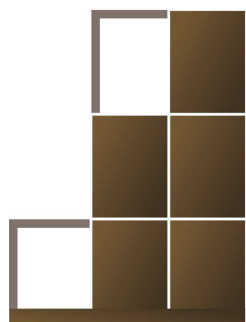
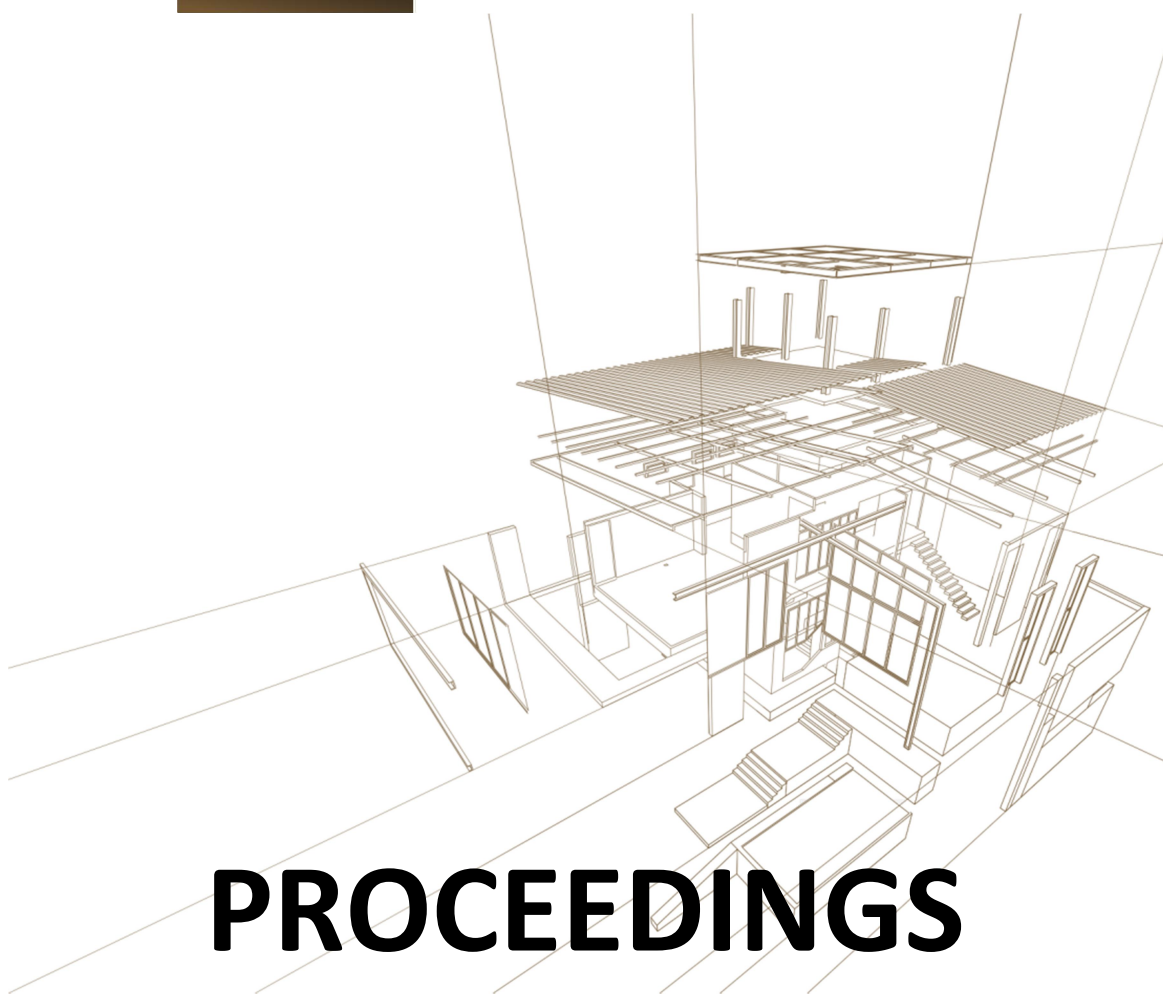


4º CONGRESO LATINOAMERICANO
DE ESTRUCTURAS DE MADERAS



CLEM

2019



PROCEEDINGS



Editoras: Laura Moya¹ y Vanesa Baño²

¹Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay

²Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República

ISBN: 978-9974-0-1823-5



Los artículos presentados reflejan la opinión de los respectivos autores.

La información contenida en este documento ha sido obtenida por las editoras de fuentes consideradas confiables. Los autores de los respectivos artículos son responsables por la rigurosidad de los datos técnicos y del texto. Las editoras o los autores no serán responsables por errores, omisiones o daños generados por el uso de esta información.

PREFACIO

La cuarta edición del Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera (CLEM 2019) se realizó en Montevideo, entre el 18 y 20 de noviembre de 2019. Fue organizado por la Facultad de Arquitectura de la Universidad ORT Uruguay, la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, el Laboratorio Tecnológico del Uruguay, y Latitud Fundación LATU.

A diez años de la primera edición, el CLEM 2019 encontró a la comunidad académica, a profesionales y técnicos del sector forestal maderero latinoamericano, muy interesados en conocer los avances en investigación y desarrollo de tecnologías innovadoras para la madera estructural. Las estructuras de madera han tenido un avance sostenido en los últimos años debido al desarrollo de nuevos productos, la disponibilidad de software de diseño y cálculo, pero fundamentalmente debido a la creciente preocupación por el cuidado del medio ambiente y por el ahorro energético durante la producción de componentes. América Latina tiene excelentes ejemplos de desarrollo forestal sostenible que permite contar con este recurso natural también en el largo plazo. Al ser el único material estructural que “se planta y crece”, la madera es considerada en los países desarrolladores de tecnologías de construcción con madera como “el material del siglo XXI”.

El CLEM 2019 contó con más de una centena de trabajos científicos y técnicos presentados por investigadores y profesionales de Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Perú, Canadá, México, España, Italia y Portugal. Siete conferencias magistrales a cargo de académicos prestigiosos, visitas técnicas y el espacio necesario para el intercambio social.

El comité organizador del CLEM 2019 expresa su sincero agradecimiento a todos los participantes por compartir sus trabajos y participar activamente en el congreso. Al comité científico por el apoyo en las actividades de revisión, al Ing. Miguel Tortoriello del Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras de la UNNOBA (LEMEJ), al Dr. Martín Sánchez Acosta editor del Boletín Forestal, a la Sociedad de Productores Forestales, y a nuestros media partners Revista Edificar y ARQA, por la fuerte difusión a nuestro congreso.

CLEM 2019 COMITÉS

Autoridades

Presidencia: Laura Moya

Vicepresidencia: Vanesa Baño

Comité organizador

Silvia Böthig (Latitud, Fundación LATU)

Javier Doldán (Laboratorio Tecnológico del Uruguay)

Vanesa Baño (Facultad de Ingeniería, Universidad de la República)

Laura Moya (Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay)

Colaboradores nacionales

Stepahny Arrejuría (Latitud, Fundación LATU)

Leandro Domenech (Facultad de Ingeniería, Universidad de la República)

Daniel Godoy (Facultad de Ingeniería, Universidad de la República)

Carolina Pérez Gomar (Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente)

Sebastián Quagliotti (Laboratorio Tecnológico del Uruguay)

Comité científico

Juan Carlos Piter, UTN- FRCU, Argentina
Alexandra Sosa Zitto, UTN- FRCU, Argentina
Pamela Fank, UTN- FRCU, Argentina
Alfredo Guillaumet, UTN- FRVT, Argentina
Miguel Tortoriello, UNNOBA, Argentina
Martín Sánchez Acosta, INTA, Argentina
Eleana Spavento, UNLP, Argentina
Carlito Calil Jr., USP, Brasil
Raquel Goncalves, UNICAMP, Brasil
Leonardo Oliveira, UFPEL, Brasil
José Tarcisio Lima, UFPA, Brasil
Adriano Wagner Balarin, UNESP-FCA, Brasil
Victor Almeida De Araujo, USP-ESALQ, Brasil
Flavio Carlos Geraldo, FG4Mad, Brasil
Peter Dechent, UDEC, Chile
Luis Valenzuela Hurtado, UDEC, Chile
Frane Zilic, UDEC, Chile
Juan José Ugarte, PUC, Chile
Pablo Guindos, PUC, Chile
Allan Cid, PUC, Chile
Sebastián Cárcamo, PUC, Chile
Paulina González, USACH, Chile
Alejandro Bozo, UCh, Chile
Ruben Ananías, UBB, Chile
Alexander Opazo, UBB, Chile
Cecilia Poblete, UBB, Chile
Gerardo Saelzer, UBB, Chile
Carlos Rozas, UBB, Chile
Marcela Ibáñez, UR- CUT, Uruguay
Diego Pasarella, UR- CUT, Uruguay
Ludmila Profumo, UR- CUR, Uruguay
Zohra Bennadji, INIA, Uruguay
Daniel Godoy, UR- FING, Uruguay
Andrés Dieste, UR- FING, Uruguay
Alina Aulet, UR- FING, Uruguay
Gonzalo Cetrangolo, UR- FING, Uruguay
Carola Romay, UR-FING, Uruguay
Juan José Fontana, UR-FADU, Uruguay
Gustavo Daniluk, UR-FAGRO, Uruguay
Lucía Pittaluga, UR- FA CCE
Bernardette Soust-Verdaguer, US, España
Luis Acuña, UVa, España
Abel Vega, CETEMAS, España
Teresa de Troya, INIA, España
Esteban Correa, U de Medellín, Colombia
Jorge Lozano Peña, UNAL, Colombia
Roberto Machuca, UACH, México
René Navarrete, UGTO, México
Federica Morandi, Unibz, Italia
Alfredo Dias, Universidade de Coimbra, Portugal
Joao Negro, Universidade de Coimbra, Portugal
Lina Nunes, LNC, Portugal
Roger Hernández, University of Laval, Canada

CONFERENCIAS MAGISTRALES

Carlito Calil Jr

La importancia de los CLEM: educación, investigación, normativa y construcción de estructuras de madera en América Latina

Universidad de São Paulo, Brasil

Mario Wagner Muñoz

Luces y sombras en la ingeniería estructural en madera en Chile

Universidad de Chile, Chile

Michael Ramage

Timber towers of tomorrow

University of Cambridge, United Kingdom

Andrés Dieste

Potencial de Uruguay en la expansión global de la construcción con madera

Centro Tecnológico CESEFOR, España

Jan-Willem van de Kuilen

Timber: a natural renewable resource for architects and engineers

Delft University of Technology, the Netherlands/Technical University of Munich,
Germany

Juan José Ugarte

Ciudades de madera para un planeta sustentable

Pontificia Universidad Católica, Chile

Eric Karsh

Timber and prefabrication: the future of construction

Equilibrium Consulting Inc, Canadá

TABLA DE CONTENIDOS

I. Genética y mejoramiento forestal orientado a la obtención de madera sólida	1
1.1- Mejoramiento genético para la obtención de madera sólida: retrospectiva de tres décadas en Uruguay	2
1.2- Desempeño de <i>Tachigali glauca</i> tul. bajo diferentes tratamientos en brechas en la Amazonia oriental.....	13
1.3- Progressão e modelagem de propiedades de árboles desde a muda até a idade de corte.....	23
1.4- Influência do espaçamento de plantio, idade e irrigação nos componentes anatómicos da madeira joven de eucalipto.....	34
II. Transformación mecánica de la madera.....	44
2.1- Madeira cruzada com isolamento- Uma proposta de um novo tipo de panel estrutural.....	45
2.2- Absorção de água e inchamento em compensados colados com adesivo natural poliuretano á base de mamona e com adesivo fenol-formaldeído.....	55
2.3- Comportamiento a flexión de vigas de madera reutilizada unida con bambú (<i>Guadua angustifolia</i> kunth).....	62
2.4- Análise numérica concernente ás espessuras das camadas de painéis OSB.....	72
2.5- Influência da proporção de poliestireno expandido na camada interna de painéis de <i>Pinus</i> sp.	82
2.6- Estudio experimental de la incidencia de la orientación de las fibras en la resistencia al cizalle a través del adhesivo en probetas de CLT	91
III. Caracterización de madera estructural.....	98
3.1- Test de modelo constitutivo ortotrópico de Hill generalizado aplicado a maderas estructurales.....	99
3.2- Determinação elasticidade de panéis lignocelulósicos –do tipo OSB- por teste não destrutivo.....	110
3.3- Estudio de la longitud de fibra, densidad, dureza y durabilidad del Sauce <i>Salix babilónica</i> x <i>Salix alba</i> 'Ragonese 131-27'	119
3.4- Identificação e caracterização da madeira <i>Manilkara</i> sp. a través de métodos destrutivos e não destrutivos.....	129
3.5- ¿Dónde está la madera estructural?: Estudio de caso en pino ponderosa.....	138
3.6- Propriedades físico-mecânicas da madeira de <i>Eucalyptus pellita</i> para elementos de construção.....	149

3.7- Relación entre las propiedades mecánicas en flexión y compresión del <i>Eucalyptus grandis</i> de Argentina	158
3.8- Caracterización físico mecánica de la madera <i>Acacia dealbata</i> del Municipio de la Calera-Cundinamarca, Colombia para su aplicación en la construcción de estructuras.....	168
3.9- Determinação do módulo de elasticidade da madeira de <i>Eucalyptus pellita</i> por método não destrutivo.....	178
3.10-Módulo elástico de pino y eucalipto uruguayo a partir de la frecuencia longitudinal de vibración.....	189
3.11- Caracterização física de compensado produzido com lâmina termorretificada e resina poliuretana.....	200
3.12- Modelos generalizados aditivos aplicados a la clasificación visual estructural de madera de pino uruguayo.....	210
3.13- Uso do ultrassom nas faces radial e tangencial da madeira de freijó (<i>Cordia goeldiana</i> Huber).....	220
3.14- Influencia del anillo de crecimiento en las propiedades físico-mecánicas del pino resinoso Argentino.....	225
3.15- Determinación del módulo de elasticidad por ultrasonido y vibraciones en vigas de pino ponderosa.....	234
3.16- Utilización del stress wave en la evaluación de la madera de freijó (<i>Cordia goeldiana</i> Huber).....	244
3.17- Seleção de madeiras da Amazônia com análise de cluster para canoas de pesca na cidade de Manaus	250
3.18- Clasificación visual de madera de <i>Pinus elliottii</i> de Uruguay y estimación del módulo de elasticidad mediante técnicas no destructivas.....	259
3.19- Evaluación de medidores de desplazamiento en la determinación de las propiedades elásticas de madera brasileña.....	270
3.20- Especificaciones para madera estructural en programas de vivienda de interés social en Uruguay.....	278
3.21- Resistencia en flexión del pino ponderosa de la Patagonia norte, Argentina.....	284
3.22- Comparación del comportamiento elasto-resistente en maderas de salicáceas de Argentina.....	294
3.23- Estado del arte de la clasificación mecánica con equipos homologados para su uso según EN 14081.....	303
3.24- Estudio del comportamiento mecánico (flexión) en vigas de madera reutilizada unidas con pino radiata.....	314

IV. Estructuras de madera.....	324
4.1- Determinación experimental del módulo de corte en su plano y la tensión de corte de rotura en paneles de CLT.....	325
4.2- Proyecto de reparación de torre de enfriamiento de madera aserrada. Desafíos estructurales considerando los criterios de la norma sísmica NCh 2369 para estructuras industriales en Chile.....	332
4.3- Método simplificado para modelación de edificios en media altura tipo marco-plataforma de madera utilizando un programa computacional de elementos finitos.....	343
4.4- Diseño de muros de corte para el sistema plataforma en madera aserrada. Propuesta para modificación norma chilena NCh 1198.....	350
4.5- Influência do efeito de corda na resistência de parafusos na direção paralela às fibras da madeira.....	360
4.6- Gridshell confeccionado com madeira de <i>Eucalyptus</i>	370
4.7- Cavilhas de madeira reforçadas com fibra de carbono e matriz epóxi.....	381
4.8- Casa con estructura de madera de marco rígido con articulaciones de clavijas de madera dura encoladas.....	389
4.9- Avaliação numérica experimental de vigas de madeira lamelada colada reforçada com fibras vectran.....	400
4.10-Avaliação numérica de peças de madeira laminada colada com reforço de fibras em situação de incêndio	413
4.11- Análise técnica comparativa entre os usos de DLT e decking em estruturas de madeira.....	420
4.12- Análisis numérico del desempeño sísmico de un edificio de marcos livianos de mediana altura.....	430
4.13- Desempeño sísmico de muros MIDPLY elaborados con madera chilena.....	441
4.14- Comportamiento a corte de compuestos madera-hormigón fabricados de madera laminada encolada uruguaya.....	450
4.15- Propuesta de modelado de estructuras complejas de madera: Museo de Arte latinoamericano en Uruguay.....	462
4.16- Desarrollo, construcción y montaje de fragmento prototipo de ciclovía elevada en madera.....	473
4.17- Medición de ductilidad en uniones tipo clavija en madera contralaminada de <i>Eucalyptus nitens</i> termo tratado.....	484

4.18- Análises experimentais de estrutura reticulada MLC glulam vinculada com ligações semirrígidas.....	495
4.19- Estabilidade em peças de madeira: comparação de critérios normativos.....	505
4.20- Evaluación del comportamiento de uniones dentadas encoladas, para la fabricación de vigas laminadas con la madera tornillo (<i>Cedrelinga cateniformis</i> D. Ducke).....	516
4.21- Comparativo da rigidez e ruptura de dois painéis estruturais de madeira maciça lamelar unida por cavilhas.....	526
4.22- Simulación numérica de elementos estructurales de madera contralaminada.....	534
4.23- Edificio de madera contralaminada aislado sismicamente.....	544
4.24- Ensayos cíclicos de muros de madera sometidos a carga vertical y momento flector.....	554
4.25- Modelado numérico de la conexión por medio de entalles en las placas de CLT y hormigón.....	565
4.26- Análisis del comportamiento cíclico de muros de CLT fabricados con pino radiata chileno.....	575
4.27- Interacción acústica/estructura en los edificios de madera.....	586
4.28- Tensões de flexão em vigas de madeira laminada colada armada avaliadas por modelagem computacional.....	597
4.29- ¿Qué conexiones son más influyentes en los desplazamientos sísmicos de edificios de madera?.....	607
4.30- Estimación de propiedades elásticas ortotrópicas de paneles CLT con técnicas no destructivas.....	618
4.31- Factores de diseño sísmico para edificios de madera marco-plataforma.....	627
4.32- Modelación no-lineal de muros marco-plataforma para edificios de madera en mediana altura.....	638
4.33- Respuesta lateral del sistema estructural marco plataforma con incorporación de dispositivos de disipación de energía combinados con mecanismos amplificadores de desplazamiento.....	650
4.34- Conexión con pinching reducido para muros de corte de CLT.....	660
4.35- Comportamiento cíclico de conexiones híbridas de LSL, hormigón y acero con CLT.....	671
V. Durabilidad y protección.....	683
5.1- Protección contra el deterioro biótico y abiótico de madera mediante el uso de sistemas silano/nanopartículas.....	684

5.2- Vivienda segura, cambios normativos que transforman la vida.....	695
5.3- Proyecto de reparación de la estructura de madera del puente de la barca en Pontevedra, España. Aspectos claves en el diseño para la durabilidad de la madera en usos exteriores.	707
5.4- Durabilidad de una casa construida con madera de <i>Eucalyptus globulus</i> en España tras 17 años de exposición.....	712
5.5- Resistencia al fuego en elementos muro y losa de CLT fabricados con Pino radiata en Chile.....	718
5.6- Estudio de la resistencia al fuego en maderas de pino y eucalipto tratadas con borato de zinc.....	727
VI. Análisis de ciclo de vida, eficiencia energética y viviendas pasivas.....	735
6.1- Políticas para la eficiencia energética de viviendas y sus efectos en la construcción en madera.....	736
6.2- Caracterización del comportamiento higromórfico de un doble capa en madera bajo características climáticas de la ciudad de Bogotá.....	747
6.3- Comportamiento de vivienda bio-pasiva tras ocho años de exposición en clima oceánico.....	758
6.4- Análisis numérico del desempeño anual de energía de los edificios de madera en Chile.....	768
6.5- Soluciones para aislación térmica y acústica de un edificio de vivienda social en CLT.....	779
6.6- Evaluación de la replicabilidad y competitividad de una vivienda industrializada en madera en Chile.....	789
6.7- Estudio del comportamiento térmico de distintas envolventes opacas empleadas en Uruguay.....	799
6.8- La Casa Uruguay: El uso de la madera en arquitectura bioclimática.....	810
VII. Bioeconomía en base a productos de madera.....	836
7.1- Abordajes de la bioeconomía en Uruguay y sus relaciones con los productos de madera.....	817
7.2- Encadenamiento productivo para la asociatividad de aserraderos Pymes, basado en diseño de productos.....	828
7.3- Influencia de la densidad en la briqueta de especies comerciales.....	840

VIII. Arquitectura en madera e industrialización de la construcción.....845

8.1- Estructuras de madera de mediana altura como mejora de la productividad en la construcción.....	846
8.2- Viabilidad técnico-económica de viviendas de interés social con paneles CLT de pino uruguayo.....	857
8.3- MiniMOD: Desenvolvimento de projeto em cross laminated timber no Brasil.....	862
8.4- Cubiertas laminares con paneles derivados de la madera, modeladas y fabricadas con procesos CAD-CAM.....	875
8.5- Diseño y validación preliminar de sistema estructural para viviendas basado en paneles de madera tensada XILO-TENS.....	886
8.6- Módulo habitacional transportable de usos múltiples construido en madera.....	897
8.7- Uniones dinámicas para sistemas de fácil montaje con elementos tubulares, bóvedas y cúpulas.....	906
8.8- Aplicación del diseño paramétrico en el desarrollo de una estructura en bambú: Galería de Passifloras.....	916
8.9- La madera laminada apernada. Cubierta de la basílica de Pátzcuaro, Michoacán.....	926
8.10- Factibilidad técnico-económica de edificio de mediana altura estructurado en CLT en zonas de alta sismicidad.....	937
8.11- Nueva sede del Laboratorio de Productos Forestales.....	948
8.12- Vivienda social sustentable con estructura liviana de madera aplicando materiales y elementos de innovación.....	958
8.13- Proyecto de construcción y rehabilitación del Museo del yacimiento arqueológico Zonzamas.....	968
8.14- Estudo de caso da construção civil em cross laminated timber no Brasil.....	978
8.15- Avances en el uso de nuevas tecnologías de construcción en madera en Brasil.....	987
8.16- Sistemas estructurales aplicados en la construcción de edificaciones de medianas luces en madera rolliza.....	998
8.17- Casa de balneario en Solanas de estructura de poste y viga de Eucalyptus con baja energía incorporada en su producción.....	1007
8.18- Un producto innovador para viviendas: losetas nervadas prefabricadas en madera..	1017

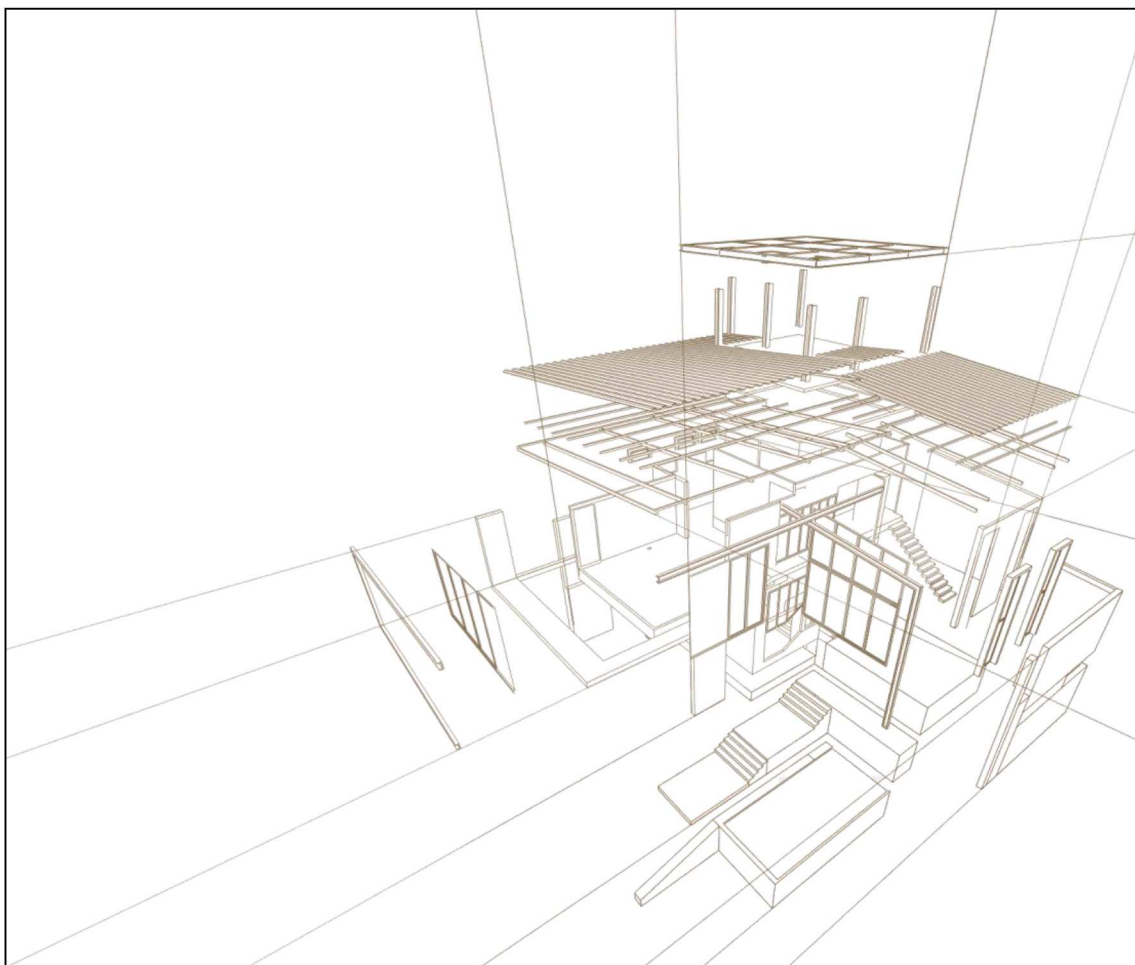
IX. Inspección y restauración de estructuras de madera.....1030

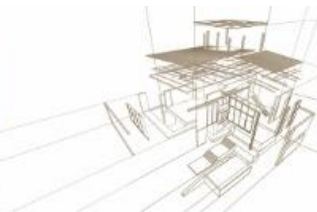
9.1- Projeto e execução de reabilitação de asnas de madeira num pavilhão polivalente....	1031
--	------

9.2- Quatorze anos de uso das pontes de madeira do Campus II da EESC/USP: Inspeções periódicas NDT.....	1043
9.3- Estudio del estado de biodeterioro de elementos patrimoniales de madera mediante microscopía óptica.....	1054
9.4- Estimación de la pérdida de rigidez lateral de muros CLT de 2 pisos con técnicas no destructivas.....	1064
9.5- Evaluación comparada de métodos de ensayo destructivos sobre madera de un edificio de rehabilitación.....	1073
X. Educación.....	1084
10.1- Design of timber structures in civil engineering education.....	1085
10.2- O ensino do sistema construtivo woodframe auxiliado por software BIM.....	1099
10.3 - Refugio en madera construido por estudiantes y docentes de FADU y vecinos del Parque Punta Yeguas (Póster).....	1104



I. Genética y mejoramiento forestal orientado a la obtención de madera sólida





MEJORAMIENTO GENÉTICO PARA LA OBTENCIÓN DE MADERA SÓLIDA: RETROSPECTIVA DE TRES DÉCADAS EN URUGUAY

FOREST TREE BREEDING AS APPLIED TO SOLID WOOD OBTENTION: A THREE DECADES RETROSPECTIVE IN URUGUAY

Bennadji, Zohra ^{1*}

¹Dra. Ing. Agr. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Programa Nacional de Investigación en Producción Forestal. Tacuarembó, Uruguay

* Contacto: zbennadji@inia.org.uy

Resumen

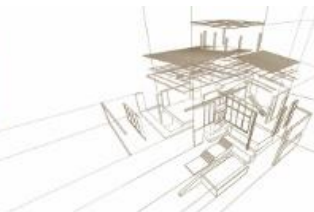
En este trabajo se presenta una retrospectiva de tres décadas de mejoramiento genético forestal en Uruguay, con énfasis en la obtención de madera sólida de especies de rápido crecimiento de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*. El análisis se centra en los avances alcanzados por el sector público, tomando la década de los 90 como línea de base de tiempo. Esta línea de base temporal corresponde: (i) al inicio del boom de la forestación registrado en el sector forestal, a raíz de la promulgación de la Ley Forestal 15.939 de 1987 y (ii) al inicio de los programas de mejoramiento genético forestal con mayor envergadura y perduración a nivel nacional. Estos programas de mejoramiento genético se analizan principalmente desde el enfoque de sus estrategias, ponderando la incorporación de criterios de selección por características de la madera, en general, y por madera sólida, en particular. En este último caso, el ritmo de su incorporación se mantuvo en las sucesivas generaciones de mejora, con ganancias genéticas reducidas pero sostenidas en el tiempo, tanto para las especies de *Eucalyptus* como para las de *Pinus*. Los desafíos planteados actualmente por el cambio climático, la intensificación del uso de la tierra, las limitantes de acceso a los recursos genéticos y los avances en biotecnología y genómica requieren nuevas planificaciones de los programas de mejoramiento genético con ponderaciones novedosas de los criterios de selección para la obtención de madera sólida.

Palabras-clave: mejoramiento genético forestal, criterios de selección, madera sólida, Uruguay

Abstract

In this work, a retrospective of three decades of forest tree breeding in Uruguay is presented, emphasizing the solid wood obtention from *Eucalyptus* and *Pinus* fast growing species. The analysis will focus on the advances reached by the public sector, taking the 90's decade as a time baseline. This time baseline is associated to: (i) the forestry boom registered in the sector, due to the launch of Forestry Law 15.939 of 1987 and (ii) the beginning of the most systematic and lasting forest tree breeding programs at national level. These tree breeding programs are basically analyzed through their strategies, weighting the incorporation of the wood characteristics criteria of selection in general and for solid wood, in particular. In this last case, the incorporation rhythm remained relatively stable through the successive breeding generations with smooth but sustained genetic gains, for *Eucalyptus* as well as for *Pinus* species. The challenges posed presently by climate change, the land use intensification, the limitations to genetic resources access and the biotechnology and genomics advances require new planning of the breeding programs with novel weightings of the selection criteria for the solid wood obtention.

Keywords: forest tree breeding, criteria of selection, solid wood, Uruguay



1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta una retrospectiva de tres décadas de mejoramiento genético forestal en Uruguay, con énfasis en la obtención de madera sólida de especies de rápido crecimiento de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*. El análisis se centra en los avances alcanzados por el sector público, principalmente en el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA).

Se toma como línea de base temporal la década de los 90 por: (i) el despegue de las plantaciones registrado en el sector forestal, a raíz de la aplicación de los decretos de la Ley Forestal 15.939 de 1987 (DGF, MGAP) y, (ii) el inicio de los programas de mejoramiento genético forestal con mayor envergadura y perduración a nivel nacional, tanto el sector público como en el privado. Este período corresponde también, institucionalmente, a la creación del área de investigación en producción forestal del INIA en 1990 y, al comienzo de sus líneas de trabajo en mejoramiento genético de *Eucalyptus* y *Pinus*.

Desde el punto de vista metodológico, las especies forestales de rápido crecimiento se caracterizan por sus tasas de crecimiento altas y sus rotaciones cortas, comparadas a las registradas tradicionalmente en zonas templadas. Estas especies se asocian habitualmente a especies exóticas de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*, plantadas mayoritariamente en países del hemisferio sur y sometidas a paquetes silvícolas comparativamente intensos. Algunas especies de estos géneros se introdujeron en Uruguay desde el siglo XIX y su adaptación fue comprobada empíricamente en diferentes zonas agroecológicas del país, habilitando su clasificación como especies de prioridad forestal en la Ley 15.939.

Por otra parte, se entiende por programa de mejoramiento completo de una especie forestal un conjunto de acciones programáticas y operativas planificadas en el espacio y en el tiempo que desemboca en la liberación de un material de reproducción mejorado bajo la forma de semilla, de material vegetativo o de los dos (Zobel and Talbert, 1984). Estos programas de mejoramiento genético se analizan principalmente en este trabajo desde el enfoque de sus estrategias, ponderando la incorporación de criterios de selección por características de la madera, en general, y por madera sólida, en particular.

Desde el punto de vista espacial, las actividades desarrolladas por el INIA en esta temática tuvieron una cobertura nacional que sigue manteniéndose hasta la fecha. Esta cobertura espacial responde, en primer lugar, a la propia estructura geográfica de la institución y, en segundo lugar, a la caracterización y regionalización de los suelos identificados jurídica y productivamente como de prioridad forestal por la ley forestal mencionada anteriormente.

2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para la elaboración de este trabajo consistió en una recopilación y análisis de los resultados obtenidos en el transcurso de la ejecución de los proyectos quinquenales de investigación desde 1992 a la fecha en el INIA, tomando como principal fuente de información su Catálogo de Información Agropecuario disponible on-line (AINFO, <http://www.ainfo.inia.uy/consulta/?initQuery=t>).



A los proyectos con financiación interna del INIA, se sumaron los financiados por fuentes externas a través de la cooperación técnica con la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) en 1993-1998 y 2000-2002, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 1995-2000) y Programa de Desarrollo Tecnológico (PDT, 2000-2005) del Ministerio de Educación y Cultura (MEC). Esto implicó, en la práctica, la revisión de 50 documentos internos, 60 publicaciones y 50 trabajos presentados en revistas arbitradas, eventos nacionales e internacionales.

Tomando en cuenta la variedad y el volumen de información generada en estas tres décadas, los avances se sintetizaron por: (i) grupo de especies, (ii) estrategias aplicadas con énfasis en características de la madera y, (iii) descripción resumida de los principales resultados obtenidos. Dado la amplitud del período considerado, los resultados y su discusión, tendrán un grado relativamente alto de simplificación y generalización. La contextualización de estos avances se realiza en la discusión, a través del abordaje de los desafíos planteados actualmente por el cambio climático, la intensificación del uso de la tierra, las limitantes de acceso a los recursos genéticos y los avances en biotecnología y genómica y sus consecuencias sobre la necesidad de nuevos diseños de los programas de mejoramiento genético.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Especies estudiadas

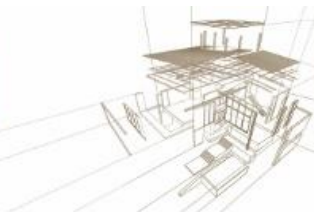
Se estudiaron 15 especies de *Eucalyptus* y 3 de *Pinus*. Seis especies de *Eucalyptus* (*E.grandis*, *E. globulus*, *E. dunnii*, *E.maidenni*, *E.saligna* y *E. tereticornis*) contaron con programa de mejoramiento genético entero mientras que para *Pinus* este número se reduce a una (*P.taeda*). En la Tabla 1, se presenta una síntesis del pool de estos recursos genéticos forestales

Tabla 1: Pool genético de los programas de mejoramiento genético forestal de *Eucalyptus* y *Pinus* de INIA

Género/Especies	Fecha de inicio	Accesiones (externas y locales)
<i>Eucalyptus</i>	1991	2000
<i>Pinus</i>	1991	262
Total		2262

3.2. Estrategias implementadas

Las estrategias implementadas obedecieron a una serie de principios rectores dictados por consideraciones científicas y económicas. Desde el punto de vista científico, se aplicó una metodología clásica relativamente sencilla, de uso bastante generalizado a nivel internacional, basada en la evaluación y selección recurrente en poblaciones de mejora y en poblaciones de producción de polinización abierta (Eldridge,1994). En la Figura 1, se presenta un esquema simplificado de las etapas de los programas de



mejoramiento genético forestal de INIA. En los últimos años, se incursionó en la obtención de híbridos y en la aplicación de selección genómica, ambas técnicas orientadas a la búsqueda de resistencia a enfermedades. Existen actualmente en los programas de mejoramiento de INIA especies de *Eucalyptus* (*E. grandis* y *E. globulus*) con dos ciclos de mejora ya cumplidos.



Figura 1: Esquema de las etapas de los programas de mejoramiento genético forestal de INIA

Las poblaciones de mejora son constituidas por pruebas de introducción y evaluación de especies, pruebas de orígenes y procedencias, pruebas de progenies, tests clonales y poblaciones genéticas base. Estas últimas son posteriormente manejadas como huertos semilleros. Estas poblaciones se establecieron a partir de fuentes de semillas obtenidas por dos vías: (i) selección masal de árboles plus en plantaciones locales y, (ii) introducciones desde el país de origen de fuentes de semilla de *Eucalyptus* (Australia) y desde el país de origen (EE. UU) más otros países con programas de mejoramiento avanzados (Sud África) en el caso de *Pinus*, apuntando a la constitución de una base genética la más amplia posible. Estas poblaciones se implantaron en por los menos tres sitios ecológicamente contrastantes con la participación y el apoyo logístico de empresas y productores. Los huertos semilleros, huertos y bancos clonales constituyendo las poblaciones genética base se instalaron por razones estratégicas en predios del INIA.

En las Figuras 2 y 3, se presentan las principales etapas de los programas de mejoramiento genético de *Eucalyptus* y *Pinus*, asumiendo el despliegue de las actividades sobre un ciclo de mejora. En la Tabla 2, se resumen los principales tipos de selección aplicados a los distintos materiales de reproducción, los tipos de ensayos y los cruzamientos aplicados.

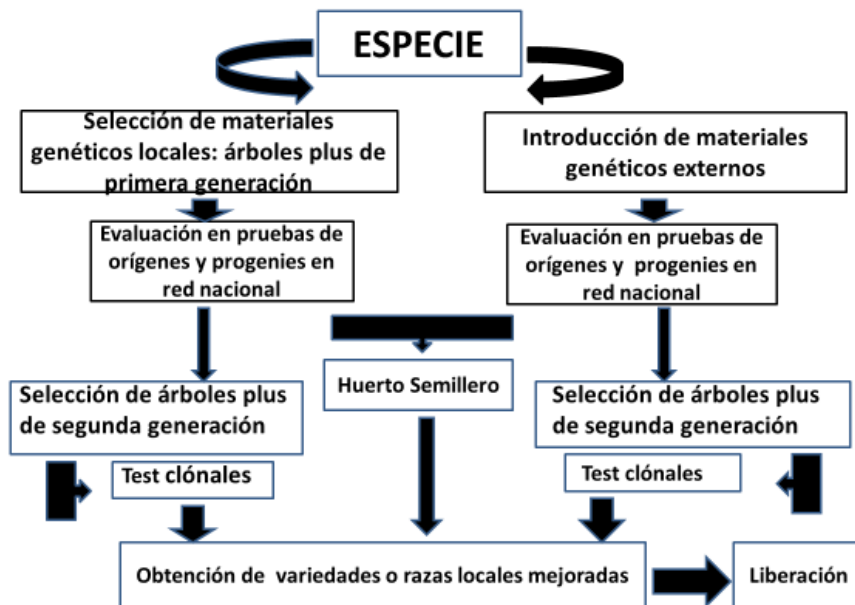
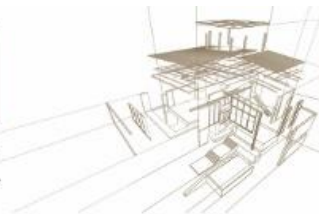


Figura 2: Esquema de las principales etapas del programa de mejoramiento genético de Eucalyptus (Primera generación). Fuente: Elaboración propia.

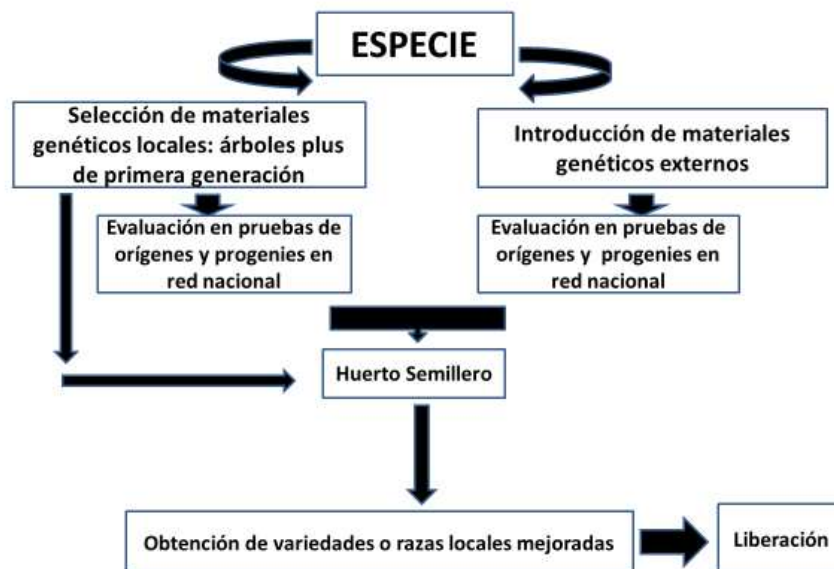


Figura 3: Esquema de las principales etapas del mejoramiento genético de Pinus.

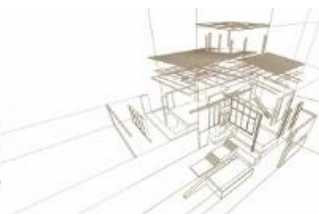


Tabla 2: Métodos de selección aplicados en los programas de mejoramiento genético de *Eucalyptus* y *Pinus* del INIA. Fuente: Elaboración propia.

Método de selección	Material genético de base	Tipo de ensayo	Cruzamientos
Masal	Rodales	Plantaciones comerciales	No
Recurrente	Árboles candidatos Arboles plus	Orígenes y procedencias Procedencias y progenies	Polinización abiertos
Individuos dentro de familias de medio-hermanos	Árboles candidatos Arboles plus	Progenies	Polinización abierta
Familias de medio-hermanos	Árboles candidatos Arboles plus	Progenies	Polinización abierta
Clonal	Clones	Test clonales <i>in vitro</i> y <i>in situ</i>	No
Hibridación	Pruebas de progenies y poblaciones genéticas base	Progenies y test clonales <i>in vitro</i> y <i>in situ</i>	Polinización controlada

Desde el punto de vista económico, se apuntó al balance entre: (i) la respuesta a un amplio abanico de usuarios con diferentes intereses (madera para pulpa, madera para aserrado y energía), (ii) la cobertura de diferentes zonas ecológicas del país y, (iii) el uso eficiente de los recursos humanos y financieros disponibles. Esto significó la búsqueda de requerimientos básicos comunes de adaptación al sitio, de buena productividad y la consideración en primer lugar de criterios de selección por sobrevivencia, crecimiento, forma y sanidad. La red nacional de ensayos instalada en el transcurso de estas tres décadas incluye 106 ensayos de *Eucalyptus* y 22 ensayos de *Pinus*, con cobertura de las zonas de prioridad forestal definidas en la Ley 15.939 (Zonas 2, 7, 8 y 9).

Según la especie y el fin de uso priorizado, el ángulo de inserción de ramas, el tamaño de copa y las características de la madera fueron otros criterios incorporados posteriormente en diferentes etapas del programa de mejoramiento genético. La densidad de la madera fue central en la movilización de los esfuerzos y recursos con la mejora de las técnicas de su muestreo y medición. Estos aspectos se tratan con mayor detalle en el punto 3.3.



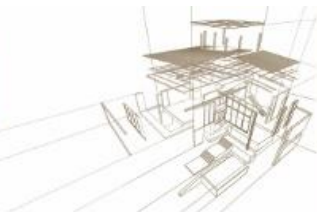
3.3. Criterios de selección

Para asegurar una base común de mejoramiento genético compartida y aceptable para diferentes fines de uso (madera para aserrado, madera para pulpa y madera para energía), el crecimiento (medido a través del DAP, altura e incremento medio anual) y la rectitud del fuste fueron los criterios de selección priorizados para el conjunto de las especies y en los diferentes ciclos de generación. Esta regla se aplicó tanto en el ranking entre individuos como en el ranking entre familias. A estos dos criterios, se sumó la sanidad ponderada fenotípicamente en las poblaciones de primera generación y cuantitativamente en las de segunda generación y criterios adicionales de ángulo de inserción de ramas, grosor de ramas, forma de copa y características de la madera.

La densidad fue la principal característica de la madera contemplada; se aplicó inicialmente como criterio de ranking para el manejo selectivo de los huertos semilleros de primera generación. Su uso se generalizó posteriormente en las poblaciones de mejora, al igual que la incorporación de otras características más específicas (contenido de lignina, rendimiento en pulpa, longitud de fibra, rajado, módulo de elasticidad etc.). El análisis de características de madera para la obtención de madera sólida se realizó sobre árboles de segunda generación de *E. grandis*, en el marco de un convenio de trabajo conjunto INIA-LATU-JICA. La tolerancia a estreses abióticos y bióticos prevaleció en los escenarios de los últimos años. En la Tabla 3, se resumen las diferentes etapas transitadas.

Tabla 3: Avances cronológicos de incorporación de criterios de selección por características de la madera y obtención de productos madereros.

Año	Etapas cronológicas del PMGF*	Grado de obtención de PM**
1990-1995	Introducción de especies, orígenes y procedencias Establecimiento de las poblaciones de mejora de primera generación de las principales especies de <i>Eucalyptus</i> y <i>Pinus</i> Establecimiento de las poblaciones de producción de primera generación	Sobrevivencia al año de implantación, crecimiento en altura
1995-2000	Manejo de las poblaciones de mejora Primera liberación de variedad mejorada en <i>Eucalyptus</i> Programa de certificación de semilla forestal (INASE)	Crecimiento en altura, Dap, rectitud del tronco, ángulo de inserción de las ramas, densidad con taladro Pressler
2000-2005	Establecimiento de las poblaciones de mejora de segunda generación de <i>Eucalyptus</i> Liberación de variedades mejoradas de segunda generación de <i>Eucalyptus</i> Liberación de bloques fundación de líneas de clone de <i>E. grandis</i>	Ídem, Pilodyn, extensómetro.



Establecimiento del primer huerto semillero clonal de *Pinus taeda*

2005-2010 Liberación de variedades de segunda generación de *Eucalyptus* Pilodyn, extensómetro, NIR

Instalación de poblaciones de mejora de primera generación para nuevas especies priorizadas de *Eucalyptus*

2010-2015 Ídem más hibridación Ídem

*PMGF: Programa de mejoramiento Genético Forestal; **PM: Productos Madereros. Fuente: Elaboración propia.

La capacidad de enraizamiento por encima de 70% fue utilizada como criterio de selección excluyente en el ranking de los clones obtenidos a partir de los árboles plus de primera y segunda generación.

3.4. Principales resultados

En estas tres décadas se lograron cuatro grandes categorías de resultados: (i) información sobre comportamiento de especies, orígenes y procedencias, (ii) conocimiento sobre los parámetros genéticos de los materiales genéticos de base, (iii) desarrollo de protocolos y herramientas de apoyo y (iv) obtención de productos tecnológicos. Todas tienen relación directa o indirecta con la obtención de productos madereros.

Con relación a la selección por características de la madera, el ritmo de su incorporación se mantuvo en las sucesivas generaciones de mejora, con ganancias genéticas reducidas pero sostenidas en el tiempo, tanto para las especies de *Eucalyptus* como para las de *Pinus*. Las ganancias obtenidas se encuentran dentro de los rangos reportados en bibliografía.

3.4.1. Información sobre comportamiento de especies, orígenes y procedencias

Los resultados sobre comportamiento de especies, orígenes y procedencias permitieron la comprobación de patrones de comportamiento por zonas ecológicas para las especies más plantadas en el país (*E. grandis*, *E. globulus* y *P. taeda*) y aportado elementos de información nuevos para otras (*E. benthamii*, *E. camaldulensis*, *E. dunnii*, *E. maidenii*, *E. saligna* y *E. tereticornis*).

Con relación al comportamiento de orígenes y procedencias, diferentes estudios basados en características de sobrevivencias, de volumen, de diámetro a la altura de pecho y de tolerancia a factores abióticos y bióticos con sus respectivas correlaciones permitieron confirmar la regla básica de la importancia de la elección de una buena fuente de semilla y la necesidad de comprobar previamente todo nuevo material de reproducción introducido en el país antes de su utilización a gran escala. Esta regla se reportó desde décadas en múltiples publicaciones internacionales para otros países.

Se identificaron las mejores fuentes de semillas australianas para las principales especies plantadas de *Eucalyptus* y para *Pinus taeda* (EE. UU y Sud África). Esta información ha perdido en cierta medida su relevancia en el caso de *Eucalyptus* frente al avance en los programas nacionales de mejoramiento genético y a la disponibilidad hoy en día de materiales locales mejorados.

3.4.2. Parámetros genéticos

Heredabilidad

La heredabilidad se evaluó para diferentes especies, diferentes caracteres y para diferentes edades. En concordancia con la literatura disponible, en el caso de *Eucalyptus*, se registraron valores bajos a moderados entre 0 y 1, que permitieron, hechas las ponderaciones relativas a cada ensayo en particular, predecir las probabilidades de éxito de las actividades de selección llevadas a cabo. Cabe destacar los avances logrados en especies de *Eucalyptus* comparados a los registrados en el caso de *Pinus*. Se comprobó también en condiciones locales que este parámetro no es fijo y depende de: (i) la amplitud de la base genética de las poblaciones de mejora, (ii) las condiciones ambientales, y (iii) la edad de los materiales genéticos considerados.

Correlaciones entre caracteres

Las correlaciones entre caracteres se establecieron para diferentes especies, para diferentes edades y para ensayos instalados en por las menos dos zonas ecológicas. Los resultados obtenidos se enmarcaron dentro de lo esperable, de acuerdo a la bibliografía regional e internacional, detectándose correlaciones tanto positivas (altura/DaP) como negativa (velocidad de crecimiento/densidad de madera).

Correlaciones juvenil-adulto

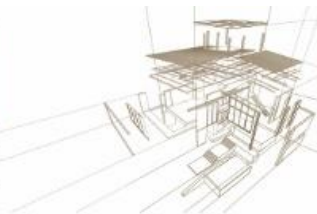
Estas correlaciones se establecieron para algunas especies de *Eucalyptus* y para características de crecimiento y sanidad. Se han también enmarcado dentro de lo esperable (correlaciones positivas para crecimiento en altura y DaP por ejemplo).

Correlaciones genotipo-ambiente

Estas correlaciones se establecieron para diferentes especies, resultando por lo general significativamente a muy significativamente positivas. Estos datos son importantes al reflejar características propias de los ambientes locales y al implicar tomas de decisión específicas sobre estrategias de mejoramiento genético. Han servido de insumo para las actividades de mejoramiento genético en el transcurso de las tres décadas pasadas y tienen todavía vigencia para el diseño de estrategias avanzadas para los próximos años. La información recaba y las bases de datos generadas cobran un especial relieve de cara al cambio climático, la intensificación del uso de la tierra y las limitantes de acceso a los recursos genéticos (White et al., 2014)

Ganancias genéticas

Los niveles de ganancia genética para la productividad se han situado en promedio en los siguientes rangos: (i) 20 a 30% para fuentes de semillas identificadas por procedencia, (ii) 5 a 15% para huertos semilleros y (iii) 10 a 20% para variedades clonales. Existen todavía algunas interrogantes sobre estas ganancias por el grado de



precisión relativo en su evaluación, debido a la edad de los ensayos en las poblaciones de mejora y a la falta, en primer lugar, de umbrales de producción claramente establecidos por especie, zona y paquete de manejo y, en segundo lugar, de umbrales definidos por el sector industrial para diferentes características de la madera (Hillis & Brown, 1984). Tampoco existe información suficiente de respaldo para la ponderación de estos umbrales desde el punto de vista económico. Sin embargo, estas ganancias son relativamente altas y, al ser acumulativas (en la medida en que el programa de mejoramiento genético es desarrollado sobre un ciclo completo y en que los materiales de reproducción genética son seleccionados sucesivamente a partir de la fase precedente), representan valores del orden de 35 a 65%.

Según algunos estudios económicos, una simple ganancia del orden de 5% en producción rentabilizaría en promedio un programa de mejoramiento genético complejo y costoso, por lo cual esta actividad es eminentemente rentable. Exige sin embargo equipos estables, bien capacitadas y trabajando de acuerdo a planes de largo plazo bien madurados.

Ciclos por generación

Ciclos generacionales de 5 años se han comprobado como viables para tres especies de *Eucalyptus* (*E. grandis*, *E. globulus* y *E. maidenii*). Esta característica de las poblaciones de producción es reforzada por la observación de floración temprana en árboles de 1 a 3 años y por la viabilidad de los lotes de semillas cosechados. Existen a su vez varias oportunidades a explorar desde el campo de la genómica para la selección temprana (Henry & Kole, 2014).

3.4.3. Liberación de variedades

El programa cuenta actualmente con un total de cinco variedades de polinización abierta de *Eucalyptus*, de veinte líneas de clones de *E. grandis* y del primer huerto semillero clonal de *P. taeda* instalado en el país. Tomando como referencia la cantidad de semilla mejorada de *Eucalyptus* comercializada, se estima que la superficie teóricamente plantada con material mejorado del INIA supera, hoy en día, las 80.000 ha.

4. CONCLUSIONES

El uso de materiales de reproducción forestal en el Uruguay evolucionó en las tres últimas décadas desde material genético prácticamente sin identificación de origen y con estrecha base genética hasta materiales con grados progresivos de ganancias genética tanto por vía sexual(semillas) como por vía vegetativa (clones). Los mayores avances tecnológicos se registraron en especies del género *Eucalyptus*, con la generalización de la forestación clonal a nivel del país, siendo los avances en *Pinus* relativamente modestos y sin logro destacable en propagación vegetativa.

Los programas de mejoramiento genético del INIA fueron protagonistas de estos cambios tecnológicos, a la par de otras instituciones públicas y privadas. Sus aportes consistieron en: (i) información sobre comportamiento de especies, origen y procedencias de interés, (ii) generación de conocimiento sobre parámetros genéticos de los materiales de base, (iii) desarrollo de protocolos y herramientas de apoyo para el



mejoramiento genético y, (iv) obtención de productos tecnológicos (variedades de semillas mejoradas y clones).

El desafío del mejoramiento genético para los próximos años consiste en dar respuestas adecuadas y en plazos razonables a una demanda cada vez más compleja. Además de alta productividad y calidad de madera, habrá que sumar la necesidad de adaptación de las plantaciones a cambios ambientales más frecuentes y de gran intensidad. Esto implica el manejo de listado de criterios de selección cada vez más extensos y ciclos de generación de mejora cada vez más reducidos para el desarrollo de variedades forestales polivalentes, adaptables a ambientes variados y cambiantes y, dotadas de una diversificación genética suficiente.

Estos escenarios plantean la importancia de la modelación para una mejor comprensión de los factores ambientales y la necesidad de incorporación de estudios económicos más afinados para la priorización de los criterios de selección. En un marco de generalización y extensión de los programas de mejoramiento genético, surge también la importancia de un manejo y conservación sostenible a mediano y largo plazo de los recursos genéticos forestales, incluidos los de las especies sin interés económico bien definido en la actualidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

El material producido por INIA está disponible en su casi totalidad on-line en el Catálogo de Información Agropecuaria

AINFO: <http://www.ainfo.inia.uy/consulta/?initQuery=t>). El material producido por INIA y consultado para este trabajo está disponible en su casi totalidad on-line en el Catálogo de Información Agropecuaria

Eldridge, K.; Davidson, J.; Harwood, C.; Wyk, G. van. 1994. Eucalypt domestication and breeding. Clarendon Press. Oxford, OK. 308 p.

Henry, R. & Kole, C.; Ed. 2014. Genetics, Genomics and breeding of Eucalypts. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, London, New York. 188 p.

Hillis, W.E. & Brown, A.G.; Ed. 1984 Eucalypts for wood production. CSIRO, Academic Press. 434 p.

MGAP. DGF. Ley Forestal 15.939. <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/descarga/ley-15939-2812087>

Zobel, B. & Talbert, J. 1984. Applied forest tree improvement. Wiley and Sons, New York. 505 p.

White, T.; Davis, J.; Gezan, S.; Hulcr, J.; Lokela, E.; Kirst, M.; Martin, T.A.; Peter, G.; Powel, G. & Smith, J. 2014. Breeding for value in a changing world: past achievements and future prospects. *New Forests* (2014) 45:301-309



DESEMPEÑO DE *TACHIGALI GLAUCA* TUL. BAJO DIFERENTES TRATAMIENTOS EN BRECHAS EN LA AMAZONIA ORIENTAL

PERFORMANCE OF *TACHIGALI GLAUCA* TUL. UNDER DIFFERENT TREATMENTS IN EASTERN AMAZON GAPS

Soares1, Amanda A.1 ^{(1)*}; Neves2, Raphael L. P.2 ⁽²⁾; Schwartz2, Gustavo2 ⁽²⁾, Emmert3, Fabiano3 ⁽³⁾; Nascimento3, Rodrigo G. M.3 ⁽³⁾

⁽¹⁾ Académica de Ing. Forestal. Universidad Federal Rural da Amazonia. Belém, Brasil

⁽²⁾ Dr. Investigador, Embrapa Amazonia Oriental. Belém, Brasil

⁽³⁾ Dr. Profesor. Universidad Federal Rural da Amazonia. Laboratorio de Mensuración y Manejo de Recursos Forestales. Belém, Brasil

* Contacto: amandaasoarez@gmail.com

Resumen

El desempeño de la especie comercial *Tachigali glauca* Tul. en el registro de las brechas en tres tratamientos diferentes se analizó en un experimento llevado a cabo en un bosque denso y ombrófilo cosechado en la Amazonía oriental. El estudio comparó durante 9 años, en 28 brechas, las tasas de mortalidad, el incremento periódico anual (IPA) en diámetros y la área basal en los siguientes tratamientos: (i) control (CT) sin intervenciones silvícolas sobre individuos naturalmente establecidos en la brecha; (ii) la conducción de la regeneración natural (RN), pero sometido a tratamientos silvícolas como la limpieza; (iii) la plantación de enriquecimiento (PL) de mudas y plántulas. Los tres tratamientos contaron inicialmente con 9; 11 y 8 brechas y 35; 17 y 129 individuos, respectivamente. Respecto a la tasa de mortalidad, CT presentó total de 1,1% año-1, RN 0,55% año-1 y PL 0,85% año-1. Sin embargo, para el IPA, CT mostró 0.268 cm año-1, RN 0.544 cm año-1 y PL 0.985 cm año-1. Y para el área basal, CT obtuvo 0,04 m²ha-1, RN 0,11 m²ha-1 y PL 1,78 m²ha-1. La principal conclusión es que *T.glauca*, cuando se somete al tratamiento de RN, presenta una buena respuesta creciente. Aunque su área basal fue menor, su tasa de mortalidad fue baja y PAI alto y en comparación con los otros tratamientos. Estos resultados ayudan a hacer de *T.glauca* una especie más atractiva para la industria maderera y las actividades de reforestación/restauración.

Palabras-clave: especies tropicales, producción de madera, crecimiento forestal.

Abstract

The performance of the timber species *Tachigali glauca* Tul. in logging gaps under three different treatments was analyzed in an experiment carried out in a harvested ombrophilous dense forest in the Eastern Amazon. The study compared for 9 years, in 28 gaps, mortality rates, periodic annual increment (PAI) in diameter and basal area of *T. glauca* in the following three treatments: (i) Standard Reduced Impact Logging (SRIL) with no silvicultural interventions over naturally established individuals in the gap; (ii) tending of the naturally established regeneration (TNER), but subjected to silvicultural treatments such as cleaning; and (iii) and enrichment planting (EP) of seedlings. The three treatments counted initially with 9; 11; and 8 logging gaps and 35; 17; and 129 individuals, respectively. Regarding the mortality rate, SRIL presented a total of 1.1% year-1, TNER with 0.55% year-1, and EP 0.85 % year-1. However, in terms of PAI, SRIL showed an increment of 0.268 cm year-1, TNER with 0.544 cm year-1, and EP 0.985cm year-1. For the basal area, SRIL had 0.04 m² ha-1, TNER 0.11 m² ha-1, and EP 1.78 m² ha-1. The main conclusion is that *T.glauca*, when submitted to the TNER treatment, presents a good growing response. Although its basal area was lower, its mortality rate was low and PAI was high in compared to the other treatments. These results help to make *T.glauca* a more attractive species for the timber industry and reforestation/restoration activities.

Keywords: tropical timber species, wood production, forest growth.



1. INTRODUCCIÓN

El consumo mundial de madera de bosques tropicales está aumentando constantemente (SFB/IMAZON 2010). Para satisfacer la demanda, no solo se debe aumentar la producción, sino también mejorar la gestión forestal (Schwartz et al. 2013). Estimar el crecimiento es esencial para el plan de manejo sostenible. Conocer el desempeño de un árbol o bosque es de gran interés en el entorno forestal, y es posible utilizar esta información para definir la rotación silvícola y predecir la producción forestal (Vatrax et al. 2016; Vanclay 1994).

Las actividades madereras aumentan la tasa de formación de brechas debido a la caída de árboles talados, así como de árboles no registrados que se talan accidentalmente durante las operaciones de cosecha (Sebbenn et al. 2008, Imai et al. 2009). En relación con el manejo forestal, las brechas en la tala pueden ser fácilmente utilizadas como una herramienta importante para posibles soluciones para mitigar problemas, como alargamiento de los ciclos de explotación (Hawthorne et al. 2012); reducir el volumen de madera cosechada; gestionar las brechas para aumentar la densidad de individuos de especies comerciales; y someter los árboles de especies importantes de cultivos futuros a los tratamientos silvícolas para proporcionar la producción sostenible a largo plazo de madera (Schwartz et al. 2013; Dauber et al. 2005; Villegas et al. 2009).

Existen varias opciones silvícolas para lograr tal objetivo. Entre las alternativas viables está la conducción de la regeneración establecida naturalmente, al reducir la competitividad de las lianas y otros árboles (Pariona et al. 2003; Park et al. 2005) y plantación de enriquecimiento, donde mudas y plántulas de especies seleccionadas son plantadas en las brechas forestales de post-explotación (Doucet et al. 2009; Keefe et al., 2009). En la mayoría de los casos, se utilizan especies forestales comerciales pioneras para estos tratamientos silvícolas debido a su rápido crecimiento y su intolerancia a la sombra, y según Gama (2002) la especie *Tachigali glauca* cumple este papel, ya que pertenece al grupo ecológico intolerante a la sombra.

El *T. glauca* es una especie de la familia Fabaceae y su género, *Tachigali*, tiene una contribución importante en la formación de la selva amazónica (Souza Filho et al. 2005), y es parte de los 15 más comunes en el Bosque Nacional del Tapajós en Santarém (Guimarães and Pyler 1999). En condiciones naturales, puede alcanzar un promedio de 40 m de altura (Reis et al. 2015). Su distribución geográfica se extiende a lo largo de la Amazonía brasileña, específicamente en los bosques de tierra firme (Van Der Werff, 2008). En el estudio de Gama (2005), *T. glauca* se encuentra con mucha frecuencia en inventarios realizados en el estado de Pará. Ha sido poco explotada por los productores, eventualmente para la producción de carbón vegetal, sin embargo, debido a su rápido crecimiento y capacidad de fijación de nitrógeno, tiene el potencial de ser adoptado en la formación de sistemas agroforestales, para la recuperación de áreas post explotación con especies de interés y producción de madera (Souza Filho et al. 2005; Pereira, 2017).

Por lo tanto, los objetivos de este estudio fueron evaluar las tasas de mortalidad, el incremento periódico anual y el área basal de plántulas y mudas de la especie *T. glauca* en brechas en la Amazonía Oriental brasileña que se sometieron a tres tratamientos silviculturales: (1) control; (2) conducción de la regeneración natural y (3) plantación de

enriquecimiento. Para indicar cuál es la mejor manera de manejar la especie y obtener madera en áreas molestadas.

2. METODOLOGÍA

Los datos utilizados en el estudio provinieron del experimento de campo realizado en el marco del proyecto “Brechas como motores para el rendimiento, la conservación y la recuperación de bosques tropicales en la Amazonía Oriental”, coordinado por Embrapa Amazonía Oriental y Jari Forestal SA. El área de estudio está ubicada en el valle de Jari, ciudad de Almeirim (1° 9' S, 52° 38' W), Pará, Brasil (Figura 1). En la región, la precipitación promedio anual es de 2.200 mm y la temperatura promedio anual es de 26° C. La vegetación se caracteriza por un denso bosque ombrófilo de tierra firme sobre latosoles amarillos (Azevedo, 2006).

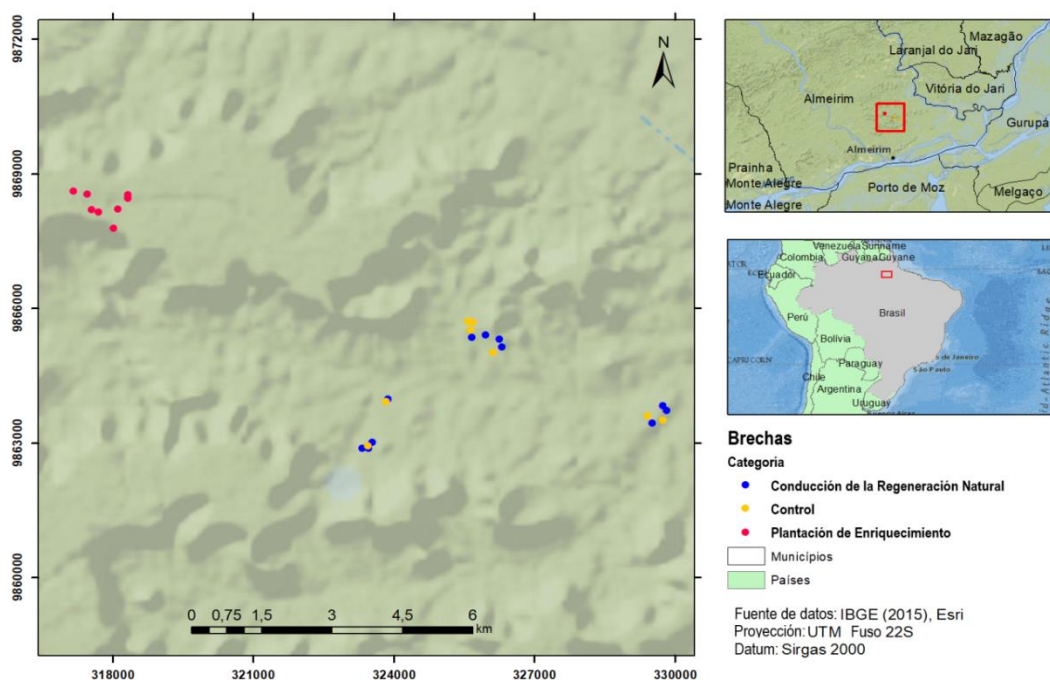
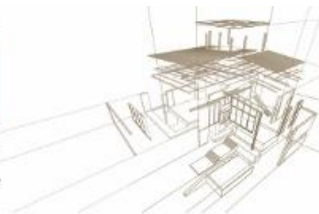


Figura 1: Ubicación del área de estudio y sus tratamientos silviculturales en la ciudad de Almeirim, PA.

El área total bajo manejo de Jari Forestal SA es de 545.535 ha, donde las operaciones de cosecha siguen las técnicas de Extracción de Impacto Reducido (EIR). La compañía actualmente vende madera certificada de 27 especies bajo las regulaciones del Forest Stewardship Council para los mercados nacionales e internacionales.

Respecto al establecimiento del experimento, se inició en 2006 y 2007, en los compartimentos de extracción cosechados en el 2004. El diseño experimental se llevó a cabo a partir de un total de 181 individuos naturalmente presentes y plantados en 28 brechas creadas por EIR. Estos individuos fueron distribuidos en tres tratamientos (Figura 1): (i) control (CT); (ii) la conducción de la regeneración natural (RN); (iii) la plantación de enriquecimiento (PL) de mudas y plántulas. En Control (CT), en 9



brechas, 35 individuos etiquetados solo fueron monitoreados, sin tratamientos silviculturales adicionales, de acuerdo con las normas actuales de manejo forestal para el monitoreo de bosques en Brasil. Ya en la conducción de la regeneración natural (RN), fueron liberados contra las plantas y lianas competidoras, aplicadas a 17 individuos entre plántulas y mudas establecidas naturalmente en 11 brechas. Y en la plantación de enriquecimiento, todas las 126 plántulas de *T. glauca* se sembraron a una distancia de 2,5 m x 2,5 m, además, fueron aplicados los tratamientos silvícolas de conducción en estos individuos en 8 brechas. La liberación contra el crecimiento vegetativo competitivo, a excepción de las medidas de Control (CT), se realizó a los 6, 12, 18, 24, 36 y 48 meses después de lo establecimiento del experimento (Schwartz et al. 2013).

Para los análisis, se utilizaron datos desde el 2010 hasta el 2018, es decir, de los últimos 9 años, para un total de 12 años del experimento. Se ha elegido el período estudiado porque se refiere al mayor número de árboles con diámetro. De esta manera, se realizaron comparaciones entre los tratamientos en relación con el incremento periódico anual (IPAd) en diámetro, área basal y tasa de mortalidad según la fórmula de Sheil et al. (1995).

Las siguientes fórmulas se utilizaron para determinar el incremento periódico anual del diámetro a la altura de pecho (IPAd).

$$IPd = d_{2010} - d_{2018} \quad (1)$$

$$IPAd = \frac{IPd}{P} \quad (2)$$

donde:

- d_{2010} es el diámetro a la altura de pecho (DAP) en 2008 (cm),
- d_{2018} es el diámetro a la altura de pecho (DAP) en 2018 (cm),
- P es lo intervalo de mediciones.

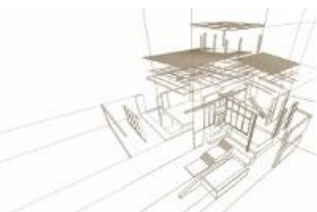
La tasa de mortalidad fue calculada de acuerdo con la fórmula de Sheil et al. (1995).

$$\left[M = 1 + \left(V_1 - \frac{V_0}{V_0} \right)^{1/t} \right] \quad (3)$$

donde:

- M es tasa de mortalidad efectiva al año,
- V_1 es número de árboles vivos en la actual medición,
- V_0 es número de árboles vivos en medición anterior,
- t es tiempo entre las mediciones.

El cálculo para el área basal se realizó también en dos partes. El primero con la siguiente fórmula de área seccional, y poco después, se ha realizado la suma de los resultados.



$$g = \frac{\pi \cdot DAP^2}{40000} \quad (4)$$

donde: DAP^2 es el diámetro a la altura del pecho (DAP) de cada árbol.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Figura 2 muestra los resultados de mediciones sucesivas desde el 2010 hasta el 2018 basadas en IPAd en función del diámetro de individuos de *T. glauca* en los tres tratamientos. Los resultados encontrados para el CT fueron de $0,268 \text{ cm.año}^{-1}$, para la RN de $0,544 \text{ cm.año}^{-1}$ y para PL $0,985 \text{ cm.año}^{-1}$. Se notó que el tratamiento de PL obtuvo el mayor valor de IPAd, seguido de RN con resultado promedio y, por último, con menor incremento, el CT.

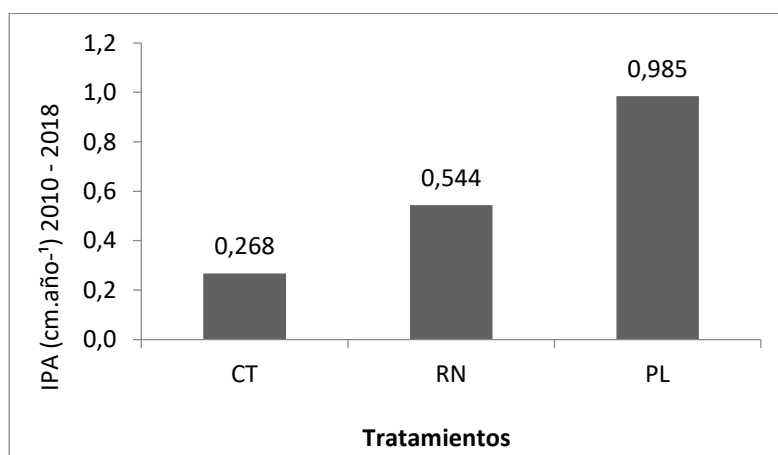
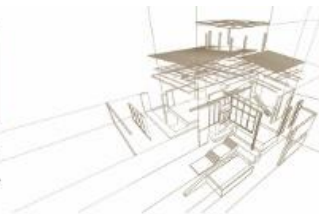


Figura 2: Incremento periódico anual (cm.año^{-1}) de los tres tratamientos con relación al diámetro a la altura de pecho (DAP) de individuos de *T. glauca* entre los años de 2010 y 2018, en valle de Jari, Almeirim – PA.

Esto se debe al hecho de que la especie no presenta un buen desarrollo cuando no está sometida a un tratamiento silvicultural, porque se trata de una brecha, y en las brechas hay mucha competencia, donde especies pioneras y no comerciales toman la delantera de crecimiento, como fue el caso de CT. En el estudio de Vidal et al. (2002), en un área del municipio de Paragominas-PA, se encontraron valores similares al presente estudio, donde los árboles bajo manejo mostraron un incremento periódico anual en DAP de $0,63 \text{ cm.año}$, es decir casi el doble que el tratamiento de control, que presentó $0,33 \text{ cm.año}$. Así como en los estudios de Barreto et al. (1998) e Carvalho (1992) donde el valor de control ha sido muy bajo en comparación con los manejados.

Según la literatura, es innegable que la especie tenga un mejor rendimiento incremental cuando se somete a tratamientos de conducción silvícola. En el estudio realizado por Schwartz et al. (2013) en la misma área, pero haciendo un aparato de 55 especies, se constató que RN era el tratamiento más efectivo para obtener incrementos más altos, excepto en los individuos más dominantes, porque también tenían valores altos en el CT. Este resultado indica que incluso los individuos codominantes requieren cierta conducción para lograr mayores incrementos, como es el caso de *T. glauca*.



El alto valor de la diferencia entre RN y PL, que es casi el doble, también puede explicarse por la diferencia en el número de individuos en cada tratamiento, que era más de siete veces mayor en PL. Schwartz et al. (2013) se constató un problema de infestación de pioneras en el PL, haciendo con que el tratamiento fuera más laborioso en la limpieza del área. El mismo explica que esto sucedió probablemente debido al hecho de que para instalar el PL, se cortó toda la vegetación anterior, lo que abrió el área de limpieza lo suficiente como para crear las condiciones ideales para la germinación de las pioneras. Además, reitera que el problema podría haberse reducido si las brechas utilizadas para la siembra fueran más recientes, no con pasado un año, como se sucedió, para que las plántulas en PL pudieran competir de manera justa con RN y sin necesitar mucha limpieza en el curso del experimento (Pariona et al. 2003; Ohlson-Kiehn et al. 2006; Navarro-Cerillo et al. 2011).

En los bosques de Indonesia (Kuusipalo et al. 1996), y en otras partes de la Amazonía brasileña (Lopes et al. 2008; Keefe et al. 2009), también aparecieron informes positivos a respecto de la regeneración en las brechas de tala debido a la aplicación de tratamientos silviculturales.

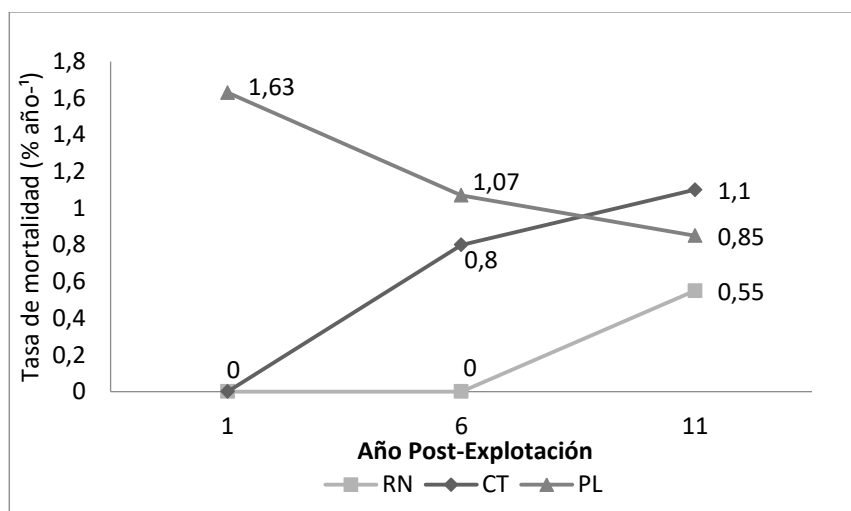


Figura 3: Tasa de mortalidad (%año⁻¹) de los tres tratamientos de individuos de *T. glauca* entre los años de 2007 (1), 2010 (6) y 2018 (11), en valle de Jari, Almeirim – PA.

En lo que se refiere a la mortalidad, la Figura 3 presenta la tasa de todos los tratamientos en el curso de todos los años de mediciones, desde el 2007, pasando por el 2010 y terminando en su última medición, que fue en el 2018. Es posible observar que las tasas nunca fueron constantes en los 11 años de experimento, donde CT obtuvo un creciente aumento en su mortalidad, presentando hasta lo año 6 de medición con tasa 0% año⁻¹, el cual creció para 0,8% año⁻¹ y en el año 11, obtuvo la tasa de mortalidad más alta, con 1,1% año⁻¹. La RN mostró excelentes resultados entre los años 1 e 6, con la tasa igual a 0% año⁻¹, pero en año el 11, su tasa subió para el 0,55% año⁻¹, sin embargo, sigue siendo la menor tasa de todos los tres tratamientos. Y la PL, a la diferencia de los demás, empezó con una tasa muy alta de 1,63% año⁻¹, pese a eso, la tasa ha decaído con eles transcurrir de las mediciones, donde en el año 6 ya tenía 1,07% año⁻¹, decayendo aún más en el año 11, donde presentó 0,85% año⁻¹, siendo así el valor intermedio entre los demás tratamientos.



El estrés causado por la transferencia de plántulas y mudas del vivero a las brechas y el hecho de que las plántulas no tuvieron ningún tratamiento adicional pueden haber contribuido a las tasas de mortalidad más alta observadas en PL durante los primeros años. Según Schwartz et al. (2013), que las tasas de mortalidad iniciales entre los tratamientos saen diferentes también puede justificarse por el hecho de que los individuos en RN eran mayores y probablemente tenían un sistema radicular más grande y mejor establecido que los plantados.

En experimento de plantación de enriquecimiento en la Amazonía Oriental de Gomes et al. (2010), también obtuvo tasas similares en los primeros años. Sin embargo, aparentemente las plántulas en PL se estaban adaptando al área y su tasa de mortalidad disminuyó con el pasar de los años.

Como ilustra la Figura 4, después del año 6 en adelante, la mortalidad solo aumentó en el tratamiento CT, probablemente porque los árboles pioneros más altos eclipsaron o golpearon a los individuos. Esos datos son compatibles con el estudio de regeneración natural en brechas en Brasilia-DF, de Felfili and Abreu (2015).

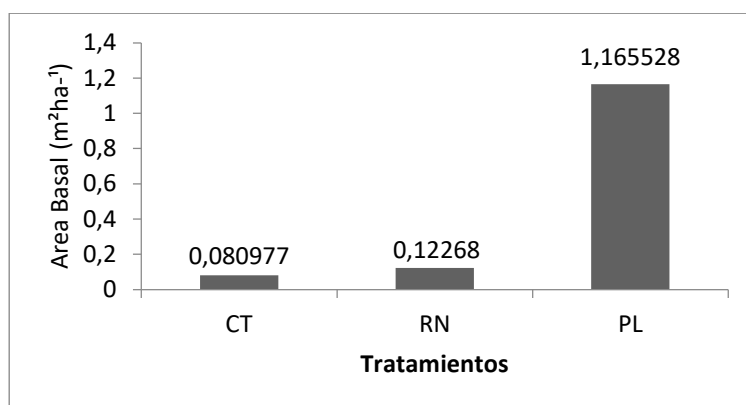
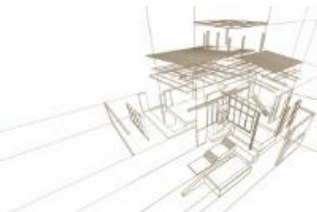


Figura 4: Área basal (m²ha⁻¹) de los tres tratamientos en relación del diámetro a la altura de pecho (DAP) de individuos de *T. glauca* entre los años de el 2010 y el 2018, en valle de Jari, Almeirim – PA.

Al analizar el área basal entre los años del 2010 y el 2018, he sido posible observar el parámetro de estimación de densidad del soporte forestal creciente. El CT indicó la menor área basal, con 0,080977 m²ha⁻¹. En seguida, la RN con 0,12268 m²ha⁻¹. Y pronto el PL, con la mayor área basal de todos los tratamientos, con 1,165528m²ha⁻¹.

La incidencia de la luz también es un factor atenuante para el crecimiento en el área basal, aunque en este estudio no establecimos una relación directa entre el área basal y el factor de luz. Do Vale (2014) encontró valor más alto de área basal en lo nordeste Paraense que une los municipios de Peixe-Boi y Bonito en Pará, el estudio presentó un área basal de 2,53m²ha⁻¹. Los valores de área basal de esta presente investigación aún es bajo con respecto al promedio que la especie presenta en otros artículos y necesita de más estudio al respecto.

La plantación de enriquecimiento seguida de la conducción es un tratamiento silvicultural post-cosecha puede proporcionar importantes beneficios económicos y de conservación en los bosques tropicales (Keefe et al. 2009; Gomes et al. 2010). A pesar



de los grandes beneficios posibles del plantío de enriquecimiento, la conducción de la regeneración natural puede tener ventajas en situaciones específicas.

En el presente experimento, conducir plántulas y mudas establecidas de forma natural en las brechas fue, en general, más eficiente en términos de crecimiento y mortalidad, si se coloca en las proporciones correctas de los individuos, pese al menor valor del área basal. Sin embargo, se sugiere que esta técnica se aplique solo en áreas de manejo donde haya suficiente regeneración natural de especies con alto valor comercial o de conservación (Keefe et al. 2009; Schwartz et al. 2013). Por otro lado, si las especies comerciales están ausentes o son bajas en número, el plantío de enriquecimiento se convierte en la mejor alternativa, ya que permitirá agregar especies valiosas al desmonte y así aumentar la probabilidad de reclutamiento de estos individuos futuramente (Lopes et al. 2008; Schulze 2008; Gomes et al. 2010). Sin embargo, con este tratamiento es más costoso, el escenario ideal sería plantas las mudas de mucho interés comercial para cubrir los costos adicionales que involucra preparar las brechas, cultivar y plantar las plántulas y la atender su necesidad de liberación cuando necesario.

4. CONCLUSIONES

En términos de crecimiento, mortalidad y frecuencia de aplicación de tratamientos silvícolas, es más eficiente y económicamente viable cultivar plántulas y mudas de *T. glauca* establecidas naturalmente en las brechas de post explotadas. Sin embargo, si no hay individuos suficientes en el área, se recomienda la plantación de enriquecimiento, debido a la excelente respuesta que presentó en el experimento, aunque más laboriosa. Estos resultados ayudan a hacer de *T. glauca* una especie más atractiva para la industria de la madera, ya que puede unirse las buenas actividades de restauración forestal, buenas características ecológicas para áreas perturbadas como brechas y su valor de madera.

AGRADECIMIENTOS

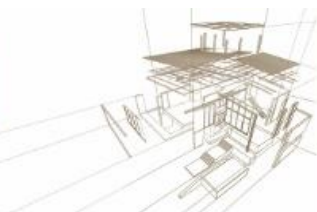
Al Dr. Gustavo Schwartz por guiarme y brindarme importante información para este trabajo. A mis profesores Dr. Fabiano Emmert y Dr. Rodrigo Geroni del Laboratorio de Mensuración y Manejo de Recursos Forestales, Universidad Federal Rural de la Amazonía (UFRA), porque sin ellos no hubiese tenido fuerza para concluir este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azevedo, C.P. (2006). Dinâmica de florestas submetidas a manejo na Amazônia Oriental: experimentação e simulação. PhD Thesis. Federal University of Paraná, Curitiba, p. 236.
- Barreto, P., Amaral, P., Vidal, E. and Uhl, C. (1998). Costs and benefits of forest management for timber production in eastern Amazonia. *Forest ecology and management*, v.108, p.9-26.
- Doucet, J. L., Kouadio, Y. L., Monticelli, D. and Lejeune, P. (2009). Enrichment of logging gaps with moabi (*Baillonella toxisperma* Pierre) in a Central African rain forest. *Forest Ecology and Management*, 258, 2407-2415.



- Do Vale, I., Costa, L.G.S. and Miranda, I.S. (2014). Espécies indicadas para a recomposição da floresta ciliar da sub-bacia do rio peixe-boi, Pará. *Ciência Florestal*, 24(3), 573-582.
- Dauber, E., Fredericksen, T.S. and Peña, M. (2005) . Sustainability of timber harvesting in Bolivian tropical forests. *Forest Ecology and Management* 214, 294–304.
- Felfili, J.M. and Abreu, H.M. (2015). Natural regeneration of *Roupala montana* Aubl., *Piptocarpha macropoda* Back. and *Persea fusca* Mez. In four environmental conditions in the gama gallery forest-df, brazil. *Cerne*, 5(2), 125-132.
- Imai, N., Samejima, H., Langner, A., Ong, R.C., Kita, S., Tittin, J., Chung, A.Y.C., Lagan, P., Lee, Y.F. and Kitayama, K.. (2009). Co-benefits of sustainable forest management in biodiversity conservation and carbon sequestration. *PLoS ONE* 4, e8267. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0008267>.
- Gama J.R.V., Souza, A. L., Martins, S. V. and Souza, D. R. (2005). Comparação entre florestas de várzea e de terra firme no estado do Pará. *R. Árvore*, Viçosa-MG, v.29, n.4, p.607-616.
- Gama, J. R. V., Botelho, S. A. and Bentes-Gama, M. D. M. (2002). Composição florística e estrutura da regeneração natural de floresta secundária de várzea baixa no estuário amazônico. *Revista Árvore*, 26(5), 559-566.
- Gomes, J.M., Carvalho, J.O.P., Silva, M.G., Nobre, D.N.V., Taffarel, M., Ferreira, J.E.R. and Santos, R.N.J. (2010). Sobrevivência de espécies arbóreas plantadas em clareiras causadas pela colheita de madeira em uma floresta de terra firme no município de Paragominas na Amazônia brasileira. *Embrapa Amazônia Oriental-Artigo em periódico indexado (ALICE)*.
- Guimarães, E.G.T. and Pyle, E.H. (1999). Levantamento florestal de 20 ha na Floresta Nacional do Tapajós. Santarém: Projeto LBA Ecologia P, 30.
- Hawthorne, W.D., Sheil, D., Agyeman, V.K., Abu Juam, M. and Marshall, C.A.M. (2012). Logging scars in Ghanaian high forest: towards improved models for sustainable production. *Forest Ecology and Management* 271, 27–36.
- Kuusipalo, J., Jafarsidik, Y., Adjers, G. and Tuomela, K.. (1996). Population dynamics of tree seedlings in a mixed deipterocarp rainforest before and after logging and crown liberation. *Forest Ecology and Management* 81, 85–94.
- Keefe, K., Schulze, M.D., Pinheiro, C., Zweede, J.C. and Zarin, D. (2009). Enrichment planting as a silvicultural in the eastern Amazon: a case study of Fazenda Cauaxi. *Forest Ecology and Management* 258, 1950–1959.
- Lho, J.O.P. (1992). Structure and dynamics of a logged over Brazilian Amazonian rain forest. Oxford. Tese (Doutorado). Oxford University.
- Lopes, J.C.A., Jennings, S.B. and Matni, N.M., (2008). Planting mahogany in canopy gaps created by commercial harvesting. *Forest Ecology and Management* 255, 300–307.
- Navarro-Cerillo, R.M., Griffith, D.M., Ramírez-Soria, M.J., Pariona, W., Golicher, D. and Palacios, G. (2011). Enrichment of big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla* King) in logging gaps in Bolivia: the effects of planting method and silvicultural treatments on long-term seedling survival and growth. *Forest Ecology and Management* 262, 2271–2280.
- Ohlson-Kiehn, C., Pariona, W. and Fredericksen, T.S. (2006). Alternative tree girdling and herbicide treatment for liberation and timber stand improvement in Bolivian tropical forests. *Forest Ecology and Management* 225, 207–212.



- Pariona, W., Fredericksen, T.S. and Licona, J.C., (2003). Natural regeneration and liberation of timber species in logging gaps in two Bolivian tropical forests. *Forest Ecology and Management* 181, 313–322.
- Park, A., Justiniano, M.J. and Fredericksen, T.S. (2005). Natural regeneration and environmental relationships of tree species in logging gaps in a Bolivian tropical forest. *Forest Ecology and Management* 217, 147–157.
- Pereira, L.D.F.B. (2018). Análise da fitossociologia de uma área de terra firme no rio Maués Mirim, município de Maués-AM.
- Reis, A.S., Sousa, J. D. S., Bastos, M. D. N. C. and Sobral, S. F. (2015). Taxonomia de *Tachigali Aubl.* (Leguminosae, Caesalpinioideae) da Região Metropolitana de Belém, Pará, Brasil. *Biota Amazônia (Biote Amazonie, Biota Amazonia, Amazonian Biota)*, 5(4), 48-55.
- Schulze, M. (2008). Technical and financial analysis of enrichment planting in logging gaps as a potential component of forest management in the eastern Amazon. *Forest Ecology and Management* 255, 866–879.
- Schwartz, G., Falkowski, V. and Peña-Claros, M. (2017). Natural regeneration of tree species in the Eastern Amazon: Short-term responses after reduced-impact logging. *Forest ecology and management*, 385, 97-103.
- Schwartz, G., Lopes, J. C., Mohren, G. M. and Peña-Claros, M. (2013). Post-harvesting silvicultural treatments in logging gaps: A comparison between enrichment planting and tending of natural regeneration. *Forest Ecology and Management*, 293, 57-64.
- Sebbenn, A.M., Degen, B., Azevedo, V.C.R., Silva, M.B., Lacerda, A.E.B., Ciampi, A.Y., Kanashiro, M., Carneiro, F.S., Thompson, I. and Loveless, M.D. (2008). Modelling the long-term impacts of selective logging on genetic diversity and demographic structure of four tropical tree species in the Amazon forest. *Forest Ecology and Management* 254, 335–349.
- SFB/IMAZON. (2010). A atividade madeireira na Amazônia brasileira: produção, receita e mercados. Serviço Florestal Brasileiro/Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, Belém, p. 26.
- Souza Filho, A. P. S., Lobo, L. T., & Arruda, M. S. P. (2005). Atividade alelopática em folhas de *Tachigali myrmecophyla* (Leg.-Pap.). Embrapa Amazônia Oriental-Artigo em periódico indexado (ALICE).
- Van der Werff, H.H. (2008) A synopsis of the genus *Tachigali* (Leguminosae – Caesalpinioideae) in Northern South America. *Ann. Missouri Bot. Gard.* 95: 618–660.
- Vanclay, J.K. (1994). Modeling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests. Copenhagen: CAB International. 312 p.
- Vatraz, S., Carvalho, J.O.P., Silva, J.N.M. and Castro, T.C. (2016) Efeito da exploração de impacto reduzido na dinâmica do crescimento de uma floresta natural Effect of the Reduced Impact Exploration on Growth dynamics of a natural forest.
- Vidal, E., Viana, V. M., & Batista, J. L. F. (2002). Crescimento de floresta tropical três anos após colheita de madeira com e sem manejo florestal na Amazônia oriental. *Scientia forestalis*, 61(1), 133-143.
- Villegas, Z., Peña-Claros, M., Mostacedo, B., Alarcón, A., Licona, J.C., Leño, C., Pariona, W. and Choque, U. (2009). Silvicultural treatments enhance rates of future crop trees in a tropical dry forest. *Forest Ecology and Management* 258, 971– 977.

PROGRESSÃO E MODELAGEM DE PROPRIEDADES DE ÁRVORES DESDE A MUDA ATÉ A IDADE DE CORTE

PROGRESSION AND MODELING OF TREE PROPERTIES FROM SEEDLING TO THE CUTTING AGE

Lorensani, Rafael; Gonçalves, Raquel; Ruy, Mônica

Faculdade de Engenharia Agrícola / UNICAMP, Brasil

Resumen

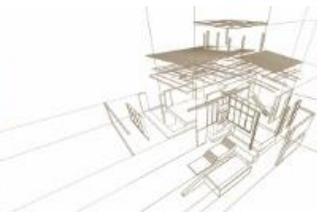
Para as empresas florestais a viabilidade de classificar, o mais cedo possível, o material genético disponível, resulta em ganhos de produtividade e de qualidade na cadeia produtiva. Por isso, um dos principais objetivos dos programas de melhora genética é realizar a seleção em plantas jovens, e que essa seleção seja representativa no ano de aproveitamento da madeira. Sob essa ótica, o desenvolvimento de tecnologia não destrutiva é fundamental, não somente para o aproveitamento de áreas florestais, mas também como ferramenta de seleção em programas de melhora genética florestal. Nesta pesquisa ficou demonstrado que, associando ensaios de propagação de ondas com outras características obtidas diretamente no caule da planta ainda jovem, é possível antecipar o conhecimento de propriedades da madeira a ser produzida pela árvore na idade de corte e, assim, classificar o material genético.

Palabras-clave: mudas, ultrassom, propiedades físico-mecánicas.

Abstract

For forest companies, the feasibility of classifying available genetic material as soon as possible results in productivity and quality gains in the production chain. Therefore, one of the main objectives of genetic improvement programs is to carry out the selection on young plants, and that this selection is representative in the year of harvesting of the wood. From this perspective, the development of non-destructive technology is fundamental, not only for the use of forest areas, but also as a selection tool in forest genetic improvement programs. In this research it was demonstrated that by associating wave propagation tests with other characteristics obtained directly in the stem of the young plant, it is possible to anticipate the knowledge of wood properties to be produced by the tree at the cutting age and thus classify the genetic material.

Keywords: seedlings, ultrasound, physical and mechanical properties.



1. INTRODUÇÃO

A seleção antecipada de madeira de árvores jovens é muito importante para as empresas de base florestal. Em empresas que usam a madeira como material, a classificação prévia permite a seleção de materiais e de destino como uma função de suas propriedades, evitando gastos desnecessários para processar materiais que não atendam aos requisitos mínimos de processamento. Para empresas de papel e celulose a seleção prévia permite o conhecimento dos genótipos, evitando investimentos desnecessários em materiais que não possuem as propriedades necessárias para serem comercialmente viáveis (Apiolaza et al. 2013, Sharma et al. al. 2016).

Para realizar a seleção precoce, é necessário utilizar modelos de previsão que envolvam propriedades correlacionadas com a idade e com a propriedade que se deseja inferir em condições da idade de corte. Entre as propriedades de interesse das empresas de base florestal estão a rigidez, resistência e densidade da madeira. Por outro lado, entre as propriedades mensuráveis em mudas e em árvores jovens estão as propriedades acústicas (Merlo et al. 2014, Gonçalves et al., 2013), densidade (Wielinga et al. 2009, Lorensani et al. 2015), resistência e rigidez (Cherry et al. 2008, Vikram et al. al. 2011) e diâmetro e altura (Neves et al. 2013, Alves Ferreira et al. 2014), todos correlacionados com a idade e com as propriedades de interesse das empresas de base florestal.

No entanto, qualquer parâmetro incluído nesse tipo de análise, especialmente em árvores jovens, requer o conhecimento de seu comportamento durante o crescimento da árvore ou sua capacidade de se propagar com a idade. Nesse sentido, observa-se na literatura diversas pesquisas que avaliaram a propagação das propriedades das árvores ao longo dos anos. (Nogueira & Ballarin 2006, Lorensani et al. 2015, Alves Ferreira et al. 2014).

Considerando os aspectos mencionados e visando a antecipação da seleção da madeira, o objetivo desta pesquisa foi verificar se as mudas avaliadas com base no diâmetro, altura, densidade básica, resistência, rigidez e velocidade de propagação da onda ultrassônica mantinham tais propriedades consistentes ao longo do crescimento das árvores e se é possível inferir as propriedades das árvores adultas por meio das propriedades das mudas.

2. METODOLOGIA

A amostra foi composta de 3 clones de Eucalipto, nomeados A, B e C e 4 famílias de *Pinus pinaster*. Para os clones de eucalipto e famílias de pinus foram utilizadas 240 mudas de 3 e 6 meses, respectivamente. Para as 270 árvores adultas dos clones, as idades amostradas foram de 12, 24, 48 e 72 meses e para as 34 famílias de pinus a idade adulta foi de 72 meses (Tabela 1).

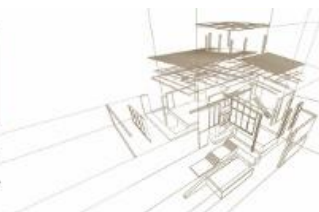


Tabela 1: Amostras de mudas e árvores adultas usados nos testes de ultrassom e determinação da densidade básica.

Clone/age	3	12	24	48	72	Total
A	50	30	30	30	30	170
B	20	30	30	30	30	140
C	50	-	-	-	30	80
Família 15	30	-	-	-	8	38
Família 18	30	-	-	-	9	39
Família 19	30	-	-	-	8	38
Família 23	30	-	-	-	9	39
Total	240	60	60	60	64	544

Todas as mudas e árvores (Tabela 1) foram submetidas a testes ultrassônicos e estáticos, além de cálculo de densidade básica e medidas de diâmetro. Após os testes de ultrassonografia, as árvores de cada local foram classificadas por grupos de árvores de velocidade ultrassônica: velocidades extremas (maiores e menores) e velocidades intermediárias. De cada grupo, pelo menos duas árvores foram escolhidas para compor a amostra de árvores a ser cortada para os ensaios de flexão estática (Tabela 2).

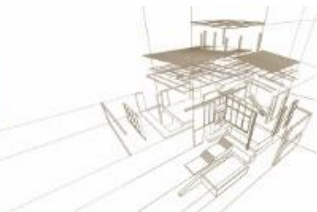
Tabela 2: Quantidade de troncos usados nos ensaios estáticos.

Clone/age	12	24	48	72	Total
A	6	10	10	6	32
B	10	10	10	6	36
C	-	-	-	6	6
Família 15	-	-	-	8	8
Família 18	-	-	-	9	9
Família 19	-	-	-	8	8
Família 23	-	-	-	9	9
Total	16	20	20	52	108

2.1. Medição de altura e diâmetro

Para medir a altura das mudas o caule foi considerado desde a linha entre a muda e o substrato, até sua extremidade, região onde se localizava uma área de brotação, desconsiderando as folhas extremas. O diâmetro foi medido na interface com o substrato.

Para as árvores (a partir dos 12 meses) a altura foi medida com um hipsômetro (Vertex IV, Haglöf, Suíça). O diâmetro das árvores foi medido na altura do peito (DAP), considerado a 1,30 m do solo, utilizando paquímetro.



2.2. Ensaio de ultrassom

Foram utilizados equipamento de ultrassonografia (USLab, Agricef, Brasil) com transdutores de pontas exponenciais de frequência de 45 kHz. As pontas dos transdutores são intercambiáveis, permitindo que os ensaios das mudas fossem feitos com ponteiras cônicas e os ensaios nas árvores com pontas arredondadas de 3 mm. As ponteiras cônicas foram feitas pelo próprio grupo de pesquisa.

Para o teste nas mudas de viveiro foi estabelecido uma distância padrão de 150mm para conter pelo menos 3 comprimentos de onda (λ). As mudas foram testadas indiretamente pelo ultrassom, com os transdutores posicionados a 45 ° com o eixo do caule. O teste indireto permite que a muda de viveiro seja testada viva e utilize a mesma metodologia aplicada em árvores.

O ensaio de ultrassom nas árvores foi realizado indiretamente, com os transdutores posicionados a 45 ° com o eixo do tronco. Nas árvores a distância entre os transdutores foi de 0,7 m, sempre adotando 0,35 m acima e abaixo do DAP. O ensaio de ultrassom repetido em duas posições diametralmente opostas do tronco.

Com os tempos de propagação das ondas e as distâncias entre os transdutores, as velocidades foram calculadas para as mudas de viveiro e árvores.

2.3. Resistência e Rigidez

No caso das mudas com 3 meses de idade, a resistência e a rigidez foram determinadas por tração paralela a fibra realizado em uma máquina universal (DL30000, EMIC, Brasil) (Figura 1). A carga e a deformação foram obtidas simultaneamente pelo software da máquina, que recebia os sinais da célula de carga e do extensômetro.



Figura 1: Ensaio de tração em caule de muda de eucalipto.

Nas árvores, a resistência e a rigidez foram obtidas no teste de flexão estática em troncos saturados da base com 3,5 m de comprimento. Os testes foram realizados em um pórtico de carga servo-hidráulica usando um sistema de aquisição de dados de 8 canais (Quantun, HBM, Alemanha) no qual a célula de carga e o transdutor eletrônico de posição linear (resolução de 0,001 mm) foram acoplados, permitindo a leitura



automática da carga e deslocamento vertical durante o teste. A aplicação da carga com 2 pontos simétricos foi realizada de acordo com a norma europeia EN 408 (2010).

As equações da NBR 7190 (1997) utilizadas nos ensaios de tração de corpos de prova (Equações 1 e 2) foram utilizadas para determinar a resistência (f_t) e o módulo de elasticidade (E_t) do caule das mudas em tração.

$$f_t = \frac{F_{t,max}}{A} \quad (1)$$

Onde: $F_{t,max}$ é a carga máxima aplicada e A é a área da seção transversal na parte central do caule.

$$E_t = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (2)$$

Em que: $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são as tensões correspondentes a 10% e 50% da tensão de tração e $\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ são a deformação específica medida na parte central da haste correspondente a $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$, respectivamente.

Para os ensaios de flexão estática em toras, o módulo de elasticidade (E_M) foi calculado pela Equação 3 (módulo global da EN 408, 2010), considerando o módulo de cisalhamento (G) como valor infinito, simplificação permitida pela EN 408 (2010).

$$E_M = \frac{3aL^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{f_{40\%} - f_{10\%}}{P_{40\%} - P_{10\%}} - \frac{6a}{5Gb} \right)} = \frac{3aL^2 - 4a^3}{48I \left(\frac{f_{40\%} - f_{10\%}}{P_{40\%} - P_{10\%}} \right)} \quad (3)$$

Onde $P_{40\%}$ e $P_{10\%}$ são 40% e 10%, respectivamente, da carga máxima aplicada ao log durante os ensaios de flexão, $f_{40\%}$ e $f_{10\%}$ são os deslocamentos verticais correspondentes às cargas $P_{40\%}$ e $P_{10\%}$, respectivamente, L é o intervalo, $a = L/3$, $I =$ Inércia de madeira redonda e D é o diâmetro da seção transversal do tronco no ponto central sob casca.

A resistência à flexão também foi calculada de acordo com a EN 408 (2010) - Equação 4.

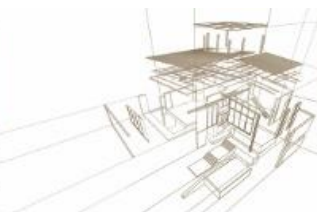
$$f_m = \frac{3F_{max}a}{bh^2} = \frac{3F_{max}a}{AD} \quad (4)$$

Onde: f_m é a resistência à flexão, F_{max} é a carga máxima (N), D é o diâmetro da seção transversal do tronco no ponto central sob casca, $A =$ área da seção transversal da madeira redonda.

2.4. Densidade básica

Do caule das mudas, com aproximadamente 150 mm de comprimento, foram utilizadas amostras de 30 a 50 mm de comprimento para determinação da densidade básica. No caso das árvores, o trado de incremento foi utilizada para obtenção de amostras cilíndricas, com 6 mm de diâmetro, na altura do peito. Cada amostra foi acondicionada em um saco plástico e refrigerada para manutenção da umidade em medições laboratoriais subsequentes.

O volume dos espécimes foi obtido em condição saturada e, em seguida, os espécimes foram levados a um forno a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingirem massa constante (condição seco no



forno), na qual os pesos foram obtidos. Os valores de massa seca e volume saturado foram utilizados para determinar a densidade básica.

3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os parâmetros (diâmetro, altura, velocidade, resistência, rigidez e densidade básica) foram analisados para verificar se existem diferenças estatísticas entre as idades e entre os clones. Usando valores médios reais e modelos de regressão (parâmetros x idade) também analisamos se as diferenças entre os clones observados nas mudas de viveiro são mantidas até a idade de corte.

Tabela 3: Valores médios (primeira linha) e coeficiente de variação (segunda linha) dos parâmetros medidos nas mudas: velocidade longitudinal ($V_{L,s}$), diâmetro (D_s) e altura das mudas (H_s) e as propriedades obtidas nas mudas e nas: densidade básica (DB_i), rigidez ($E_{M,i}$) e resistência ($f_{m,i}$).

Clone	Parâmetro	Idade (meses)				
		3	12	24	48	72
A	Velocidade [$m.s^{-1}$]	2249 (a) (1)	2697 (b) (1)	3130 (c) (1)	3811 (d) (1)	4654 (e) (1)
	Resistência [Mpa]	19,8 (a) (1)	31,7 (b) (1)	42,5 (d) (1)	57,9 (d) (1)	46,0 (c) (1)
	Rigidez [Mpa]	1822 (a) (1)	5858 (b) (1)	9704 (de) (1)	9772 (e) (1)	8257 (cd) (1)
	Densidade Básica [$kg.m^{-3}$]	350 (a) (1)	430 (b) (1)	480 (c) (1)	470 (c) (1)	480 (c) (1)
	Diâmetro [mm]	2,5 (a) (1)	64,7 (b) (1)	110,6 (c) (1)	124,5 (d) (1)	190,1 (e) (3)
	Altura [m]	0,31 (a) (1-2)	7,78 (b) (1)	16,12 (c) (1)	17,52 (d) (1)	28,72 (e) (3)
	B	Velocidade [$m.s^{-1}$]	2048 (a) (2)	2475 (b) (2)	2835 (c) (2)	3133 (d) (2)
Resistência [Mpa]		23,2 (a) (2)	30,6 (a) (1)	40,7 (b) (2)	51,4 (cd) (2)	44,2 (bc) (1)
Rigidez [Mpa]		2241 (a) (1)	5440 (b) (1)	6283 (bc) (2)	5843 (b) (2)	7346 (cd) (1)
Densidade Básica [$kg.m^{-3}$]		360 (a) (1)	460 (b) (2)	470 (b) (1)	460 (b) (1)	460 (b) (2)
Diâmetro [mm]		2,8	81,2	119,9	143	168,7



	(a) (2)	(b) (2)	(c) (2)	(d) (2)	(e) (2)
Altura [m]	0,28	10,66	16,47	20,87	26,75
	(a) (1)	(b) (2)	(c) (1)	(d) (2)	(e) (2)
Velocidade [m.s ⁻¹]	2095				3954
	(a) (2)				(b) (2)
Resistência [Mpa]	19				47,7
	(a) (1)				(b) (1)
Rigidez [Mpa]	1256				7295
	(a) (2)				(b) (1)
Densidade Básica [kg.m ⁻³]	270				470
	(a) (2)				(b) (2)
Diâmetro [mm]	2,5				139,5
	(a) (1)				(b) (1)
Altura [m]	0,31				20,45
	(a) (2)				(b) (1)

Número e letras diferentes indicam valores estatisticamente diferentes. Letras comparam as linhas, e números comparam colunas.

Com os resultados, é possível observar que a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas permite diferenciar os clones das mudas de viveiro, mantendo-se a ordem de diferenciação, de forma coerente, até a idade de corte. A velocidade das ondas de ultra-som usadas como ferramenta para classificar clones aos 12 ou 24 meses de idade apresentam o mesmo comportamento, mostrando que essas idades também poderiam ser usadas para diferenciar os clones por métodos acústicos.

Apesar dos resultados de velocidade apresentarem coeficiente de variação e valores médios similares aos de outros autores, deve-ser compará-los com cautela, uma vez que a idade, espécie e outros fatores que influenciam o crescimento, influenciam nos valores (Santaclara et al. 2010, Vikran et al. 2011).

Observando os valores médios, tanto para a resistência, quanto para a rigidez, ambos não mantiveram sua diferenciação, porém avaliando modelos matemáticos dessas propriedades, observamos uma diferenciação a partir dos 12 meses de idade. Apesar de observarmos um decréscimo do valor médio das propriedades aos 72 meses, é importante salientar que a amostragem era composta por clones, e não pelos mesmos indivíduos ao longo do tempo.

Espera-se que a densidade básica aumente com a idade, mas este parâmetro é muito variável dentro e entre árvores de até 3 anos de idade (Raymond 2002 citado por Padua 2009). Diferentes pesquisas utilizando Eucalyptus obtiveram resultados incompatíveis quanto à variação de densidade com idade (Oliveira et al. 2005, Wu et al. 2007, Pádua et al. 2006). A densidade seguiu o mesmo modelo estatístico de regressão das propriedades mecânicas, mas somente após os 24 meses de idade, mantendo a diferenciação entre os clones até a idade de corte.



A altura e o diâmetro foram representados pelo mesmo modelo estatístico de regressão e a diferenciação dos clones pode ser feita a partir dos 12 meses de idade. Elevados valores de coeficiente de variação, e inversão de valores médios aos 72 meses podem ser explicados pelo fato de ter sido utilizados clones de diferentes idades, e não os mesmos clones ao longo do tempo.

Cada parâmetro obtido nas mudas (variáveis independentes), bem como as relações dos parâmetros (Tabela 5), foram avaliados, isoladamente, como preditores dos parâmetros de madeira (módulo de elasticidade, resistência e densidade) das árvores (Tabela 4).

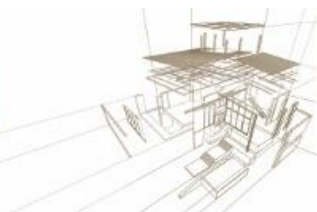
Tabela 4: Valores médios (primeira linha) e coeficiente de variação (segunda linha) dos parâmetros medidos nas mudas: velocidade longitudinal ($V_{L,s}$), diâmetro (D_s) e altura das mudas (H_s) e as propriedades obtidas nas mudas e nas: densidade básica (DB_t), rigidez ($E_{M,t}$) e resistência ($f_{m,t}$).

Espécies	Mudas (3* e 6 meses)						Árvores (72 meses)		
	$V_{L,s}$ m.s ⁻¹	D_s mm	H_s m	DB_s kg.m ⁻³	f_{ts} MPa	E_{ts} MPa	DB_t kg.m ⁻³	f_{mt} MPa	E_{Mt} MPa
Clone 1	2249	2.48	0.31	350	19.8	1822	480	46	8257
	10.1	7.2	9.3	17.8	27.3	58.2	4.6	12.0	18.3
Clone 2	2048	2.83	0.29	360	23.2	2241	460	44	7346
	4.7	12.5	7.5	15.7	44.9	60.1	5.0	16.0	8.6
Clone 3	2095	2.51	0.31	270	19.0	1256	470	48	7295
	7.7	10.1	9.2	17.0	36.5	59.1	4.80	5.7	30.6
Família 15	1816	3.30	0.33	430	17.1	312	440	50	2797
	9.9	11.0	7.4	11.7	23.3	25.1	7.7	16.1	25.2
Família 18	1789	3.59	0.33	430	16.9	313	460	59	3183
	8.2	9.2	10.4	6.4	21.4	25.6	9.0	11.3	14.1
Família 19	1735	3.46	0.31	440	18.2	313	460	54	2721
	11.0	9.9	11.5	16.7	19.6	26.9	11.5	28.4	31.1
Família 23	1930	3.75	0.36	440	17.4	469	480	49	2964
	11.1	11.32	9.7	6.3	16.1	17.0	7.8	29.8	16.8

*Mudas 1, 2 e 3 possuem 3 meses de idade, e as mudas 15, 18, 19 e 23 possuem 6 meses de idade.

Tabela 5: Relações entre parâmetros obtidos nas mudas.

Espécies	CLL_s	H_s/D_s	E_{ts}/f_{ts}
Clone 1	1770	125.0	92.0
Clone 2	1510	102.5	96.6



Clone 3	1185	123.5	66.1
Família 15	1417	100.0	18.2
Família 18	1376	91.9	18.5
Família 19	1324	89.6	17.2
Família 23	1639	96.0	27.0

Nota: Coeficiente de rigidez da muda $CLL_s = DB_s \cdot (VL_s)^2$, Velocidade Longitudinal (VL_s), diâmetro da muda (D_s), altura da muda (H_s), densidade básica da muda (DB_s), módulo de elasticidade da muda (Et_s), resistência à tração da muda (fm_s).

Inicialmente, foram analisados os modelos simples de regressão, com R^2 variando de 57 a 95% para estimar a rigidez. Os modelos de predição da resistência apresentaram R^2 variando de 58 a 81%. Para a densidade básica obtida nas árvores nenhum parâmetro obtido nas mudas apresentou correlação estatisticamente significativa. Os coeficientes de determinação encontrados são compatíveis com os coeficientes obtidos por outros autores (Watt et al., 2010, Apiolaza, 2009, Chauhan and Walker, 2006)

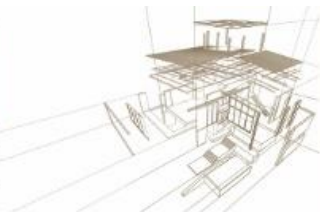
Para a resistência à flexão (fm_t) e densidade básica (DB_t) obtida das árvores, nenhum modelo de regressão múltipla envolvendo variáveis independentes não auto correlacionadas foi estatisticamente significativa. A magnitude da variação desses parâmetros pode explicar esse resultado. A variabilidade (coeficiente de variação) das densidades de madeira das árvores (clones e progênies) foi próxima de 3% e a resistência à flexão próxima de 10%, mas para o módulo de elasticidade esta variabilidade foi próxima de 50%.

Para a rigidez, um modelo que utilizava velocidade de propagação do pulso ultrassônico e altura da muda apresentou R^2 de 98,5%. Watt and Zoric (2010) em sua pesquisa obtiveram modelos que utilizavam a idade, relação entre altura e diâmetro e a temperatura mínima do outono com um R^2 de 96% (Tabela 6).

Tabela 6: Modelos de regressão com maior significância para predição da resistência (f_{Mt}) e rigidez (E_{Mt}) das árvores.

Model	P-valor	R^2 (%)	R	Error*
$f_{Mt} = 1/(0.0147 + 0.0016 \cdot \ln(Ets/fts))$	0,0145	81,0	0,90	3,10
$E_{Mt} = -2504 + 10.8 \cdot VL_s - 42572 \cdot H_s$	0,0002	98,5	0,99	384

4. CONCLUSÕES



Em geral, os resultados permitem concluir que todos os parâmetros têm o potencial de serem usados em um modelo preditivo para selecionar árvores, mas o grau dessa antecipação não seria o mesmo.

O modelo de regressão múltipla envolvendo a altura e a velocidade longitudinal das ondas ultrassônicas ao longo da direção das fibras do caule nas mudas foi o mais adequado para a predição da rigidez da madeira das árvores.

Para correlacionar a resistência à flexão de madeira das árvores, um modelo de regressão simples, utilizando a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência obtida no teste de tração das mudas, permitiu um resultado estatisticamente significativo.

Finalmente, a densidade de madeira das árvores não pode ser prevista por nenhum modelo envolvendo parâmetros obtidos em plântulas dos mesmos clones ou progênies. Como a densidade é um parâmetro muito importante a ser conhecido, esse resultado mostra a importância de mais pesquisas nessa área.

AGRADECIMIENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP; Processos 2013/03449-9 e 2015/11926-7) pelo apoio financeiro e bolsa de estudos; À International Paper of Brazil pela doação de mudas e árvores dos clones de eucaliptos e apoio logístico aos ensaios florestais; ao projeto "IMAGINE" FEDER ININTERCONECTA nº: ITC-20151167 desenvolvido no Madera Plus Calidad Forestal e na Companhia Tragsa, Galicia, Espanha, pelo apoio financeiro; ao Projeto Trees4Future desenvolvido no Centro de Inovação e Serviços Tecnológicos de Madeiras da Galiza (CISMADEIRA), Espanha; e ao Laboratório de Estruturas da Escola Superior Politécnica de Lugo, Universidade de Santiago de Compostela, Lugo, Espanha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

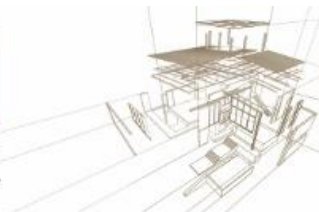
Alves Ferreira, D. H. A., Leles, P. S. S., Machado, E. C., Abreu, A. H. M.; Abílio, F. M. 2014. Crescimento de clone de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* em diferentes espaçamentos. Floresta, [S.l.], v. 44, n. 3, p. 431-440. doi:10.5380/ufv.v44i3.32188.

Apiolaza, L. A. 2009. Very early selection for solid wood quality: screening for early winners. Ann. For. Sci 66(6):601. doi:10.1051/forest/2009047.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de Estrutura de Madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

Chauhan, S. S. and Walker, J. C. F. 2006. Variations in acoustic velocity and density with age, and their relationship in radiata pine. For. Ecol. Manage. 229(1-3): 388-394. doi:10.1016/j.foreco.2006.04.019.

Cherry, M. L., Vikram, V.; Briggs, D., Cress, D. W. and Howe, G. T. 2008. Genetic variation in direct and indirect measures of wood stiffness in coastal Douglas-fir. Can. J. For. Res. 38(9): 2476-2486. doi:10.1139/X08-087.



EUROPEAN STANDARDS. EN 408. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties, 2010.

Gonçalves, R., Batista, F. A. F. and Lorensani, R. G. M. 2013. Selecting eucalyptus clones using ultrasound test on standing trees. For. Prod. J. 63 (3-4): 112-118. doi:10.13073/FPJ-D-12-00114.

Lorensani, R. G. M., Alves, C. S. and Gonçalves, R. 2015. Prediction of basic density using parameters measured on trees. In: 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Rio de Janeiro, Brasil, September.

Lorensani, R. G. M., Alves, C. S. and Gonçalves, R. Prediction of basic density using parameters measured on trees. In: 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. Rio de Janeiro, Brasil, September 2015.

Merlo, E., Alvarez-Gonzalez, J. G., Santaclara, O. and Y Riesco, G. 2014. Modelling modulus of elasticity of *Pinus pinaster* Ait. in northwestern Spain with standing tree acoustic measurements, tree, stand and variables. Forest Syst. 23(1):1-14. doi: 10.5424/fs/2014231-04706.

Neves, T. A., Protásio, T. P., Trugilho, P. F., Valle, M. L. A., Sousa, L. C. and Vieira, C. M. 2013. Qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus* em diferentes idades para a produção de bioenergia. Revista de Ciências Agrárias. 56(2):139-148. doi:10.4322/rca.2013.022

Nogueira, M. and Ballarin A. W. 2006. Ultrasound as a tool in the classification of parts of *Pinus taeda*. In: Seminário END Madeira, Itatiba, SP, CD-ROM 2006.

Oliveira, J. T. S., Hellmeister, J. C. and Tomazello Filho, M. Variation of moisture content and basic density in the wood of seven species of eucalyptus. Revista Árvore, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 115-127, jan./fev. 2005.

Pádua, F. A. de, Trugilho, P. F. and Lima, J. T. Sampling of wood for the evaluation of basic density in *Eucalyptus*. In: BRAZILIAN MEETING ON WOOD AND WOOD STRUCTURES, 10., 2006, São Pedro, SP. Anais. São Pedro: UNESP/CEVEMAD/IBRAMEM, 2006. CD-ROM.

Santaclara, O., Álvarez, J. G. and Merlo, E. 2011. Modeling structural lumber quality for *Pinus pinaster* Ait. in northwestern Spain using standing tree acoustic assesment, tree characteristics and stand variables. Proceedings of the 17th International Non destructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. University of West Hungary, Sopron, Hungary.

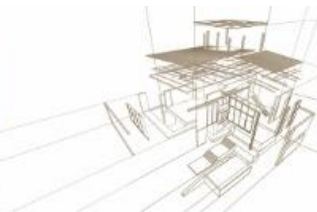
Vikram, V., Cherry, M. L., Briggs, D., Cress, D. W., Evans, R. and Howe G. T. 2011. Stiffness of Douglas-fir lumber: effects of wood properties and genetics. Can. J. For. Res. 41(6): 1160–1173. DOI: 10.1139/x11-039.

Watt, M. S. and Zoric, B. 2010. Development of a model describing modulus of elasticity across environmental and stand density gradients in plantation-grown *Pinus radiata* within New Zealand. Can. J. For. Res. 40(8): 1558-1566. doi:10.1139/X10-103.

Watt, M. S., Sorensson, C., Cown, D. J., Dungey, H. S. and Evans, R. 2010. Determining the main and interactive effect of age and clone on wood density, microfibril angle and modulus of elasticity for *Pinus radiata*. Can. J. For. Res. 40(8): 1550-1557. doi: 10.1139/X10-095.

Wielinga, B., Raymond, C. A., James, R. and Matheson, A.C. 2009. Genetic parameters and genotype by environment interactions for green and basic density and stiffness of *Pinus radiata* d. don estimated using acoustics. Silvae Genet 58:112–122.

Wu, H. X., Powell, M. B., Yang, J. L., Ivkovich, M. and McRae, T. A. 2007. Efficiency of early selection for rotation-aged wood quality traits in radiata pine. Ann. For. Sci. 64: 1–9



INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO DE PLANTIO, IDADE E IRRIGAÇÃO NOS COMPONENTES ANATÔMICOS DA MADEIRA JOVEM DE EUCALIPTO

INFLUENCE OF PLANTING SPACE, AGE AND IRRIGATION ON THE ANATOMIC COMPONENTS OF YOUNG EUCALYPTUS

Moulin, Jordão Cabral⁽¹⁾ *; Arantes, Marina Donária Chaves⁽²⁾

⁽¹⁾ Professor, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro/ES, Brasil. ⁽²⁾ Professora, Universidade Federal de São João del-Rei, Sete Lagoras/MG, Brasil.

* Contacto: jordao_cm@hotmail.com

Resumo

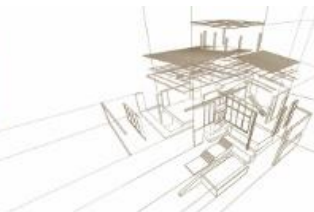
O objetivo do trabalho foi avaliar a influência da idade, espaçamento de plantio e irrigação na composição anatômica da madeira de eucalipto em dois clones de eucalipto. A mensuração de fibras e vasos foi realizada em materiais do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* com idades de 6 e 12 meses provenientes de plantios em duas regiões, uma irrigada e outra região não irrigada, com espaçamentos de 3x0,5; 1,5x2, 3x1; 3x2 e 3x3 m. Foi possível verificar a influência da idade, espaçamento e irrigação nos elementos anatômicos da madeira, sendo que a maior frequência de vasos foi na idade de 6 meses, e no Clone B, houve redução da frequência de vasos com a ampliação do espaçamento de plantio. A irrigação causou a redução no diâmetro do vaso nas madeiras com 6 meses e inversos resultados aos 12 meses. A irrigação pouco influenciou no comprimento e espessura de parede da fibra, o espaçamento de plantio influenciou apenas na espessura de parede e comprimento da fibra da madeira do Clone B, havendo redução da espessura de parede com a ampliação do espaçamento de plantio e no comprimento da fibra houveram diferentes tendências, aumento e redução com a ampliação do espaçamento de plantio

Palabras-clave: silvicultura, madeira, fibra, vaso.

Abstract

The objective of this study was to evaluate the influence of age, spacing and irrigation in anatomical composition of eucalyptus wood. The materials used were two clones *E. grandis* x *E. urophylla* ages of 6 and 12 months from planting in two regions, one irrigated and unirrigated other region, with spacing of 3x0,5, 1,5 x2, 3x1, 3x2 and 3x3 m being performed anatomical analyzes these samples. It was possible to verify the influence of age, spacing and irrigation in the anatomical elements of wood, and the higher frequency of vessel was at the age of 6 months and Clone B was reduced with the increase of planting space. Irrigation caused the reduction in vessel diameter in the woods with 6 months and inverse results at 12 months. Irrigation little influence on the length and thickness of the fiber wall, planting spacing influenced only in wall thickness and length of the wood grain Clone B, with reduced wall thickness with the expansion of planting spacing and length fiber there were different trends, increase and decrease with the increase of planting space.

Keywords: forestry, wood, fiber, vessel.



1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con, para el mejor uso de la madera es importante conocer los factores que influyen en su calidad. El espaciado tiene una serie de implicaciones silvícolas, tecnológicas y económicas. De acuerdo con Ferreira et al. (2014) el estudio del espaciado de plantación para diferentes materiales genéticos de eucalipto es importante porque respondieron de manera diferente a cada espacio.

La siembra y el espacio de riego pueden influir en la producción y calidad de la madera, por lo que es importante estudiar estos tratamientos silvícolas para una mejor aplicación de las plantaciones forestales. Además de estos tratamientos silvícolas, se producen cambios notables en la madera a lo largo de los años hasta la madurez (Carneiro et al. 2014), las características de la madera también pueden verse influenciadas por las interacciones del tracto silvícola con la edad de la planta (Couto et al. 2012).

El comportamiento de madera es estrechamente asociado con su estructura celular. Las características anatómicas como el diámetro y la frecuencia de los vasos, y la longitud y el grosor de la pared celular se utilizan para comprender el comportamiento de la madera para diversos usos. Panshin and De Zeeuw (1980) afirman que los elementos del recipiente, debido a que tienen grandes dimensiones y paredes delgadas, son estructuras débiles, y su abundancia, tamaño y distribución influyen en la resistencia mecánica de la madera. Destacan la estrecha correlación entre el volumen de fibra, la densidad y la resistencia mecánica.

La evaluación del crecimiento y la producción es importante para la planificación de plantaciones forestales (Sales et al. 2009), por lo tanto, se han utilizado prácticas silvícolas para maximizar la producción de madera de estas plantaciones (Fischer and Zylbersztajn 2012). Existen pocos estudios que aborden el efecto de estas prácticas en la calidad de la madera. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del espaciamiento de las plantas, la edad de corte y el riego en los componentes anatómicos de la madera en dos clones de eucalipto.

2. METOLOGIA

2.1. Origen del material, caracterización de la región y muestreo

Se utilizaron dos clones del híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* de Fibria Celulose S.A. Company, unidad Aracruz, estado de Espírito Santo, Brasil.

Los materiales en estudio de seis y doce meses provenían del espaciamiento de 3x3, 3x2, 3x1, 1.5x2, 3x0.5 m, plantados bajo dos condiciones diferentes, una irrigada y otra no irrigada, totalizando 40 tratamientos. Para cada tratamiento se recolectaron 3 árboles. Para el estudio de los parámetros de las macetas y fibras se obtuvieron las maderas en discos de 2.5 cm de espesor, tomados en la base de los árboles.

Para que el presente estudio pudiera dibujar un perfil consistente de la caracterización de la madera de eucalipto, se muestrearon tres árboles espaciando cada clon, edad y región, es decir, 3 árboles x 5 espacios x 2 clones x 2 edades x 2 condiciones (irrigadas y no irrigada), obteniendo 120 árboles.



2.2. Análisis de parámetros de vasos y fibras

Las mediciones de vasos y fibras se realizaron de acuerdo con los estándares del Comité IAWA (1989). Para las mediciones de vasos y fibras en la madera, se utilizó el disco obtenido de la base de los árboles. En la medición de los vasos, se eliminaron bloques de madera con dimensiones de 2x2x3 cm, se suavizaron en agua caliente y se fijaron en un microtomo de portaobjetos para obtener secciones anatómicas de espesor que oscilaban entre 18 y 20 μm desde el plano transversal, y se prepararon en cuchillas temporales, utilizando glicerina y agua. En posesión de las diapositivas, se realizaron fotomicrografías con la ayuda de una cámara conectada a un microscopio. Los parámetros se midieron en las fotos de un software analizador de imágenes Axion-vision, siendo la frecuencia vascular en poros / mm^2 y los diámetros de los vasos en μm .

Para medir las fibras, se disociaron de la madera mediante el método propuesto por Nicholls y Dadswell descrito por Ramalho (1987).

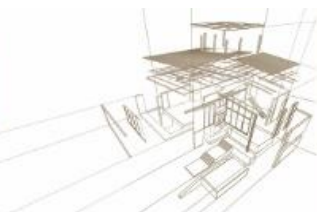
Para la maceración, se prepararon astillas de madera y se transfirieron a recipientes que contenían solución de maceración (ácido acético glacial y peróxido de hidrógeno, en una relación 1:1). Después de ser selladas, las muestras se llevaron al invernadero y se mantuvieron a 60°C durante 48 horas. Posteriormente, el macerado se lavó y coloreó con el colorante de safranina en alcohol para una mejor visualización. Los portaobjetos de glicerina se prepararon para obtener microfotografías que contienen las fibras disociadas. Después de las fotomicrografías, las fibras se midieron con el mismo software analizador de imágenes descrito en la medición del vaso.

Se realizaron cuarenta repeticiones para medir la frecuencia de los vasos (número de vasos. mm^{-2}) y 20 para su diámetro. Al medir la longitud, el largo y el diámetro de la fibra, se realizaron 25 repeticiones para cada componente. El grosor de la pared de fibra de madera se obtuvo restando el diámetro de la fibra del diámetro del lumen, y el resultado dividido por dos.

2.3. Análisis estadístico de datos

Los efectos del espaciamiento de las plantas, la edad y la condición de riego se evaluaron por separado para cada clon, adoptando un diseño completamente aleatorio organizado en un esquema factorial con tres factores (edad x condición de riego) y los 3 árboles se consideraron como repeticiones.

Para los factores de edad y condición de plantación, se usó la prueba de Tukey, con un nivel de significancia de 5%, mientras que para el factor de espaciamiento se usó la regresión lineal, modelo simple. En la regresión, se usó el área útil representada por el espacio de siembra, ya que las áreas en los arreglos de 1.5x2 y 3x1 m son las mismas. Se realizó un análisis de varianza entre los dos para evaluar la diferencia de los componentes anatómicos, ya que no hubo diferencia, el área utilizable de 3 m^3 estuvo representada por los promedios de los dos espacios de siembra, por lo tanto, en la regresión, se utilizaron las áreas de 9, 6, 3 y 1.5 m^2 .



3. RESULTADOS

3.1. Frecuencia y diámetro del vasos

Resumen del análisis de varianza de la frecuencia y el diámetro de la vaso de madera de los dos clones del híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* con diferentes edades y plantados en diferentes espacios de cultivos y regiones (condición de siembra en la que recibió irrigado y no irrigado) se puede ver en la Tabla 1. La frecuencia de los vasos de los dos clones difería significativamente entre las edades, en el Clon B todavía había diferencias en el espaciamiento. En el diámetro del vaso de los dos clones, hubo una interacción triple entre los factores, lo que implica que se requiere la dependencia entre los factores y el desmembramiento de los factores.

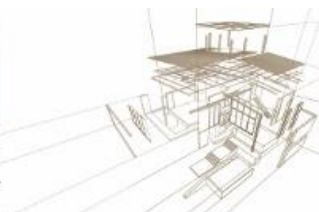
Table 1: Análisis de varianza de frecuencia (FV) y diámetro de los vasos (DV) en la madera de dos clones del híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*.

FV	GL	CLONE A		CLONE B	
		FV	DV	FV	DV
Edade (Ed)	1	124.64*	411.44*	82.69*	488.37*
Región (Rg)	1	7.49	14.44	1.44	24.27
Espaciado (Esp)	4	9.78	69.09*	19.83*	35.51
Ed x Rg	1	0.77	1538.64*	0.44	1684.76*
Ed x Esp	1	0.44	33.2	5.16	9.51
Rg x Esp	4	5.74	12.44	0.90	20.24
Ed x Rg x Esp	4	3.49	91.84*	2.48	93.56*
Residuos	40	2.80	15.29	1.97	27.80
Total	59				

Irrigado no influyó en la frecuencia de los vasos de madera en ambos clones, como se observa en la Tabla 1. Otros autores como Tomazello Filho (2006) que trabajaron con *E. grandis* x *E. urophylla* hybrid y Drew et al. (2009) con *E. globulus* no verificó la influencia del irrigado en la frecuencia de los vasos. February et al. (1995) no encontraron ningún efecto del riego sobre la frecuencia de los vasos en la madera de *E. grandis* y en el híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis*, pero en el híbrido de *E. grandis* x *E. nitens* se observó una mayor frecuencia de los vasos en la región no tratada regado.

Entre las edades hubo una mayor frecuencia de vasos en la edad más joven para ambos clones, y para el Clon A a los 6 meses fue de 16.12 y 13.23 vasos.mm⁻² a los 12 meses, en el Clon B fue de 15.86 μ m a los 6 meses y 13,51 vasos.mm⁻² a los 12 meses. Sette Jr. et al. (2012) también encontraron una reducción en la frecuencia de los vasos de 12 a 24 meses de edad en madera de *E. grandis*, estos resultados corroboran la declaración de Panshin and De Zeeuw (1980), quienes enfatizan la reducción en la frecuencia de los vasos de madera hasta alcanzar su edad adulta.

El espaciado de siembra influyó en la frecuencia de los vasos en la madera del clon B, ya que la tendencia era disminuir con el aumento del espaciado de siembra, con la



ecuación ajustada para disminuir la frecuencia lineal de vasos en función del espaciado de siembra con la función "Frecuencia de los vasos = $18.35500838 - 1.51582915 \times$ Espaciado de plantación"; con el coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.68. Dado que la frecuencia de los vasos del clon A no se vio afectada por el espacio de siembra, es evidente que el material genético de la madera también influye en la interacción con el espaciado de plantación para la formación del número de vasos por área.

En ambos clones, las variaciones en los diámetros de los vasos entre las dos edades fueron similares, con un aumento del diámetro de los vasos al aumentar la edad en la región irrigada, y un resultado inverso en la región no irrigada, al disminuir el diámetro del vaso al aumentar edad (Tabla 2).

Table 2: Valores medios y prueba de comparación múltiple para el desarrollo de interacciones del diámetro del vaso para los dos clones del híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*.

Espaciado de plantación (m)	Edade (meses)	Diámetro del vasos (μm)			
		Clon A (región)		Clon B (región)	
		Irrigada	No irrigada	Irrigada	No irrigada
3x3	6	56.17 Bb	73.35 Aa	68.40 Bb	80.63 Aa
	12	81.69 Aa	61.38 Bb	90.88 Aa	71.28 Bb
3x2	6	56.75 Bb	68.04 Aa	63.20 Bb	79.92 Aa
	12	73.69 Aa	60.84 Bb	83.05 Aa	71.51 Ba
3x1	6	69.66 Aa	70.15 Aa	62.62 Bb	76.29 Aa
	12	73.92 Aa	65.22 Bb	83.87 Aa	70.21 Ba
1,5x2	6	63.44 Bb	70.61 Aa	72.89 Aa	72.88 Aa
	12	78.44 Aa	71.95 B a	79.01 Aa	72.39 Aa
3x0,5	6	61.48 Bb	71.08 Aa	69.64 Ab	73.65 Aa
	12	76.59 Aa	69.39 Ba	81.45 Aa	73.51 Aa

Dentro de cada espaciado de plantación, las mismas letras mayúsculas en cada fila y las letras minúsculas en cada columna no difieren entre sí con una significación del 5% por la prueba de Tukey.

En la evaluación de la influencia del espaciado en el diámetro de los vasos, se encontró que el análisis de regresión fue significativo solo en la mitad de las condiciones estudiadas y con diferentes tendencias (Tabla 3). El diámetro de lo vaso aumentó con un mayor espaciado de plantación en la región regada solo para el clon A a los 6 meses, mientras que en el mismo clon A los 12 meses en la región no regada, el diámetro de lo vaso disminuyó al aumentar el espaciado de plantación (Tabla 3). El diámetro de lo vaso del clon B fue influenciado por el espaciado de plantación la edad de 6 meses y se plantó en la región no regada, con un aumento del diámetro de lo vaso al aumentar el espaciado de la siembra.

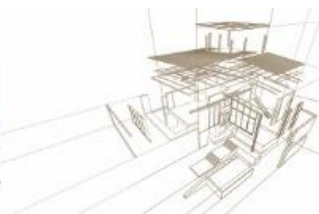


Table 3: Ecuaciones ajustadas para el diámetro del vaso para las cinco separaciones.

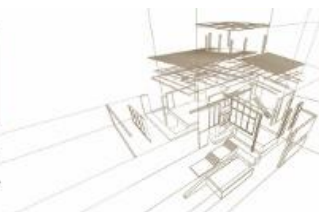
Edade (meses)	Ecuaciones ajustadas para región irrigada			
	Clone A	R ²	Clone B	R ²
6	$\hat{Y}_i = 42.6218 + 18.3703 X_i$	0.47*	$\hat{Y}_i = 68.5458 - 0.2663 X_i$	0.04
12	$\hat{Y}_i = 72.3400 + 0.5580 X_i$	0.09	$\hat{Y}_i = 78.2244 + 1.2273 X_i$	0.25
Ecuaciones ajustadas para región no irrigada				
	Clone A	R ²	Clone B	R ²
6	$\hat{Y}_i = 69.6445 + 0.2197 X_i$	0.04	$\hat{Y}_i = 72.1897 + 1.0272 X_i$	0.89*
12	$\hat{Y}_i = 71.0946 - 1.2399 X_i$	0.80*	$\hat{Y}_i = 72.9794 - 0.2201 X_i$	0.01

3.2. Dimensiones de fibra

La Tabla 4 resume el análisis de la varianza de la longitud, el largo, el diámetro y el grosor de la fibra de madera de los dos clones del híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* con diferentes edades y plantados en diferentes espacios y regiones (irrigada y no irrigada). Se pueden observar los efectos de las interacciones triples sobre la longitud de la fibra en ambos clones, mientras que para el grosor de la pared de la fibra hubo una interacción entre la edad x la región para el clon A. La interacción significativa indica que existe una dependencia entre los factores y que usted mismo para desplegar y evaluar un efecto dentro del otro. En el Clon B hubo un efecto de la edad sobre el diámetro de la fibra y el grosor de la pared de la fibra, y la biometría de estos últimos también fue influenciada por el espaciamiento de la siembra.

Table 4: Análisis de varianza de Largo (C), ancho (A), diámetro del lumen (DL) y grosor de la pared de fibra en los dos clones del híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*

FV	G L	Square Medio							
		Clone A				Clone B			
		L	A	DL	EP	L	A	DL	EP
Edad (Ed)	1	137070*	2.16	0.18	0.90*	132222*	0.40	4.51*	1.91*
Región (Rg)	1	1504	0.22	0.0006	0.06	5902	0.05	0.87	0.12
Españado(Esp)	4	2595*	0.66	0.85	0.03	2491	1.37	0.89	0.31*
Ed x Rg	1	119.88	1.26	0.15	0.58*	46	2.12	0.75	0.08
Ed x Esp	1	1434	0.45	0.86	0.02	1805	0.18	0.15	0.11
Rg x Esp	4	1660.66	0.88	0.66	0.02	1208.61	1.40	2.16	0.06
Ed x Rg x Esp	4	2301.77*	0.11	0.15	0.08	4670.82*	0.17	0.20	0.10
Resíduo	40	782.83	0.65	0.61	0.06	753.44	0.60	0.92	0.06
Total	59								



Los valores de longitud de fibra más altos se obtuvieron en clones a los 12 meses (Tabla 5), solo en el Clon A de la región regada y con un espaciado de plantación de 3x0.5 m y en el Clon B de la misma región y un espaciado de plantación de 3x1 m. Encontró el mismo efecto. En la gran mayoría de las condiciones de siembra hubo un aumento en la largo de la fibra, Samariha (2011) encontró la misma tendencia para *E. camadulensis* a las edades de 14 y 20 años. Esta variación ocurre hasta que la madera alcanza su fase adulta, y se encuentra comúnmente en la literatura (Panshin and De Zeeuw 1980).

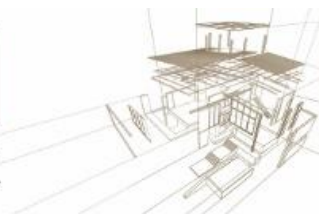
Table 5: Valores medios y prueba de comparación múltiple para desplegar interacciones de longitud de fibra para los dos clones del híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*.

Espaciado de plantación (m)	Idad (meses)	Largo de las fibras (µm)			
		Clon A (región)		Clon B (región)	
		Irrigada	Não irrigada	Irrigada	Não irrigada
3x3	6	686.83 Ab	706.17 Aa	704.50 Ab	746.33 Ab
	12	812.33 Aa	768.49 Ab	878.32 Aa	803.84 Ba
3x2	6	740.40 Ab	687.66 Bb	710.77 Ab	691.08 Ab
	12	834.56 Aa	797.11 Aa	837.19 Aa	780.20 Ba
3x1	6	678.04 Ab	700.09 Ab	763.13 Aa	699.06 Bb
	12	830.99 Aa	798.62 Aa	794.86 Aa	775.06 Aa
1,5x2	6	690.10 Ab	710.12 Ab	718.00 Ab	693.18 Ab
	12	780.95 Aa	802.62 Aa	792.23 Aa	827.17 Aa
3x0,5	6	768.59 Aa	723.98 Ab	759.45 Ab	718.17 Ab
	12	797.21 Aa	825.02 Aa	813.84 Aa	839.81 Aa

Dentro de cada espacio de siembra, las mismas letras mayúsculas en cada fila y las letras minúsculas en cada columna no difieren entre sí con una significación del 5% por la prueba de Tukey.

Al verificar el efecto del irrigada sobre la longitud de la fibra de madera, se encontraron valores más altos en la no irrigada para el Clon A a los 6 meses plantados en un espaciado de plantación de 3x2 m, y en el Clon B a los 6 meses en un espacio de plantación de 3x1 m, así como a los 12 meses en el espaciado de plantación de 3x3 y 3x2 m. En la gran mayoría de las condiciones de siembra, el riego no influyó en la longitud de la fibra de madera en ambos clones. Pereira and Araújo (1990) no verificaron un patrón claro de variación en la longitud de la fibra de la madera del *E. globulus* a los 6 y 11 meses plantados en la región regada y no regada, ya que a los 6 meses la longitud de la fibra se redujo en la región irrigado y a los 12 meses el resultado fue inverso.

El ajuste de los modelos de regresión simple para la longitud de la fibra de madera del Clon B presentó coeficientes de determinación altos, con diferentes tendencias. Tienne et al. (2009) también verificaron el aumento en la longitud de la fibra al aumentar el espacio para el híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* a los dos años en el espacio 1x1; 2x1; 1.3x1.9; 2x2 y 5x2 m. Corroborando los resultados del Clon A, Miranda, Tomé and Pereira (2003) encontraron que el espaciamiento de siembra no influía en la longitud de las fibras de madera de *E. globulus* de 18 años. Al evaluar el efecto sobre la longitud de



la fibra causado por el espaciamiento de la siembra dentro de las regiones y edades, se observó que el análisis de regresión fue significativo solo para el Clon B, excepto por su edad de 6 meses y plantado en una región no regada (Tabla 6).

Tabla 6: Ecuaciones ajustadas para la longitud de la fibra para los cinco espacios.

Idade (meses)	Ecuaciones ajustadas para región irrigada			
	Clone A		Clone B	
6	$\hat{Y}_i = 750.8995 - 6.3435 X_i$	R ² = 0.34	$\hat{Y}_i = 791.4726 - 10.7062 X_i$	R ² = 0.86*
12	$\hat{Y}_i = 791.7457 - 3.8453 X_i$	R ² = 0.44	$\hat{Y}_i = 786.6231 + 4.3961 X_i$	R ² = 0.52*
Ecuaciones ajustadas para región no irrigada				
Idade (meses)	Clone A		Clone B	
	Clone A		Clone B	
6	$\hat{Y}_i = 717.3225 - 2.23778 X_i$	R ² = 0.38	$\hat{Y}_i = 719.1664 - 2.5761 X_i$	R ² = 0.44
12	$\hat{Y}_i = 819.1333 - 4.9482 X_i$	R ² = 0.65	$\hat{Y}_i = 816.8321 - 4.7007 X_i$	R ² = 0.69*

*Significativo por la prueba F al 5% de probabilidad. \hat{Y}_i : estimación de la longitud de la fibra, X_i : espaciado de plantación

En el ancho de la fibra de los dos clones no hubo efectos de la edad, el riego o el espacio de siembra. El diámetro de el lume de las fibras del Clon A fue el mismo en todas las condiciones de siembra estudiadas. En el Clon B hubo influencia de la edad, donde los resultados más altos fueron a la edad de 12 meses, con 12.51 μm y 11.96 μm a los 6 meses. El diámetro de el lumem de las fibras de madera Clon B aumentó con el aumento de la edad. Evangelista et al. (2010) encontraron valores más altos de ancho de fibra y diámetro de el lumen en *E. urophylla* a una edad más temprana, analizándose a los 6 y 8 años.

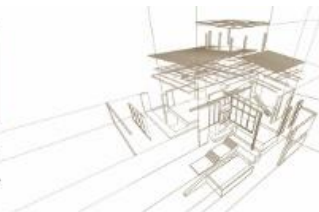
El grosor de la pared de fibra de los dos clones en la región no irrigada disminuyó con el aumento de la edad (Tabla 7).

Table 7: Valores medios, prueba de comparación múltiple para el desarrollo de interacciones de la región y la edad para el grosor de la pared de fibra del híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*.

Idade (meses)	Espessura de parede das fibras (μm)			
	Clone A (região)		Clone B (região)	
	Irrigada	Não irrigada	Irrigada	Não irrigada
6	3.66 Aa	3.79 Aa	3.77 Aa	3.94 Aa
12	3.61 Aa	3.35 Bb	3.49 Aa	3.50 Ab

Dentro de cada clone, as mesmas letras maiúsculas em cada linha e minúsculas em cada coluna não diferem entre si, a 5% de significância pelo teste Tukey.

El aumento del espacio de plantación condujo a una reducción en el grosor de la pared de las fibras de madera del Clon B (Figura 1), independientemente de la edad y el riego. Evangelista et al. (2010) analizaron la madera de *E. urophylla* de 6 y 8 años y obtuvieron valores más altos del grosor de la pared de fibra en los árboles más viejos, de acuerdo con Panshin and De Zeeuw (1980). La pared de fibra tiende a aumentar con la madurez de los árboles. El resultado distintivo del grosor de la pared celular de este



trabajo puede estar relacionado con la corta edad del material estudiado y la baja diferencia entre las dos edades.

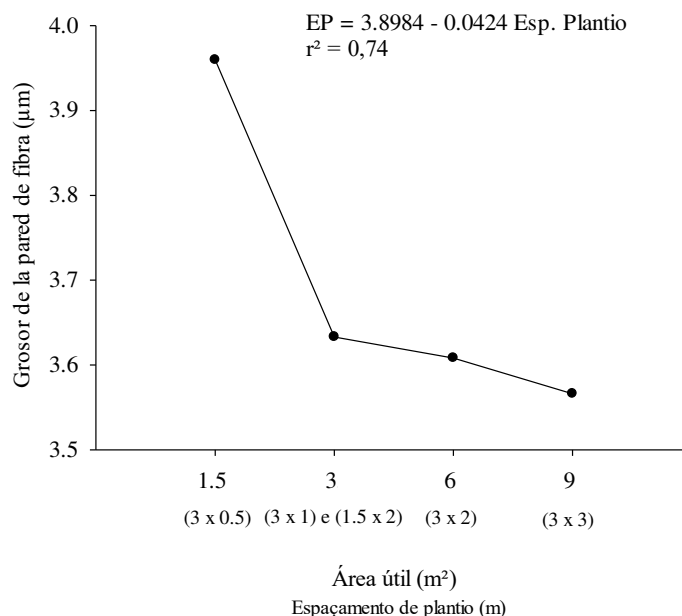


Figure 1: Relación funcional entre el área útil de plantación y el grosor de la pared de fibras de madera Clone B. EP estimación del grosor de la pared de fibra, Esp.Plantación: espaciado de plantación.

4. CONCLUSIONES

En la frecuencia de las macetas no hubo influencia del riego, los resultados más altos fueron a la edad de 6 meses, en el clon B hubo una reducción con la expansión del espacio de siembra. El riego causó una reducción en el diámetro del vaso en bosques de 6 meses y los resultados opuestos a los 12 meses. El espaciado de plantación afectó el diámetro del vaso con diferentes tendencias para los clones, la edad y la región, con situaciones en las que el diámetro disminuyó y aumentó.

Los valores más altos de longitud de fibra se obtuvieron en clones a los 12 meses. El riego tuvo poca influencia en la longitud de la fibra. El riego tuvo poca influencia en el grosor de la fibra de ambos clones, donde solo el Clon A a los 12 meses aumentó el grosor de la pared causado por el riego. El espaciado de siembra solo influyó en el grosor de la pared del clon B, con una reducción al aumentar el espaciado de siembra. Solo en la región no irrigada hubo un efecto de la edad, con un mayor grosor de la pared a una edad más joven.

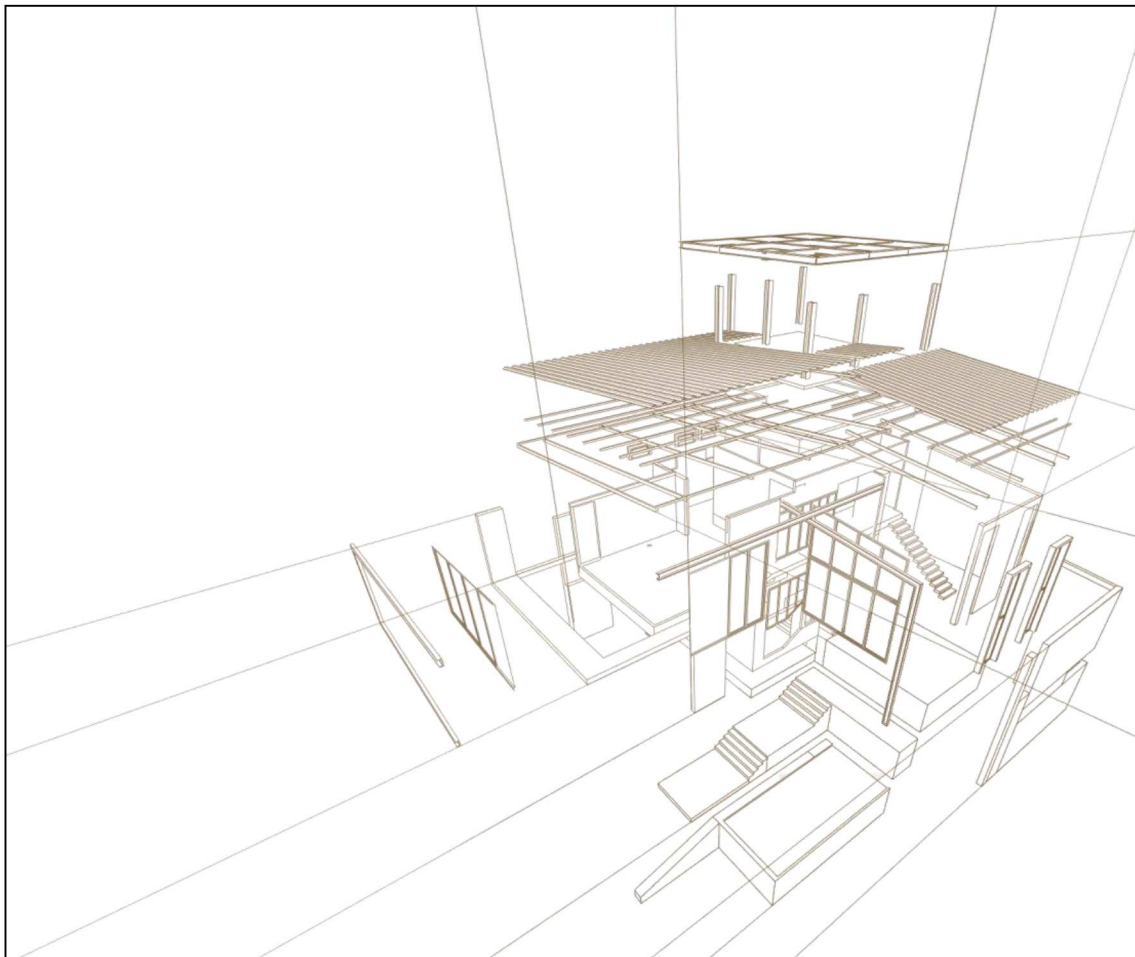


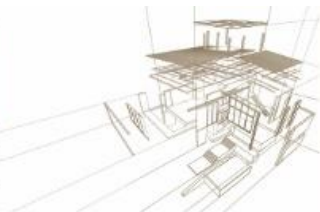
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carneiro, A.C.O. et al. (2014) Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. *Revista Árvore*, Viçosa, MG, v. 38, n. 2, p. 375-381.
- Couto, A. M. et al. (2012). Amostragens longitudinais alternativas para a determinação da densidade básica em clones de *Eucalyptus* sp. *Floresta e Ambiente*, Seropédica, v. 19, n. 2, p.184-193.
- Drew, D.M. et al. (2009). High resolution temporal variation in wood properties in irrigated and non-irrigated *Eucalyptus globules*, *Annals of Forest Science*, Australia, n. 66, 2009.
- Evangelista, W.V. (2010). Caracterização anatômica quantitativa da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 273-284.
- February, E.C. (1995). Relationships between water availability and selected vessel characteristics in *Eucalyptus grandis* and two hybrids. *IAWA Journal*, Holanda, v. 16, n. 3, p. 269-276, 1995.
- Ferreira, D.H.A. (2014). Crescimento de clone de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* em diferentes espaçamentos. *Floresta*, v. 44, n. 3, p. 431-440, 2014.
- Fischer, A. and Zylbersztajn, D. (2012). O fomento florestal como alternativa de suprimento de matéria-prima na indústria brasileira de celulose. *Revista Eletrônica de Administração*. n. 2, p. 494-520.
- International Association of Wood Anatomists - IAWA Committee. List of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bulletin* 1989; 10:219-332.
- Miranda, M.J.A.C.; Tomé, M. and Pereira, H. (2003). The influence of spacing on wood properties for *Eucalyptus globules* Labill pulpwood. *Appita Journal*, v. 56, n. 2, p. 140-144.
- Panshin, A.J. and De Zeeuw, C. (1980). *Textbook of wood technology*. 4 ed. New York: 722p.
- Pereira, H. and Araújo, C. (1990). Raw-material quality of fast grown *Eucalyptus globules* during the first year. *IAWA Bulletin*, Holanda, v. 11, n. 4, p. 421-427.
- Ramalho, R.S. (1987) O uso de macerado no estudo anatômico de madeiras. Viçosa. UFV, 4p.
- Sales, F.C.V. et al. (2015). Ajustes de modelos volumétricos para o clone *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* cultivados no agreste de Pernambuco. *Florestav*. 45, n. 4, p. 663-670.
- Samariha, A. (2011). The influence of tree's age on the physical properties and fiber length of *Eucalyptus camadulensis* in the Zabol Region at Iran. *Middle-East Journal of Scientific Research*, Tehran, v. 8, n. 5, p. 851-854.
- Sette Junior, C. R. et al. (2012). Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, Viçosa, MG, v. 36, n. 6, p. 1183-1190.
- Tienne, D.L.C. et al. (2009). Influência do espaçamento no ângulo das microfibrilas e comprimento de fibras de clone de eucalipto. *Revista Florestal Latino Americana*, v. 24, n. 1, p. 67-83.
- Tomazello Filho, M. (2006). Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* x *urophylla*, tese, Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiro



II. Transformación mecánica de la madera





MADEIRA CRUZADA COM ISOLAMENTO- UMA PROPOSTA DE UM NOVO TIPO DE PANEL ESTRUTURAL

CROSS INSULATED TIMBER – A NEW STRUCTURAL PANEL TYPE PROPOSAL

Pedro Santos^{1*}, Alfredo Dias¹, Luís Godinho¹, João Correia²

¹ISISE, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal

²Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal

* Contacto: alfgdias@dec.uc.pt

Resumo

La madera laminada cruzada (CLT) es un tipo de panel estructural que consta de varias capas compuestas de laminados de madera que se apilan en forma transversal para producir un sistema de madera maciza. Contudo CLT es un sistema de madera maciza que implica un volumen significativo de materia prima de madera para producir los paneles. Con esa limitación en mente, se propone el desarrollo de una solución de panel basada en CLT alternativa, o al menos complementaria, que haga uso de menos madera. Dicha solución se obtiene combinando los conceptos de paneles de madera aislados estructurales (SIP). Más específicamente, dicha solución consiste en reemplazar la capa interna de un panel CLT de cinco capas por uno hecho de un material rígido aislado (espuma rígida de poliuretano). Los paneles se producen y evalúan en términos de rendimiento mecánico como elementos de vigas o paredes, así como en términos de rendimiento térmico y acústico en una campaña experimental. Los resultados se presentan, lo que demuestra que este es un complemento potencial para los paneles comunes de CLT.

Palabras-clave: Paneles sándwich; Madera laminada cruzada; Panel aislante estructural

Abstract

Cross Laminated Timber (CLT) is a type of structural panel that consists of several layers composed of timber laminations that are stacked crosswise in order to produce a massive timber system. However, CLT is a massive wood system which implies a significant volume of wood raw material to produce the panels. With that limitation in mind, the development of an alternative, or at least complementary, CLT based panel solution that makes use of less wood is proposed. Such solution is obtained by combining the CLT and structural insulated timber panel (SIP) concepts. More specifically, such solution consists in the replacement of the inner layer of a five-layer CLT panel by one made of a rigid insulated material (polyurethane rigid foam). Panels are produced and evaluated in terms of mechanical performance as beam or wall elements in an experimental campaign. Panels are produced and evaluated in terms of mechanical performance as beam or wall elements as well in terms of thermal and acoustic performance in an experimental campaign. The results are presented, showing that this a potential complement to the common CLT panels.

Keywords: Sandwich panels; Cross-Laminated Timber; Structural Insulated Panel



1. INTRODUCTION

1.1. Background

Cross-Laminated Timber (CLT) is a type of structural product that consists of several layers of timber laminations stacked crosswise ideal to be included in massive timber construction systems. Such layouts, which significantly reduces the anisotropy of the panel, guarantees higher physical stability (e.g. reduced warping) and allows for easier and more efficient connections between elements, making these panels a versatile solution to bear both out-of-plane and in-plane loads (Crespell and Gagnon, 2010) (Karacabeyli & Douglas, 2013). This system has significant advantages with respect to traditional wood light-frame construction (higher dimensional stability, strength and stiffness capacities or easier connections possibilities, etc.), that open a completely new field for the use of timber in construction (Dias, et al., 2016). On the other hand, as this is a massive wood system, a significant volume of wood raw material is required to produce the panels and this is pointed out as one of the main barriers for CLT implementation (Espinoza, et al., 2016). In that context, the development of an alternative, or at least complementary, CLT based panel solution that makes use of less wood, combining mechanical performance with improved thermal insulation and reduced weight has been under study by the authors of the present paper. Such solution, named cross-insulated timber (CIT), consists of replacing the inner layer of a five-layer CLT panel by one made of a rigid insulated material (polyurethane rigid foam), as in the structural insulated timber panel (SIP) concept (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



Figura 1: Example of the panel solution cross-section under development.

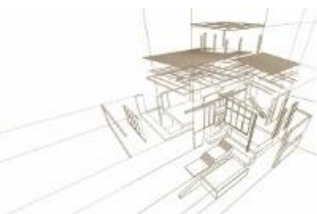
This paper presents the most relevant results obtained in the preliminary stages of the research carried out to develop the proposed innovative panel solution.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Introduction

In a research involving the development of a new product it is of outmost relevance the analysis and characterization of the materials used in the various components. This data is necessary for both the results analysis and as input in the models. The relevant properties to use as input in the analytical/numerical models were obtained from experimental tests and bibliography.

From the bibliographic review, it is found that the relevant properties to know for each component on sandwich type panels include the modulus of elasticity of the skins, the shear



modulus of the core, the bending strength of the skins and the shear and compressive strength of the core.

2.2. Material characterization - Wood elements

The modulus of elasticity (MOE) of the wood elements was determined for each one of the lamellas of the tested elements prior to gluing. For that propose, the dynamic modulus of elasticity, which has high correlation with the static modulus of elasticity for sawn wood beams (Hodoušek, et al., 2017), was determined with basis on axial vibration test.

The other properties, namely the bending strength, shear modulus and shear strength were not determined by experimental tests, so reference values found in the works of (Machado, et al., 2014)(Xavier, et al., 2009)(Bucur, 2016)(Santos, 2017) were considered. Regarding the definition of the rolling shear modulus, no distinguish was made between the transversal-longitudinal and the longitudinal-radial planes, so a mean value was assumed form those collected from the cited works. The mean values and coefficient of variation for the mechanical properties of the wood elements considered in the analytical models are shown in *Table 1: Mean values and coefficient of variation for the wood layers' mechanical properties*

Table 1: Mean values and coefficient of variation for the wood layers' mechanical properties

Material		E (MPa)	G ₀ (MPa)	G ₉₀ (MPa)	f _m (MPa)	f _r (MPa)
Maritime pine	Mean	17520	1210	239	149	4.6
	CV (%)	11.5	6.1	19.8	-	12.3
Australian blackwood	Mean	15196	1366	384	139	-
	CV (%)	6.6	-	-	-	-

2.3. Material characterization - Polyurethane foam

The manufactures of the foam only provided little or incomplete information related to the mechanical properties of the same, most related with the compressive strength. So in order to fully characterize the relevant properties namely, shear, compression and tension, a set of experimental tests were conducted following procedures found on relevant standard or scientific works. In Figure 1 is shown an example of a test setup for compression and the corresponding result. In general the mechanical behavior observed in compression was plastic behavior with the foam hardening while in tension a linear elastic behavior until a brittle failure was observed. A summary of the results obtained is presented in Table 2.

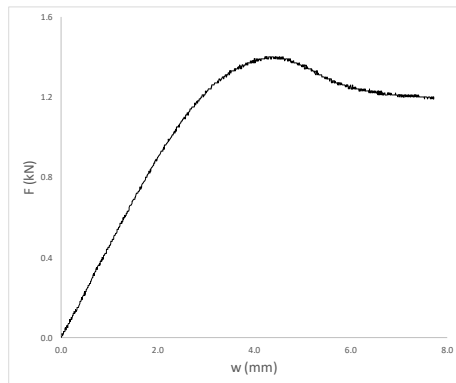
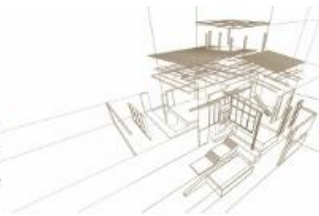


Figura 1: Test setup and load slip example of the Polyurethane characterization – Compression test.

Table 6: Mean values and standard deviations for mechanical properties of the polyurethane foam. Note: E – modulus of elasticity; G – shear modulus; f_c – compressive strength; f_t – tensile strength; f_v – shear strength; fw – flatwise; ew – edgewise.

	$E_{c, fw}$ (N/mm^2)	$E_{c, ew}$ (N/mm^2)	$E_{t, fw}$ (N/mm^2)	G (N/mm^2)	$f_{c, fw}$ (N/mm^2)	$f_{c, ew}$ (N/mm^2)	$f_{t, fw}$ (N/mm^2)	f_v (N/mm^2)
Mean	7.86	3.81	14.15	3.01	0.26	0.14	0.26	0.12
CV (%)	7.8	20.3	7.2	17.2	4.3	5.1	6.9	7.0

2.4. Material characterization - Adhesive layers

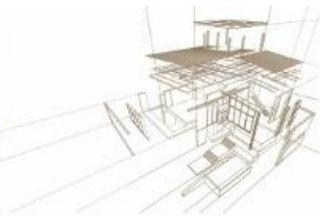
According to EN 16351 (CEN, 2015) a minimum shear strength value of 1.00 MPa per glue line and a characteristic value of 1.25 MPa shall be ensure in between wood cross-layers. Those same values were fulfilled using a one-component polyurethane adhesive (140 g/m^2) with pre-application of a polyol primer (20 g/m^2) and a bonding pressure of 0.6 MPa, for both Maritime pine and combined Maritime pine/Australian blackwood (Santos, et al., 2019). The shear strength values obtained in tests are shown in Table 7.

Table 7: Shear strength of the glue lines values obtained in tests according to EN16351 for the wood glued elements.

Material		f_v (N/mm^2)
Maritime pine + Maritime pine	Mean	5.77
	CV (%)	23.0
Maritime pine + Australian blackwood	Mean	5.60
	CV (%)	21.0

The comparison of the shear strength of the glue lines with the shear strength of the polyurethane foam (Table 6) shows that the foam is the most fragile element.

In order to ensure an adequate bonding between the faces and the core, ETAG 016-1 (EOTA, 2003a) refers a tensile strength test, for which the failure should not occur at the bond layer. A series of tests were conducted on bonded specimens with a two-component polyurethane



adhesive (SikaForce L100) made of a polyurethane foam layer between two Maritime pine layers. From the conducted tests. It was found that a bonding pressure of 0.1 MPa was enough to ensure that failure would occur totally at the foam and not at the glue line.

3. EXPERIMENTAL TESTS

3.1. Specimens preparation

In the manufacturing of the beams, the bonding specifications were followed in accordance to the results described above. To assemble the wood parts to the polyurethane foam, an adhesive spread rate of 350 g/m^2 and a bonding pressure of 0.1 MPa were considered. The beam specimens were not edge bonded and the external layers were composed by only one board, so that no finger-joint unions were used. Depending on the available materials, different layer thickness for the wood and polyurethane elements were considered, which for wood ranged from 10 to 35 mm and to polyurethane from 30 to 120 mm. It should be noticed, that such were not defined with basis on design, as the main purpose here was to validate the prediction models.

3.2. Test setup – beam

In order to assess the mechanical behaviour of the developed panels when subjected to out-of-plane loads (floor) and validate the analytical/numerical models to describe such behaviour, an experimental campaign was carried out. The experimental campaign included bending tests on both beams and panels following the ASTM C393 (ASTM, 2011b) and EN 408 (CEN, 2012) guidelines. The beams, simply supported, were subject to a four point loading scheme and the mid-span deflection in measured. From the results it was possible to obtain the global stiffness of the beam as well its behaviour up to failure. Figure 2 shows the setup for a beam.

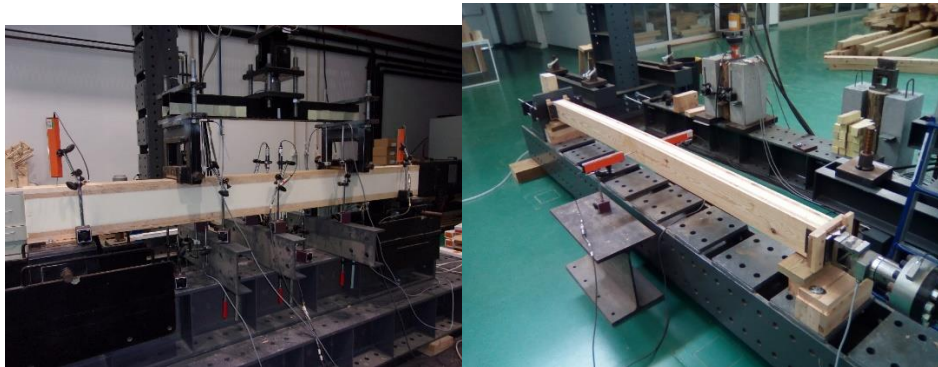
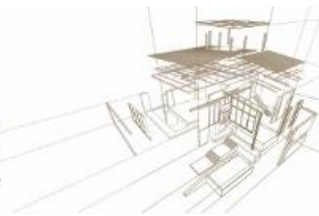


Figure 2: Examples of a beam test setup for bending test and lateral deflection observed during the buckling test

3.3. Test setup – columns

In order to assess the mechanical behavior of the developed panels when subjected to in-plane loads (wall) and validate the analytical models to describe such behavior, an experimental campaign was carried out. The experimental campaign included concentric loading on column type-elements following the guidelines from ASTM E1803 (ASTM, 2014). The columns, simply supported, were subject to a punctual load acting at one top and the mid-span deflection was measured. Figure 2 shows the setup for a column.



The global buckling load was determined from the load/deflection curve using the method presented by (Southwell, 1932). Providing that the plotted load/deflection curve is roughly a rectangular parabola passing through the origin, a linear regression is obtained between the deflection/load vs deflection curve, for which the inverse of the slope corresponds to the least critical buckling load.

4. TEST RESULTS

4.1. Beams

From the analysis of the experimental results, it is found good agreement between the experimental values from the load-deflection curve (Figure 3), up to the end of the linear behavior of the beams, and the analytical models typically used for sandwich panels and cross laminated timber, namely the Timoshenko and Kreuzinger beam models (see Table 4). For the description of the non-linear behavior observed, a model considering the non-linear behavior of the material (polyurethane foam) was developed using the commercial finite element (FEM) package Abaqus, with good agreement with the experimental results (Figure 3).

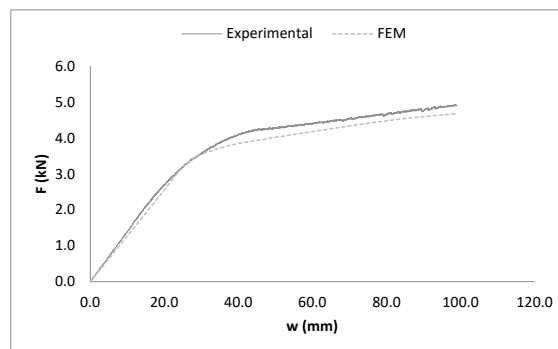


Figure 3: Example of load-deflection curve obtained in experiments and comparison with the result from the finite element model.

Table 4: Relative error estimation (Δ) of the experimental force-deflection relation using the Kreuzinger and Timoshenko beam theories.

	Δ Kreuzinger (%)	Δ Timoshenko (%)
Mean	1	3
Standard deviation	6	6

The shear failure at the foam layer was always the failure mode observed in the bending tests.

4.2. Columns

Similarly to what was observed in the beam tests from the analysis of the experimental results, it is found good agreement between the experimental values of the buckling load obtained from the load-deflection curve (Figure 4) with the ones obtained by the analytical model proposed by (Allen, 1969) for the buckling load for pin-ended sandwich panels (Table 5).

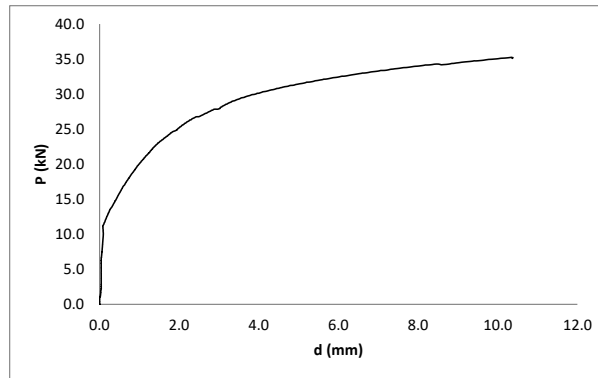
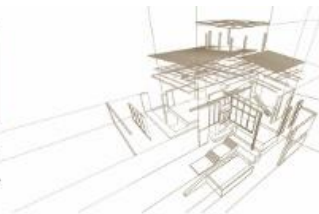


Figure 4: Example of lateral mid-height deflection vs load curve obtained in the buckling tests.

Table 5: Relative error estimation (Δ) of the buckling load by the analytical model.

	Δ Allen (%)
Mean	-2
Standard deviation	5

4.3. Acoustic and thermal characterization

Panels were produced and evaluated in terms of acoustic performance in an experimental campaign with respect to the determination of airborne and impact sound insulation. Two configurations were tested, one with the wood layers with 10 mm thickness (CIT 70) and the other with 35 mm (CIT 170); both types had a 30 mm thick polyurethane core. Besides the referred panels, also equivalent thickness massive solutions in CLT were tested (plus a 6 cm thick reinforced concrete floor and a traditional wooden floor for the impact tests). The results (Figure 5) shows that the developed panel solutions have lower insulation in comparison with the CLT corresponding solutions, however they still perform quite well with mean weighted sound reduction index (R_w) between 38-47 dB and weighted normalised impact sound pressure level (L_{nw}) values of 88-95 dB.

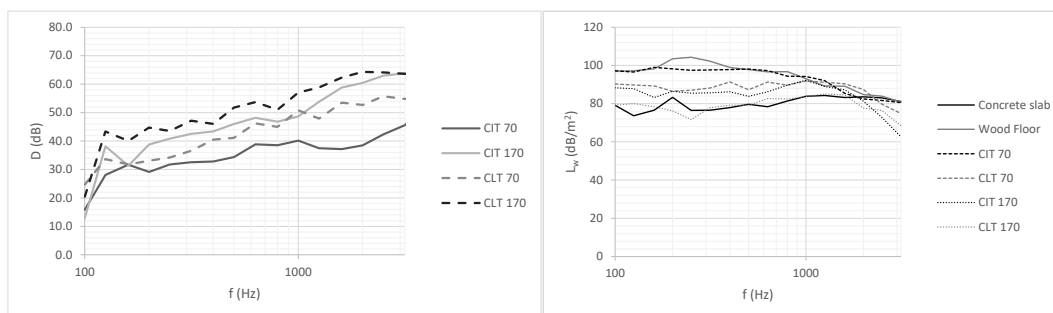


Figure 5: Comparison of the airborne and impact sound insulation curve for the different panels tested.

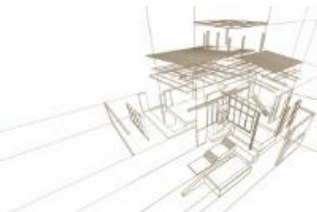


Table 6: Weighted sound reduction index and weighted normalised impact sound pressure level for the panels tested.

	R_w (dB)	$L_{n,w}$ (dB)
Concrete slab	-	89
Wooden floor	-	97
CLT 70	46	92
CLT 170	53	85
CIT 70	38	95
CIT 170	47	88

The same panel typologies (CIT 70 and CIT 170) were evaluated in terms of thermal resistance in an experimental campaign using an experimental setup based on ASTM C1155 (ASTM, 1995). The thermal resistance (R) of the panels was estimated with basis on the conductivity coefficient of the component materials from documented values for Maritime pine wood ($0.23 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$) and from the manufacturer of the polyurethane foam ($0.021 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$). The comparison of the predicted vs experimental values (presented on Table 7) shows a good agreement, which confirms the expected insulation of the tested solutions.

Table 7: Comparison between the thermal resistance (R) obtained experimentally vs predicted.

	R ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$)	
	Experimental	Predicted
CIT 70	1.576	1.538
CIT 170	2.135	1.972

5. FINAL REMARKS

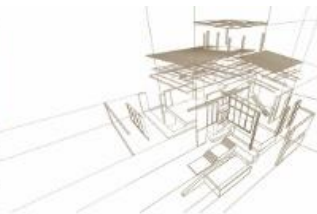
This paper presents preliminary results from a research work undertaken to develop an innovative hybrid panel with functional characteristics similar to those of conventional CLT.

The research included the assessment of the materials used as well as of the panel prototypes developed. These included mechanical, thermal and acoustic tests.

The mechanical tests showed a significant decrease in the performance when compared to the results that would be expected from a conventional CLT configuration (massive wood system). The results obtained were compared with those obtained with FEM and analytical models and good correlations were obtained.

In what regards to functional performance the results obtained, with the various configurations tested, showed the potential of the developed solution for sound insulation proposes and to fulfil the thermal requirements for most of current practical applications.

Overall these preliminary results demonstrate that the developed solutions are well suited to replace conventional CLT in many situations, becoming an very interesting complement to the common CLT panels.



ACKNOWLEDGEMENTS

This work was partly financed by FEDER funds through the Competitiveness Factors Operational Programme – COMPETE and by national funds through FCT – Foundation for Science and Technology, within the scope of the Project POCI-01-0145-FEDER-007633. The authors acknowledge the financial support of the Operational Program Competitiveness and Internationalization R&D Projects Companies in Co-promotion, Portugal 2020, within the scope of the project OptimizedWood – POCI-01-0247-FEDER-017867. The authors wish to thank Foundation for Science and Technology for the PhD grant PD/BD/113786/2015 given to Pedro Santos.

REFERENCES

- Allen, H., 1969. *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*. London: Pergamon press.
- ASTM, 1995. Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-Situ Data. *ASTM C1155*.
- ASTM, 2011b. Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure. *ASTM C393/C393M*.
- ASTM, 2011b. Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure. *ASTM C393/C393M*.
- ASTM, 2014. Standard Test Methods for Determining Structural Capacities of Insulated Panels. *ASTM E1803*.
- Bucur, V., 2016. *Handbook of Materials for String Musical Instruments*. 1 ed. Melbourne, Australia: Springer.
- CEN, 2012a. Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. *EN 408*.
- CEN, 2012. Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. *EN 408*.
- CEN, 2015. Timber structures - Cross laminated timber - Requirements. *EN 16351*.
- Dias, A., Skinner, J., Crews, K. & Tannert, T., 2016. Timber-concrete-composites increasing the use of timber in construction. *Eur. J. Wood Prod.*, 74(3), pp. 443-451.
- EOTA, 2003a. Guideline for European Technical Approval of Self-Supporting Composite Lightweight Panels. Part 1: General.. *ETAG 016-1*.
- Espinoza, O., Trujillo, V., Mallo, M. & Buehlman, U., 2016. Cross-Laminated Timber: Status and Research Needs in Europe. *BioResources*, 11(1), pp. 281-295.
- Hodoušek, M. et al., 2017. Comparison of Non-Destructive Methods Based on Natural Frequency for Determining the Modulus of Elasticity of *Cupressus lusitanica* and *Populus x canadensis*. *BioResources*, Volume 12, pp. 270-282.
- Karacabeyli, E. & Douglas, B., 2013. *CLT Handbook U.S. Edition*. Quebec: FPIInnovations.
- Knorz, M., Torno, S. & Kuilen, J.-W., 2017. Bonding quality of industrially produced cross-laminated timber (CLT) as determined in delamination tests. *Construction and Building Materials*, Volume 133, p. 219–225.



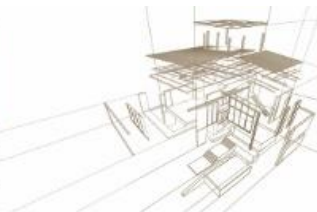
Machado, J. et al., 2014. Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.). *Materials and Design*, Volume 56, p. 975–980.

Santos, J., 2017. *A riqueza das madeiras portuguesas - Propriedades e fichas técnicas*. Porto: AIMMP.

Santos, P. et al., 2019. Bonding quality assessment of cross-layered Maritime pine elements glued with one-component polyurethane adhesive. *Construction and Building Materials*, Volume 211, pp. 571-582.

Southwell, R., 1932. On the analysis of experimental observations in problems of elastic stability. *Proc R Soc A Math Phys Eng Sci*, Volume 135, pp. 610-616.

Xavier, J., Oliveira, M., Morais, J. & Pinto, T., 2009. Measurement of the shear properties of clear wood by the Arcan test. *Holzforschung*, Volume 63, p. 217–225.



ABSORÇÃO DE ÁGUA E INCHAMENTO EM COMPENSADOS COLADOS COM ADESIVO NATURAL POLIURETANO À BASE DE MAMONA E COM ADESIVO FENOL-FORMALDEÍDO

ABSORPTION OF WATER AND SWELLING OF PLYWOOD PRODUCED WITH NATURAL POLYURETHANE ADHESIVE BASED ON CASTOR BEAN

Julia C. Athanázio-Heliodoro^{(1)*}, Gabriel F. D'Elacqua-Santos⁽²⁾, Hernando A. Lara-Palma⁽³⁾,
Adriano W. Ballarin⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Doutoranda Ciência Florestal. Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu – UNESP. Botucatu-SP, Brasil

⁽²⁾ Engenheiro Florestal, Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu – UNESP. Botucatu-SP, Brasil

⁽³⁾ Professor Assistente Doutor. Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu – UNESP. Botucatu-SP, Brasil

⁽⁴⁾ Professor Titular. Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu – UNESP. Botucatu-SP, Brasil

* Contacto: juliaheliodoro@hotmail.com

Resumen

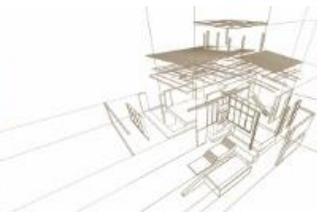
O painel compensado possui usos consagrados na construção civil e indústria moveleira, além de usos específicos como componentes de carrocerias de caminhões onde está exposto frequentemente à água. Este trabalho parte de um estudo mais amplo que intuito desenvolver painéis compensados de durabilidade prolongada quando expostos a condições adversas; compara o uso tradicional do adesivo fenólico com o alternativo poliuretano, à base de óleo de mamona hidrorrepelente, biodegradável, não-tóxico e proveniente de fonte natural renovável. Dois tipos de painéis foram produzidos com madeira de *Pinus taeda* em dimensões comerciais (1220mm × 2440mm), com utilização de 360 g.m⁻² de cola em linha dupla. Os painéis com resina fenólica foram pré-prensados a frio e posteriormente, prensados a quente por 20 min (pressão de 1,2 MPa e temperatura de 130°C) e os painéis com resina poliuretana foram prensados diretamente por 30 min (pressão de 1,2 MPa e temperatura de 65°C). A densidade foi 486kg.m⁻³ e 490kg.m⁻³ para painéis com resinas fenólica e poliuretana, respectivamente. A absorção de água evidenciou diferença estatística de comportamento nos dois tipos de painéis (p<0,01): 56% e 42% para painéis com resinas fenólica y poliuretana, respectivamente. Para o inchamento em espessura também foi detectada diferença estatística: painéis com resina poliuretana incharam 3,69% e tiveram inchamento mais recuperação em espessura de 6,16%; para painéis com resina fenólica estes valores foram de 6,11% e 9,69%, respectivamente. Os resultados diferenciados nas propriedades podem ser atribuídos ao efeito hidrorrepelente do adesivo poliuretano.

Palabras-clave: compensado, poliuretana, fenólica, inchamento

Abstract

Plywood panels have well-established uses in civil construction and furniture industry, as well as specific uses such as components of truck bodies where they are frequently exposed to water. This work is part of a large study aiming to increase plywood durability when exposed to adverse conditions; compares the use of traditional phenolic- with alternative polyurethane-adhesive based on castor oil which, is water repellent, biodegradable, non-toxic and comes from a renewable natural source. Two types of panels were produced with *Pinus taeda* in commercial dimensions (1220mm × 2440mm), using 360 g.m⁻² glue in double line. The panels with phenolic resin were pre-cold-pressed and then hot-pressed for 20 min (1.2 MPa pressure and 132°C temperature). Those produced with polyurethane were pressed directly for 30 min (pressure of 1.2 MPa and temperature of 65°C). The density was 486kg.m⁻³ and 490kg.m⁻³ for panels with phenolic and polyurethane resins, respectively. The water absorption behavior showed statistical differences between the two types of panels (p <0.01), being 56% and 42% for those with phenolic and polyurethane resin, respectively. Statistical difference was also observed in thickness swelling: panels with polyurethane swelled 3.69% and had swelling plus recovery in thickness of 6.16%; panels with phenolic, showed values of 6.11% and 9.69%, respectively. The different property results can be attributed to the water repellent effect of the polyurethane adhesive.

Keywords: plywood, polyurethane, phenolic, swelling



1. INTRODUÇÃO

Com usos consagrados na construção civil e indústria moveleira, o painel compensado também tem se destacado por usos específicos na indústria de ônibus, caminhões, vagões de trens e contêineres e por sua aplicação crescente como matéria-prima de construções habitacionais do tipo *Wood Frame*, sistema com mercado crescente devido à sua qualidade, custos competitivos e rápida execução.

É essencial que componentes produzidos com materiais higroscópicos como a madeira e que possam ser expostos à umidade, como é o caso de aplicações em carrocerias de meios de transporte e sistemas construtivos, tenham algum tipo de proteção hidrorrepelente para garantir sua maior durabilidade. A produção de painéis de madeira de maior resistência à umidade, aumentando assim a sua qualidade e durabilidade, diminuiria ainda mais a pressão sobre as florestas nativas e sobre os demais produtos não renováveis (TUFOLO NETTO, 2010).

Uma das opções para aumentar a capacidade hidrorrepelente dos compensados é a utilização de adesivos que tenham um comportamento hidrorrepelente, como é o caso do fenol-formaldeído (FF), tradicionalmente utilizado na indústria de compensados. O FF tem boa resistência à umidade, durabilidade e adesão com a madeira, sendo indicado para colagem de produtos para uso externo (FRIHART, 2013).

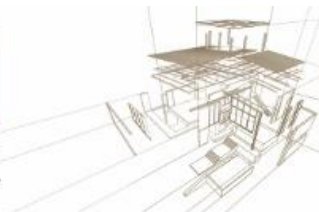
No entanto, esse adesivo apresenta alto consumo de energia devido às altas temperaturas exigidas para a cura, pode emitir formaldeído livre (na forma de gás) durante a prensagem e nos primeiros dias seguintes a ela, o que pode causar irritações nasais, nos olhos, garganta e pele, tosse e alergias (GUPTA; ULSAMER; PREUSS, 1982; MÄKINEN; KALLIOKOSKI; KANGAS, 1999; BÖHM; SALEM; SRBA, 2012), além de serem provenientes do petróleo, uma fonte não-renovável que dificulta o descarte dos resíduos e limita o seu uso (PETERSON, 1964; SAMLAIC, 1983).

Uma alternativa a esses adesivos seria o uso alternativo do adesivo poliuretano à base de óleo de mamona que, além de possuir propriedades hidrorrepelentes, é biodegradável, não-tóxico e proveniente de fonte natural renovável (THORAT; TAYDE, 2015; DIAS; LAHR; ROCCO, 2004). Este adesivo também pode ser utilizado para outras finalidades, por apresentar boas propriedades de adesão, versatilidade química, resistência ao intemperismo e flexibilidade de formulação, além de umectar efetivamente a superfície de fibras lignocelulósicas, promovendo boa ligação entre fibras de madeira (SILVA et al., 2010).

Este adesivo à base de mamona (*Ricinus communis*) – PU – tem se mostrado uma alternativa viável para uso em compensados (DIAS; LAHR; ROCCO, 2004) e outros painéis de madeira (FERRO et al., 2015; 2016; PEREIRA et al., 2016) pois permite manuseio e prensagem à temperatura ambiente - diminuindo os custos de produção - além de ser resistente à ação dos raios ultravioleta e possuir alta resistência mecânica (JESUS, 2000; AZAMBUJA; DIAS, 2006). A resina também já foi testada em laminados usados no interior de aeronaves, com resultados superiores ao adesivo de contato tradicional (BORGES, 2015) e tem potencial para produzir painéis de alta durabilidade (resistência biológica) devido às suas propriedades antifúngicas, antimicrobianas e antibacterianas (TAKANO et al., 2007; SALLES et al., 2015; GAHUKAR, 2017; SUURBAAR; MOSIBIL; DONKOR, 2017; BADARO et al., 2017).

Pesquisas recentes comprovaram a capacidade hidrorrepelente deste adesivo em EGP - painéis colados lateralmente (MÖLLEKEN, 2016, 2017) e em painéis aglomerados (SUGAHARA, 2018 e SUGAHARA et al., 2019) quando comparados a painéis colados com resina FF e UF.

Com o intuito de desenvolver painéis compensados de alta qualidade e durabilidade prolongada, produzidos com um adesivo que demande um menor consumo de energia para a cura, que não seja



tóxico ou prejudicial ao meio ambiente e à saúde humana e que seja proveniente de fontes renováveis, busca-se com este trabalho verificar a efetividade da resistência à umidade de painéis compensados produzidos com dois tipos de adesivos.

2. MATERIALES E MÉTODOS

2.1. PRODUÇÃO DOS PAINÉIS COMPENSADOS

A madeira utilizada na produção dos compensados foi proveniente de plantios de *Pinus taeda*. Foram estudados dois tratamentos: painéis compensados prensados com resina fenólica (FF) e painéis prensados com resina poliuretana (PU), com cinco repetições cada (10 painéis no total).

Todos os painéis compensados foram produzidos numa indústria de compensados, seguindo as variáveis do processo de fabricação usuais da indústria, bem como as recomendações dos fabricantes das resinas utilizadas. Foram confeccionados com sete lâminas (espessura nominal de 2,5mm cada) e dimensões comerciais (2440 mm de comprimento × 1220 mm de largura).

A resina fenol-formaldeído utilizada foi a CASCOPHEN HL-7090 HS da marca CASCO® - Hexion, com aplicação de 360 g.m⁻² (linha dupla de colagem). Os painéis produzidos com esta resina foram pré-prensados a frio a 6 kgf.cm² por 10 min e prensados a quente a 130°C a 12 kgf.cm² por 20 min.

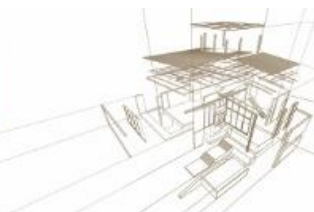
A resina poliuretana à base de mamona utilizada foi a AGT 1315 da marca IMPERVEG®, sendo aplicada na mesma gramatura (360 g.m⁻² em linha dupla). Neste caso os painéis produzidos foram diretamente para a prensa a quente, a 60°C e 12 kgf.cm² por 30 minutos. A aplicação da resina PU, feita com rolos e de forma inédita em painéis com dimensões comerciais, foi precedida de testes-piloto preliminares com acompanhamento dos técnicos responsáveis da empresa IMPERVEG, fabricante da resina e apoiadora do projeto.

2.2. CONFEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E ENSAIOS GERAIS

Para avaliação do desempenho dos painéis compensados quando expostos à umidade foram realizados os ensaios de absorção e inchamento em espessura, atendendo-se no geral às prescrições das normas indicadas na Tabela 1 e da NBR 9488/2011, que determina as condições de amostragem de compensado para ensaio. Os ensaios foram realizados em corpos de prova condicionados à temperatura de 20 ± 3°C e umidade relativa de 65 ± 5% conforme prescrito na norma NBR 9489/2011.

Tabela 1: Ensaios realizados e normas utilizadas

Ensaios	Normas
Densidade aparente	ABNT NBR 9485 / 2011
Teor de umidade	ABNT NBR 9484 / 2011
Inchamento	ABNT NBR 9535 /2011
Absorção	ABNT NBR 9486 / 2011



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados (Tabela 2) evidenciam que para ambos os tratamentos – PU e FF – a umidade dos painéis foi de 8,1%. A densidade foi 486 kg.m⁻³ e 490 kg.m⁻³ para painéis colados com resinas fenólica e poliuretana, respectivamente, valores que não apresentaram diferença estatística entre si ao nível de 5% de probabilidade no teste-T, utilizado para verificar todos os resultados. Apesar de apresentarem pouca variação entre tratamentos e dentro de cada tratamento (coeficientes de variação de 0,2%) os valores encontrados ficaram abaixo dos normalmente apresentados na literatura para painéis compensados de Pinus spp. (MACEDO et al., 2019 e CAMPOS et al., 2009, por exemplo).

Tabela 2: Resultados dos ensaios físicos

	Fenólica	Poliuretana
Densidade (kg.m ³)	486 a	490 a
Umidade	8,10% a	8,05% a
Inchamento + Recuperação em espessura (I+RE)	9,70 a	6,17 b
Recuperação em espessura (RE)	3,59 a	2,47 a
Inchamento (I)	6,11 a	3,70 b
Absorção (A)	56% a	42% b

Nota: As médias seguidas pela mesma letra, na mesma linha, não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste t ao nível de 5% de probabilidade ($p < .05$).

Os resultados (Figura 1) de Inchamento mais recuperação em espessura (I+RE), Inchamento (I), Recuperação em espessura (RE) e absorção (A) dos dois grupos de painéis compensados apontam sempre valores melhores, ou seja, menores níveis de absorção e inchamento para painéis prensados com a resina poliuretana.

Para a absorção de água evidenciou-se diferença estatística de comportamento dos dois tipos de painéis a nível de 1% de probabilidade no teste-T ($p < 0,01$) sendo de 56% para painéis com resina fenólica e 42% para painéis com resina poliuretana mostrando a eficiência do adesivo alternativo para proteção do painel contra umidade. Ambos os resultados de absorção foram menores que os reportados por MACEDO et al. (2019) e CAMPOS et al. (2009), respectivamente de 65% e 68% que também utilizaram resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona para prensagem dos painéis.

No caso do teste de inchamento em espessura também foi detectada diferença estatística ao nível de 1% de probabilidade no comportamento: os painéis prensados com resina poliuretana incharam 3,69% e tiveram inchamento mais recuperação em espessura de 6,16%; já painéis prensados com a resina fenólica, os valores foram bastante superiores: 6,11% e 9,69%, respectivamente.

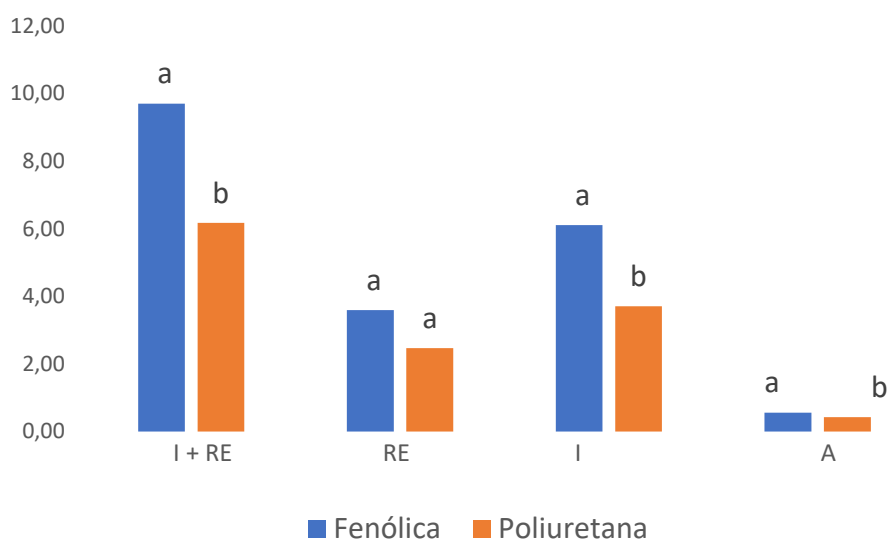


Figura 1: Resultados dos ensaios de Inchamento mais recuperação em espessura (I+RE), Inchamento (I), Recuperação em espessura (RE) e absorção (A)

Para os dois tratamentos estudados (FF e PU) não foi constatada diferença significativa entre a densidade do painel e sua absorção de água, como havia sido reportado por constatado por Campos et al.(2009).

4. CONCLUSÃO

Houve influência significativa do tipo de adesivo (FF e PU) na absorção de água e inchamento em espessura dos painéis. O melhor desempenho dos painéis PU só pode ser atribuído ao efeito hidrorrepelente do adesivo poliuretano.

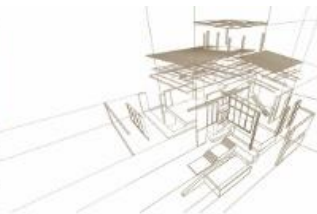
Os resultados mostraram também que não houve influência da densidade do painel compensado na absorção de água.

AGRADECIMENTOS

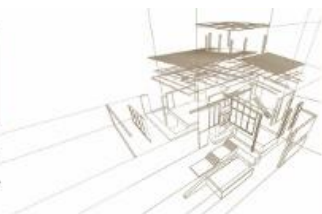
Este trabalho contou com o apoio das seguintes instituições: Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu – FCA/UNESP; Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES; Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP; Instituto de Pesquisas tecnológicas – IPT e Fundação do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – FIPT.

BIBLIOGRAFIA

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2011) NBR 9486 - Compensado - Determinação da absorção de água – Requisitos. Rio de Janeiro.



- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2011) NBR 9488 - Amostragem de compensado para ensaio – Requisitos. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (1986) NBR 9484 - Compensado – determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (1986) NBR 9485 - Compensado – determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2011) NBR 9489 - Condicionamento de corpos de prova de compensados para ensaios – Requisitos. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2011) NBR 9535 - Painéis de madeira compensada: determinação da recuperação em espessura e inchamento mais recuperação em espessura. Rio de Janeiro.
- Azambuja, M. A.; Dias, A. A. (2006) Use of castor oil-based polyurethane adhesive in the production of glued laminated timber beams. *Mat. Res.*, São Carlos, v. 9, n. 3, p. 287-291.
- Badaro, M.M.; Salles, M.M.; Leite, V.M.F.; Arruda, C.N.F.; Oliveira, V.C.; Nascimento, C.; Souza, R.F.; Paranhos, H.F.O.; Silva-Lovato, C.H. (2017) Clinical trial for evaluation of *Ricinus communis* and sodium hypochlorite as denture cleanser. *J. Appl. Oral Sci.*, Bauru, v. 25, n. 3, p. 324-334.
- Böhm, M.; Salem, M.Z.M.; Srba, J. (2012) Formaldehyde emission monitoring from a variety of solid wood, plywood, blockboard and flooring products manufactured for building and furnishing materials. *Journal of Hazardous Materials*, 221–222, 68–79.
- Borges, A.T. (2015) Avaliação Preliminar da Aplicação de Adesivo de Poliuretano a Base de Mamona no Interior de uma Aeronave. Tese (Engenharia Aeronáutica Espacial). ITA.
- Campos, C.I.; Morais, R.D.V; Nascimento, M.F. (2009) Caracterização físico-mecânica de painéis de madeira compensada produzida com *Pinus* spp. e resina poliuretana bi-componente. *Revista Madeira arquitetura & engenharia*. N. 24. 10.
- Dias, F. M.; Lahr, F. A. Rocco. (2004) Alternative castor oil-based polyurethane adhesive used in the production of plywood. *Mat. Res.*, São Carlos, v. 7, n. 3, p. 413-420.
- Ferro, F. S.; Almeida, T. H.; Almeida, D. H.; Christoforo, A. L.; Rocco Lahr, F. A. (2016) Physical Properties of OSB Panels Manufactured with CCA and CCB Treated *Schizolobium amazonicum* and Bonded with Castor Oil Based Polyurethane Resin. *International Journal of Materials Engineering*. 6(5): 151-154.
- Ferro, F. S.; Icimoto, F. H.; Souza, A. M.; Almeida, D. H.; Christoforo, A. L.; Rocco Lahr, F. A. (2015) Produção de painéis de partículas orientadas (OSB) com *Schizolobium amazonicum* e resina poliuretana à base de óleo de mamona. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 43, n. 106, p. 313-320.
- Frihart, R. C. (2013) Wood Adhesion and Adhesives. In: ROWELL, M. R. Handbook of wood chemistry and wood composites. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, Cap. 9.
- Gahukar, R.T. (2017) A review of castor-derived products used in crop and seed protection, *Phytoparasitica*, 45: 655.
- Gupta, K.C.; Ulsamer, A.G.; Preuss, P.W. (1982) Formaldehyde in indoor air: Sources and toxicity, *Environment International*, 8, 1–6, 349-358.
- Jesus, J.M.H. (2000) Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC). São Carlos, 106p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.



Macedo, L. B. De; Aquino, V. B. De M.; Wolenski, A. R. V.; Christoforo, A. L.; Lahr, F. A. R. (2019) Paineis híbridos de lâminas e partículas de madeira para uso estrutural. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 15-23.

Mäkinen, M.; Kalliokoski, P.; Kangas, J. (1999) Assessment of total exposure to phenol-formaldehyde resin glue in plywood manufacturing. *Int Arch Occup Environ Health*, 72: 309.

Mölleken, R.E.; Trianoski, R.; Neto, S.C.; Pereira, C.R.; Iwakiri S.; Azevedo, E.C. (2016) Evaluation of pressing time in the production of edge glued panel with adhesive polyurethane derived from castor oil. *Appl Adhes Sci*. 4:9.

Mölleken, R E. (2017) Aplicação do adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona na obtenção de painéis de madeira colados lateralmente. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Pereira, C. R.; Mölleken, R. E.; Souza, F. H.; Capellari, G. S.; Claro Neto, S.; Azevedo, E. C. (2016) Evaluation of MDF bonding with polyurethane of castor oil. *Applied Adhesion Science*. 4:13.

Peterson, R.W. (1964) Wood adhesives, Forest Products Research Branch. Ottawa, n. 1055.

Salles, M.M.; Badaró, M.M.; Arruda, C.N.F.; Leite, V.M.F.; Silva, C.H.L., Watanabe, E.; Oliveira, V.C.; Paranhos, H.F.O. (2015) Antimicrobial activity of complete denture cleanser solutions based on sodium hypochlorite and *Ricinus communis* – a randomized clinical study. *Journal of Applied Oral Science*, 23(6), 637-642.

Samlaic, J. (1983) Os atuais problemas e as possibilidades dos adesivos para madeira, *Revista da Madeira*, n. 374, p. 7-10.

Silva, B. B. R.; Santana, R. M. C.; Forte, M. M. C. (2010) A Solventless Castor Oil based PU adhesive for wood and foam substrates. *International Journal of adhesion and adhesives*. Porto Alegre/RS, Brazil, p. 559-565. 15 May.

Silva, B.C.; Vieira, M.C.; Oliveira, G.L.; Gonçalves, F.C.; Rodrigues, N.D.; Lelis, R.C.C.; Iwakiri, S. (2012) Qualidade de Compensados Fabricados com Adesivos à Base de Tanino-formaldeído de *Pinus oocarpa* e Fenol-formaldeído. *Floresta e Ambiente*, 19(4):511-519.

Sugahara, E. S. (2018) Painéis aglomerados produzidos com partículas de eucalipto e bagaço de cana, com adesivos ureia formaldeído e poliuretano à base de mamona. Tese de doutorado.

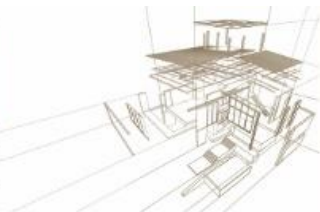
Sugahara, S.E.; Da Silva, A.M.S.; Buzo, S.C.A.; De Campos, I.C.; Morales, M.E.; Ferreira, S.B.; Azambuja, A.M.; Rocco Lahr, F.; Christoforo, A. (2019) High-density Particleboard Made from Agro-industrial Waste and Different Adhesives. *BioResources*, 14(3), 5162-5170.

Suurbaar, J.; Mosobil, R.; Donkor, A. (2017) Antibacterial and antifungal activities and phytochemical profile of leaf extract from different extractants of *Ricinus communis* against selected pathogens. *BMC Research Notes*, 10:660.

Takano, E.H.; Busso, C.; Golçalves, E.A.L.; Chierice, E.O.; Catanzaro-Guimarães, S.A.; Catro-Prado, M.A.A. (2007) Inibição do desenvolvimento de fungos fitopatogênicos por detergente derivado de óleo da mamona (*Ricinus communis*). *Cienc. Rural*, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1235-1240.

Thorat, P. V.; Tayde, S. S. (2015) A Review on Castor Oil based Polyurethane Adhesive. *International Journal of Emerging Trend in Engineering and Basic Sciences*. 2, 2, 97-102.

Tufolo Netto, H.; Gaiane, J. H.; Carlos, V. J. (1986) Uso de compensados de madeira tratada a pressão, no Brasil. *Anais. II Encontro Brasileiro em preservação de madeiras*.



COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE VIGAS DE MADERA REUTILIZADA UNIDA CON BAMBÚ (*Guadua angustifolia kunth*)

BENDING PERFORMANCE OF BEAMS MADE WITH REUSED WOOD UNITED WITH BAMBOO (*Guadua angustifolia kunth*)

Guerra Riaño, Andrés Felipe ⁽¹⁾*; Lozano Peña, Jorge Enrique ⁽²⁾

⁽¹⁾MSc. Ingeniero Civil. Grupo de investigación Madera y Guadua, Universidad Nacional. Bogotá, Colombia

⁽²⁾MSc. Arquitecto. Grupo de investigación Madera y Guadua, Universidad Nacional. Bogotá, Colombia

*Contacto: afguerrari@unal.edu.co

Resumen

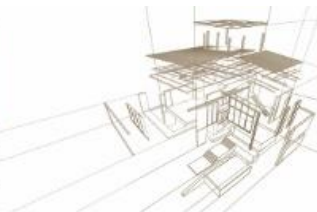
En esta investigación se estudió el comportamiento mecánico de vigas compuestas por piezas de madera reutilizada obtenida en procesos de deconstrucción unidas con láminas de *Guadua angustifolia kunth* en la parte superior e inferior mediante el sistema de encolado prensado estructural, confinando la madera y asumiendo los mayores esfuerzos de tracción y compresión producidos por la flexión y el cortante. Para este propósito se realizaron ensayos según las normas ASTM D198 y NTC5279 que permitieron hallar parámetros mecánicos como el esfuerzo máximo de las fibras de *Guadua angustifolia kunth* en el límite proporcional, el módulo de rotura, el módulo de elasticidad y la ductilidad al desplazamiento. Como resultado se pudo determinar que el comportamiento mecánico del sistema no está en función de la densidad de las piezas de madera, el contenido de humedad y tamaño, sino de la resistencia mecánica de las fibras de *Guadua angustifolia kunth* y la calidad de la línea de adhesivo. Así mismo se pudo determinar que las vigas tienen un comportamiento dúctil antes de llegar a la falla.

Palabras-clave: Madera reutilizada, bambú, Guadua angustifolia kunth, sostenibilidad, deconstrucción.

Abstract

This research studies the mechanical performance of beams composed of pieces of reused wood obtained in deconstruction processes, joined with *Guadua angustifolia kunth* sheets in the upper and lower part with structural pressing glue system and confining the wood, assuming biggest stresses of traction and compression, produced by bending and shear efforts. For this purpose, tests were according to ASTM D198 and NTC5279 standards to find mechanical parameters such as the maximum stress of the *Guadua angustifolia kunth* fibers in the proportional limit, the modulus of rupture, the modulus of elasticity and the ductility to displacement. The result was: the mechanical performance of the system is not a function of the density of the wood pieces, the moisture content and size, but of the mechanical strength of the *Guadua angustifolia kunth* fibers and the quality of the line of adhesive. Likewise, it was possible to determine that the beams have a ductile performance before the failure.

Keywords: Reused wood, bamboo, Guadua angustifolia kunth, sustainability, deconstruction.



1. INTRODUCCIÓN

Para reducir los impactos ambientales que genera la industria de la construcción se proponen diferentes alternativas que controlen la extracción de materias primas no renovables. Una opción son los procesos de deconstrucción, en los cuales, los elementos que componen la edificación pueden ser desensamblados utilizados nuevamente sin que se requiera un proceso de transformación. Los sistemas estructurales de madera permiten desensamblar sus componentes de manera sencilla, ya que sus uniones se basan en elementos metálicos. En esta investigación se estudió el comportamiento mecánico a flexión de vigas construidas con piezas de madera reutilizada, unida con esterilla de *Guadua angustifolia kunth* mediante el sistema de laminado estructural prensado encolado. El estudio experimental consistió en realizar ensayos de flexión a vigas de 3 m siguiendo los parámetros de la norma ASTM D198 - NTC5279. Encontrando el esfuerzo de la fibra en el límite proporcional, el módulo de rotura y el módulo de elasticidad de las vigas estudiadas.

2. VIGAS DE MADERA REUTILIZADA UNIDAS CON BAMBÚ MEDIANTE EL SISTEMA DE LAMINADO ESTRUCTURAL PENSADO ENCOLADO.

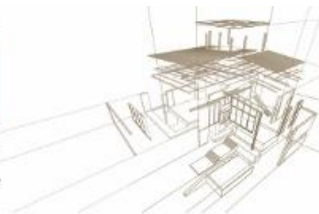
En esta investigación se recolectaron piezas de madera producto de demoliciones y se llevó a unas dimensiones establecidas retirando los elementos metálicos, las imperfecciones y los residuos de otros materiales como adhesivos y morteros. Las piezas de madera son colocadas una junto a otra y se unen mediante una lámina superior e inferior de esterilla de *Guadua angustifolia kunth* en el sistema de laminado encolado, confinando los elementos de madera reutilizada y asumiendo los esfuerzos máximos de compresión y tensión producto de la flexión (figura 1).



Figura 1: Vigas compuestas estudiadas

2.1 Deconstrucción

Es una técnica en la cual se recuperan elementos de construcción durante el desmonte de una edificación, reduciendo el tratamiento de residuos y mitigando impactos ambientales generados en las etapas de extracción de materias primas, procesamiento y disposición final. [1] En los procesos de deconstrucción, los materiales que componen a las edificaciones pueden ser reutilizados y reciclados sirviendo de materia prima para la fabricación de nuevos elementos, haciendo que su ciclo de vida sea cerrado pasando de un análisis de ciclo de vida “creadle to grave” a uno “creadle to creadle” en el cual los materiales pueden ser recolectados, reutilizados o reciclados manteniendo una calidad aceptable. [2] El diseño para la deconstrucción (DfD) es un concepto en el cual, desde el diseño se proyectan las construcciones para que sus elementos se puedan desensamblar, reutilizar, manufacturar y reciclar en industrias. El principal objetivo de esta iniciativa es reducir la contaminación, aumentando la eficiencia económica y de los recursos naturales en demoliciones de edificaciones. [3]



2.2. Madera reutilizada y madera laminada encolada

Los sistemas estructurales para la construcción en madera hacen que sus elementos sean fáciles de desmontar y reutilizar, sus conexiones se basan principalmente en elementos metálicos como clavos, tornillos pernos y pletinas. En deconstrucción los tamaños de la madera y la forma en que se unen y se cortan los elementos determinan su reutilización, las piezas más grandes tienen más opciones a la hora de evaluar sus posibles nuevos usos.[4] Para llevar a cabo procesos de reutilización de madera es importante analizar las condiciones a las que estuvo expuesto el material en la edificación. [5]. La reutilización de elementos de madera a los que se les ha aplicado adhesivo, presentan una severa reducción en la resistencia cuando se vuelven a utilizar en productos encolados, en los elementos de madera reutilizada que tienen residuos de urea formaldehído se ve significativamente afectado el comportamiento del curado y la calidad de la adhesión del nuevo sistema. [6]. La madera laminada se define como la unión de prismas de madera unidos mediante diferentes métodos, conformando un elemento monolítico continuo en escuadría y en largo. Dependiendo del tipo de unión los elementos laminares pueden ser pernados, calvados o encolados. [7]. Entre los adhesivos sintéticos se encuentran los Formaldehidos, usualmente son a base de fenol formaldehido (PF), resinol formaldehido (RF), fenol-resinol formaldehido (PRF), úrea formaldehído (UF) y melamina formaldehido. Estos polímeros se deben mezclar con catalizadores, cargas y disolventes para su aplicación, el fraguado de estos materiales se produce por la policondensación de la resina cuando reacciona con el catalizador, el tiempo de fraguado depende en gran parte de la temperatura ambiente. [8]

2.3. Bambú *Guadua angustifolia kunth* en el sistema laminado

La guadua se clasifica como un bambú leñoso del cual existen aproximadamente 1000 especies, 500 de estas especies presentes en América. El bambú *Guadua angustifolia kunth* se encuentra principalmente en países como Colombia, Venezuela y Ecuador, aunque también existe en grandes cantidades en países centroamericanos como Panamá. [9]. Las fibras se encuentran orientadas axialmente dando a la guadua una alta resistencia a la tensión paralela a la fibra, siendo más resistente en la pared externa debido a su dureza y mayor cantidad de fibras. [10] Para la *Guadua angustifolia kunth* en el sistema laminado estructural la calidad y la durabilidad del elemento depende del adhesivo y su resistencia a las condiciones de humedad [11]. En cuanto a la determinación del mejor adhesivo para la fabricación de vigas laminadas de bambú Gonzalez et al., 2009 estudiaron diferentes tipos de pegantes entre ellos la melamina formaldehido, fenol resorcinol formaldehido y poliuretano, encontrando que para todos la falla se presentó en la *Guadua angustifolia kunth* en la zona de interacción con el adhesivo, concluyendo que la falla no se produce en la línea de cola sino en el material blando de la guadua. Como conclusión de la investigación el adhesivo melamina formaldehido fue el mejor en cuanto a sostenibilidad y comportamiento mecánico. [12]

3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

3.1. Transformación de materias primas

La madera utilizada en esta investigación fue recuperada de la estructura de cubierta de edificios ubicados dentro de la Universidad Nacional de Colombia. Los elementos de madera fueron desmontados tratando de mantener su integridad. Los elementos metálicos de fijación fueron retirados (Figura 2), Cada elemento de madera es cortado perpendicularmente a su eje longitudinal, eliminando defectos como nudos, perforaciones, pudrición, rajaduras y manchas. Mediante este proceso se obtuvieron piezas de 18 cm de altura y 4 cm de espesor. Para el largo de las piezas se definieron diferentes medidas, 260 cm, 130 cm, 86 cm y 65 cm.



Figura 2: Retiro de elementos metálicos



Figura 3: Proceso de cepillado y corte

Las piezas se dejan planas por una de las caras de 18cm y se deja ortogonal una de las caras de 4cm. Este proceso se lleva a cabo utilizando una planeadora para madera. Luego se procede a cepillar cada elemento (figura 3), logrando un espesor uniforme para todas las piezas.

La *Guadua angustifolia kunth* que se utilizó en la construcción de las vigas se obtuvo en la región de El Socorro, Santander – Colombia, municipio ubicado sobre la cordillera oriental los Andes, esta región tiene una temperatura media de 23°C, y se encuentra a una altitud media de 1.300 m. sobre el nivel del mar. Para elaborar las láminas de esterilla, se realizan incisiones en el nudo, este procedimiento se lleva a cabo generando fisuras en los entrenudos. Posteriormente se abre la *Guadua* longitudinalmente y se retira la parte interna de los nudos. Además, se retira el tejido parenquimático para garantizar la adhesión de las fibras de *guadua* con el adhesivo, (figura 4).



Figura 4: Retiro de tejido parenquimatoso y nudos



Figura 5: Proceso de prensado

3.2. Construcción de vigas

Las piezas de madera tienen una altura de 16cm, esta altura corresponde a la máxima dimensión que se pudo recuperar teniendo en cuenta que todas las piezas deben tener la misma altura para garantizar la presión de prensado constante. En el sentido longitudinal, se usan diferentes dimensiones para mantener uniforme la distribución de las piezas en esta investigación se logra recuperar longitudes de 260 cm, 130 cm, 86 cm y 65 cm. Se construyen 12 vigas con 6 configuraciones diferentes. El adhesivo utilizado para adherir la esterilla de *Guadua angustifolia kunth* es úreamelamina formaldehído (MUF1442). Se debe garantizar una presión uniforme en los elementos a adherir durante un tiempo determinado por la dosificación de la mezcla (figura 5), luego curan los elementos a temperatura ambiente.

3.3. Ensayo de flexión para madera en tamaño estructural

En este método la viga se somete a un momento flector aplicando dos cargas transversales impuestas simétricamente entre las reacciones (Figura 6). El ensayo se realiza hasta la ruptura, se toman mediciones de la deflexión de la viga en el centro de la luz hasta alcanzar la deformación máxima permitida en las deflexiones admisibles contempladas en el título G del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Para cada viga se registraron los valores de fuerza (kgf) y desplazamiento (mm) (Figura 7). Con los datos obtenidos en el ensayo de flexión siguiendo los parámetros descritos en las normas ASTM D198 - NTC5279 se realiza el cálculo del esfuerzo cortante y momento flector máximo para cada probeta.

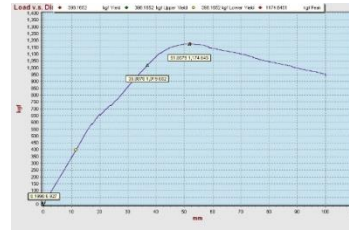


Figura 6: Ensayo de flexión Figura 7: Curvas carga (kgf) desplazamiento (mm).

Tabla 1: Esfuerzo cortante, momento y deflexión para la carga máxima y para carga en el límite proporcional

Probeta	Carga máxima P(N)	Cortante máximo V(N)	Momento máximo M(N*mm)	Deflexión Δ(mm)	Probeta	Carga en el límite proporcional P _{lp} (N)	Cortante V _{lp} (N)	Momento M _{lp} (N*mm)	Deflexión Δ(mm)
G1A	11519.33	5759.67	5414086.22	48.56	G1A	10787.32	5393.66	5070038.05	37.72
G1B	14482.00	7241.00	6806539.91	41.53	G1B	13729.31	6864.66	6452775.70	39.19
G2A	5067.00	2533.50	2381489.05	30.53	G2A	4314.93	2157.46	2028015.22	14.70
G2B	3985.47	1992.74	1873171.65	18.13	G2B	1916.22	958.11	900623.12	6.74
G3A	2353.30	1176.65	1106051.85	7.264	G3A	2353.30	1176.65	1106051.85	7.26
G3B	3530.67	1765.33	1659414.24	24.34	G3B	2458.33	1229.17	1155415.58	15.02
G4A	4861.00	2430.50	2284669.76	26.17	G4A	4860.96	2430.48	2284651.33	26.24
G4B	6367.33	3183.67	2992645.27	47.23	G4B	4917.64	2458.82	2311292.07	25.00
G5A	5560.00	2780.00	2613199.01	25.11	G5A	4400.93	2200.47	2068437.25	17.42
G5B	7966.33	3983.17	3744177.01	35.63	G5B	3115.96	1557.98	1464503.54	10.30
G6A	2850.26	1425.13	1339623.89	10.12	G6A	2850.26	1425.13	1339623.89	10.12
G6B	6259.33	3129.66	2941884.97	35.38	G6B	3143.82	1571.91	1477593.45	10.48

3.4. Cálculo de la constante de elasticidad en el alma "CE" por elementos finitos

A partir de los valores de fuerza y desplazamiento en el rango elástico, se determina la constante de elasticidad en el alma. Es necesario conocer la tasa de deformación que determina el comportamiento del alma dentro para calcular "n" que relaciona el módulo de elasticidad de la guadua y la tasa de deformación en el alma calculando la ubicación del eje neutro y el momento de inercia de una sección transformada. Para conocer la constante de elasticidad del alma se realiza un modelo de elementos finitos de cada viga en las condiciones del ensayo de flexión para la carga registrada en los 8 mm de deformación (Figura 8), el módulo de elasticidad del alma será ajustado mediante iteraciones hasta alcanzar la deformación de los 8 mm. (Tabla 2).

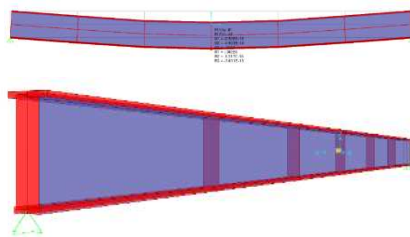


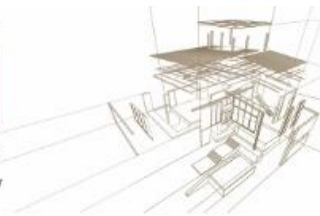
Figura 8: Modelo de elementos finitos

PROBETA	Carga (kgf)	Carga por bloque de carga (kgf)	Deflexión Δ(mm)	Constante de elasticidad del alma CE (kgf/m ²)	Constante de elasticidad del alma CE (MPa)
G1A	386.4	193.2	8	125000000.00	1225.83
G1B	382.9	191.45	8	125000000.00	1225.83
G2A	272.8	136.4	8	33000000.00	323.62
G2B	197.8	98.9	7	16000000.00	156.91
G3A	234.37	117.185	7.5	23000000.00	225.55
G3B	177.93	88.965	8	8300000.00	81.39
G4A	279.2	139.6	8	35000000.00	343.23
G4B	273.6	136.8	8	32000000.00	313.81
G5A	287.53	143.765	8	41000000.00	402.07
G5B	271.87	135.935	8	32000000.00	313.81
G6A	240.13	120.065	8	20000000.00	196.13
G6B	280.08	140.04	8	36000000.00	353.04

Tabla 2: Constante de elasticidad del alma de las vigas.

3.5. Ubicación del eje neutro y momento de inercia de la sección

Para calcular la ubicación del eje neutro y el momento de inercia de cada elemento es necesario analizar cada tipo de viga como un material heterogéneo de sección compuesta. Por lo tanto, es necesario realizar cálculos sobre una sección transformada asumiendo que toda la viga tiene el MOE de la *Guadua Angustifolia Kunth*. (Tabla 3)



	Ye (mm)	PATIN SUPERIOR					ALMA SECCIÓN TRANSFORMADA					PATIN SUPERIOR					Iv (mm ⁴)
		b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)	Y (mm)	bt (mm)	h (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)	Y (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)	Y (mm)	
G1A	99.87	60	10	600	5000	175	4.52	160	722.59	2E+06	90	40	10	400	3333.3	5	8607091.56
G1B	99.87	60	10	600	5000	175	4.52	160	722.59	2E+06	90	40	10	400	3333.3	5	8607091.56
G2A	104.28	60	10	600	5000	175	1.19	160	190.76	406964	90	40	10	400	3333.3	5	7397595.62
G2B	105.56	60	10	600	5000	175	0.58	160	92.49	197316	90	40	10	400	3333.3	5	7166116.11
G3A	105.00	60	10	600	5000	175	0.83	160	132.96	283641	90	40	10	400	3333.3	5	7261889.88
G3B	106.22	60	10	600	5000	175	0.30	160	47.98	102358	90	40	10	400	3333.3	5	7059922.24
G4A	104.14	60	10	600	5000	175	1.26	160	202.33	431628	90	40	10	400	3333.3	5	7424593.88
G4B	104.35	60	10	600	5000	175	1.16	160	184.98	394631	90	40	10	400	3333.3	5	7384079.42
G5A	103.74	60	10	600	5000	175	1.48	160	237.01	505621	90	40	10	400	3333.3	5	7505326.89
G5B	104.35	60	10	600	5000	175	1.16	160	184.98	394631	90	40	10	400	3333.3	5	7384079.42
G6A	105.24	60	10	600	5000	175	0.72	160	115.61	246645	90	40	10	400	3333.3	5	7220927.90
G6B	104.07	60	10	600	5000	175	1.30	160	208.11	443960	90	40	10	400	3333.3	5	7438076.25

Tabla 3: Momento de inercia sección transformada

El esfuerzo máximo de tensión de las fibras en el límite proporcional se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$S_{ft} = \frac{M_{lp} \cdot C_t}{I_v} \quad (1)$$

S_{ft} = Esfuerzo de tensión de la fibra en el límite proporcional.

M_{lp} = Momento para en el límite proporcional.

C_t = Distancia del eje neutro a la fibra más alejada sometida a tensión.

I_v = Momento de inercia de la viga.

Por otro lado el esfuerzo máximo de compresión paralelo a las fibras en el límite proporcional se calcula:

$$S_{fc} = \frac{M_{lp} \cdot C_c}{I_v} \quad (2)$$

S_{fc} = Esfuerzo de compresión en el límite proporcional.

C_c = Distancia del eje neutro a la fibra más alejada sometida a compresión.

Probeta	Momento M_p (N*mm)	C_t (mm)	I_v (mm ⁴)	S_{ft} (MPa)
G1A	5070038.05	99.87	8607091.56	58.83
G1B	6452775.70	99.87	8607091.56	74.87
G2A	2028015.22	104.28	7397595.62	28.59
G2B	900623.12	105.56	7166116.11	13.27
G3A	1106051.85	105.00	7261889.88	15.99
G3B	1155415.58	106.22	7059922.24	17.38
G4A	2284651.33	104.14	7424593.88	32.05
G4B	2311292.07	104.35	7384079.42	32.66
G5A	2068437.25	103.74	7505326.89	28.59
G5B	1464503.54	104.35	7384079.42	20.70
G6A	1339623.89	105.24	7220927.90	19.52
G6B	1477593.45	104.07	7438076.25	20.67

Tabla 4: Esfuerzo máximo de tensión de la fibra en el límite proporcional

Probeta	Momento M_p (N*mm)	C_c (mm)	I_v (mm ⁴)	S_{fc} (MPa)
G1A	5070038.05	80.13	8607091.56	47.20
G1B	6452775.70	80.13	8607091.56	60.07
G2A	2028015.22	75.72	7397595.62	20.76
G2B	900623.12	74.44	7166116.11	9.36
G3A	1106051.85	75.00	7261889.88	11.42
G3B	1155415.58	73.78	7059922.24	12.07
G4A	2284651.33	75.86	7424593.88	23.34
G4B	2311292.07	75.65	7384079.42	23.68
G5A	2068437.25	76.26	7505326.89	21.02
G5B	1464503.54	75.65	7384079.42	15.00
G6A	1339623.89	74.76	7220927.90	13.87
G6B	1477593.45	75.93	7438076.25	15.08

Tabla 5: Esfuerzo máximo de compresión de la fibra en el límite proporcional

3.5.1. Cálculo del módulo de rotura

El módulo de ruptura para las fibras en tensión se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_{Rt} = \frac{M \cdot C_t}{I_v} \quad (3)$$

S_{Rt} = Esfuerzo de tensión de la fibra en el límite proporcional.

M = Momento para la carga máxima.

C_t = Distancia del eje neutro a la fibra más alejada sometida a tensión.

I_v = Momento de inercia de la viga.

Por otro lado el módulo de ruptura para las fibras en compresión calcula:

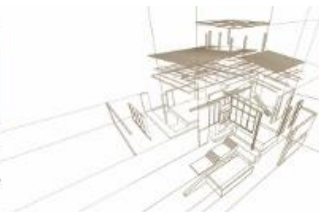
$$S_{Rc} = \frac{M \cdot C_c}{I_v} \quad (4)$$

S_{Rc} = Esfuerzo de compresión de la fibra en el límite proporcional.

M = Momento para la carga registrada en el límite proporcional.

C_c = Distancia del eje neutro a la fibra más alejada sometida a compresión.

I_v = Momento de inercia de la viga.



Probeta	Momento M (N*mm)	C _c (mm)	I _v (mm ⁴)	S _{zc} (MPa)
G1A	5414086.22	99.87	8607091.56	62.82
G1B	6806539.91	99.87	8607091.56	78.98
G2A	2381489.05	104.28	7397595.62	33.57
G2B	1873171.65	105.56	7166116.11	27.59
G3A	1106051.85	105.00	7261889.88	15.99
G3B	1659414.24	106.22	7059922.24	24.97
G4A	2284669.76	104.14	7424593.88	32.05
G4B	2992645.27	104.35	7384079.42	42.29
G5A	2613199.01	103.74	7505326.89	36.12
G5B	3744177.01	104.35	7384079.42	52.91
G6A	1339623.89	105.24	7220927.90	19.52
G6B	2941884.97	104.07	7438076.25	41.16

Probeta	Momento M (N*mm)	C _c (mm)	I _v (mm ⁴)	S _{zc} (MPa)
G1A	5414086.22	80.13	8607091.56	50.40
G1B	6806539.91	80.13	8607091.56	63.37
G2A	2381489.05	75.72	7397595.62	24.38
G2B	1873171.65	74.44	7166116.11	19.46
G3A	1106051.85	75.00	7261889.88	11.42
G3B	1659414.24	73.78	7059922.24	17.34
G4A	2284669.76	75.86	7424593.88	23.34
G4B	2992645.27	75.65	7384079.42	30.66
G5A	2613199.01	76.26	7505326.89	26.55
G5B	3744177.01	75.65	7384079.42	38.36
G6A	1339623.89	74.76	7220927.90	13.87
G6B	2941884.97	75.93	7438076.25	30.03

Tabla 6: Modulo de rotura fibras a compresión Tabla 7: Modulo de rotura fibras a tensión.

3.5.2. Cálculo del módulo de elasticidad

Para hallar el Modulo de elasticidad de cada viga se despeja E, de la ecuación de deflexión que para una viga simplemente apoyada con dos cargas puntuales ubicadas simétricamente la deflexión en el centro de la luz.

$$E = \frac{P*a}{24 \Delta I} * (3L^2 - 4a^2)(5)$$

E= Módulo de elasticidad
Δ= Deflexión.
P= Fuerza.

a= Distancia entre la reacción y el punto de carga más cercano.

I= Momento de inercia de la viga.

L= Luz, distancia entre las reacciones.

Probeta	Carga limite proporcional (N)	Δ limite proporcional (mm)	a(mm)	L(mm)	I _v (mm ⁴)	E (Mpa)
G1A	10787.32	37.72	940.00	2820.00	8607091.56	26447.55
G1B	13729.31	39.19	940.00	2820.00	8607091.56	32397.92
G2A	4314.93	14.70	940.00	2820.00	7397595.62	31583.89
G2B	1916.22	6.74	940.00	2820.00	7166116.11	31579.24
G3A	2353.30	7.26	940.00	2820.00	7261889.88	35510.13
G3B	2458.33	15.02	940.00	2820.00	7059922.24	18453.16
G4A	4860.96	26.24	940.00	2820.00	7424593.88	19862.04
G4B	4917.64	25.00	940.00	2820.00	7384079.42	21204.14
G5A	4400.93	17.42	940.00	2820.00	7505326.89	26793.34
G5B	3115.96	10.30	940.00	2820.00	7384079.42	32610.63
G6A	2850.26	10.12	940.00	2820.00	7220927.90	31046.43
G6B	3143.82	10.48	940.00	2820.00	7438076.25	32102.24

Tabla 8: Módulo de elasticidad

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los valores de cortante, momento flector y deflexión para la carga en el límite proporcional y la carga máxima presentan una alta dispersión en los resultados, esto se ve reflejado en la gran reducción de la resistencia en el valor característico del Módulo de ruptura y el esfuerzo de la fibra en el límite proporcional del sistema propuesto. Por otro lado, la dispersión en los valores de esfuerzo en la fibra en el límite proporcional fue la mayor de todos los datos recolectados, este comportamiento se debe a que fue difícil garantizar la calidad en toda la línea de encolado por las irregularidades que presenta la esterilla. En el momento en que el patín superior, sometido a esfuerzos de compresión, empieza deformarse y al despegarse de la madera termina el rango elástico del material, entonces la carga máxima al límite proporcional está directamente relacionada con la calidad del adhesivo sobretodo en el patín superior. A continuación, se presenta el resumen de los valores promedio, el valor para el quinto percentil y el valor característico. (Tabla 10).

Tabla 10: Índice de ductilidad

	PROMEDIO	QUINTO PERCENTIL	VALOR CARACTERISTICO
Sft (MPa)	30.26	14.77	7.72
Sfc (MPa)	22.74	10.49	4.94
SRt (MPa)	39.00	17.94	11.36
SRc (MPa)	29.1	12.77	7.56
E (MPa)	28299.23	19228.04	16219.06

4.1. Relación entre el CH de las piezas de madera reutilizada y el comportamiento mecánico de las vigas



Se realizan gráficos relacionando la resistencia y el módulo de elasticidad con el contenido de humedad CH de la madera reutilizada en donde se presenta la falla y la desviación estándar de los contenidos de humedad de las piezas, como parámetro para determinar la influencia de la variación entre los contenidos de humedad de las piezas de madera que componen la viga. (Figura 9)

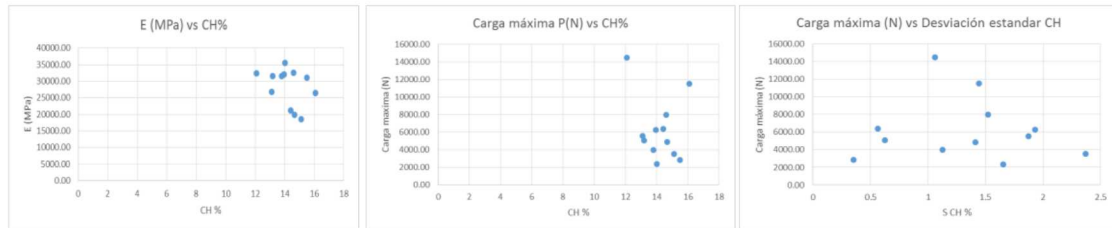


Figura 9: Modulo de elasticidad, carga en el límite proporcional, carga máxima vs CH de la pieza de madera en el lugar de la falla.

No se encuentra una tendencia clara entre la relación del contenido de humedad de la madera reutilizada y el módulo de elasticidad de las vigas, lo mismo ocurre entre el contenido de humedad y la carga máxima registrada en el ensayo de flexión. Al analizar la variación de los contenidos de humedad (desviación estándar del CH) de las piezas que componen las vigas con relación a la carga máxima tampoco se encuentra una tendencia definida. El comportamiento de las vigas no está determinado por el contenido de humedad de las piezas que componen el alma de las probetas ensayadas. Siempre y cuando se garantice la calidad de la línea de cola.

4.2. Relación entre el tamaño de las piezas de madera reutilizada y el comportamiento mecánico de las vigas

A pesar de que las vigas con piezas de 0.65 x 0.16 m. tienen una carga máxima mayor que las de 0.87 x 0.16 m. Se puede ver una tendencia en el aumento de la resistencia con relación al tamaño máximo de las piezas que componen la viga. Las vigas con piezas de 1.30 x 0.16 m. fueron las que soportaron la mayor carga y las piezas de 0.87 x 0.16 cm la menor. (figura 10) Durante los ensayos de flexión se observó que existe un desplazamiento entre las piezas de madera que componen el alma de la viga, es por esto que se analiza la relación entre el módulo de elasticidad y la cantidad de juntas en cada viga, además de la relación entre el comportamiento de la carga máxima resistida respecto al número de uniones. (Figura 11)

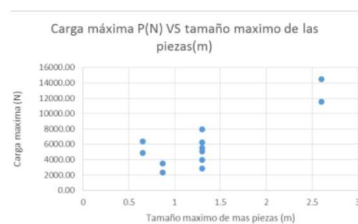


Figura 10: Carga máxima vs tamaño de las piezas de madera reutilizada

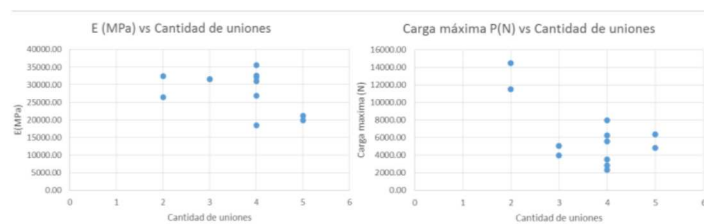
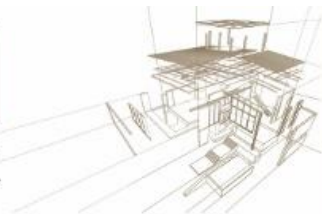


Figura 11: Modulo de elasticidad y Carga máxima vs Cantidad de uniones

En vigas con tres uniones se presenta la menor dispersión de resultados, la carga máxima se registró en vigas con dos uniones, sin embargo, el módulo de elasticidad máximo se presentó en vigas de cuatro uniones. El mejor comportamiento se obtiene en vigas con dos uniones, siendo estas vigas las que tienen la menor cantidad de juntas de todas las vigas analizadas.

4.3. Tipos de falla



Comportamiento dúctil: falla por tensión en las fibras del patín inferior, este tipo de falla fue común en la mayoría de las probetas ensayadas, al empezar a aumentar la carga las vigas tienen un comportamiento elástico y empiezan a deformarse las fibras del patín superior que no están adheridas a la madera reutilizada. (Figura 15) En esta etapa hay un desplazamiento relativo entre las piezas de madera reutilizada, esta deformación solamente es controlada por la esterilla de guadua. La guadua realiza el mayor aporte a la rigidez de la viga. (Figura 16).



Figura 15: Deformación fibras del patín superior



Figura 16: Desplazamiento relativo piezas de madera reutilizada

Al aumentar la carga y la deflexión, la esterilla de la parte superior empieza a despegarse de las piezas de madera, en este punto se registra el final del comportamiento elástico de la viga, el inicio del comportamiento plástico se caracteriza por que las fibras de guadua del patín inferior empiezan a ser más solicitadas. Ya hay deformaciones permanentes. (Figura 17) Las deformaciones continúan y existen saltos en la gráfica carga deformación a medida que se despegan las fibras del patín superior, sin embargo, en todos los casos la viga continúa asumiendo carga hasta que supera la carga obtenida en el límite proporcional. (Figura 18).

Las deformaciones empiezan a ser mayores para pequeños incrementos de carga sin fallar (ductilidad), la falla se produce cuando se pierde la adherencia entre el patín inferior y el adhesivo o cuando las fibras de guadua superan su resistencia a la tensión. Las piezas de madera reutilizada no sufrieron daños en ninguna viga y se pueden reutilizar nuevamente. (Figura 19)



Figura 17: Separación de la guadua del patín



Figura 18: Esfuerzos asumidos por el patín inferior.

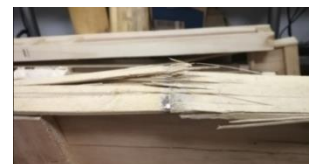
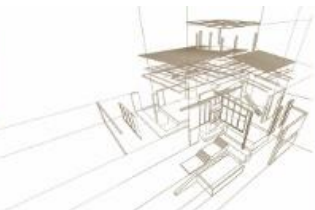


Figura 19: Falla por tensión de las fibras del patín inferior.

5. CONCLUSIONES

La mayor carga máxima registrada en los ensayos de flexión fue de 14482.00 N, para la viga compuesta por dos piezas de madera de baja densidad en los extremos (0.2m x 0.16m) y un elemento central de madera de alta densidad (2.60m x 0.16), esta configuración presenta el menor número de uniones y la pieza de madera de mayor longitud. La menor carga máxima registrada fue de 2353.30 N, para la viga compuesta por dos elementos de alta densidad en los extremos (0.87m x 0.16m), y tres elementos centrales de baja densidad: un elemento central de (0.87m x 0.16m) y dos elementos a cada lado de (0.2m x 0.16m). El esfuerzo de la fibra más alejada del eje neutro en el límite proporcional y el módulo de rotura se calcularon para las fibras sometidas a tensión y a compresión, los máximos esfuerzos se producen en las fibras inferiores sometidas a tensión.

La dispersión de los resultados fue bastante alta, para el esfuerzo de la fibra más alejada del eje neutro en el límite proporcional se tiene un coeficiente de variación de 61.24% en tensión y 67.85% a compresión. En cuanto al módulo de ruptura el coeficiente de variación es de 47.01% a tensión y 52.37% a compresión. Los valores del módulo de elasticidad tuvieron un coeficiente

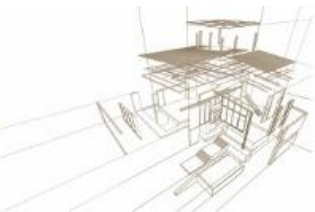


de variación del 20%, teniendo la menor dispersión de todos los resultados. La dispersión alta hace que los valores promedio de esfuerzo de la fibra más alejada del eje neutro en el límite proporcional y módulo de ruptura se reduzcan en más de un 50% para el quinto percentil y en más del 70% para el valor característico. En el caso del módulo de elasticidad se reduce en un 32% para el quinto percentil y 43% para el valor característico. La dispersión en los resultados se produce por la variación en la calidad en el proceso de encolado teniendo en cuenta que las irregularidades en el espesor de la esterilla provocan deficiencias de presión en algunas zonas, así mismo es difícil mantenerla en su sitio justo antes de aplicarles presión.

No se encontró una relación entre el contenido de humedad de las piezas de madera reutilizada en donde ocurre la falla y la resistencia de las vigas, lo mismo ocurre con el tamaño máximo de las piezas utilizadas y con el número de uniones. El comportamiento depende entonces de la resistencia los elementos de *Guadua angustifolia kunth* y la calidad de la línea de adhesivo. En vigas con tres uniones se presenta la menor dispersión de resultados, la carga máxima se registró en vigas con dos uniones, sin embargo, el módulo de elasticidad máximo se presentó en vigas de cuatro uniones. El mejor comportamiento se obtiene en vigas con dos uniones, siendo estas vigas las que tienen la menor cantidad de juntas de todas las vigas analizadas. En cuanto a la relación entre el módulo de elasticidad y la densidad de la madera reutilizada, el valor máximo y mínimo del módulo de elasticidad se reportó para las vigas construidas con el 65% de maderas de alta densidad, la menor dispersión en los resultados se logró con 87% de maderas de alta densidad. No se establece una tendencia clara entre el módulo de elasticidad de la viga y la densidad de las piezas de madera reutilizada que compone el alma de la viga. Las vigas tienen un comportamiento dúctil, al finalizar su comportamiento elástico, las vigas continúan deformándose plásticamente sin fallar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Environmental Protection Agency United States.(2008). Lifecycle Construction Resource Guide.
- [2] McDonoufh. W and Braungart . M. Cradle to cradle: Remaking the way we make things.
- [3] A. B. Guy, “Design for Deconstruction and Materials Reuse.”
- [4] D. Zabusova.(2014) “Design for Deconstruction,” no. October.
- [5] R. Flak, D. Green, and S. C. Lantz.(1999). “Evaluation of lumber recycled from an industrial military building” vol. 49, no. 8816, pp. 49–55.
- [6] R. Zhong, J. Gu, Z. Gao, D. Tu, and C. Hu. (2017). “International Journal of Adhesion and Adhesives Impacts of urea-formaldehyde resin residue on recycling and reconstitution of wood-based panels,” vol. 78, no. May, pp. 60–66.
- [7] Perez, V.(1992) "Manual de madera laminada" Instituto forestal de Chile. Santiago.
- [8] Quevedo, V.(2000). "Adherencia y adhesivos para madera".
- [9] Olarte, Arenas.(2012). "Diseño de conexiones en elementos estructurales de bambú - Guadua laminada pegada prensada para un proyecto de vivienda".
- [10] Carvajal W, Ortegon W & Romero (1981). "Elementos estructurales en bambú".
- [11] J. Lozano (2010). “Diversas aplicaciones del bambú en la arquitectura.” 2010.
- [12] H. Gonzalez, S. Hellwing, and J. Montoya (2009). “Determinación del adhesivo óptimo en la fabricación de vigas de bambú (*Guadua angustifolia*).
- [13] M. Estrada (2016). “Modelo numérico micromecánico del proceso de fractura de estructuras fabricadas con bambú *Guadua angustifolia*.



ANÁLISE NUMÉRICA CONCERNENTE ÀS ESPESSURAS DAS CAMADAS DE PAINÉIS OSB

NUMERICAL ANALYSIS CONCERNING THE THICKNESS OF LAYERS OF OSB PANELS

Julio Soriano^{1*}, Juliano Fiorelli², Lucas S. Peixoto³, Wanley E. Lopes Junior⁴, Guilherme H. Barbirato⁵, Romulo Martins⁶

(1) Professor Livre Docente. FEAGRI, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, Brasil

(2) Professor Livre Docente. FZEA, Universidade de São Paulo, Pirassununga, Brasil

(3) Mestrando em Eng. Agrícola, FEAGRI, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, Brasil

(4) Mestrando em Eng. e Ciência de Materiais, FZEA, Universidade de São Paulo, Pirassununga, Brasil

(5) Doutorando em Eng. e Ciência de Materiais, FZEA, Universidade de São Paulo, Pirassununga, Brasil

(6) Mestrando em Eng. e Ciência de Materiais, FZEA, Universidade de São Paulo, Pirassununga, Brasil

* Contato: julio.soriano@feagri.unicamp.br

Resumo

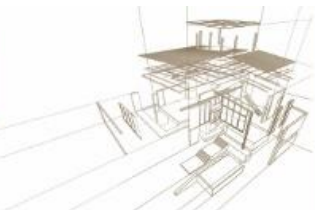
Os painéis OSB (Oriented Strand Boards) possibilitam o uso de madeira de florestas jovens, bem como o aproveitamento de resíduos da indústria madeireira. A rigidez do painel se deve às propriedades elásticas da matéria prima, bem como da orientação das partículas (strands) geralmente dispostas em três camadas. Esta pesquisa objetivou avaliar a influência das espessuras das camadas na rigidez de painéis OSB fletidos. Painéis retangulares (400 mm x 240 mm) e quadrados (400 mm x 400 mm) foram discretizados com elementos Shell 181 do software Ansys (R19-1), levando-se em conta as propriedades elásticas e ortotrópicas (coeficientes de Poisson e módulos de elasticidade longitudinal e transversal) das camadas externas (e) e interna (i). Os deslocamentos verticais e as tensões normais de flexão foram avaliados em função da relação i/h , com h representando a espessura total do painel. Com o aumento de i/h , as flechas nos painéis quadrados foram reduzidas e aumentaram nos painéis retangulares. Para ambos os formatos de painéis, por efeito do aumento dos valores i/h , as tensões normais resultaram moderadamente crescentes segundo a direção paralela ao eixo de orientação das camadas externas e , na direção transversal as tensões foram decrescentes. Com base nos resultados desta pesquisa pode-se concluir pela viabilidade da relação $i/h=0,6$ na constituição das camadas de painéis OSB.

Palavras-chave: rigidez a flexão, flechas, tensões normais, método dos elementos finitos.

Abstract

Oriented Strand Board (OSB) panels enable to the use of wood from young forests, as well as the use of waste from the timber industry. The stiffness of the panel is due to the elastic properties of the raw material as well as the orientation of the strands, generally arranged in three layers. This research aimed to evaluate the influence of layers thickness on the stiffness of OSB panels under flexure. Rectangular (400 mm x 240 mm) and quadratic (400 mm x 400 mm) panels were discretized by Shell 181 elements of the Ansys software (R19-1), taking into account the elastic and orthotropic properties (Poisson coefficients and longitudinal and transverse elasticity) of the external (e) and inner (i) layers. The vertical displacements and the bending normal stresses were evaluated as a function of the i/h ratio, with h representing the total thickness of the panel. It was noted that with the increase of i/h ratio, the vertical displacements in the quadratic panels were reduced and, increased in the rectangular panels. As a result of the increase of the i/h values, in both panel formats, the normal stresses were moderately increasing in the direction parallel to the orientation axis of the external layers, and in the transverse direction the stresses resulted decreasing. It was possible to conclude the feasibility of the relation $i/h = 0.6$ in the composition of the OSB panel layers.

Keywords: bending stiffness, vertical displacement, normal stress, finite element method.



1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de produtos compósitos de madeira tem proporcionado soluções mais eficientes para a utilização dos recursos florestais, dentre os quais os painéis de OSB são formados pela matriz composta por finas lascas ('strands') de madeira com adesivo estrutural e disposta em três camadas orientadas (Iwakiri et al. 2005; FPL 2010; Shmulsky and Jones 2011; Stokke 2014). São produtos cuja forma laminada possibilita o uso em construção de paredes, forros de coberturas e pisos, bem como na composição de vigas do tipo I ou caixão.

No processo de fabricação dos laminados OSB se faz possível controlar as dimensões, as proporções e a orientação das partículas em cada uma das camadas do painel. Esse controle na produção do OSB, é essencial para que se tenha uma maior resistência à flexão e a maior rigidez do painel, que em grande parte são atribuídas a orientação paralela dos 'strands' (FPL 2010; Shmulsky and Jones 2011). Segundo Thomas (2003) e Plenzler, Niewiadomska and Mielcarek (2013), a rigidez do painel OSB é função das propriedades ortotrópicas da madeira utilizada, bem como da espessura de cada camada. A norma EN 300:2002 estabelece requisitos mínimos para painéis de OSB que são classificados em quatro tipos. No caso de placas do tipo OSB/1 (para usos gerais, incluindo-se mobiliários, interiores, utilizados em ambiente secos), com espessuras de 6 a 10 mm, os módulos de ruptura (MOR) devem ser de mínimo 20 e 10 MPa para as direções longitudinal e transversal, respectivamente.

A modelagem computacional é uma ferramenta importante para a avaliação e o entendimento do comportamento dos produtos compósitos de madeira, cuja estrutura pode ser representada por elementos finitos, como por exemplo na modelagem de painéis OSB por elementos do tipo casca (Pang 2005; Chen, Yan and Cooper 2008) ou do tipo sólido (Zhu et al. 2005). A complexidade dos materiais compósitos de madeira tem sugerido a implementação de modelos sólidos de homogeneização que considere as características da microestrutura do material (Holmberg, Persson and Peterson 1988; Wu, Lee and Han 2004).

Esta pesquisa teve por objetivo a análise da influência das espessuras das camadas discretizadas na rigidez de painéis OSB, em que as flechas e as tensões normais foram obtidas pela modelagem computacional.

2. METODOLOGIA

Para se alcançar os objetivos deste trabalho foram simulados painéis com formatos quadrado (400 mm x 400 mm) e retangular (400 mm x 240 mm), ambos os formatos com espessura total (h) de 10 mm. Os painéis foram formados por três camadas (Figura 1), sendo as duas externas (e) e a interna (i), com os resultados discutidos em função da relação

(i/h).

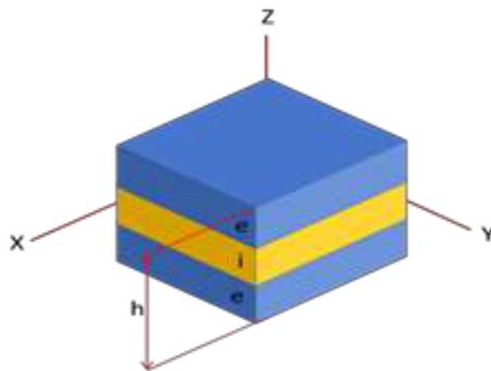
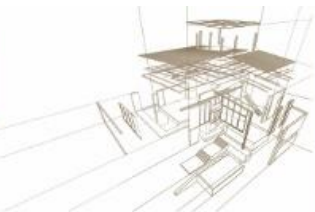


Figura 1: Representação das três camadas do painel

A variação da composição da espessura total do painel foi estabelecida pela relação i/h com valores no intervalo de 0 a 0,8 e para essas combinações tem-se os valores inteiros para as respectivas espessuras das camadas (Tabela 1).

Tabela 1: Relações i/h para painéis OSB com três camadas e 10 mm de espessura

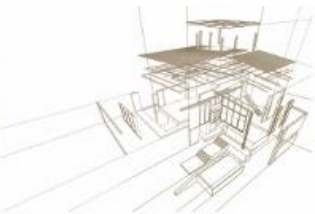
i/h	0	0,2	0,4	0,6	0,8
i (mm)	0	2	4	6	8
e (mm)	5	4	3	2	1

Para cada valor do parâmetro i/h foram obtidos os deslocamentos verticais, os quais foram empregados na análise da rigidez do composto. Também foram obtidas para análise as tensões normais nas direções que caracterizam a placa X e Y (segundo as coordenadas globais).

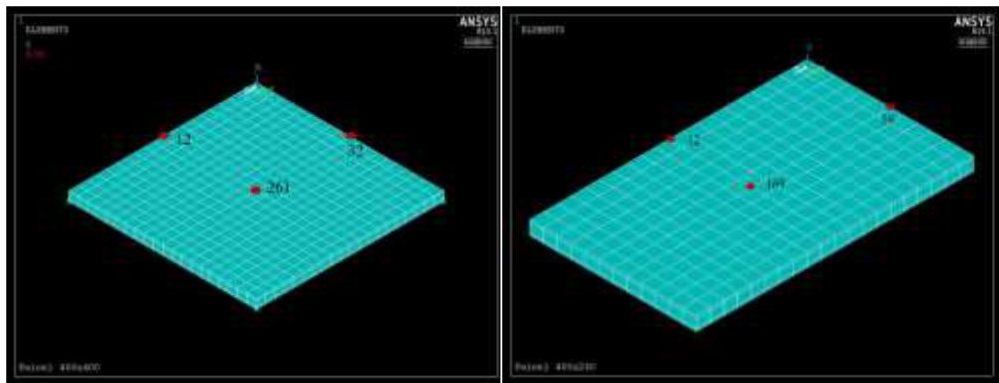
2.1. Propriedades do material

As propriedades mecânicas empregadas para análise elástica foram obtidas da pesquisa publicada por Thomas (2003), sendo os módulos de Young ($E_x = 3550$ MPa; $E_y = E_z = 2320$ MPa), coeficientes de Poisson ($\nu_{xy} = 0,23$; $\nu_{yz} = \nu_{xz} = 0,16$) e os módulos de cisalhamento ($G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = 1230$ MPa). Como propriedade física essencial para se considerar os efeitos de peso próprio dos painéis empregou-se uma densidade média de $650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

2.2. Modelagem dos painéis



Cada um dos painéis foi discretizado com elementos finitos do tipo Shell 181 (Ansys, R19-1) e com a atribuição de modelagem da seção transversal em camadas (Figura 2). O painel de formato quadrado foi modelado com 400 elementos e 441 nós, e o painel retangular com 240 elementos e 273 nós. Na Figura 2 são destacados os nós para os quais os resultados da simulação foram essenciais na discussão deste trabalho. As condições de contorno de cada painel consistiram na aplicação de apoios fixos em cada uma das extremidades, restringindo os deslocamentos verticais desses pontos e, também, foi impedida a rotação de cada painel em torno do eixo vertical (Z).



(A)

(B)

Figura 2: Malha de elementos finitos. (A) painel 400x400; (B) painel 400x240

As camadas de cada painel, conforme Figura 3, foram orientadas segundo as coordenadas globais (X, Y, Z), sendo as duas camadas externas (1 e 3) dispostas na direção X (direção 0°) e a camada interna orientada segundo a direção Y (direção 90°).

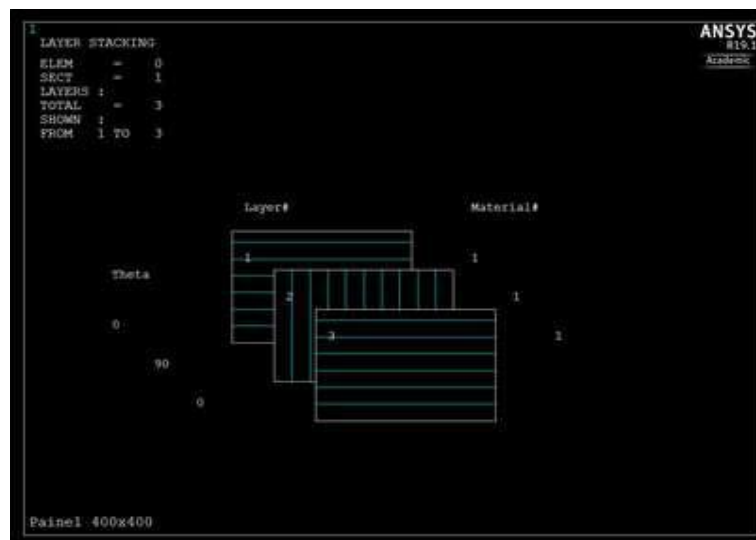
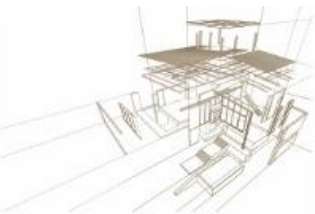


Figura 3: Camadas orientadas para formação do painel OSB

As simulações foram realizadas com incrementos de carga uniformemente distribuída na superfície de cada painel. Para se considerar a ação de peso próprio do painel, cuja densidade



é igual a 650 kg m^{-3} , foi ativada a aceleração de $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ segundo o eixo Z. Com isto, ação do próprio foi equivalente a uma ação uniformemente distribuída igual a $6,38 \cdot 10^{-5} \text{ N mm}^{-2}$.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os efeitos de variação das espessuras das camadas foram quantificados por relações percentuais das flechas (deslocamentos verticais) e das tensões normais obtidas para o correspondente carregamento de peso próprio dos painéis. Em se assumindo um modelo elástico linear, esses efeitos aqui discutidos para a relação i/h se mantém para quaisquer outros incrementos de carga. Foram consideradas as relações i/h variando de 0 a 0,8. No caso do primeiro valor (0) trata-se apenas de um parâmetro teórico correspondendo a um painel de camada única (igual a espessura total) e que foi utilizado como referência para avaliação dos efeitos da relação i/h . Tipicamente, o painel OSB é caracterizado pela fabricação em camadas formadas por 'strands' com espessuras da ordem de 0,6 a 0,75 mm (FPL 2010; Shmulsky and Jones 2011).

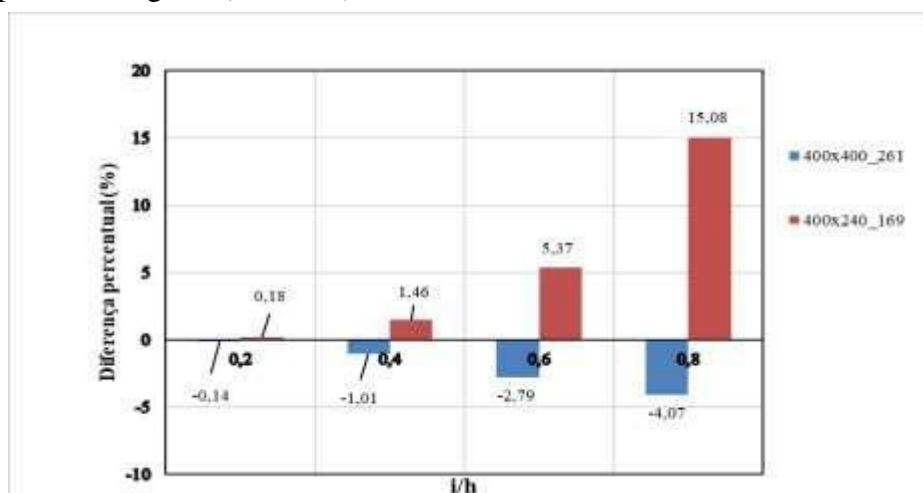
3.1. Efeito do parâmetro i/h na flecha

Para cada valor do parâmetro i/h foi determinada a flecha (deslocamento vertical máximo) no ponto central de cada painel (Tabela 2), representados pelos nós 261 e 169, para os painéis 400x400 e 400x240, respectivamente.

Tabela 2: Flechas (mm) obtidas com carregamento de peso próprio dos painéis

i/h	0	0,2	0,4	0,6	0,8
Painel 400x400	0,17572	0,17548	0,17394	0,17081	0,16857
Painel 400x240	0,08388	0,08403	0,0851	0,0880	0,0965

As diferenças nas flechas devidas aos incrementos do parâmetro i/h (Figura 4) mostraram que esse efeito é não linear. Em relação ao valor $i/h=0$ o aumento da camada interna fez reduzir os deslocamentos do painel de forma quadrada (400x400) e, por outro lado, fez aumentar a flecha do painel retangular (400x240).



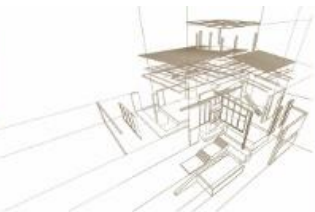


Figura 4: Efeito da relação i/h nos deslocamentos verticais, nó central dos painéis 400x400 e 400x240

Para o painel 400x400, observam-se os maiores benefícios para as relações i/h 0,6 e 0,8, com as quais as flechas foram reduzidas da ordem de 2,79% e 4,07%, respectivamente.

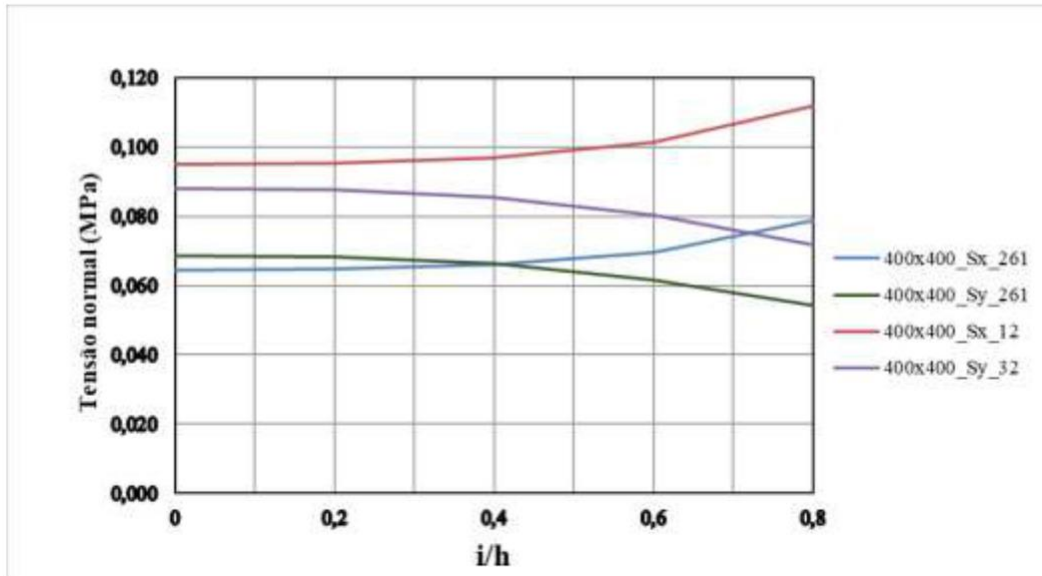
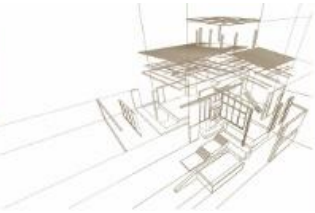
No caso do painel retangular (400x240) o efeito do incremento de i/h implicou no aumento da flecha de forma muito significativa, tendo resultado numa diferença de 15,08% para a relação 0,8. Por esse acréscimo de flecha, no caso em que o Estado Limite de Serviço é uma limitante de projeto, a relação $i/h=0,8$ para o painel retangular deixa de ser de interesse.

As relações i/h 0,2 e 0,4 implicam em pequenos aumentos da flecha para um painel retangular e, as relações i/h 0,6 e 0,8 intensificam a redução de flechas para painéis quadrados. No entanto, para um painel com espessura de 10 mm há de se considerar que a relação extrema $i/h=0,2$ resulta numa camada interna com apenas 2 mm e, para $i/h=0,8$ as camadas externas terão a espessura de apenas 1 mm, podendo implicar na exequibilidade da fabricação do painel.

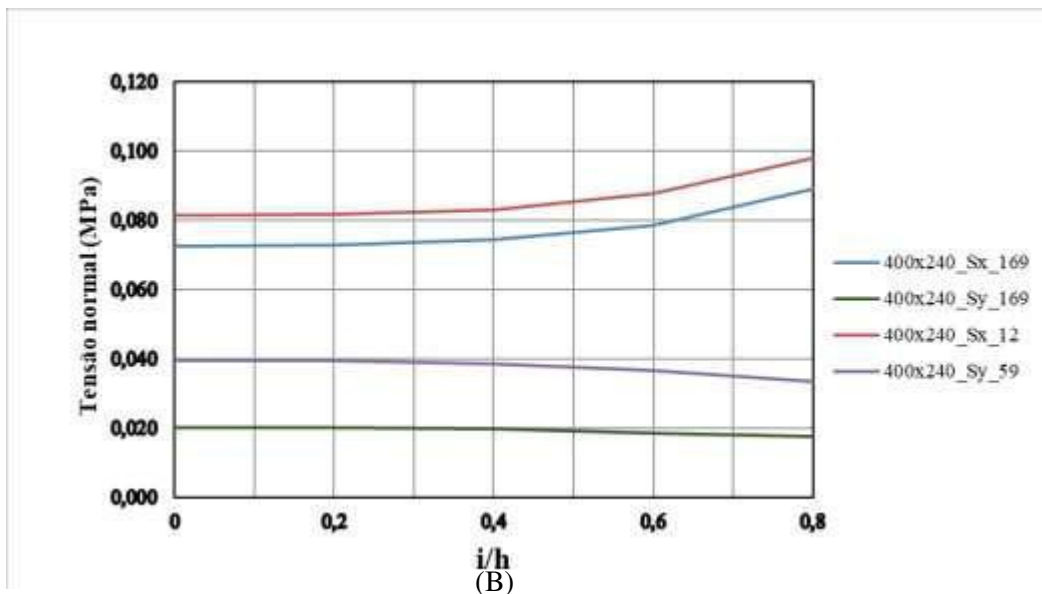
3.2. Efeito do parâmetro i/h nas tensões normais

Para a análise das tensões normais foram considerados os efeitos na posição central do painel 400x400 (Figura 5A) no correspondente nó 261 e, no nó 169 do painel 400x240 (Figura 5B). Também foram avaliados os efeitos sobre as tensões normais críticas (máximas) para as bordas dos painéis, nos respectivos nós 12 e 32 (Painel 400x400) e, 12 e 59 (Painel 400x240). Na região central do painel 400x400 (nó 261), conforme Figura 5A, os valores das tensões normais se aproximam ($S_x \sim S_y$), havendo uma inversão de intensidade de tensão para $i/h=0,4$ e as diferenças foram mais acentuadas para a relação $i/h=0,8$ ($S_{x_261} > S_{y_261}$). Portanto, o aumento da camada interna (com menor módulo de elasticidade) implicou para a posição central no aumento das tensões solicitantes S_x (direção X) e, simultaneamente, reduziu as tensões S_y (direção Y). Nas bordas do painel 400x400 foram obtidas as tensões críticas segundo as direções longitudinal (S_{x_12}) e transversal (S_{y_32}).

Para o painel 400x240 (Figura 5B) na região central tem-se as tensões $S_{x_169} \gg S_{y_169}$, cujas diferenças se intensificaram com o aumento da relação i/h . Analogamente ao observado com o painel quadrado, o aumento da camada interna fez aumentar as tensões S_x e S_y . A tensão crítica também ocorreu no ponto de borda (S_{x_12}).



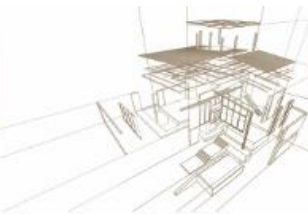
(A)



(B)

Figura 5: Efeito da relação i/h nas tensões normais. (A) painel 400x400; (B) painel 400x240

Da análise das tensões normais deve-se considerar que a EN 300:2002 estabelece $MOR_{Longitudinal} \gg MOR_{Transversal}$, e que para o caso desta pesquisa a relação entre os valores mínimos do $MOR_{Longitudinal}$ (20 MPa) e $MOR_{Transversal}$ (10 MPa) resulta igual a 2,0. As relações entre as tensões solicitantes na direção X (máxima) e na direção Y (mínima) são apresentadas na Figura 6, mostrando para o painel 400x400 que $i/h=0,8$ implicou na relação entre tensões (Sx_{12}/Sy_{261}) igual a 2,06, superando, assim, a relação com os limites inferiores da EN 300:2002. Para os valores de i/h 0,2 a 0,6, mesmo que a tensão normal solicitante atinja o valor limite mínimo estabelecido para a direção transversal, na direção X as tensões resultarão aquém do limite ($= 2,0$). Nota-se que a aproximação ao valor limite se dá acima de $i/h=0,6$.



Para o painel retangular, em todos os casos de i/h tem-se que a relação entre tensões normais (S_x_{12} / S_y_{169}) resultou maior que 2,0. Com isto, uma vez fixado o valor mínimo de resistência para a direção longitudinal, como consequência na direção transversal a tensão solicitante resultará muito aquém do valor limite mínimo normalizado (o qual o painel deverá atender como requisito de fabricação), o que demonstra o mal aproveitamento das propriedades do painel segundo a direção Y.

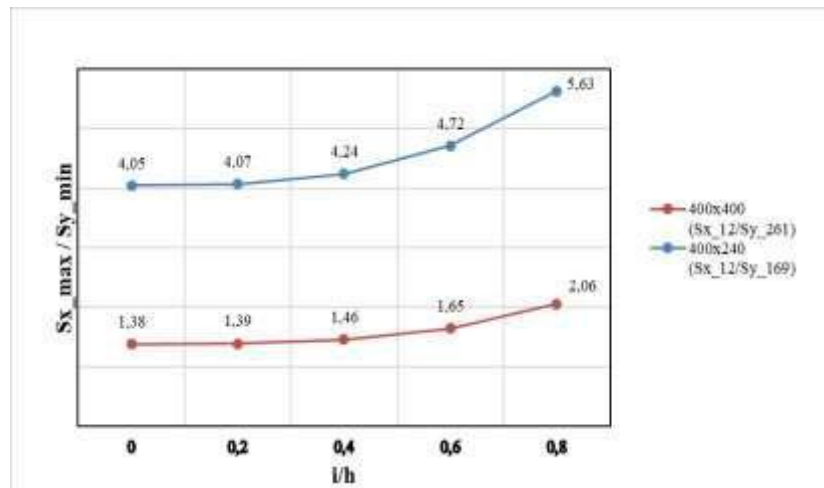


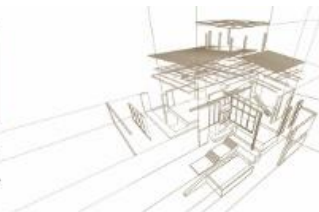
Figura 6: Relação das tensões longitudinal e transversal relativas ao parâmetro i/h

Tendo por base as discussões concernentes aos deslocamentos verticais e às tensões solicitantes em painéis de OSB, formados por três camadas, com forma quadrada e retangular, bem como as espessuras das camadas que tornam exequíveis a fabricação de painéis, conclui-se como mais apropriada a relação $i/h=0,6$. Para este valor destacam-se principalmente os benefícios de reduções das flechas para o painel quadrado e o melhor aproveitamento dos limites para as tensões normais. No caso do painel retangular verificou-se que a flecha aumentou acentuadamente com a variação de i/h no intervalo de 0,6 a 0,8.

Os resultados desta pesquisa corroboram com os resultados experimentais em que autores (Mendes 2001; Iwakiri, Mendes and Saldanha 2002) obtiveram as melhores performances de qualidade e de comportamento à flexão estática para painéis de OSB em cujas fabricações foram configuradas camadas na proporção 1:3:1 (face:miolo:face).

4. CONCLUSÕES

A análise numérica de painéis OSB pelo método dos elementos finitos, acerca dos efeitos da rigidez resultante das variações das espessuras das camadas possibilitou concluir que: O aumento da espessura da camada interna implica favoravelmente na redução das flechas no painel de formato quadrado. No entanto, para painéis retangulares as flechas são crescentes com o aumento de i/h . Em ambos os casos o comportamento da flecha em função de i/h resultou de forma não linear.



Para os valores de i/h menores que 0,8, nos painéis quadrados as tensões normais segundo a direção longitudinal resultam próximas ao dobro dos valores da direção transversal, implicando que para ambas as direções é possível explorar os limites estabelecidos pela EN 300:2002.

Para o painel de forma retangular, independentemente do valor i/h , a relação entre a tensão normal longitudinal e transversal resulta maior que 2,0. Com isto, para a tensão na direção longitudinal estabelecida pelo valor de requisito mínimo para fabricação, a resistência do painel na direção transversal ficará subaproveitada.

Tendo em vista os efeitos da variação i/h aos deslocamentos verticais e às tensões normais, a relação 0,6 mostrou-se mais apropriada para painéis de OSB com 10 mm de espessura, com o melhor aproveitamento dos limites de resistência, bem como pela pelas flechas reduzidas para o painel quadrado e moderadamente ampliadas para o formato retangular.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio obtido da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (proc. 2017/18076-4), do CNPq (proc. 407451/2018-8) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ansys Academic Research Mechanical – Release 19.1. Ansys, Inc.

Chen, Z., Yan, N. and Cooper, P. (2008). Predicting performance of oriented strandboard under concentrated static loading conditions using finite element modeling. *Wood and Fiber Science*, v.40, n. 4, p. 505 – 518.

European Committee for Standardization (2006). *Oriented Strand Boards (OSB) – Definitions, classification and specifications*. EN 300. Portugal.

Forest Products Laboratory - FPL. (2010). *Wood handbook—Wood as an engineering material*. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI, USA.

Holmberg, S., Persson, K. and Peterson, H. (1999). Nonlinear mechanical behaviour and analysis of wood and fibre materials. *Computers and Structures*, v. 72, p. 459-480.

Iwakiri, S., Mendes, L.M. and Saldanha, L.K. (2002). Produção de chapas de partículas orientadas “osb” de *Eucalyptus gaudis* com diferentes teores de resina, parafina e composição em camadas. *Ciência Florestal*, v. 13, n.1, p. 89-94.

Iwakiri, S. et al. (2005). *Painéis de madeira reconstituída*. FUPEF, Curitiba, PR, Brasil.

Mendes, M. L. (2001). *Pinus spp. na produção de painéis de partículas orientadas (OSB)*. Doutorado em Ciências Florestais – Universidade Federal do Paraná, PR.

Pang, W.C. (2005). *Corrugated wood composite panels for structural decking*. Doctor of Philosophy, Michigan Technological University, MI.



Plenzler, R., Niewiadomska, L. and Mielcarek, P. (2013). Shear and bending properties of structural oriented strand boards osb/4. *Wood Research.*, v. 48, n.2, p.285-294.

Shmulsky, R. and Jones, P.D. (2011). *Forest products and wood science: an introduction.*

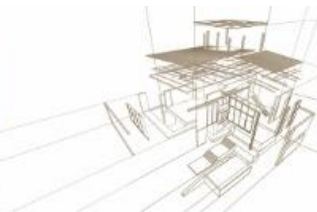
Hoboken, Wiley-Blackwell, NJ, USA.

Stokke, D.D. (2014). *Introduction to wood and natural fiber composites.* Chichester, West Sussex, Wiley, UK.

Thomas, W.H. (2003). Poisson's ratios of an oriented strand board. *Wood Sci Technol.*, v. 37, p. 259–268.

Zhu, E.C. et al. (2005). A constitutive model for OSB and its application in finite element analysis. *Holz Roh Werkst.* v.63. p. 87–93.

Wu, Q., Lee, J. N. and Han, G. (2004). The influence of voids on the engineering constants of oriented strandboard: a finite element model. *Wood and Fiber Science*, v. 36, n. 1, p. 71–83.



INFLUÊNCIA DA PROPORÇÃO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO NA CAMADA INTERNA DE PAINÉIS DE *Pinus* sp.

INFLUENCE OF EXPANDED POLYSTYRENE PROPORTION ON THE CORE LAYER OF *Pinus* sp. PARTICLEBOARDS

Kitai, Susan⁽¹⁾*; Pizza, João⁽²⁾; Morais, César Augusto Galvão⁽³⁾; Bertolini, Marília da Silva⁽³⁾

⁽¹⁾Graduando em Engenharia Industrial Madeireira. UNESP Câmpus de Itapeva. Itapeva, Brazil

⁽²⁾Graduando em Engenharia de Produção. UNESP Câmpus de Itapeva. Itapeva, Brazil

⁽³⁾Professor Assistente Doutor – Curso de Engenharia de Produção. UNESP Câmpus de Itapeva. Itapeva, Brazil

*Contacto: aki.kitai26@gmail.com

Resumen

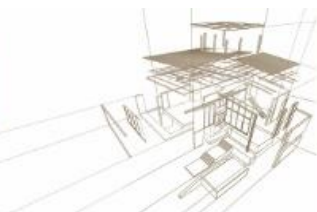
Poliestireno expandido (EPS) es un material inerte, aislante térmico y de baja absorción de agua. A pesar de la versatilidad, genera preocupación después de su consumo. El empleo de este material en tableros de particulados tiene un uso prometedor. El objetivo de este trabajo fue la producción y caracterización de paneles con residuos de *Pinus* sp., adhesivo bicomponente a base de ricino y EPS usado. Se produjeron tableros con capa interna compuesta de la mezcla de partículas de madera y EPS (en proporciones de 0, 15 y 30%), y las capas exteriores de partículas de madera. La determinación de las propiedades mecánicas de los tableros se realizó siguiendo la norma NBR 14810: 2018. El desempeño de los tableros en la flexión estática, muestras con 15% de EPS (densidad 807,92 kg / m³) resultaron en MOE de 2073 MPa, MOR de 13,76 MPa y resistencia a la adherencia interna de 0,26 MPa. Los tableros con 30% de EPS (densidad 757,98 kg / m³) presentaron los valores para las propiedades citadas de: 2113 MPa; 13,51 MPa y 0,20 MPa; respectivamente. La proporción de EPS en los tableros no afectó las propiedades de MOE y MOR, hecho observado por la diferencia estadística entre las medias. Los resultados de adherencia interna en los tableros con EPS presentaron valores inferiores a los requisitos de la norma. Se comprobó con el desarrollo del trabajo la viabilidad de producción de tableros particulados con residuos de EPS, siendo posible su utilización en aplicaciones como en la construcción civil.

Palabras-clave: EPS, tableros de partículas, madera.

Abstract

Expanded polystyrene (EPS) is an inert material, with thermal insulation and low water absorption. Despite the versatility, it generates concern after consumption. The use of this material in particleboards has a promising use. The objective of this work was the production and characterization of panels with wastes from *Pinus* sp. and EPS post-consumer and bicomponent adhesive based on castor oil. Panels were produced with internal layers composed of the mixture of wood particles and EPS (in proportions of 0, 15 and 30%) and superficial layers only of wood particles. Mechanical properties of the panels were performed according to NBR 14810: 2018. For static bending, samples with 15% EPS (density 807.92 kg / m³) resulted in MOE of 2073 MPa, MOR of 13.76 MPa and internal bond of 0.26 MPa. Panels with 30% EPS (density 757.98 kg / m³) presented values for the mentioned properties of: 2113 MPa; 13.51 MPa and 0.20 MPa; respectively. The proportion of EPS in the boards did not affect the properties of MOE and MOR, a fact confirmed by the statistical difference between the means. Results of internal bond in the boards with EPS presented lower values than the requirements of the standard. It was observed with the development of the work the feasibility of producing particulate panels with EPS residues, being possible its use in applications such as civil construction.

Keywords: EPS, particleboards, wood.



1. INTRODUCCIÓN

La preservación del medio ambiente promueve varias discusiones hoy en día, teniendo en cuenta los problemas ambientales relacionados con la contaminación, la generación de residuos sólidos y la escasez de materia prima en la naturaleza, debido no solo a los procesos productivos, sino también al consumismo desenfrenado de la sociedad. capitalista La gran cantidad de desechos sólidos que ha generado la humanidad llama la atención sobre el problema asociado con su eliminación, desafiando a los investigadores y las empresas a buscar soluciones efectivas. La eliminación de productos derivados del petróleo en vertederos o su incineración son métodos de bajo costo, como la eliminación posterior al consumo, pero generan un grave problema ambiental (Kreutz 2019).

Los paneles de madera consisten en estructuras hechas de la aglutinación de madera en chapas o en diferentes etapas de desintegración, reemplazando la madera sólida en varios usos, como muebles y pisos.

El concepto de paneles de aglomerado es, según Iwakiri (2005), un panel hecho de partículas de madera, con la incorporación de un adhesivo y reconstituido en una matriz aleatoria, consolidada aplicando presión y calor a la prensa caliente. Este principio de fabricación le da al producto una serie de ventajas sobre la madera contrachapada y la madera, tales como: eliminación de la anisotropía de la madera; eliminación de factores reductores de resistencia como nudos, madera juvenil y adulta, entre otros; posibilidad de adecuación de las propiedades físico-mecánicas mediante el control de los parámetros del proceso; menores requerimientos de materia prima de madera; reducción del costo de producción en madera y calidad laboral.

La producción de paneles de MDP en Brasil representa una división significativa entre la producción en América del Sur y la producción mundial. En 2018, Brasil produjo aproximadamente 3,14 millones de m³ de paneles de MDP, mientras que la producción de Sudamérica fue de 4,73 millones de m³ y la producción mundial totalizó 96,86 millones de m³ durante el mismo período (Figura 1), según datos de la FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

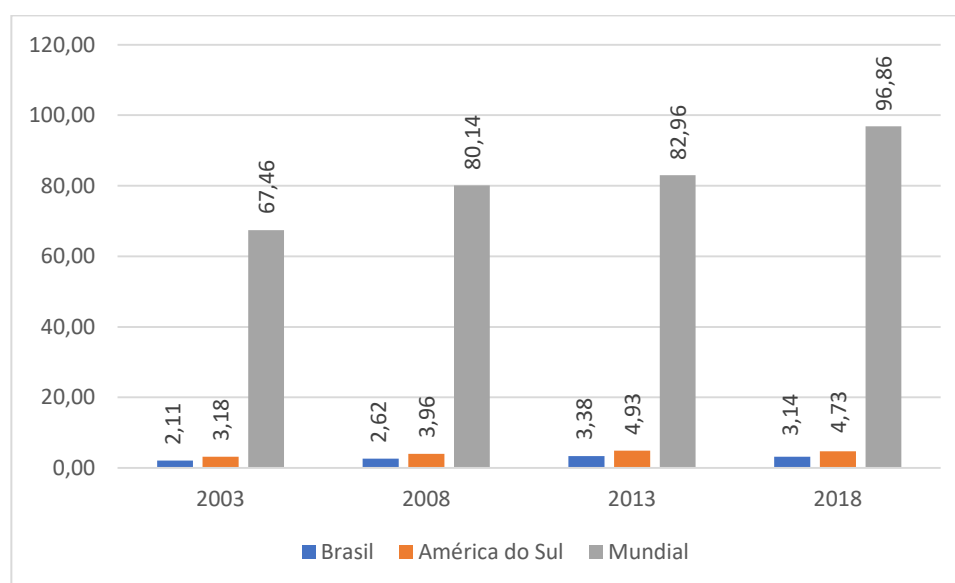
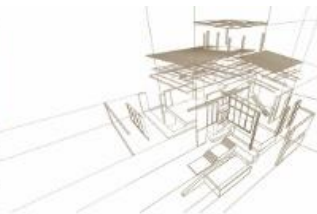


Figura 1: Producción de tableros de partículas en los últimos 15 años (millones de m³).
Fuente: Adaptado de FAO (2019).



Los compuestos forman una clase de materiales heterogéneos, que consta de dos o más materiales que difieren en propiedades físicas y químicas entre sí. Para crear un nuevo material, los materiales compuestos son adecuados para diversas situaciones de uso. Es una matriz (aglutinante) que proporciona forma estructural al material y transfiere tensiones al material de refuerzo. La matriz puede consistir en material metálico, cerámico o polimérico. El uso de fibras naturales como material de refuerzo en materiales compuestos mejora el rendimiento de los polímeros en aplicaciones tecnológicas, además de su bajo costo, alta disponibilidad y biodegradabilidad (Kreutz 2019).

El EPS (poliestireno expandido) es un producto sintético derivado del petróleo. El material en cuestión es un polímero muy ligero, que consume poca energía y genera muy pocos desechos sólidos o líquidos en su proceso de fabricación (Jesus 2014). Descubierta en Alemania en 1949 en el laboratorio de BASF, el EPS está compuesto de 2% de poliestireno y 98% de aire, siendo un plástico celular rígido formado por polimerización de estireno en agua (Moncada et al.2019). El EPS es un material reciclable (incluso puede volver a las condiciones originales), el aislante térmico tiene baja absorción de agua. Su aplicación es muy diversa, como en la construcción en techos, losas, puentes; en envases como protección para productos electrónicos; juguetes y en escenarios teatrales, productos náuticos, moldes de fundición, entre otros. También se caracteriza por ser un material químicamente inerte, no es biodegradable, no se desintegra o contiene gases tóxicos. El EPS es químicamente inerte, no biodegradable, no se desintegra y no contiene gas. Por lo tanto, no contamina químicamente el suelo, el agua o el aire, sin embargo, es un problema ambiental si no se recicla porque ocupa un gran espacio debido a su baja densidad que causa problemas en los vertederos (Lima et al.2019).

Según el Informe de tasa de reciclaje de EPS, en 2016, se reciclaron más de 53,000 toneladas de EPS en los Estados Unidos, de las cuales 28,000 toneladas provienen de envases postconsumo y 25,000 toneladas de recuperación posindustrial que incluyen envases no desechables. usados y embalajes usados y desechados por industrias (EPS Industry Alliance 2016).

El objetivo de este estudio es evaluar la influencia de la proporción de EPS en la capa central de *Pinus* sp. y resina de poliuretano bicomponente de aceite de ricino en propiedades mecánicas. Además, el estudio de la viabilidad del uso de residuos industriales y postconsumo, así como el uso de un adhesivo parcialmente derivado de fuentes renovables, también contribuyen a la producción de productos con bajo impacto ambiental.

2. METODOLOGÍA

2.1. Producción de paneles

Para la producción de los paneles se utilizaron los siguientes materiales: *Pinus* sp. relaves de EPS postconsumo y adhesivo bicomponente de poliuretano a base de aceite de ricino. La madera se obtuvo de los residuos del procesamiento primario de madera en equipos de UNESP - Campus de Itapeva Aserradero y Laboratorio de Procesamiento. Los desechos de madera se procesaron para obtener material particulado utilizando el molino de cuchillas Marconi MA680 en el Laboratorio de Propiedades de Materiales. Para la clasificación de partículas se usó un tamiz de apertura de 3 mm en el molino de cuchillas usando el material pasante.

El EPS postconsumo se obtuvo de empresas que recolectan el material en los puntos de reciclaje y lo procesan para su uso en rellenos de muebles tapizados. Para la fabricación de los paneles se realizó un reprocesamiento en gránulos más pequeños de los mismos utilizados en una trituradora.



En la producción de los paneles, el adhesivo utilizado fue la resina de poliuretano a base de aceite de ricino de dos componentes, siendo el componente A polioli, derivado del aceite de ricino y densidad 1.2 g/cm^3 y el componente B, isocianato polifuncional, densidad $1,24 \text{ g/cm}^3$. Se usó la proporción 1: 1 de los componentes A y B y la cantidad de adhesivo se basó en 15% + 3% del peso de las partículas de madera por panel, ya que las pérdidas se consideraron durante el proceso de producción.

Se produjeron un total de 6 paneles (2 paneles por tratamiento) con 3 capas, totalizando 3 tipos de tratamiento, que difieren en términos de proporciones de EPS (control - 0%, 15% y 30%) dispuestos en la capa interna agregada 1/3. partículas de madera totales como se muestra en la Figura 1.

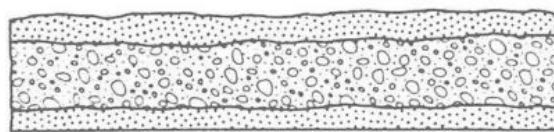


Figura 1: Representación del tablero de partículas multicapa. Fuente: Iwakiri (2005)

Inicialmente, se pesaron las partículas de madera, el EPS y los componentes adhesivos A y B, considerando una densidad nominal de $0,60 \text{ g/cm}^3$ como base de la cantidad establecida para los paneles de cada tratamiento. Las partículas de madera y el adhesivo se homogeneizaron manualmente. En los paneles se mezclaron EPS y madera en la capa central, se añadió EPS a la mezcla después de homogeneización madera + adhesivo.

Se usó un molde de $420 \times 420 \text{ mm}$ en una placa de metal. Luego, se realizó un prensado inicial en una prensa mecánica Ribeiro, con 5 toneladas de carga durante 5 minutos, para acomodar las partículas y la formación del colchón.

Para el prensado en caliente final, se utilizaron limitadores de espesor de 13 mm. El proceso de prensado final se realizó en la prensa hidráulica Hidhal-Mac, modelo PHH 80t. Los parámetros de prensa utilizados fueron: temperatura de $85 \text{ }^\circ\text{C}$, presión de 4 MPa y 2 ciclos de 6 minutos intercalados con un alivio de presión. Después de presionar, los paneles se almacenaron para un curado completo durante un período de 72 horas. Posteriormente, los paneles se cuadraron y las dimensiones finales fueron $400 \times 400 \times 13 \text{ mm}$.

2.2. Caracterización del panel

Para la caracterización de los paneles, se evaluaron las propiedades mecánicas del módulo elástico (MOE), la resistencia a la flexión estática (MOR) y la adhesión interna de acuerdo con ABNT NBR 14810 (2018) y las propiedades físicas de la densidad y el contenido de humedad (TU) se realizaron de acuerdo con la norma ABNT NBR 14810 (2018).

Los paneles tenían sus bordes refinados y luego las muestras se extrajeron en dimensiones de acuerdo con NBR 14810: 2 (2018). Para los ensayos MOE y MOR, las dimensiones de la muestra fueron $(310 \times 50 \times 13) \text{ mm}$ para longitud, ancho y grosor, respectivamente. Para la adhesión interna, las dimensiones fueron $(50 \times 50 \times 13) \text{ mm}$, como en la Figura 3 a continuación.

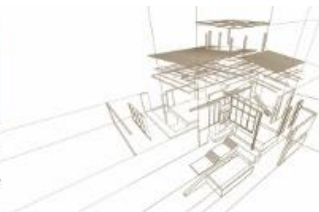


Figura 3: Muestras para ensayo de adhesión interna

A partir de los resultados obtenidos, el tratamiento estadístico se realizó utilizando el software Minitab® 18.1, y como parámetro para la comparación de los resultados se utilizaron los estándares ABNT NBR 14810 (2018) y ANSI A208.1 (2009), y otros trabajos similares encontrados en la literatura.

2.2.1. Módulo de elasticidad (MOE) y resistencia a la flexión estática (MOR)

Se siguieron los procedimientos sugeridos por ABNT NBR 14810 (2018) para obtener el módulo de elasticidad (MOE) y las propiedades de resistencia a la flexión estática (MOR). Las dimensiones de ancho y grosor de las muestras se determinaron con un calibre de resolución en milímetros y con el micrómetro, las dimensiones se ingresaron en el software de la máquina de prueba y las pruebas se realizaron en las muestras con la máquina universal de la marca EMIC, modelo DL-30000. Las muestras biapoiled, respetando el espacio de acuerdo con el documento normativo, se sometieron a carga hasta su ruptura (Figura 4). Los resultados para las pruebas se obtuvieron de los cálculos utilizando las ecuaciones 1 y 2.

$$MOE = \frac{P \times D^3}{d \times 4 \times B \times E^3}, \quad (1)$$

donde:

- *MOE* es el módulo de elasticidad,
- *P* es la carga en el límite proporcional,
- *D* es la distancia entre soportes,
- *d* es la desviación correspondiente a la carga *P*1,
- *B* es el ancho de la muestra,
- *E* es el grosor de la muestra.

$$MOR = \frac{1,5 \times (P \times D)}{B \times (E)^2}, \quad (2)$$

donde:

- *MOR* es el módulo de resistencia a la flexión estática,
- *P* es la carga máxima hasta el descanso,
- *D* es la distancia entre los soportes del equipo,
- *B* es el ancho de la muestra,

- Es el grosor de la muestra.



Figura 4: Realización del ensayo MOE y MOR

2.2.2. Adhesión interna

El procedimiento para determinar la adhesión interna se realizó de acuerdo con ABNT NBR 14810 (2018). Las diez muestras consideradas en la prueba se lijaron para homogeneizar la superficie, luego se determinaron las dimensiones de b_1 y b_2 , que luego se insertaron en el software de la máquina de prueba para la prueba. Las superficies superior e inferior de las muestras se unieron a bloques de tracción con adhesivo instantáneo y se presionaron con abrazaderas de sargento durante 24 h para garantizar el curado completo del adhesivo. El conjunto formado por los bloques de tracción y la muestra se probaron en la máquina de prueba universal - EMIC, modelo DL-30000, con una capacidad de 300 kN, que tiraba de los conjuntos perpendiculares a las caras hasta la ruptura. Los valores obtenidos por ensayo se usaron para calcular el valor de adhesión interna por las ecuaciones 3 y 4.

$$TP = \frac{P}{S}, \quad (3)$$

$$S = b_1 \times b_2, \quad (4)$$

donde:

- TP es la adhesión interna,
- P es la carga en el descanso,
- k es la superficie,
- b_1 e b_2 son las dimensiones de la muestra.



3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Tabla 1 presenta los resultados para las propiedades mecánicas del módulo de elasticidad (MOE), la resistencia a la flexión estática (MOR) y la adhesión interna para los 3 tratamientos.

Tabla 1: Resultados para MOE, MOR y adherencia interna

Cantidad de EPS (%)	Densidad* (kg / m ³)	TU* (%)	MOE* (MPa)	MOR* (MPa)	Adhesión interna* (MPa)
0	826,07 A (0,15)	8,85 A (0,09)	2131 A (26,75)	15,51 A (36,64)	1,1760 A (16,88)
15	807,92 A (0,08)	8,52 A (0,04)	2073 A (32,28)	13,76 A (38,71)	0,2618 B (24,71)
30	757,98 A (0,13)	8,51 A (0,08)	2113 A (28,65)	13,51 A (29,60)	0,2007 B (35,29)

* Las medias seguidas de letras iguales no difieren estadísticamente según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).**(Coeficiente de variación). Comparación entre líneas.

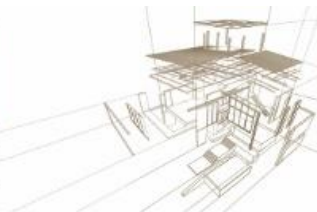
De acuerdo con NBR 14810-2 (2018), el valor mínimo para las propiedades del módulo de elasticidad (MOE) y la resistencia a la flexión estática (MOR) es 1800 y 11 MPa respectivamente, para paneles de entre 6 y 13 mm, espesor no estructural. bajo condiciones de uso en interiores en condiciones secas. Los resultados obtenidos para este ensayo fueron totalmente superiores a los requisitos del estándar, como se muestra en la Tabla 1.

El estándar ANSI A208.1-2009 establece que los paneles con densidad entre 640 y 800 kg / m³ son de densidad media. Los tratamientos con 0% y 15% de EPS en la capa central tienen valores muy cercanos al máximo definido por la norma, considerándose como densidad media en este estudio. Por lo tanto, para paneles tipo M2 (densidad media y uso en exteriores), el valor mínimo de MOE es 2000 MPa y para MOR 13 MPa. En comparación con los valores de la Tabla 1, se encontró que los valores cumplen con los requisitos propuestos por el estándar estadounidense. Para el contenido de humedad, todos los paneles cumplen con los requisitos establecidos por ANSI A208.1 (2009) y ABNT NBR 14810 (2018), que permiten valores de 5 a 13%.

Tanto para los ensayos MOE como para MOR, las medias no difieren en el análisis estadístico mediante la prueba de Tukey para todos los tratamientos, lo que demuestra que la adición de EPS no afectó negativamente el rendimiento de los paneles para estas propiedades.

De acuerdo con NBR 14810-2 (2018) y ANSI A208.1 (2009), para paneles no estructurales, para uso en interiores en condiciones secas, el valor mínimo para la propiedad de unión interna es 0.40 MPa. En comparación con los resultados obtenidos en este trabajo, se encontró que todos los tratamientos con inserción de EPS en la composición tienen valores por debajo de los requisitos mínimos de los estándares. Esto se debe al hecho de que, dado que el EPS está en la capa central y no se fusiona ni tiene la adición de adhesivo, el centro de estas muestras se convirtió en una región frágil, con tendencia a romperse debido a que se redujo la adhesión interna. Para el análisis estadístico, se encontró que las medias difieren para paneles con y sin adición de EPS por la prueba de Tukey.

En estudios similares, Lyuty, Bekhta y Ortynska (2018) usaron para la producción de compuestos plásticos de madera, polietileno reciclado de baja densidad (LDPE) y partículas de madera en la proporción 60:40, además del 3% del peso de la madera en EPS y resina de melamina-urea-formaldehído como adhesivo. La densidad de 700 kg / m³ y los paneles de 8 mm de grosor se sometieron a una presión de 3.5 MPa a 180 ° C durante un tiempo específico de 1



min / mm de espesor en un solo ciclo. Para la prueba de adhesión interna, los autores obtuvieron un valor de 0.25 MPa, que es un rendimiento más bajo en comparación con el presente estudio. Lacombe (2015) hizo paneles de madera aglomerada con partículas de madera de pino y EPS, en una proporción de 50/50, disueltos en diluyente para su aplicación en el panel como adhesivo. Para la producción de paneles de 21 mm de espesor y una densidad media de 505 kg / m³, el colchón se sometió a una presión de 4 MPa durante un período de 12 minutos. El autor obtuvo como resultado una resistencia a la flexión estática y un MOE de 10.46 y 1372.08 MPa respectivamente. En comparación con la literatura citada, se observó la superioridad de todos los valores del presente estudio, posiblemente debido al hecho de que el uso de resina bicomponente a base de aceite de ricino aumenta la resistencia en las propiedades mecánicas y el hecho de que el EPS como adhesivo tiene poca rigidez, transfiriendo así la característica a la placa.

4. CONCLUSIONES

A través de este estudio se observó la viabilidad de utilizar residuos de EPS postconsumo en la constitución de la capa interna de tableros de partículas de madera multicapa en varias proporciones, y puede considerarse como una alternativa de eliminación en lugar de su eliminación en vertederos, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental y agregando valor en la obtención de un nuevo producto.

A partir de los resultados obtenidos, se observó que la configuración y la proporción de EPS en la capa interna influyeron en las propiedades mecánicas de MOE, MOR y la adhesión interna, cumpliendo los requisitos normativos mínimos para todas las pruebas, excepto para la adhesión interna. Esto demuestra la viabilidad de usar este tipo de paneles con restricción a algunos tipos de uso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CNPq, Caso No. 429130 / 2016-3, por la ayuda financiera otorgada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American National Standards Institute (2009). Particleboard. ANSI A208.1. Gaithersburg.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2018). Painéis de partículas de médiadensidade. Parte 2: Requisitos e Métodos de Ensaio. ABNT NBR 14810-2. Rio de Janeiro.
- EPS Industry Alliance (2016). EPS recycling ratereport. EPS Industry Alliance, Crofton.
- FAO. FAOSTAT Forestry. (2019). Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/626/DesktopDefault.aspx?PageID=626#anchor>>. Acesso em: 01 Mai. 2019.
- Jesus, L. C. C. D. (2014). Obtenção e caracterização de compósitos de poliestireno pós-consumo reforçado com celulose de bagaço de cana-de-açúcar.
- Lacombe, J. E. D. A. (2015). Painéis de madeira aglomerada produzidos com resíduos de serragem e poliestireno expandido para aplicações na construção civil. Doctoral dissertation. Universidade de São Paulo, SP.



Lima, P. S., de Sousa, da Silva Santos, M. F., A. A. S. R., da Costa, L. F. S. C., & Ferreira, C. V. (2019). Incorporação do poliestireno extendido (EPS) no concreto: perspectiva de desenvolvimento de umasoluções sustentável. *Revista Ciência& Saberes-Facema*, 4(4).

Lyuty, P., Bekhta, P., &Ortynska, G. (2018). Lightweight flat pressedwoodplastic composites: possibilityof manufacture and properties. *Drvnaindustrija: Znanstveničasopiszapitanjadrvnetehnologije*, 69(1), 55-62.

Moncada, J. E. C. M., Flor, L., Silva, V., & Pacheco, J. (2019). Estudo da adição de argila expandida e EPS como agregados naelaboração de concreto leve. *Revista Eletrônica TECCEN*, 12(1), 02-07.

Kreutz, J. C. (2019). Propriedades mecânicas e térmicas de compósitos de poliestireno e MDF. Doctoraldissertation. Unioeste, PR.

Iwakiri, S. (2005). Painéis de madeira reconstituída. Curitiba:FUPEF.



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INCIDENCIA DE LA ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS EN LA RESISTENCIA AL CIZALLE A TRAVÉS DEL ADHESIVO EN PROBETAS DE CLT

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INCIDENCE OF FIBER'S ORIENTATION IN SHEAR STRENGTH OF GLUE LINES IN TEST SAMPLES OF CLT

Pérez, Eduardo ^{(1)*}, Burgos, Camila ⁽²⁾, González, Paulina ⁽³⁾, Acuña, Patricio ⁽⁴⁾, Cofré, Eduardo ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Ing. Civil Industrial. Depto. Ing. Obras Civiles, Fac. Ing., Universidad de Santiago de Chile. Santiago, Chile.

⁽²⁾ Dra Arquitecto. Facultad Tecnológica, Universidad de Santiago de Chile. Santiago, Chile.

⁽³⁾ Ing. Civil, Magister en Ing. Sísmica. Depto. Ing. Obras Civiles, Fac. Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile.

⁽⁴⁾ Constructor Civil. Depto. Ing. Obras Civiles, Fac. Ing., Universidad de Santiago de Chile. Santiago, Chile

* Contacto: eduardo.perez@usach.cl

Resumen

La fabricación de CLT en Chile ya es una realidad, con ello se empiezan a construir las primeras estructuras con este material, sin embargo no hay una normativa vigente que regule y controle su proceso de producción. La norma chilena NCh 2148 especifica los requisitos mínimos para la fabricación de madera laminada encolada, cuya orientación de las fibras es paralela en las líneas de encolado, en cambio en la madera contralaminada o CLT las fibras están dispuestas de manera perpendicular en las líneas de encolado.

En este trabajo se muestran los resultados de ensayos realizados a distintas probetas fabricadas de acuerdo con lo estipulado en la norma NCh 2148, pero con distintas orientaciones de las fibras en las líneas de encolado para determinar valores de resistencia al cizalle paralelo, perpendicular y mixto.

Se concluye que la orientación de la fibra incide en la resistencia al cizalle a través del adhesivo, disminuyendo en un 60% entre cizalle paralelo y cizalle mixto. Por esta razón, la norma chilena NCh 2148 no sería aplicable para la madera contralaminada, debido a que los valores de resistencia al cizalle a través del adhesivo son distintos al tener distinta orientación de las fibras.

Palabras-clave: cizalle a través del adhesivo, madera contralaminada, pino radiata.

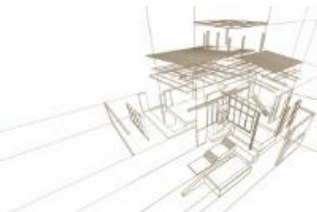
Abstract

The manufacture of CLT in Chile is already a reality, with this the first structures with this material begin to be built, however there is no current regulation that regulates and controls the production process. The Chilean standard NCh 2148 specifies the minimum requirements for the manufacture of glulam, whose orientation of the fibers is parallel in the gluing lines, whereas the cross-laminated timber or CLT is arranged perpendicularly to the fibers in the gluing lines.

This paper shows the results of tests carried out on different specimens manufactured according to the stipulations of NCh 2148, building them particularly with different orientations of the fibers to determine shear strength values through the adhesive of parallel, normal and mixed orientation of the fibers.

It is concluded that the orientation of the fiber has influence in the resistance to the shear through the adhesive, decreasing by 60% between parallel shear and mixed shear. For this same reason, the NCh 2148 standard would not be applicable to cross-laminated timber, because the shear strength values through the adhesive are different when having different orientation of the fibers.

Keywords: shear through the adhesive, cross laminated timber, radiata pine.



1. INTRODUCCIÓN

El ensayo del cizalle a través del adhesivo permite evaluar la resistencia del encolado de las piezas. En la norma chilena NCh 2148 (INN 2013) se indica un valor de resistencia para la madera laminada encolada que está conformada por piezas de madera unidas mediante líneas de cola paralela a sus fibras, lo que no ocurre en el CLT, ya que las capas de madera se unen con sus fibras en sentido perpendicular respecto de las capas adyacentes (González et al 2014 y 2019). En atención a ello, en este estudio se analiza la incidencia de la orientación de la fibra en la resistencia al cizalle a través del adhesivo.

2. ENSAYOS CIZALLE A TRAVÉS DEL ADHESIVO

2.1. Preparación de probetas

Se utilizan piezas de pino radiata de 41x138mm por 4 metros de largo. En primera instancia se clasifican visualmente, prestando atención en defectos tales como nudos, alabeos, agujeros. El segundo parámetro utilizado para la selección de las piezas corresponde al espesor de los anillos, ya que esta característica permite estimar en forma aproximada el valor de la densidad de la pieza, mayor o menor a 500 Kg/m³. Las piezas seleccionadas se cortan longitudinalmente por el canto y por la cara, se eliminan los nudos, y posteriormente se cepillan por la cara y por los cantos, para obtener piezas de 19 mm de espesor por 130 mm de ancho. A continuación se identifican las piezas mediante códigos numéricos y se determina el contenido de humedad y la densidad de cada una, utilizando los procedimientos descritos en las normas chilenas NCh 176/1 (INN 1986) y NCh 176/2. Con estos antecedentes se materializan dos grupos, uno con las piezas de madera cuya densidad es mayor que 500 kg/m³, y el otro con las piezas de madera que tienen densidad de referencia inferior a 500 kg/m³. Luego, se conforman parejas de piezas de madera con densidad de valores similares para elaborar bloques, a partir de los cuales se preparan las probetas para realizar los ensayos.

Los bloques se confeccionan mediante un proceso de encolado de las piezas de madera, considerando dos direcciones de orientación de las fibras de las piezas que se unen: paralela y perpendicular. Las probetas con unión paralela a la fibra se someten a ensayo de cizalle paralelo a la fibra y cizalle perpendicular a la fibra. El ensayo de las probetas con unión perpendicular se ha denominado cizalle mixto. En la Figura 1 se muestran las probetas con las distintas orientaciones de las fibras y la dirección de la carga de cizalle: paralelo, perpendicular y mixto.

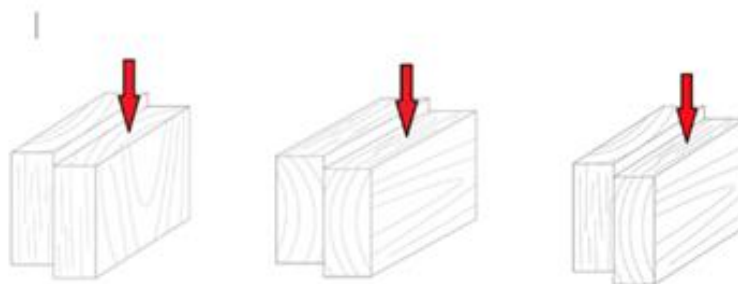


Figura 1: Probetas para ensayos de cizalle paralelo, perpendicular y mixto. (Acuña y Cofré 2018).



2.2. Montaje y procedimiento de ensayo

La norma chilena NCh 2148 (INN 2013) indica que el ensayo para determinar la resistencia de las líneas de encolado se debe hacer según la norma ISO 12579 (2007). Esta norma ISO especifica un método de prueba del control de calidad de producción a través de la medición de la resistencia al cizalle de las líneas de encolado de la madera laminada encolada. El procedimiento de este ensayo consiste en aplicar una fuerza de cizalle en las líneas de encolado de valor creciente hasta que se produzca una falla, se registra el valor de la carga ejercida al momento de la falla y se evalúa el porcentaje de falla de la madera, que corresponde al área de las paredes de la unión que permanece con madera adherida después de realizado el ensayo. Las dimensiones de la probeta para efectuar el ensayo se muestran en la Figura 2 (INN 2013).

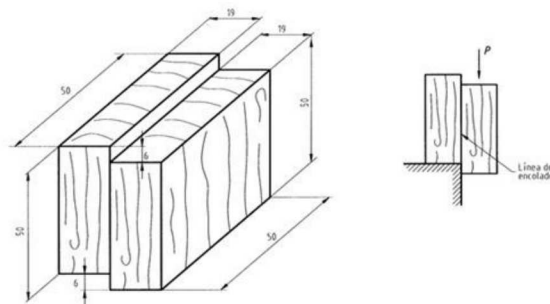
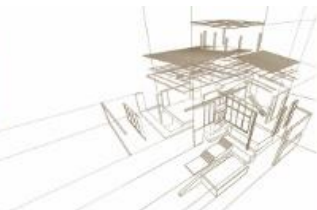


Figura 2: Probeta para ensayo de cizalle a través del adhesivo según NCh 2148 (INN 2013).

El montaje de la probeta de ensayo se muestra en la Figura 3; se emplea un equipo calibrado para aplicar una fuerza de compresión sobre una de las piezas de madera que conforman la probeta de tal manera de generar tensiones de cizalle en la zona encolada y así determinar la resistencia de la línea de encolado ante esta sollicitación.



Figura 3: Montaje para ensayo de cizalle a través del adhesivo. (Acuña y Cofré 2018).



3. RESULTADOS

En las Tablas 1 a 4 se exponen los resultados obtenidos para las diferentes orientaciones de las fibras. Las Tablas 1 y 2 contienen los valores de resistencia al cizalle a través del adhesivo y de porcentaje de falla de madera de los grupos de ensayo con densidad menor y mayor a 500 kg/m³, respectivamente, para todas las direcciones de orientación de las fibras consideradas en el estudio, paralela, perpendicular y mixta.

*Tabla 1: Resultados de ensayos en probetas con densidad menor a 500 Kg/m³.
(Acuña y Cofré 2018).*

Paralelo	Resistencia al cizalle	% Falla madera
N° de piezas (un)	40	40
Promedio (MPa)	9,7	65
Desviación estándar (MPa)	1,7	33,8
Coefficiente de variación (%)	17,1	52,4
Valor mínimo (MPa)	5	5
Valor máximo (MPa)	12	100
Perpendicular	Resistencia al cizalle	% Falla madera
N° de piezas (un)	40	40
Promedio (MPa)	4,0	91
Desviación estándar (MPa)	0,3	25,1
Coefficiente de variación (%)	8,3	27,6
Valor mínimo (MPa)	3	0
Valor máximo (MPa)	5	100
Mixto	Resistencia al cizalle	% Falla madera
N° de piezas (un)	40	40
Promedio (MPa)	3,7	67
Desviación estándar (MPa)	0,4	32,8
Coefficiente de variación (%)	10,2	49,2
Valor mínimo (MPa)	3	0
Valor máximo (MPa)	4	100



Tabla 2: Resultados de ensayos en probetas con densidad mayor a 500 kg/m^3 .
(Acuña y Cofré 2018).

Paralelo	Resistencia al cizalle	% Falla madera
N° de piezas (un)	40	40
Promedio (MPa)	11,5	41
Desviación estándar (MPa)	1,5	29,4
Coefficiente de variación (%)	13,3	71,5
Valor mínimo (MPa)	8	5
Valor máximo (MPa)	15	100
Normal	Resistencia al cizalle	% Falla madera
N° de piezas (un)	40	40
Promedio (MPa)	5,1	100
Desviación estándar (MPa)	0,5	0,0
Coefficiente de variación (%)	10,7	0,0
Valor mínimo (MPa)	4	100
Valor máximo (MPa)	7	100
Mixto	Resistencia al cizalle	% Falla madera
N° de piezas (un)	40	40
Promedio (MPa)	5,0	64
Desviación estándar (MPa)	0,7	31,7
Coefficiente de variación (%)	14,0	49,8
Valor mínimo (MPa)	4	5
Valor máximo (MPa)	6	100

En las Tablas 3 y 4 se exponen los valores mínimos requeridos de resistencia al cizalle a través del adhesivo y de porcentaje mínimo de falla de madera, que resultan de aplicar los criterios de la norma NCh 2148 (INN 2013). Para efectos de comparación, se incluyen también los valores promedio obtenidos en el programa de ensayos efectuado en el presente trabajo.

Tabla 3: Comparación de resultados de ensayos con requisitos mínimos de la norma NCh 2148 en probetas con densidad menor a 500 kg/m^3 . (Acuña y Cofré 2018).

Tipo de cizalle	Promedio de resistencia al cizalle de ensayos MPa	Promedio de resistencia al cizalle mínimo de NCh 2148 MPa	Promedio de porcentaje de falla de madera de ensayos (%)	Porcentaje de falla de madera mínimo de NCh 2148 (%)
Paralelo	9,7	4,0	65	57
Perpendicular	4,0	4,0	91	100
Mixto	3,7	4,0	67	100

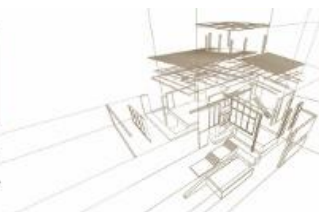


Tabla 4: Comparación de resultados de ensayos con requisitos mínimos de la norma NCh 2148 en probetas con densidad mayor a 500 kg/m³. (Acuña y Cofré 2018).

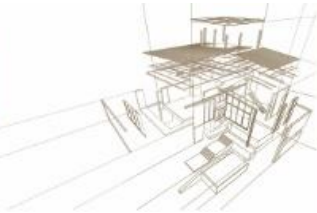
Tipo de cizalle	Promedio de resistencia al cizalle de ensayos MPa	Promedio de resistencia al cizalle mínimo de NCh 2148 MPa	Promedio de Porcentaje de falla de madera de ensayos (%)	Porcentaje de falla de madera mínimo de NCh 2148 (%)
Paralelo	11,5	6,0	41	40
Perpendicular	5,1	6,0	100	98
Mixto	5,0	6,0	64	99

Los resultados de las Tablas 3 y 4 muestran que se satisfacen los requisitos de la normativa chilena sólo en el caso de cizalle paralelo a las fibras para todo el rango de valores de densidad considerados en el estudio. Para este caso, los valores promedio de tensión de resistencia al cizalle determinados en los ensayos prácticamente duplican a los valores mínimos que exige la normativa vigente; en lo que se refiere al porcentaje de falla de madera, se encuentra que los valores promedio de los ensayos superan ligeramente los valores mínimos que establece la norma NCh 2148 (INN 2013). Se observa también que la densidad no tiene gran influencia en la resistencia al cizalle, siendo levemente superiores los valores de resistencia obtenidos en las probetas con densidad mayor a 500 kg/m³. Además, se aprecia que el factor que más influye en la resistencia al cizalle es la dirección de orientación de las fibras, encontrándose que el valor obtenido para el ensayo de cizalle mixto es aproximadamente 60% inferior al de resistencia al cizalle paralelo a la fibra, pero de valor similar al obtenido en el caso de cizalle perpendicular.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se ha efectuado un programa de ensayos para determinar la resistencia al cizalle a través del adhesivo de uniones encoladas de piezas de madera de pino radiata, considerando distintas direcciones de orientación de las fibras de las piezas que conforman la unión y dos rangos de valores para la densidad de la madera. Los resultados de los ensayos permiten concluir que la densidad de la madera es un parámetro que no tiene gran influencia en la resistencia al cizalle de la unión encolada y que la orientación de las fibras incide significativamente en la capacidad resistente al cizalle de la unión. Se encuentra que la resistencia al cizalle mixto, que es aquel que se genera en uniones conformadas por piezas que tienen sus fibras perpendiculares entre sí en la línea de encolado, es aproximadamente un 60% menor que la resistencia al cizalle paralelo. Además, se obtiene como resultado que la resistencia al cizalle mixto es similar a la resistencia al cizalle perpendicular a las fibras.

Entonces, en base a los resultados experimentales obtenidos, se propone considerar un valor mínimo de resistencia al cizalle para elementos de madera contralaminada igual 3,3 MPa y un valor de 60% para el porcentaje mínimo de falla de madera. Estos dos valores que se propone corresponden, respectivamente, al 90% de aquellos obtenidos en los ensayos de cizalle mixto en probetas con densidad inferior a 500 kg/m³.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acuña, P y Cofré, E. (2018). Estudio experimental de la incidencia de la orientación de las fibras en la resistencia al cizalle a través del adhesivo en un tablero de CLT. Memoria de título de Constructor Civil, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile.

González, P., Saavedra, E., Pérez, E., Burgos, C., Piña, F. y Wagner, M. (2014). Sistema constructivo en madera contralaminada para edificios, ISBN: 978-956-303-267-3. Universidad de Santiago de Chile, www.conmaderausach.cl.

ISO (2007). Timber structures - Glued laminated timber- Method of test for shear strength of glue lines.12579:2007(E).1a ed. Switzerland.

INN (Instituto Nacional de Normalización) (2003). NCh 176/1. Madera – Parte 1: Determinación de humedad.

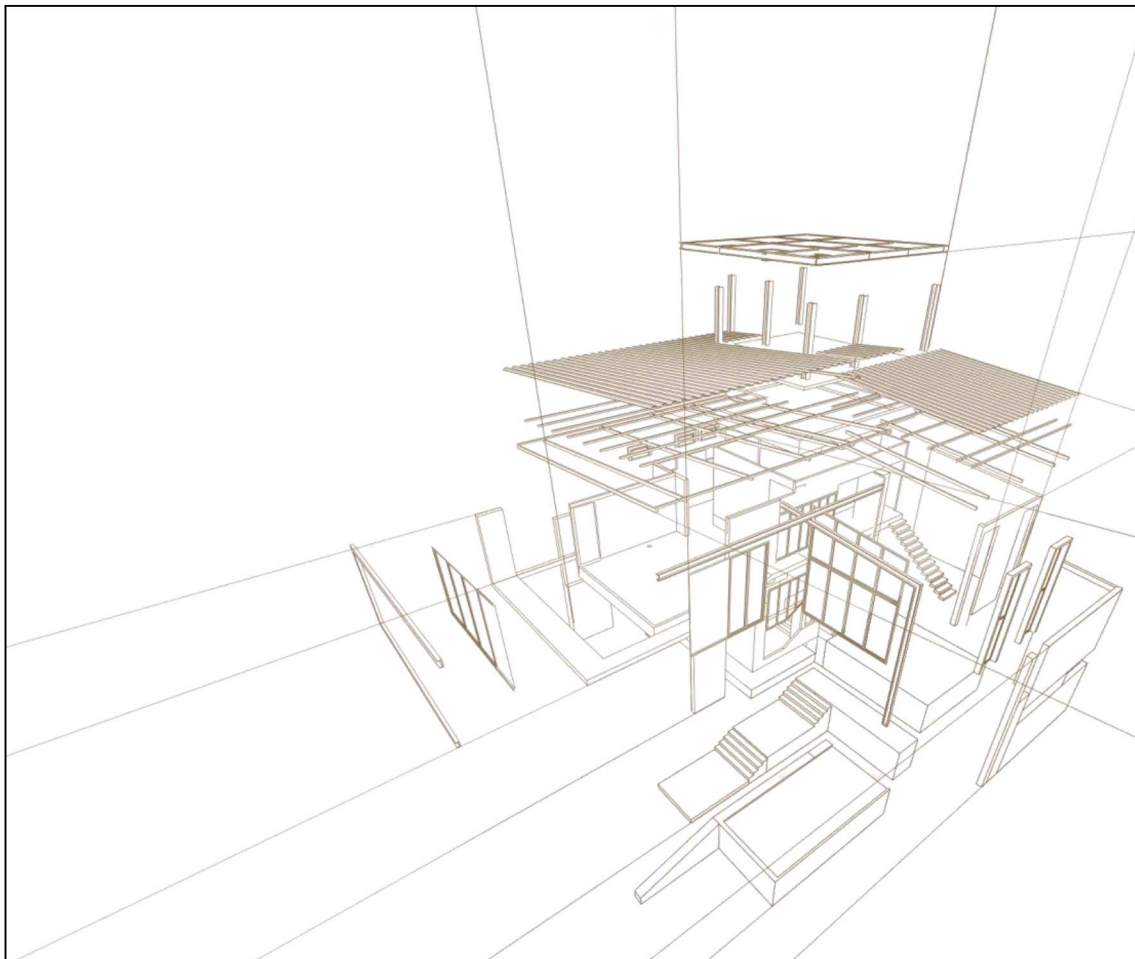
INN (Instituto Nacional de Normalización) (1988). NCh 176/2. Madera – Parte 2: Determinación de la densidad.

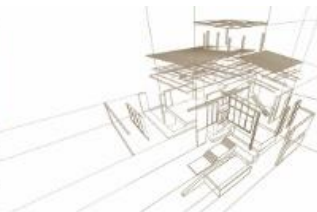
INN (Instituto Nacional de Normalización) (2013). NCh 2148 Madera laminada encolada estructural - Requisitos, métodos de muestreo e inspección.

INN (Instituto Nacional de Normalización) (1991). NCh 2150 Madera Laminada Encolada – Clasificación mecánica y visual de madera aserrada de pino radiata.



III. Caracterización de madera estructural





TEST DE MODELO CONSTITUTIVO ORTOTRÓPICO DE HILL GENERALIZADO APLICADO A MADERAS ESTRUCTURALES.

TEST OF GENERALIZED HILL CONSTITUTIVE MODEL APPLIED TO STRUCTURAL TIMBERS

José A. Santelli ⁽¹⁾ *; Esteban Morales ⁽²⁾; Ricardo Marino ⁽²⁾, Leandro Serraiocco ⁽²⁾

⁽¹⁾ Grupo GITEVE, Depto. Mecánica, UTN-FRGP, Av. Hipólito Yrigoyen 288, 1617 Gral. Pacheco, Buenos Aires, Argentina, <http://www.frgp.utm.edu.ar/giteve>

⁽²⁾ Grupo MADERAS, Depto. Civil, UTN-FRGP, Av. Hipólito Yrigoyen 288, 1617 Gral. Pacheco, Buenos Aires, Argentina

* Contacto: jsantelli@docentes.frgp.utm.edu.ar, ramarino@docentes.frgp.utm.edu.ar

Resumen

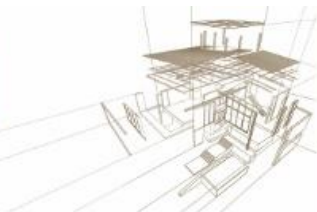
Se desarrolló una metodología para la caracterización de uniones en maderas laminadas y uniones con pernos en maderas macizas para el Álamo Australiano 129 y Álamo Stoneville 67/72 cultivados en el Delta del Paraná. Esta metodología se basa en ensayos no destructivos y la predicción del comportamiento estructural por correlación de ensayos a plena escala con el ajuste de parámetros en modelos numéricos. El primer modelo numérico propuesto fue el ensayo virtual según Norma EN 383, cuyos resultados se muestran en el presente trabajo. Dicho ensayo se implementó en ANSYS Mechanical utilizando un modelo constitutivo que, al computar deformaciones elásticas, utiliza ortotropía lineal, con sus respectivas constantes en las direcciones cartesianas, y al computar las deformaciones plásticas, las mismas se adicionan a las elásticas, siendo basadas en la plasticidad anisotrópica (R. Hill), con una generalización que tenga en cuenta la distorsión de la superficie de fluencia (C.F. Shih), lo cual hace que dicho modelo sea apto para materiales naturales del tipo madera. Las constantes plásticas anisótropas son difíciles de obtener en ensayos, por lo que se implementó un código en MATLAB con una optimización multi-objetivo de dichas constantes, que obtuvo unos resultados compatibles con las restricciones que impone el modelo de Hill Generalizado. Los resultados de la simulación se correlan con los experimentos y se discuten durante el trabajo.

Palabras clave: Norma EN 383, uniones con pernos, elementos finitos, modelo de Hill, correlación, función objetivo.

Abstract.

A methodology had been developed for the characterization of joints in laminated Woods and pinned joints in solid Woods for the Australian Poplar 129 and Stoneville Poplar 67/72 grown in Parana's River Delta. This methodology is based on non-destructive tests and the prediction of the structural behavior by correlation of full-scale testing and parameter adjustment on the models. The first numerical model proposed was the virtual test according to EN 383 Standard, whose results are shown in the present work. That virtual test was implemented in ANSYS Mechanical using a constitutive model that, when computing elastic deformations, uses linear orthotropy, with the corresponding constants in the Cartesian direction, and when computing plastic deformation separately, and added to the elastic afterwards, they are based on anisotropic plasticity (R. Hill) with a generalization that accounts for the distortion of the plastic surface (C.F. Shih), which makes the model suitable for natural materials, such as wood. The anisotropic plastic constant are difficult to obtain in tests, the reason why a MATLAB code was implemented with a multi-objective optimization of such constants, which obtained results compatible with the restrictions that the Generalized Hill model imposes. Modelization results and correlation with tests are shown and discussed in the present work.

Keywords: EN 383 Standard, bolted joints, finite elements, Generalized Hill model, correlation, objective function.



1. INTRODUCCIÓN

La resistencia al aplastamiento en uniones de fijación tipo clavija, es una propiedad que se mide ensayando probetas de madera en laboratorio, determinando una curva carga-desplazamiento elasto-plástica; esta curva está estrechamente relacionada con los límites elásticos de la madera (Strength Properties en inglés), en particular Compresión Perpendicular a la fibra y Compresión Paralela a la fibra.

Los ensayos de tracción y compresión de la madera se realizan con probetas estandarizadas, con las cuales se determinan las propiedades elásticas como módulos de Young y de Poisson, además de los límites citados, entre otros.

En cambio, en la resistencia al aplastamiento, se ensayan probetas rectangulares agujereadas, en donde se coloca un perno de acero, que es quien aplica la fuerza.

En el presente trabajo se realizó un ensayo virtual de resistencia al aplastamiento en una probeta de madera de Pópulus deltoides, clones Australiano 129/60 y Stonville 67, álamo cultivado en el delta del Río Paraná. Los resultados se analizan tanto por ensayo real como ensayo virtual por elementos finitos.

2. MADERA ALAMO DEL DELTA (POLULUS DELTOIDES)

El Delta del Río Paraná (ver Referencia #Bodorowski04) es una gran área verde de 1.750.000 hectáreas.

Actualmente, los tres principales clones de álamos cultivados por los productores forestales del Delta, son los “australiano 129/60”, “australiano 106/60” y el “stoneville 67”.

3. ENSAYOS DE APLASTAMIENTO EN LABORATORIO

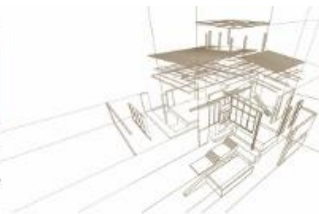
En la Referencia (Marino2014) se realizó una serie de ensayos de aplastamiento en laboratorio basados en la norma EN 383, que utilizaremos como base del trabajo de modelización.

El modelo de Johansen (Johansen49) ha sido adoptado por las reglas de diseño de numerosos países para estimar la capacidad portante de este tipo de conexiones. Este modelo está basado - además de la configuración geométrica de la unión- sobre dos propiedades de los materiales que la integran: la resistencia al aplastamiento de la madera y el momento plástico de los elementos de fijación (INTI CIRSOC 2013; EN 1995-1-1 2005; NDS 2005; NCh 1198 2007).

De esta manera, para el modo de rotura por aplastamiento de la madera, se encontraron valores característicos para los Álamos del Delta. Más adelante en este trabajo se hará una comparativa entre los ensayos de laboratorio con los ensayos virtuales del modelo numérico.

4. MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE ENSAYO DE APLASTAMIENTO

Para la construcción de un modelo numérico representativo del comportamiento plástico de este ensayo empírico, se utilizó el software ANSYS Mechanical para la parte de simulación mecánica, y el software MATLAB para obtener unos límites elásticos compatibles con los requerimientos del modelo numérico. En el caso del ANSYS, se utilizó el elemento finito SOLID95 con la opción de NLGEOM activada, y el modelo de material TB, ANISO que corresponde al modelo de Hill Generalizado, y en el caso del MATLAB, se utilizó para



optimizar las propiedades de materiales, mediante la función fgoalattain, que permite resolver funciones multi-objetivo.

4.1. Propiedades mecánicas de la madera

Las propiedades mecánicas de la madera estructural, en su formato convencional, están descritas en detalle en la referencia (#Ross10), el Handbook de maderas del Departamento de Agricultura de los EEUU. En ella se describen la naturaleza ortotrópica de estos elementos estructurales, las características físicas y las propiedades mecánicas, siempre entendidas como un material ingenieril. A continuación estableceremos los siguientes ejes de referencia para la ortotropía de la madera:

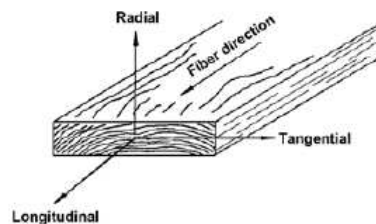


Figura 1. Ejes de referencia para la madera. Imagen extraída de (#Ross10).

Si bien el eje Tangencial no es estrictamente cartesiano se trabajará asumiéndolo así. En el modelo numérico, se tomará la siguiente terna de referencia:

X=RADIAL / Y=TANGENCIAL / Z=LONGITUDINAL

Un material lineal ortótropo u ortotrópico, tendrá las siguientes 9 constantes elásticas:

1. Módulo de Elasticidad: E_x, E_y, E_z
2. Módulo de Poisson: $\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$
3. Módulo de Rigidez: G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}

Los límites elásticos ya específicos para el material madera, se definen de la siguiente manera:

4. Contenido de Humedad: En el caso que nos ocupa se toma un valor de 12%.
5. Módulo de Ruptura: La Tensión de fluencia según la dirección Z (dirección de la fibra)
6. Tensión Perpendicular a la Fibra: Tensión de fluencia en cualquier dirección perpendicular
7. Tensión de Corte paralela a la Fibra: Tensión de corte a la que el material comienza a fluir.
8. Compresión Paralela a la Fibra: Tensión de fluencia de compresión.
9. Compresión Perpendicular a la Fibra: Tensión de fluencia de compresión.

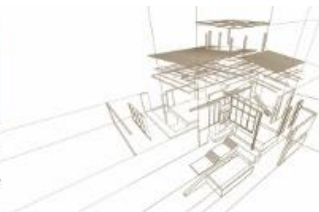
4.2. Mediciones de límites elásticos de forma adaptada para el modelado por elementos finitos

En este trabajo, se realizaron ensayos de laboratorio de manera de establecer un desglose de los límites elásticos, tal como se describe a continuación:

- Tensión Perpendicular a la Fibra: Desglose en Tensión Perpendicular-Radial, y Tensión Perpendicular-Tangencial (ver Figura 1)
- Compresión Perpendicular a la Fibra: Idem anterior, Compresión Perpendicular-Radial, Compresión Perpendicular-Tangencial.

De ésta manera, se obtienen los siguientes límites elásticos no definidos convencionalmente en los manuales de maderas:

- Tensión Perpendicular-Radial
- Tensión Perpendicular-Tangencial



- Compresión Perpendicular-Radial
- Compresión Perpendicular-Tangencial

De acuerdo a los valores medidos en el laboratorio, se tomó un límite a la compresión de 3 MPa cuando la madera se comprime en la dirección Y (paralela a anillos de crecimiento), y de 6 MPa cuando la madera se comprime en la dirección X (perpendicular a anillos de crecimiento).

5. MODELO NUMÉRICO DE APLASTAMIENTO

El modelado numérico del ensayo de aplastamiento consiste en, literalmente, realizar un ensayo “virtual” en una computadora en lugar del laboratorio. Este ensayo virtual tiene que contar con hipótesis lo suficientemente aproximadas al caso de la madera, de manera que a la hora de la correlación la misma sea aceptable. Dichas hipótesis podrían enumerarse en: Modelo Constitutivo (modelo de comportamiento de material), Modelo Mecánico (malla y tipo de elementos finitos), y Condiciones de borde (apoyos, metodología de contacto, cargas). En cuanto a la metodología de contacto, cabe destacar que en el caso de un ensayo físico de aplastamiento, siempre se registra una holgura entre el perno y la probeta, mientras que en el caso del modelo numérico, dicha holgura se consideró como cero (contacto perfecto).

5.1. Modelo constitutivo de Hill Generalizado

El Criterio de Hill (opción TB, HILL en Ansys) es una extensión del Criterio de Falla de Von Mises, que puede ser utilizado en materiales cuya microestructura influencia el comportamiento macroscópico del material, como p. ej. el caso de metales en un proceso de laminado. (Véase Referencia Hill98). Sin embargo, este criterio no es suficiente para analizar maderas, cuyo comportamiento ortotrópico, si bien tiene tres planos de referencia, observa un diferente comportamiento a la tracción y a la compresión.

Para las maderas, se utiliza una extensión del Criterio de Hill (opción TB, ANISO en Ansys), conocida como Criterio de Hill Generalizado (Véase Referencia Shih78), que permite tener en cuenta la diferencia entre límites a la tracción y a la compresión.

En la figura en la imagen de la izquierda, se ve la superficie de fluencia cilíndrica de Hill, caracterizada por estar desplazada según tres planos normales. A la derecha, en la imagen 2D, se ve que, además de desplazada, dicha superficie está distorsionada porque tiene distinta resistencia a la tracción que a la compresión.

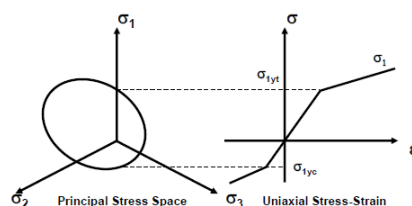


Figura 2. Superficie de fluencia para el modelo de Hill Generalizado.

Se definen los siguientes coeficientes ortotrópicos:

$$M_{ii} = \frac{K}{\sigma_i^+ \sigma_i^-} \quad (1)$$

En donde K es la tensión de fluencia en una dirección dada.

$$L_i = M_{ii}(\sigma_i^+ - \sigma_i^-) \quad (2)$$

Estos coeficientes, K y L, y M, están definidos de tal manera que si la tensión a la compresión es igual a la de tracción los Li se igualan a cero. Además, si el material es ortotrópico, todos los



coeficientes M_{ii} de esfuerzo normal serán igual a uno, los coeficientes al corte serán igual a tres, y la superficie de fluencia se reduciría a la de Von Mises.

En Ansys, el modelo de Hill Generalizado está programado como una ley de endurecimiento isotrópico bilineal, con diferentes valores a la tensión y a la compresión, que se pueden definir tanto para la tensión de fluencia como para el módulo elástico tangente en las tres direcciones ortogonales.

En un trabajo similar (Referencia #Moses02), en el cual se basó la utilización del modelo anisotrópico para este trabajo, así como en la teoría citada, se da cuenta de dos condiciones que tiene que cumplir la superficie de fluencia, para poder asegurar la convergencia del cálculo: La superficie de fluencia siempre debe permanecer cerrada, caso contrario no tendría sentido físico alguno

$$M_{11}^2 + M_{22}^2 + M_{33}^2 - 2(M_{11}M_{22} + M_{22}M_{33} + M_{11}M_{33}) < 0 \quad (3)$$

Se debe satisfacer la condición de consistencia, esto es, la incompresibilidad plástica (o sea que las deformaciones plásticas no contribuyan a ningún cambio volumétrico).

$$\frac{\sigma_x^+ - \sigma_x^-}{\sigma_x^+ \sigma_x^-} + \frac{\sigma_y^+ - \sigma_y^-}{\sigma_y^+ \sigma_y^-} + \frac{\sigma_z^+ - \sigma_z^-}{\sigma_z^+ \sigma_z^-} = 0 \quad (4)$$

Las tensiones de fluencia anisotrópicas y los módulos tangentes no son independientes para este modelo. Estos criterios deben ser satisfechos, caso contrario el código de elementos finitos, en sus chequeos previos al análisis, arroja mensajes de error.

5.2. Compatibilización entre los datos de material y el modelo de Hill Generalizado

Se realizó una compatibilización de los datos obtenidos de laboratorio y de las referencias como para que puedan ser utilizados en el código de elementos finitos Ansys. Ello se realizó utilizando la optimización multivariable mediante el código MATLAB. Básicamente, se definió una optimización multi-objetivo sin restricciones, de manera de cumplir simultáneamente con las ecuaciones (3) y (4). A continuación, se muestra la variación en las propiedades:

Tabla 1: Optimización multi-objetivo para compatibilizar los valores de las propiedades (OLD) de manera que se puedan utilizar en un análisis de elementos finitos (NEW).

OLD Orthotr stress limits		NEW Orthotr stress limits		Difference
XTEN	3	XTEN	2,9497	-1,68%
YTEN	6	YTEN	5,9874	-0,21%
ZTEN	70	ZTEN	69,9999	0,00%
XCMP	6	XCMP	6,0126	0,21%
YCMP	3	YCMP	3,0504	1,68%
ZCMP	38,2	ZCMP	38,2003	0,00%
XY	4,1	XY	4,1	0,00%
XZ	4,1	XZ	4,1	0,00%
YZ	8,2	YZ	8,2	0,00%



5.3. Malla de elementos finitos

Para el modelo numérico se utilizaron elementos 3D del tipo SOLID95, con la opción NLGEOM activada, tanto para la representación de la probeta de madera como para el perno de acero:

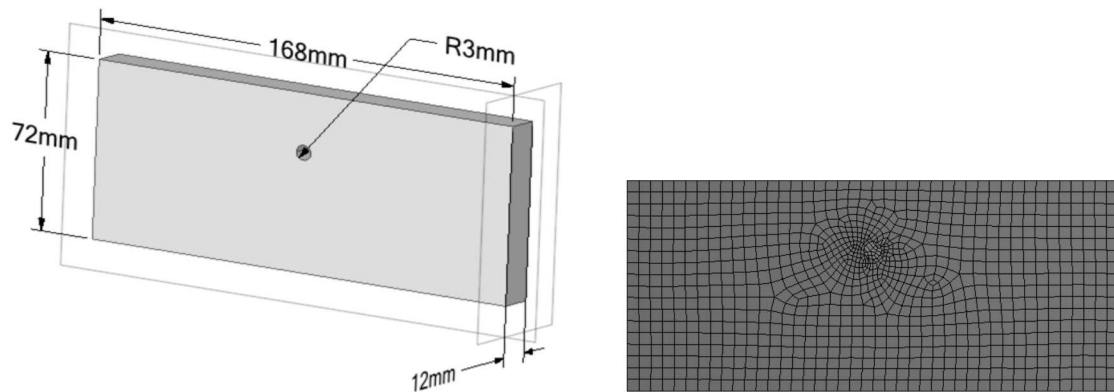


Figura 3: Malla de elementos finitos para el ensayo perpendicular a la fibra.

5.4. Condiciones de borde del modelo numérico

Se aplicaron apoyos simples en la parte inferior y lateral del modelo para estabilizar la solución, y se aplicó verticalmente un desplazamiento prescrito de 2 mm en los extremos del perno de acero, permitiéndole cierta flexibilidad, pero al ser las caras desplazadas de forma vertical, se comporta prácticamente como un elemento rígido respecto de la madera.

En el contacto perno-madera, se aplicó un coeficiente de fricción de 0,4 (Ver Referencia #Johansen49).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados del modelo numérico. Se definirán tres casos de estudio:

- Perpendicular-Tangencial
- Perpendicular-Radial
- Perpendicular-Semicorte

Se muestran diferentes resultados para cada caso en particular. El área de estudio de interés, se muestra en la figura a continuación:

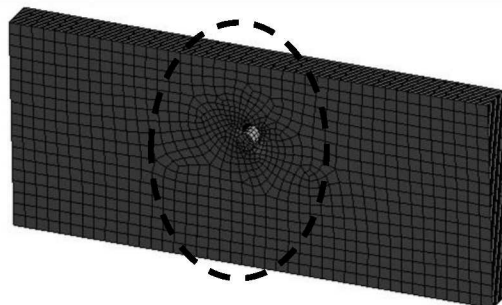


Figura 4: Modelo Perpendicular-Tangencial deformado, mostrando el área de interés para los resultados.



6.1. Caso 1. Aplastamiento Perpendicular-Tangencial

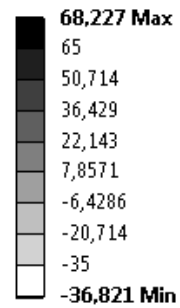
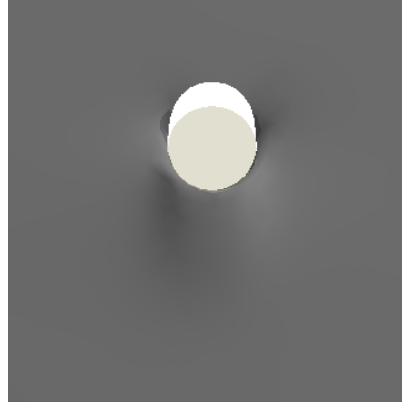
Campo de tensiones:

Unidades: MPa

Componente XX



Componente YY



Componente ZZ



Componente YZ

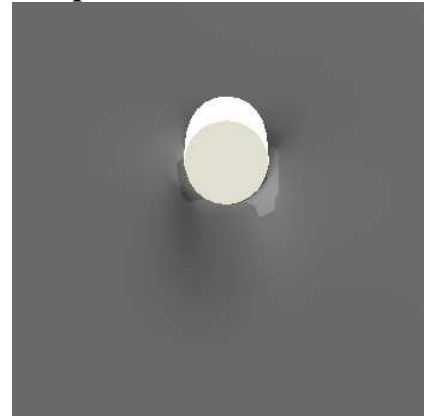


Figura 5: Caso 1. Componentes de la tensión en los tres ejes principales y tensión de corte en el plano XY.

Deformaciones Plásticas:

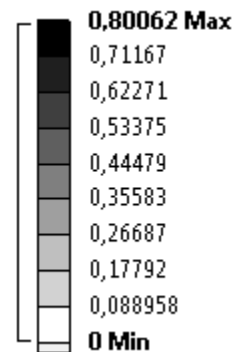
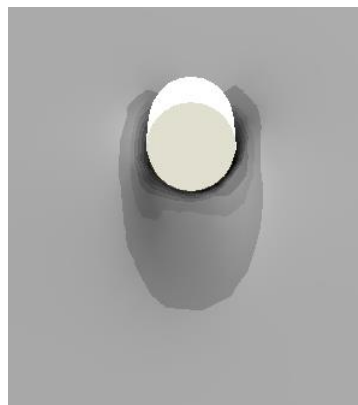
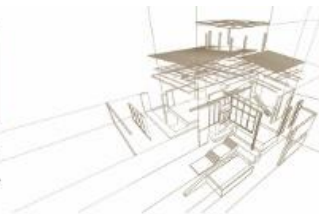


Figura 6: Caso 1. Deformaciones plásticas.



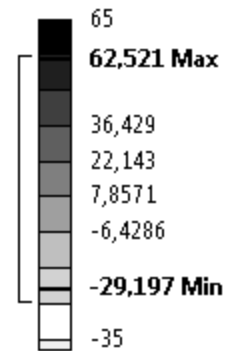
6.2. Caso 2. Aplastamiento Perpendicular-Radial

Campo de tensiones:
Unidades: MPa

Componente XX



Componente YY



Componente ZZ



Componente YZ



Figura 7: Caso 2. Componentes de la tensión en los tres ejes principales y tensión de corte en el plano XY.

Deformación Plástica:

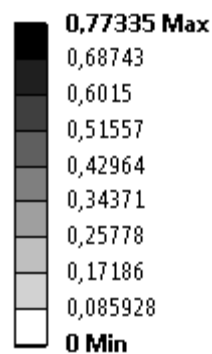
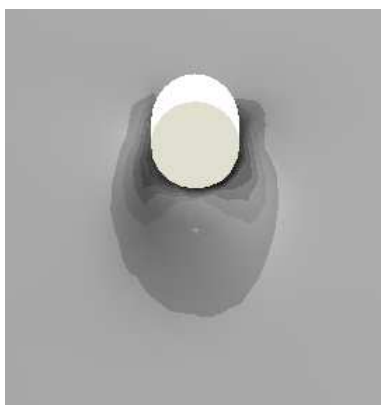
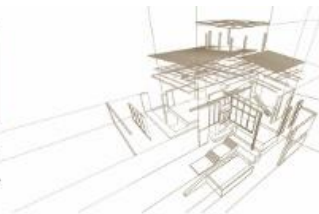


Figura 8: Caso 2. Deformaciones plásticas.



6.3. Caso 3. Aplastamiento Perpendicular-Semicorte

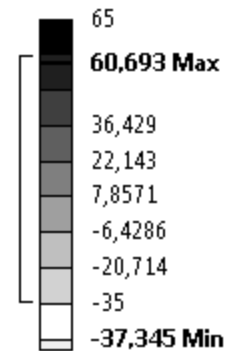
Campo de tensiones:

Unidades: MPa

Componente XX



Componente YY



Componente ZZ



Componente YZ



Figura 9: Caso 3. Componentes de la tensión en los tres ejes principales y tensión de corte en el plano XY.

Deformación Plástica:

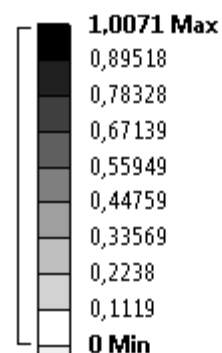
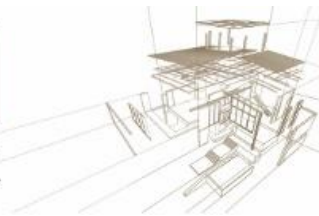


Figura 10: Caso 2. Deformaciones plásticas.



6.4. Caso 1A – Aplastamiento Perpendicular-Tangencial diámetro 12,7 mm

Para este caso, se muestra la curva Fuerza-Desplazamiento en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

6.5. Caso 1B – Aplastamiento Perpendicular-Tangencial diámetro 8 mm

Para este caso, se muestra la curva Fuerza-Desplazamiento en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

6.6. Discusión de los resultados

Tabla 1: Resultados de tensión y deformación para los tres casos bajo estudio.

	Máx SX [MPa]	Máx SY [MPa]	Máx SZ [MPa]	Máx SYZ [MPa]	Máx Def. Plast.
Caso 1	70,774	74,11	68,227	12,156	0,80062
Caso 2	52,601	55,158	65,521	17,189	0,77335
Caso 3	8,3954	31,166	60,693	1,6695	1,0071

En el Caso 3 (semicorte), la caída de la tensión cortante es significativa.

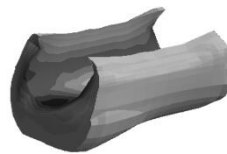


Figura 11: Iso-Superficies de la región plástica para el Caso 3 (semicorte).

6.7. Correlación con el ensayo de laboratorio

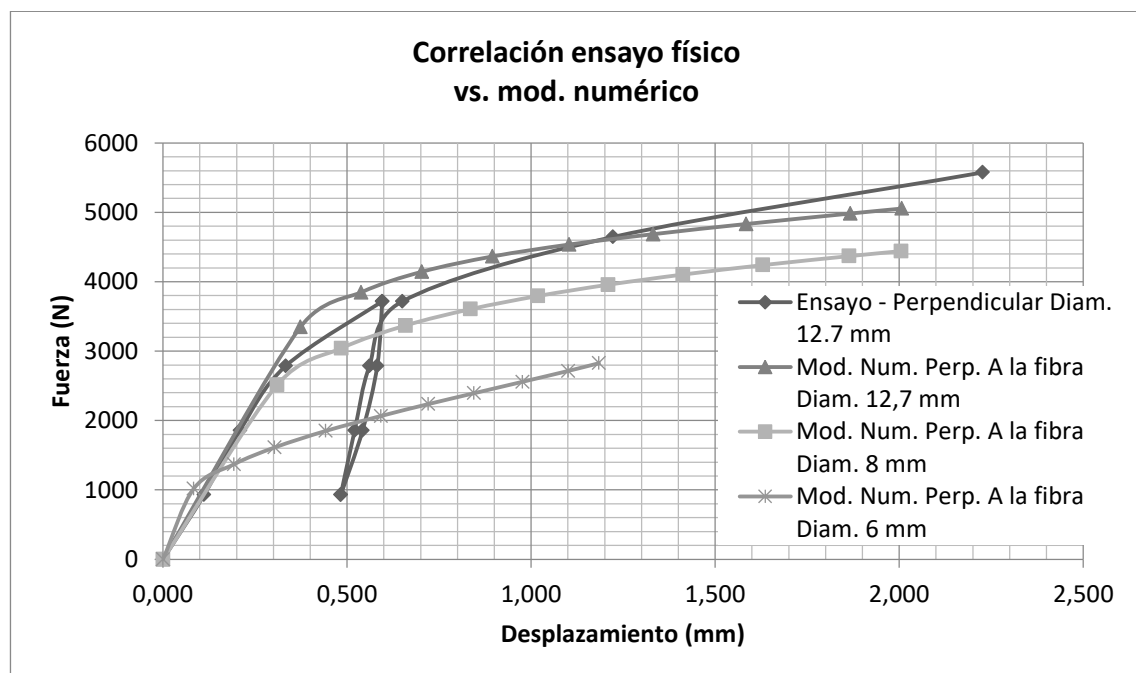




Figura 12: Correlación Fuerza-Desplazamiento para el ensayo vs. Modelo, para un diámetro de bulón de 12,7 mm. Adicionalmente, se muestra el efecto de reducción de diámetro en el ensayo virtual.

En el gráfico se muestran los resultados del ensayo virtual vs. ensayo real, para las propiedades de material optimizadas, entendidos como fuerza vs. Desplazamiento.

Se observa una correlación modelo-experimento, que presenta diferencias en cuanto a pendientes, tanto de módulos elásticos como de módulos tangentes (plasticidad). También el coeficiente de fricción entre perno-madera y los valores de la tensión de fluencia en sí, influyen en el resultado de esta curva.

Sin embargo, a pesar de estas diferencias, se puede observar un comportamiento aceptablemente similar al caso de laboratorio.

7. CONCLUSIONES

El modelo constitutivo de Hill Generalizado presenta un comportamiento bilineal, cuyos valores pueden ajustarse hasta hacerlos coincidir aceptablemente con los de un ensayo real, respetando todas las pautas correspondientes del caso.

En la correlación se observa que la parte plástica podría ajustarse mediante valores de modulo tangente ajustados para que coincidan de forma más precisa con el ensayo.

La visualización del campo de tensiones en el modelo numérico, permite observar la influencia de cada componente de la tensión. En particular, se observa la alta tensión en la dirección de la fibra (dirección ZZ).

Las deformaciones plásticas observadas en el modelo numérico, sobre todo las observadas en el semicorte, muestran que prácticamente las propiedades en la dirección paralela-tangencial y paralela-radial, no presentan grandes diferencias. A pesar de la mayor resistencia en la dirección paralela-radial, la otra dirección no presenta un comportamiento sensiblemente diferente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Borodowski, E. y Suárez, (2004), El cultivo de álamos y sauces: su historia en el Delta del Paraná, SAGPyA Forestal,

Marino, Ricardo, (2014), Resistencia al aplastamiento para dos diámetros de elementos de fijación tipo clavija, Memorias 2014 Segundas jornadas de investigación en Ingeniería Civil,

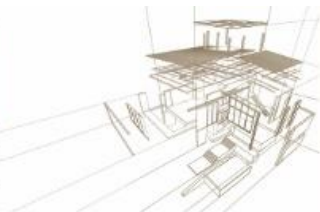
Ross, Robert J., et al. (2010), Wood handbook: wood as an engineering material. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, 2010: 509 p. 1 v., vol. 190.

Hill, Rodney (1998), The mathematical theory of plasticity. Vol. 11. Oxford university press,.

Shih, C. F., & Lee, D. (1978). Further developments in anisotropic plasticity. Journal of Engineering Materials and Technology, 100(3), 294-302.

Moses, D. M., & Prion, H. G. (2002). Anisotropic plasticity and failure prediction in wood composites. Ansys. net (online).

Johansen, K. W. (1949). Theory of timber connections. Int Assoc Bridge Struct Eng, 9, 249-262.



DETERMINAÇÃO DA ELASTICIDADE DE PAINÉIS LIGNOCELULÓSICOS - DO TIPO OSSB – POR TESTE NÃO DESTRUTIVO

ELASTICITY DETERMINATION OF LIGNOCELLULOSIC BOARDS – OSSB TYPE – BY NON-DESTRUCTIVE TEST

Silva, João Vítor Felipe ^{(1)*}; Silva, Maria Fernanda Felipe ⁽²⁾; Ferreira, Bruno Santos ⁽³⁾;
Campos, Cristiane Inácio de ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Mestrando em Eng. Mec. Departamento de Engenharia Mecânica. FEG-UNESP. Guaratinguetá-SP, Brasil

⁽²⁾ Graduada em Eng. Ind. Madeireira. Campus Experimental de Itapeva. UNESP. Itapeva-SP, Brasil

⁽³⁾ Dr. Eng. Mec. Campus Experimental de Itapeva. UNESP. Itapeva-SP, Brasil

⁽⁴⁾ Dr.ª Eng. Civil. Campus Experimental de Itapeva. UNESP. Itapeva-SP, Brasil

* Contacto: jvf.silva@unesp.br

Resumen

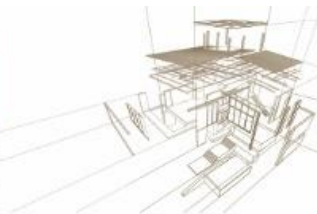
O uso de técnicas não destrutivas na caracterização de compósitos a base de madeira e outros materiais lignocelulósicos tem se mostrado uma área de pesquisa de destaque nas últimas décadas, especialmente devido aos benefícios de se determinar propriedades do material sem que o mesmo perca sua possibilidade de aplicação. Este trabalho teve como objetivo avaliar o ajuste do modelo linear na correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico (MOE_d) e o módulo de elasticidade em flexão estática (MOE) em painéis lignocelulósicos do tipo OSSB (*Oriented Structural Straw Board*) com diferentes teores de adesivo em sua composição. Os painéis OSSB foram produzidos com palha de soja e adesivo poliuretano a base de óleo de mamona em quatro teores (6%, 9%, 12% e 15%, com base no peso seco de palha). Os ensaios não destrutivos foram realizados com base na ASTM E1876-15 para determinar o MOE_d “fora do plano” utilizando o sistema SONELASTIC[®] (incluindo o suporte de amostras, o dispositivo de impacto e o microfone) e o ensaio de flexão estática de três pontos foi realizado em uma máquina universal de ensaios. Os resultados encontrados indicaram que o ajuste linear varia de acordo com o teor de adesivo na composição do painel e com o sentido de orientação da palha na camada externa do compósito. Os valores de R^2 variaram entre 0,74 e 0,94 indicando que os painéis contendo 9% e 15% geram melhor ajuste.

Palavras-chave: SONELASTIC[®], Compósito lignocelulósico, Regressão linear, Correlação.

Abstract

The use of non-destructive techniques in the characterization of wood-based composites and other lignocellulosic materials has been an area of research in the last decades, mainly due to the benefits of determining properties of the material without losing its possibility of later application. This work aimed to evaluate the fit of the linear model in the correlation between the dynamic modulus of elasticity (MOE_d) and the modulus of elasticity in static bending (MOE) of OSSB (*Oriented Structural Straw Board*) tested with different adhesive contents. The OSSBs were produced with soybean straw and castor oil in four adhesive proportions (6%, 9%, 12% and 15%, based on the dry mass of straw). The non-destructive tests were performed based on ASTM E1876-15 for the determination of the “out-of-plane” MOE_d using the SONELASTIC[®] system (including support for samples, impact instrument and microphone) and the static three-point bending tests were performed in a universal test machine. The results indicate that the linear adjustment varies according to the adhesive content in the panel composition and the direction of the straw in the outer layer of the composite. R^2 values ranging from 0.79 to 0.94 indicate that 9% and 15% adhesive content gives the best curve fit.

Keywords: SONELASTIC[®], Lignocellulosic composite, Linear regression, Correlation.



1. INTRODUCCIÓN

Entre las diversas formas de caracterización de los materiales compuestos lignocelulósicos se encuentran los métodos no destructivos (NDT). Según Gholizadeh (2016), NDT indica el proceso de evaluación e inspección de los materiales o componentes, para la caracterización sin alterar los atributos originales o dañar el objeto que se está probando.

Se han realizado estudios para caracterizar, por métodos no destructivos, maderas (Ribeiro et al. 2016; Carrasco et al., 2017; Yang et al. 2017) y compuestos a base de madera (Pizzol, Mantilla y Carrasco, 2017; Rosa et al. 2019). Sin embargo, pocos se han desarrollado para caracterizar compuestos lignocelulósicos que no sean de madera, como Oliveira et al. (2017) y Zhang et al. (2018), estudiaron tableros de partículas hechos de residuos de caña de azúcar.

Hay una fuerte tendencia en el uso de especies no madereras y residuos agrícolas como materia prima en la producción de paneles compuestos, siendo una alternativa ecológicamente favorable para el desarrollo tecnológico del sector (Bekhta, Korkut y Hiziroglu 2013; Silva et al. 2015).

El uso de residuos agrícolas como la paja en industrias como material renovable para la producción de productos de valor agregado ha despertado interés debido a la presencia de polímeros naturales, bajo costo, amplia disponibilidad y reducción de la contaminación ambiental (Akpınar et al. 2012).

Entre los tableros que utilizan paja se encuentra el OSSB (*Oriented Structural Straw Board*), que fue patentado por Alberta Research Council para su aplicación en la construcción, hecho de paja de trigo, cuyos beneficios son: la reducción de las emisiones de CO₂ por parte de quema de paja, reduce la deforestación de árboles nativos y aumenta los ingresos para los agricultores mediante la venta de un subproducto de su cosecha (Tang 2018). La primera planta industrial OSSB ha estado en operación en China desde octubre de 2009 (Han et al. 2012).

Según EMBRAPA (Corporación Brasileña de Investigación Agropecuaria) (2019), la producción mundial de cereales alcanzó 362 millones de toneladas, de las cuales 123 millones fueron producidas por los Estados Unidos y 114 millones por Brasil, donde los estados que más producen son: Mato Grosso, Paraná y Rio Grande do Sul. Por lo tanto, existe la propuesta de producir paneles OSSB con residuos de paja de soja.

Otro problema es el adhesivo utilizado en la fabricación del compuesto. Para la producción a escala industrial del tablero OSSB, se usa resina de isocianato polimérico pMDI (diisocianato de difenilmetano) que cuesta aproximadamente diez veces más costosa que la resina de urea formaldehído (Han et al., 2012; Bekhta, Korkut y Hiziroglu 2013; Cheng, Han y Fang 2013). Otro tipo de resina que no contiene formaldehído en su composición es el adhesivo poliuretano producido con aceite de ricino, que tiene un alto rendimiento mecánico y abundancia en Brasil (Bertolini et al. 2014; Nascimento et al. 2015; Nasser 2016; Bianche et al. 2017). Se han desarrollado estudios que involucran la aplicación de adhesivo de PU a base de aceite de ricino a materiales compuestos a base de madera como Tang et al. (2008), Bertolini et al. (2014) y Bianche et al. (2017). Sin embargo, pocos estudios han analizado las propiedades de los compuestos producidos con este adhesivo y otros materiales lignocelulósicos.

A partir de lo anterior, este trabajo tuvo como objetivo evaluar las propiedades mecánicas de los paneles OSSB mediante el método no destructivo de excitación por impulsos y correlacionar estos resultados con los de la prueba de flexión estática destructiva convencional.



2. METODOLOGÍA

A seguir se describe cómo se fabricaron los tableros OSSB, cómo se realizaron los ensayos de flexión estática y no destructiva y el análisis estadístico de los resultados.

2.1. Fabricación de los tableros OSSB

Las materias primas utilizadas en este trabajo fueron la paja de soja (*Glycine Max L.*) y un adhesivo de poliuretano bi-componente a base de aceite de ricino. La paja de soja utilizada se refiere a la cosecha 2017/2018, en la ciudad Itapeva, en provincia de San Pablo y el adhesivo utilizado fue poliuretano bi-componente de aceite de ricino producido por la empresa KEHL® con un contenido de sólidos del 100%, siendo el componente A polioliol a base de aceite de ricino y componente B, el prepolímero que es un isocianato polifuncional.

La variable estudiada en este trabajo fue el contenido de adhesivo del tablero, y se definieron cuatro tratamientos cuyos porcentajes oscilaron entre 6% y 15%, según el peso de la paja seca. La masa total de los paneles fue constante ($1565 \cdot 10^{-3}$ kg), y en total se produjeron tres tableros por tratamiento con dimensiones nominales de 42 cm x 42 cm x 15 mm y una densidad objetivo de 650 kg m^{-3} .

El procesamiento inicial de la paja se basó en el método descrito por Bach, Domier y Holowach (1999) y Silva et al. (2018), donde el material de campo debe cortarse y secarse antes de la producción de compuestos.

La preparación del adhesivo de poliuretano a base de aceite de ricino consistió en pesar y mezclar los dos componentes, polioliol y prepolímero, en una proporción de 1: 1.

La paja procesada ya seca también se pesó y luego se mezcló con el adhesivo dentro de un aglutinante de laboratorio. La resina se aplicó manualmente, ya que su viscosidad impidió el uso de la pistola de gravedad, y el procedimiento de rotación del equipo de mezcla duró 10 minutos.

El material adherido se dividió en tres partes, en proporciones en masa de 30: 40: 30, para las capas exterior e interior. La orientación del material en la caja de formación se realizó manualmente, donde la capa interna se dispuso de forma ortogonal en relación con las externas.

El colchón formado se sometió al procedimiento de prensado a temperatura ambiente en una prensa neumática durante 10 minutos y 0,4 MPa de presión. El proceso que siguió fue la prensa caliente, en una prensa hidráulica calentada, que se produjo en tres ciclos de 180 s con dos intervalos de alivio de presión de 3000 ms a 100 °C con una presión de 4 MPa, siguiendo las recomendaciones de Maloney (1993), Cheng, Han y Fang (2013) y Silva et al. (2016).

Los tableros producidos fueron controlados por el clima a 25 °C y 65% de humedad relativa durante al menos 72 h. Posteriormente, los especímenes de prueba fueron producidos para pruebas físicas y mecánicas, mediante corte circular con sierra, en las dimensiones recomendadas por la EN 310 (1993) para la caracterización de OSB en flexión estática y lijado de las superficies de las capas exteriores.

2.2. Ensayos no destructivos

El ensayo no destructivo se basó en ASTM E1876 (2015), a partir de la cual se determinó el módulo de elasticidad dinámica "fuera de plano" de los tableros OSSB producidos, paralelos y perpendiculares a dirección de las fibras de la capa exterior.



Se hicieron especímenes rectangulares de 350 mm por 50 mm, la dimensión más grande se tomó paralela y perpendicular a la dirección de la pajilla de la capa exterior de la placa. Cada espécimen tenía su masa, ancho, grosor y longitud determinados antes de las pruebas.

El sistema SONELASTIC® se utilizó para realizar el ensayo, donde cada espécimen de prueba se apoyó en un soporte metálico rígido cerca del dispositivo de detección (micrófono) acoplado a una computadora (Figura 1). La excitación por impulso ocurrió con el impacto de una varilla polimérica flexible con punta de metal en la parte central superior de la espécimen de prueba.

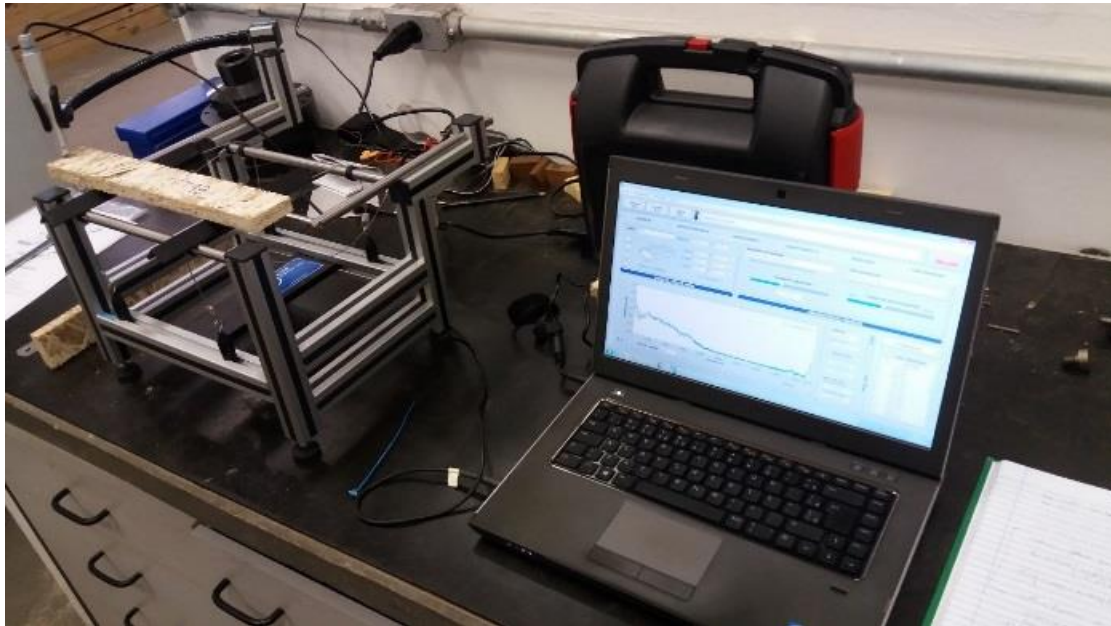


Figura 1: Equipamientos utilizados en el ensayo no destructivo de excitación por el impulso.

La adquisición de datos de la frecuencia de vibración natural de la muestra se realizó mediante el *software* ATCP Sonelastic 3.0. La frecuencia natural de vibración se determinó promediando cinco mediciones consecutivas cuya variación fue inferior al 1% de la medición anterior. El tiempo de adquisición utilizado fue de 0.683 segundos utilizando un filtro de detección estándar (hasta 20 kHz).

Las ecuaciones 1 y 2 presentan el cálculo del módulo dinámico de elasticidad.

$$MOE_d = 0,9465 \cdot \left(\frac{m \cdot f_f^2}{l_2} \right) \cdot \left(\frac{l_1^3}{t^3} \right) \cdot T_1, \quad (1)$$

donde:

- MOE_d es el módulo de elasticidad dinámico “fuera de plano” (Pa),
- m es la masa (kg),
- f_f es la frecuencia de oscilación natural del espécimen de prueba (Hz),
- l_2 es el ancho del espécimen de prueba (m),
- l_1 es la longitud del espécimen de prueba (m),
- t es el espesor del espécimen de prueba (m),
- T_1 es el factor de corrección para el modo de flexión fundamental (sin dimensiones).

$$T_1 = \left[1,000 + 6,585 \cdot \left(\frac{t}{l_1} \right)^2 \right], \quad (2)$$

2.3. Ensayos de flexión estática

Estos ensayos se basaron en la norma EN 310 (1993), que se utiliza para caracterizar la rigidez y la resistencia a la flexión estática de los tableros a base de madera. Cada muestra se apoyó entre dos soportes cilíndricos de 300 mm, y la carga se aplicó con una cuchilla en el centro del tramo. La velocidad de carga fue tal que la rotura de la muestra ocurrió dentro de 60 ± 30 s.

La Figura 2 muestra uno de los especímenes de prueba durante el ensayo de flexión estática en la máquina universal EMIC 300 kN - Laboratorio de Propiedades de Materiales de UNESP en el Campus Experimental de Itapeva.



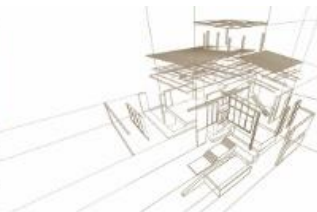
Figura 2: Ensayo de flexión estática de un espécimen de prueba de tableros OSSB.

Los datos se ingresaron utilizando el software Tesc versión 3.04, a partir del cual se calcularon la elasticidad y la resistencia a la flexión para cada espécimen. La ecuación 3 presenta el cálculo del módulo de elasticidad.

$$MOE = \frac{l^3 \cdot (F_{40\%} - F_{10\%})}{4 \cdot l_2 \cdot t^3 \cdot (a_{40\%} - a_{10\%})} \quad (3)$$

donde:

- MOE es el módulo de elasticidad en flexión estática (Pa),
- l es la distancia entre apoyos (m),
- $(F_{40\%} - F_{10\%})$ es el incremento de la fuerza en el rango elástico de la curva de desplazamiento de la fuerza X cuyos porcentajes están en relación con la carga máxima (N),
- $(a_{40\%} - a_{10\%})$ es el incremento de la flecha en el centro de la distancia entre apoyos, debido al incremento de la fuerza $(F_{40\%} - F_{10\%})$ (m).



2.4. Análisis estadística

Se realizó la regresión lineal de los resultados, correlacionando el Módulo de Elasticidad en función del Módulo de Elasticidad Dinámica de los tableros OSSB. Así, se determinaron la ecuación de la recta y el coeficiente de correlación (R^2). Además, el análisis de varianza con los resultados de las pruebas no destructivas se realizó mediante la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

3. RESULTADOS

La Tabla 1 muestra los resultados medios de los ensayos de caracterización no destructiva, junto con la desviación estándar de los resultados y el análisis de la varianza. La Figura 3 muestra los gráficos de regresión lineal, que correlacionan el módulo elástico estático (MOE) en función del módulo elástico dinámico (MOE_d).

Tabla 1: Resultados de los ensayos no destructivos en tableros OSSB

Tratamiento	MOE_d paralelo (10^6 Pa)	MOE_d perpendicular (10^6 Pa)
T6	1591a (224)	618a (98)
T9	2203ab (486)	733a (317)
T12	2854bc (562)	701a (167)
T15	3458c (439)	766a (187)

El módulo de elasticidad dinámico de los tableros OSSB en la dirección paralela de las placas fue significativamente mayor que en la dirección perpendicular, lo que indica la influencia de la orientación de la paja durante el proceso de fabricación.

El aumento en el contenido de adhesivo influyó significativamente en el módulo dinámico de elasticidad solo en dirección paralela a las fibras de la madera de la capa exterior, sin efecto en la dirección perpendicular.

Se realizó la correlación entre el módulo dinámico de elasticidad de las placas y el módulo de elasticidad en flexión estática (Figura 3). Los tratamientos T9 y T15 mostraron un alto coeficiente de correlación (R^2), superior a 0,79, en ambas direcciones de orientación de la paja en la capa exterior. Los tratamientos T6, paralelos y T12, perpendiculares, presentaron el coeficiente de correlación más bajo, cercano a 0,5.

Yang et al. (2017) encontraron valores de R^2 entre 0.66 y 0.80 en la correlación entre MOE_d y MOE, para madera de *Pinus elliottii*, utilizando el método de onda de estrés. Carrasco et al. (2017) encontraron valores de correlación entre 0.56 y 0.97 para las propiedades elásticas en compresión, tracción y corte en maderas de origen brasileña. En ambos casos, se observa la proximidad de los valores de R^2 con los obtenidos en el presente estudio.

Pizzol, Mantilla y Carrasco (2017) encontraron R^2 de 0.73 en tableros de madera contrachapada, empleados en formas de concreto. Los autores utilizaron el dispositivo Sonelastic® para la caracterización, lo que indica que el nivel de correlación encontrado es cercano al de los paneles a base de madera.

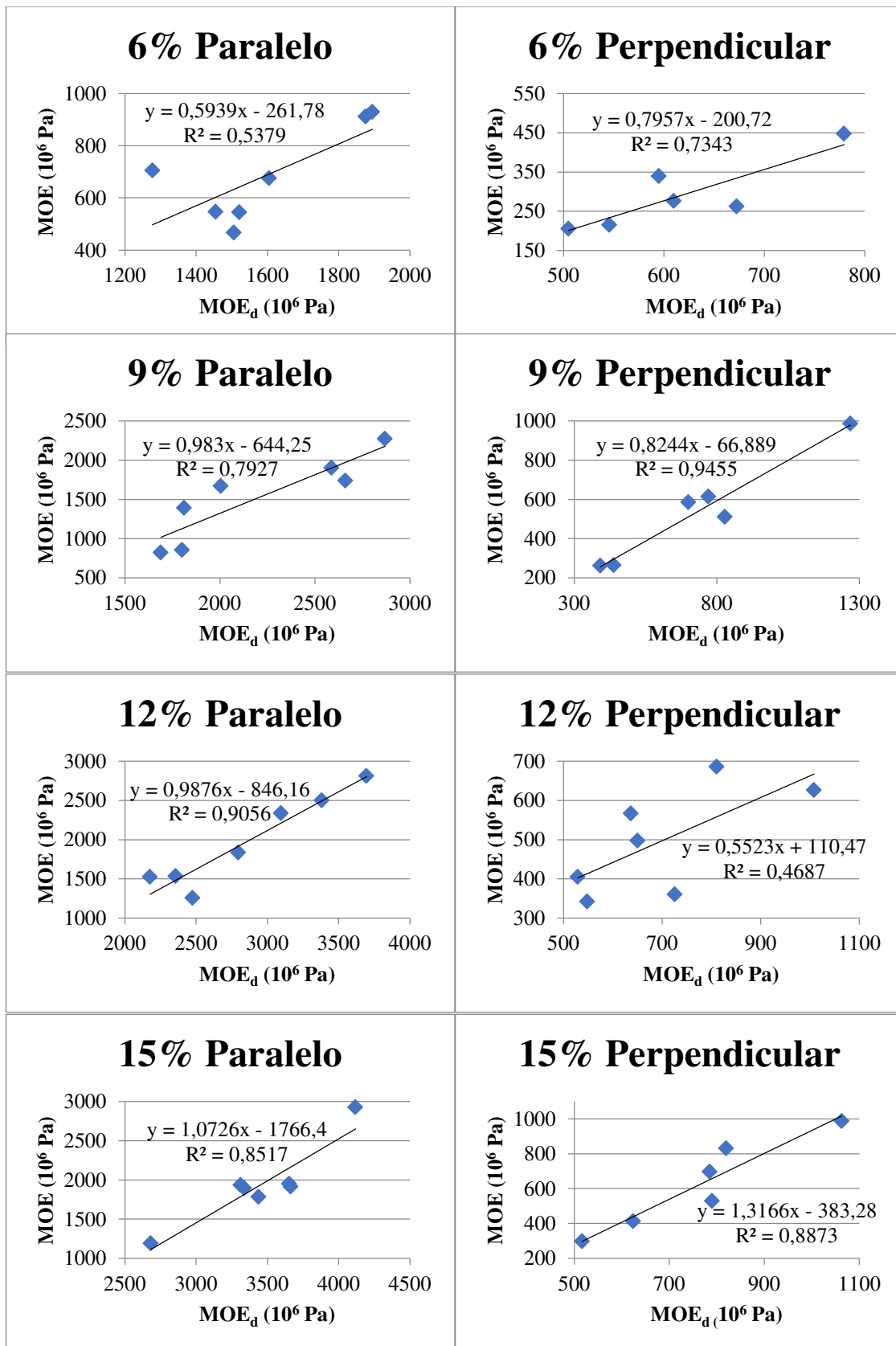
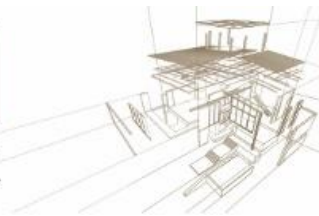


Figura 3: Resultados de la analice de correlación para todos los tratamientos.



4. CONCLUSIONES

Los resultados indicaron que el ajuste lineal varía según el contenido de adhesivo en la composición del panel y la dirección de la orientación de la paja en la capa exterior del compuesto. Las muestras orientadas en la dirección perpendicular no mostraron diferencias, independientemente del contenido de adhesivo utilizado en la fabricación. Los valores de R^2 oscilaron entre 0,74 y 0,94, lo que indica que los tableros que contienen 9% y 15% generan un mejor ajuste. Los resultados obtenidos fueron similares a los encontrados en otros estudios con piezas de madera y tableros a base de madera.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo por ayuda financiera a JVFS para el desarrollo de su proyecto de maestría, del 01/05/2018 al 29/02/2020; la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Código de Financiamento 001; y al Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, No. 131765 / 2018-3. A Erick Hertel Almeida por la donación de paja de soja.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akpinar, O., Sabanci, S., Levent, O. and Sayaslan, A. (2012). Evaluation of antioxidant activity of dilute acid hydrolysate of wheat straw during xylose production. *Ind. Crop Prod.*, v. 40, p. 39-44.

American Society for Testing and Materials (2015). Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. ASTM E1876-15. West Conshohocken.

Bach, L., Domier, K.W. and Holowach, R. (1999). Method of fabricating a straw panel, board, or beam. CA n° 5,932,038, Alberta Research Council, CA.

Bekhta, P., Korkut, S. and Hiziroglu, S. (2013). Effect of pretreatment of raw material on properties of particleboard panels made from wheat straw. *Bioresources*, v. 8, n. 3, p. 4766-4774.

Bertolini, M.S., Nascimento, M.F., Christoforo, A.L. and Lahr, F.A.R. (2014). Painéis de partículas provenientes de rejeitos de *Pinus sp.* tratado com preservante CCA e resina derivada de biomassa. *Revista Árvore*, v. 38, n. 2, p. 339-346.

Bianche, J.J., Reixeira, A.P.M., Ladeira, J.P.S., Carneiro, A.C.O., Castro, R.V.O. and Della Lucia, R.M. (2017). Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus sp.* colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. *Floresta e Ambiente*, v. 24, p. 1-9.

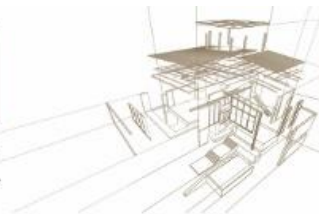
British Standards Institution (1993). Wood-based panels - determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. EN 310-93. Brussels.

Carrasco, E.V.M., Vargas, C.B., Souza, M.F. and Mantilla, J.N.R. (2017). Evaluation of mechanical characteristics of wood by means of impulse excitation. *Revista Matéria*, e-11936.

Cheng, W., Han, G. and Fang, D. (2013). Oriented Structural Boards from Split Wheat Straw: Effects of Straw Length, Panel Density, and Resin Content. *Bioresources*, v. 8, n. 3, p. 4497-4504.

Embrapa (2019). Soja em números (safra 2018/2019). Technical Report, EMBRAPA, BR.

Gholizadeh, S. (2016). A review of non-destructive testing methods of composite materials. Proceeding of XV Portuguese Conference on Fracture, Paço de Arcos, Portugal, February.



- Han, G., Cheng, W., Manning, M. and Eloy, P. (2012). Performance of zinc borate-treated oriented structural straw board against mold fungi, decay fungi, and termites – a preliminary trial. *Bioresources*, v. 7, n. 3, p. 2986-2995.
- Maloney, T.M. (1993). *Modern particleboard & dry-process fiberboard*. Miller Freeman, San Francisco, CA, USA.
- Nascimento, M.F., Bertolini, M.S., Panzera, T.H., Christoforo, A.L. and Lahr, F.A.R. (2015). Painéis OSB fabricados com madeiras da caatinga do nordeste do Brasil. *Ambiente Construído*, v. 15, n. 1, p. 41-48.
- Nasser, S.M. (2016). Painéis de partículas de bambu e casca de amendoim com adesivo à base de mamona. MSc. Thesis, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, SP.
- Oliveira, S.L., Mendes, R.F., Mendes, L.M., Narciso, C.R.P. and Ribeiro, D.P. (2017). Avaliação não destrutiva de painéis de partículas de média densidade pelo método *Stress Wave Timer*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 37, n. 91, p. 243-247.
- Pizzol, V.D., Mantilla, J.N.R. and Carrasco, E.V.M. (2017). Elastic characterization of plywood used and reused in forms through impulse excitation. *Revista Matéria*, e-11928.
- Ribeiro, E.S., Gonçalves, J.C., Souza, R.S. and Paula, M.H. (2016). Avaliação de propriedades mecânicas da madeira por meio de métodos destrutivos e não-destrutivos. *Nativa*, v. 4, n. 2, p. 103-106.
- Rosa, T.O., Terezo, R.F., Rios, P.A., Sampietro, J.A. and Rosa, G.O. (2019). *Schizolobium Parahyba* var. *Amazonicum* Glulam Classified by Non-destructive Tests. *Floresta e Ambiente*, v. 26, n. 2, e20171202.
- Silva, D.W., Farrapo, C.L., Ribeiro, D.P., Mendes, R.F., Mendes, L.M. and Scolforo, J.R.S. (2015). MDP com partículas de eucalipto e palha de milho. *Scientia Forestalis*, v. 43, n. 108, p. 853-862.
- Silva, J.V.F., Ferreira, B.S., Campos, C.I., Christoforo, A.L. and Lahr, F.A.R. (2016). Characterization of particleboards produced with *Pinus spp.* waste. *Scientia Forestalis*, v. 44, n. 111, p. 623-628.
- Silva, J.V.F., Silva, M.F.F., Ferreira, B.S. and Campos, C.I. (2018). Caracterização física de painéis OSSB produzidos com palha de soja e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona. *Proceeding of 23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Foz do Iguaçu, November.
- Tang, Y. (2018). Burning Issue - how design can help reduce straw burning in China. Technical Report 0032160, NSCAD University, CA.
- Tang, Y., Wang, D.Y., Jing, X.K., Ge, X.G., Yang, B. and Wang, Y.Z. (2008). A formaldehyde-free flame retardant wood particleboard system based on two-component polyurethane adhesive. *J. of App. Polym. Sci.*, v. 108, n. 2, p. 1216-1222.
- Yang, Z., Jiang, Z., Hse, C.Y. and Liu, R. (2017). Assessing the impact of wood decay fungi on the modulus of elasticity of slash pine (*Pinus elliottii*) by stress wave non-destructive testing. *Int. Biodeterioration & Biodegradation*, v. 117, p. 123-127.
- Zhang H., Sfarra, S., Sarasini, F., Fiorelli, J., Peeters, J., Avdelidis, N.P., Sartori, D.L., Ibarra-Castanedo, C., Perilli, S., Mokhtari, Y., Tirillò, J. and Maldague, X.P.V. (2018). Impact Modelling and A Posteriori Non-destructive Evaluation of Homogeneous Particleboards of Sugarcane Bagasse. *J. of Nondestructive Evaluation*, v. 37, n. 6.



ESTUDIO DE LA LONGITUD DE FIBRA, DENSIDAD, DUREZA Y DURABILIDAD DEL SAUCE *SALIX BABYLONICA X SALIX ALBA* 'RAGONESE 131-27'.

STUDY OF THE FIBER LENGTH, DENSITY, HARDNESS AND DURABILITY OF WILLOW *SALIX BABYLONICA X SALIX ALBA* 'RAGONESE 131-27'.

Cobas, Ana Clara¹; Correa, Maria Veronica²; Tortoriello, Miguel¹; Cichero, Renso¹

¹Universidad Nacional del Noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina;

²Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT), Argentina

* Contacto: cobasanaclara@yahoo.com.ar

Resumen

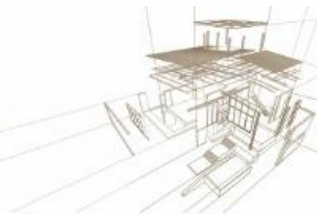
En los últimos tiempos se ha avanzado, tanto en conocimiento como en difusión, en la construcción de viviendas económicas de madera, material que debe ser resistente, durable y de costo aceptable. Esto ha motivado el estudio de especies ventajosas en cuanto al rápido crecimiento y facilidad de propagación, como el caso del sauce. Este trabajo se basó en el estudio integral del *Salix babylonica x Salix alba* 'Ragonese 131-27', de manera de determinar cuál es la variación axial y radial que tienen las propiedades anatómicas, físicas y mecánicas (densidad, longitud de fibra y dureza) que determinarán su aptitud de uso estructural. Asimismo, se estudió su durabilidad natural, a fin de determinar la necesidad, o no, de preservar la madera con un producto biocida antes de usarla en estructuras en contacto con el suelo y al exterior. Se estudiaron 6 ejemplares extraídos de un rodal ubicado en la EEA Delta del Paraná. De cada una de estas trozas, se confeccionaron probetas para determinar la densidad, longitud de fibra y dureza Janka. Los resultados promedios obtenidos indican que la madera de este sauce posee una densidad de 400 Kg/m³, una longitud de fibras de 1025 µm y un valor de dureza Janka de 256 Kg/cm². En cuanto al estudio de la durabilidad natural, el valor obtenido establece que esta madera es medianamente resistente.

Palabras-clave: Sauce, Durabilidad, Propiedades, Estructural.

Abstract

In recent times, progress has been made, both in knowledge and dissemination, in the construction of low-cost wooden houses; this material must be resistant, durable and of acceptable cost. This has motivated the study of advantageous species in terms of rapid growth and ease of propagation, as in the case of the willow. This work was based on the integral study of *Salix babylonica x Salix alba* 'Ragonese 131-27', in order to obtain the axial and radial variation of the anatomical, physical and mechanical properties (density, fiber length and hardness) that determine its suitability for structural use. Likewise, its natural durability was studied, in order to determine the need, or not, to preserve the wood with a biocidal product before using it in structures in contact with the ground and outdoors. Six logs extracted from a stand located in the EEA Delta del Paraná were studied. From each of these logs, specimens were made in order to determine the density, Janka hardness and fiber length. The average results obtained indicate that the wood of this willow has a density of 400 Kg/m³, the fiber length was 1025 µm and the Janka hardness value 256 Kg/cm². In terms of natural durability, the value obtained establishes that this wood is moderately resistant.

Keywords: Willow, Durability, Properties, Structural

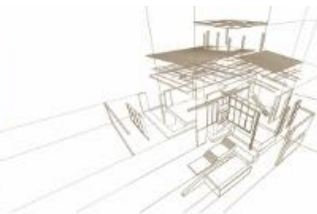


1. INTRODUCCIÓN

La madera puede ser vista como un material higroscópico, como un agregado de fibras y finos, o como una masa de diferentes sustancias químicas en combinación, pero fundamentalmente como un producto biológico generado durante la actividad de crecimiento del cambium en años sucesivos (Monteoliva, 2010). Es un material biológico, anisotrópico y heterogéneo, de amplio uso histórico -y creciente- por la humanidad, ya sea como fuente energética, destinando sus fibras para la industria celulósica-papelera, o en diversos usos sólidos, tanto no estructurales (ej. muebles, pisos, pallets, paneles) como estructurales portando cargas en viviendas, edificios, etc. El desarrollo de las sociedades está así fuertemente ligado al uso de la madera y sus derivados, a la vez que constituye un reservorio de carbono, que es extraído y fijado desde la atmósfera. (e.g. Hacke & Sperry, 2001; Rice et al, 2004; Martínez Meier et al, 2008).

La madera ha servido como material de construcción desde la prehistoria, es un material que ofrece muchas ventajas y también algunas desventajas a quien lo usa. Entre sus mejores características están el ser uno de los pocos materiales de construcción renovables; su transformación requiere mucho menos energía por unidad de peso que el acero, el aluminio o el hormigón armado; proporciona mejor aislamiento térmico por unidad de espesor que los metales o el hormigón armado; posee una mayor relación entre rigidez y peso que algunos materiales utilizados en la construcción; trabajar y unir la madera es relativamente fácil pues se requieren herramientas simples; y en ciertas circunstancias posee larga duración. Sin embargo, el uso de la madera en la construcción presenta algunos inconvenientes que han de ser considerados por cualquier programa, por ejemplo, la madera se quema, se pudre, contrae al secar, es susceptible al ataque de insectos y puede resultar más costosa que otros materiales.

A nivel mundial, el uso de la madera en la construcción es un tema estudiado por mucho tiempo en varias disciplinas (ingeniería civil, arquitectura, ingeniería forestal, entre otras). Países como Estados Unidos, tienen la mayoría de sus viviendas construidas en madera, mientras que en Australia podemos encontrar el edificio de madera de ingeniería más grande de ese país, se inauguró en 2018 y cuenta con 10 pisos y 45 metros de altura. Aunque el uso de la madera en la construcción de importantes edificios públicos y residencias privadas tiene varios precedentes históricos, en nuestro país generalmente se considera a ésta como el material para construcciones provisionales y /o de mala calidad. Una de las principales causas de esta creencia es la falta de conocimiento por parte de la población de las ventajas que tiene la construcción con este material. Además, la madera, como todo tejido en un ser vivo, está sujeta a variación fenotípica (dada por la influencia ambiental) y genética (dada por la historia evolutiva de la especie), las que, en especies longevas como los árboles, pueden determinar una amplia variabilidad aún dentro del mismo individuo (Barnett y Jeronimidis, 2003). Así, la madera producida por árboles de la misma especie no es idéntica en sus propiedades físicas y mecánicas, existiendo variabilidad entre individuos y dentro del mismo árbol. Todas las características anatómicas y físico-mecánicas dentro del árbol exhiben un rango en sus valores que dependen de la edad de formación (variabilidad radial, madera juvenil o madura) y de la altura en el fuste (variabilidad axial). Conocer esta variabilidad permite establecer su aptitud para determinados usos



de manera adecuada (Barnett y Jeronimidis, 2003). Otra consideración a tener en cuenta es que los estudios sobre las propiedades de la madera para uso sólido no han sido analizados desde grupos multidisciplinarios lo que permitiría una comprensión integral de las necesidades para el uso en estructuras y las características propias del material y no solo información parcializada de la disciplina que la estudió.

El sauce *Salix babylonica x Salix alba* 'Ragonese 131-27' está siendo estudiado por el INTA Concordia para fines estructurales, enfocado en la construcción de viviendas sociales. En los últimos tiempos se ha avanzado, tanto en conocimiento como en difusión, en la construcción de viviendas económicas de madera, destacando que el término económico no está relacionado con la calidad, sino con un producto confiable y durable de costo no muy elevado. Esto ha motivado el estudio de especies con ciertas ventajas en cuanto a crecimiento y facilidad de propagación, que no eran consideradas "buenas" para uso estructural, como el caso del sauce.

Si se pretende incorporar a la madera como material para la construcción, es necesario conocer sus características físicas, anatómicas y mecánicas, como así también los métodos que pueden mejorar algunas de estas propiedades, como por ejemplo la durabilidad, de manera de valorizar la madera de salicáceas para uso estructural.

2. METODOLOGÍA

Se trabajó con la especie *Salix babylonica x Salix alba* 'Ragonese 131-27', el material fue obtenido de un ensayo con manejo silvícola de Edgardo Casaubón de la EEA Delta del Paraná. Se seleccionaron 6 ejemplares en buenas condiciones fitosanitarias y representativos del rodal. Se tomó como muestra la troza basal de 2 m de largo y fue cortada en cruz para facilitar la posterior formación de las tablas a ensayar. El material a estudiar fue cedido por el responsable del INTA Concordia, el Dr. Martín Sanchez Acosta.

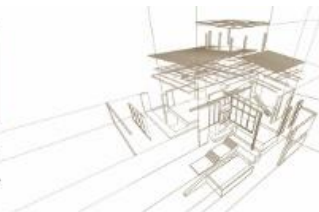
Se tomó una tabla central por altura (base y 2 m), se marcaron los anillos de crecimiento, se midió el ancho de cada uno de ellos y se determinó la edad de los ejemplares.

Para la determinación de la densidad básica se tomaron probetas de 8 cm³ como mínimo (IRAM 9544) en cada una de las posiciones de muestreo sobre el radio (cada tres años una posición radial). El volumen verde se calculó por desplazamiento de fluidos (inmersión en agua) sobre las probetas saturadas en agua (humedad mayor al 30%). El peso seco se determinó luego del secado en estufa a una temperatura de 105 ± 3 °C hasta peso constante.

Para la determinación de la longitud de fibra se consideraron las mismas posiciones radiales que en el caso de densidad, se tomó una astilla de cada una de ellas y se procedió a macerarlas (Franklin, 1945) en una solución de ácido acético y agua oxigenada a 60 °C por 24 hs. El material macerado fue puesto sobre un portaobjetos y se tomaron fotos en un microscopio. Las fotos fueron analizadas posteriormente a través del programa Imagen TOOLS.

Para la realización del ensayo de dureza Janka se siguió la norma ASTM D 143 – 94 (Reapproved 2000) (Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber). Se ensayaron 30 probetas por árbol de dimensiones 5 cm x 5 cm x 15 cm.

Herrera y Gómez-Nava (1980) y otros autores coinciden al indicar que el estudio para evaluar la durabilidad natural de la madera en contacto con el suelo o enterrada



proporciona datos más precisos, pero el tiempo para obtenerlos es excesivo. De ahí la importancia de los métodos in vitro o de laboratorio que en poco tiempo permite obtener la información por medio de índices. Asimismo, mencionan que la bibliografía existente sobre durabilidad natural de la madera, demuestra que en numerosas experiencias realizadas en diversos, países, existe una buena correlación entre los resultados en los ensayos en laboratorio y la durabilidad de prueba en contacto con el suelo o enterradas. Se emplearon dos hongos xilófagos pertenecientes a la familia de las Poliporáceas, las cuales son recomendadas para estudios de este tipo, *Trametes versicolor* y *Perenniporiella neofulva*. Se tomó como referencia la norma ASTM D2017-62t y se calculó el porcentaje de pérdida de peso (%PP) de cada probeta de madera empleando la siguiente relación:

$$\%PP = \left[\frac{(PSI - PSF)}{PSI} \right] * 100$$

donde:

PSI = Peso seco inicial (gr) antes del proceso de pudrición,

PSF = Peso seco final (gr) después del proceso de pudrición.

Dichos valores (%PP) son interpretados según la Norma ASTM 02017-62t, para la clasificación de las especies forestales en base a su durabilidad natural.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Variación radial y axial de ancho de anillo (Figuras 1, 2 y 3)

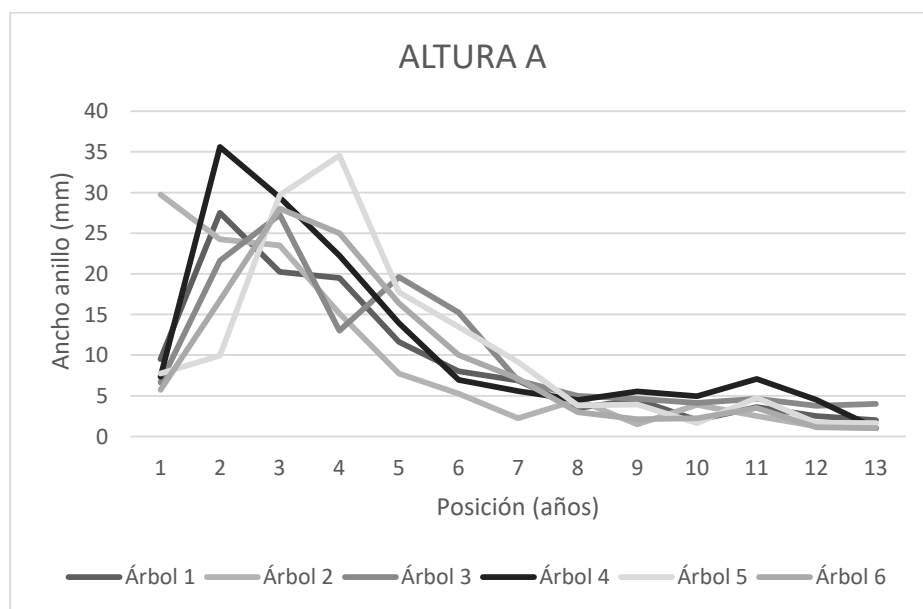


Figura 1: variación radial del ancho de anillo en la altura A (0.3 m)

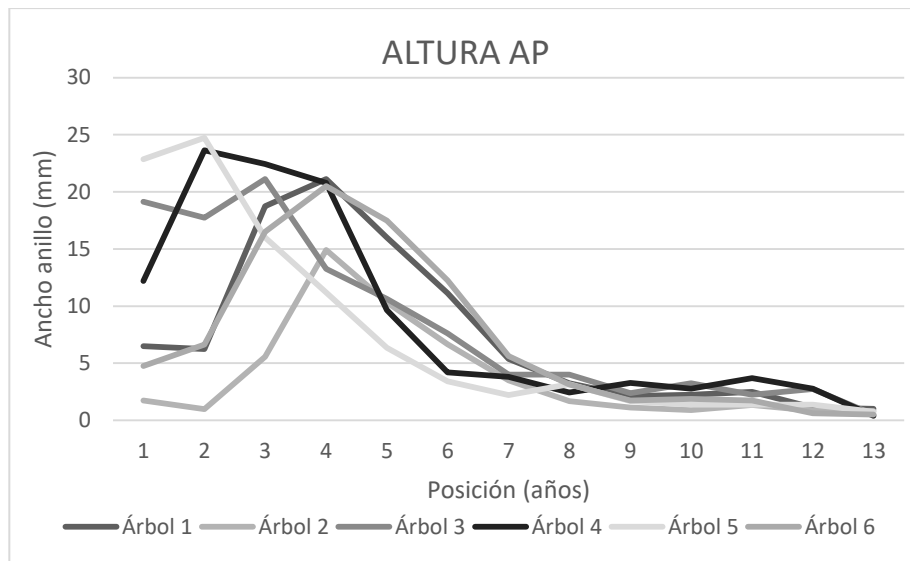
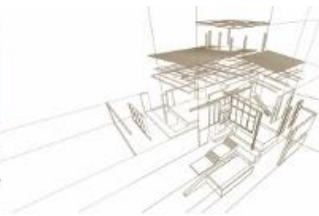


Figura 2: Variación radial del ancho de anillo en la altura AP (2 m)

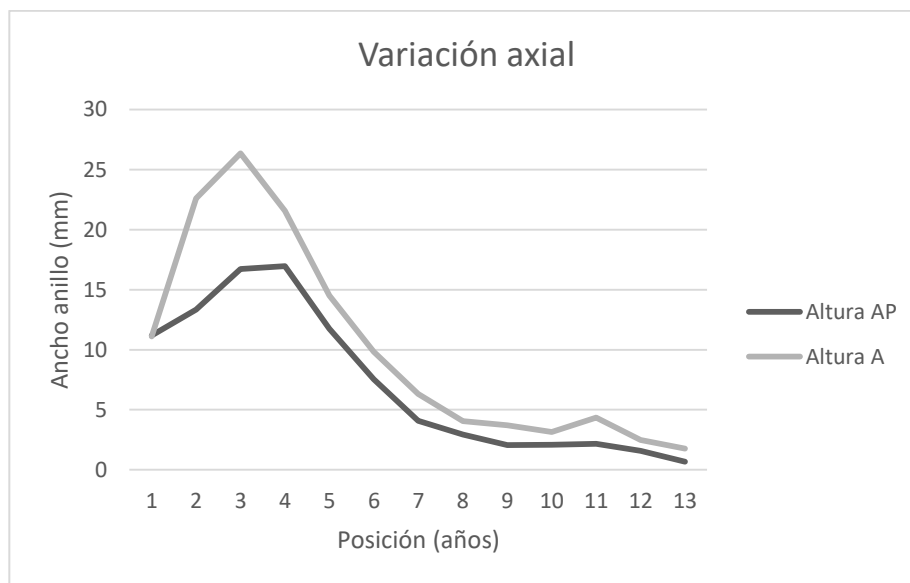
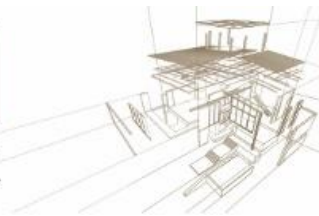


Figura 3: Variación axial del ancho de anillo en sauce

La variación radial encontrada en ambas alturas (Figura 1 y 2) presenta un aumento del ancho de los anillos de crecimiento con la edad hasta el año 4. Luego disminuye hasta lograr una estabilización en el año 8 y se mantiene constante hasta el año 13. Si consideramos la variación axial (Figura 3), observamos que el ancho de anillo disminuye con la altura principalmente en los primeros años de crecimiento (2 a 5) aunque esta diferencia no fue significativa. ($p > 0,05$).

3.2. Variación radial y axial de la densidad

El valor promedio de densidad obtenido fue de 400 Kg/cm^3 . La densidad no presenta patrones de variación homogéneos en el sentido médula-corteza si consideramos al árbol como fuente de variación (Figura 4 y 5). Esto coincide con la bibliografía de



saucos (Bonavía de Guth y Ragonese 1980, Cobas *et al.* 2013, Cobas *et al.* 2014) y de otras Salicáceas como diferentes especies de *Populus* (Matyás y Peszlen 1997, DeBell *et al.* 2002). Si tomamos el promedio podemos observar que la densidad disminuye con la edad hasta la posición radial 3 (9 años) y luego incrementa. Esto se puede observar en ambas alturas.

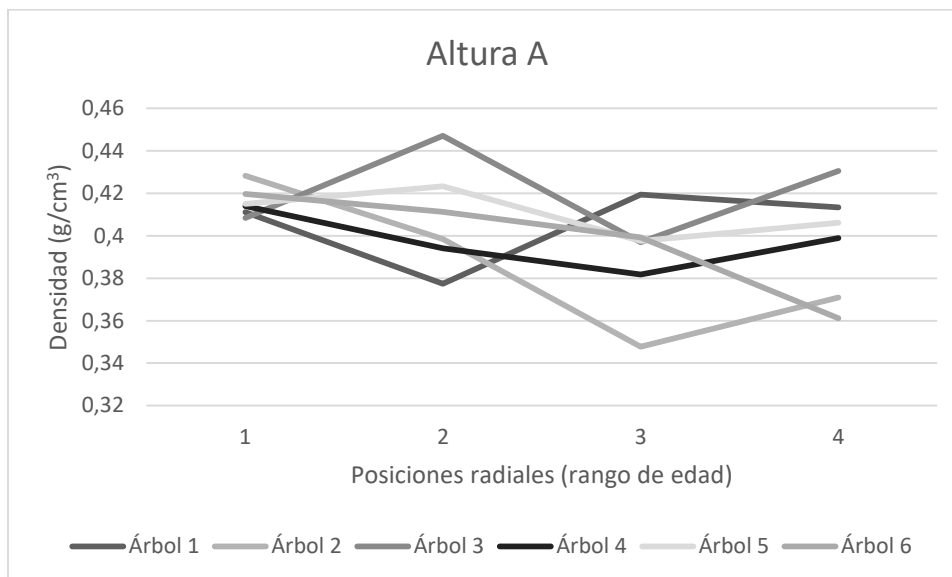


Figura 4: Variación radial de la densidad en la altura A (0,3 m), en sauce

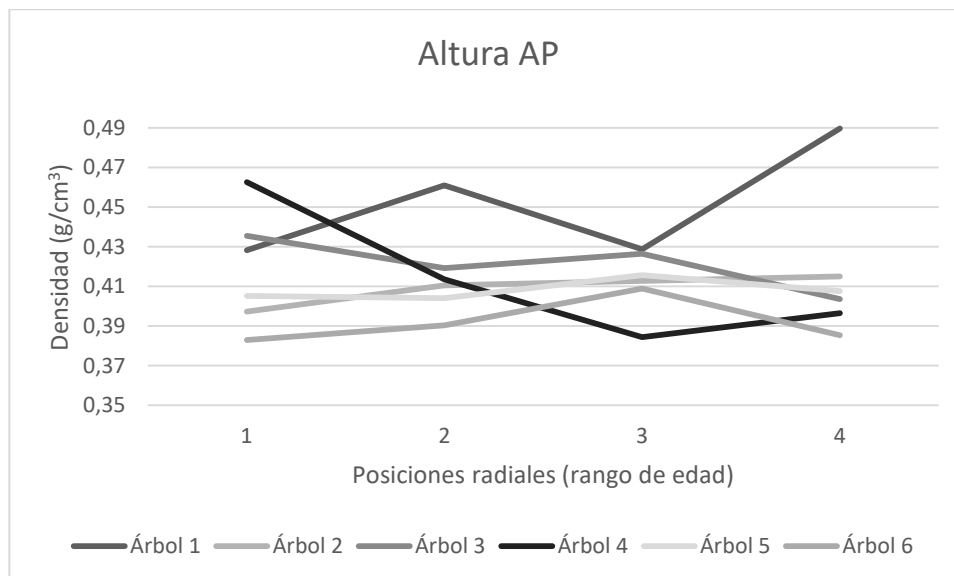


Figura 5: Variación radial de la densidad en la altura AP (2 m), en sauce

Si observamos la variación axial (Figura 6), podemos mencionar que la densidad aumenta con la altura sin embargo no es una variación significativa ($p > 0,05$).

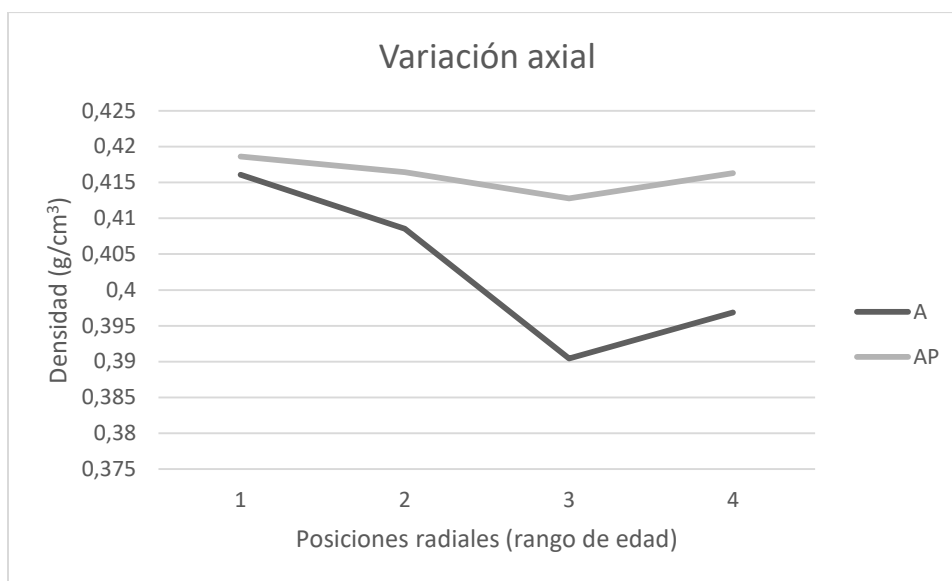


Figura 6: Variación axial de la densidad en sauce

3.3. Variación axial y radial de la longitud de fibra

El patrón general de variación encontrado para la longitud de fibra (valor promedio de 1025 μm) en sauce (Figuras 7 y 8) consiste en el aumento de sus valores de médula a corteza en ambas alturas muestreadas. Resultados similares fueron presentados por Deka et al (1992) para sauces híbridos de 14 años en Canadá y por Bonavía y Ragonese (1980), Monteoliva *et al* (2005) y Cobas et al (2014) para sauce americano.

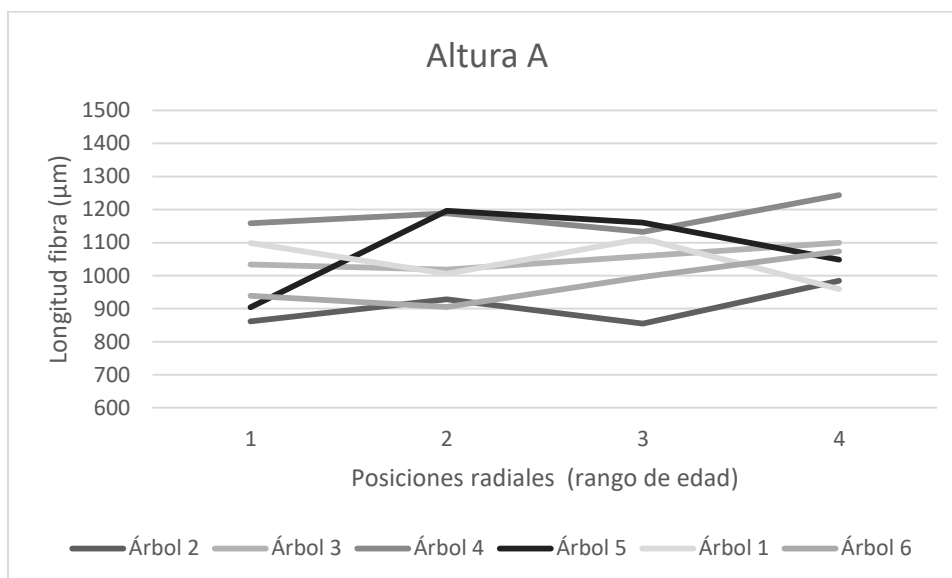


Figura 7: Variación radial en la altura A (0,3 m) de la longitud de fibra en sauce

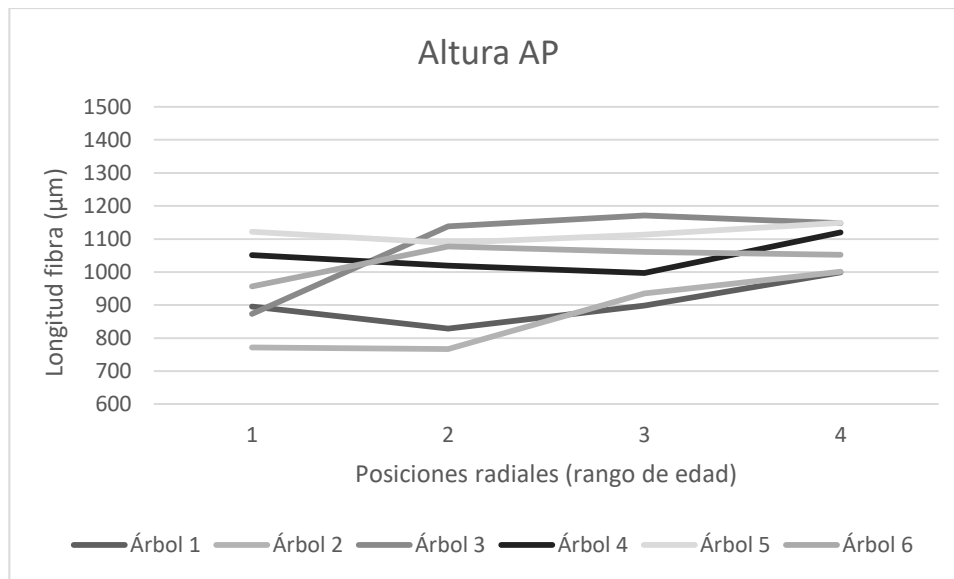
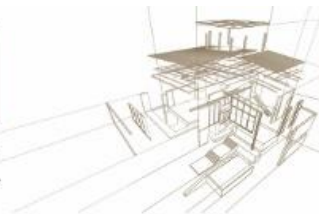


Figura 8: Variación radial en la altura AP (2 m) de la longitud de fibra en sauce

De acuerdo a la Figura 9, la longitud de fibra presenta una disminución con la altura de muestreo, sin embargo, la misma no fue significativa ($p > 0,05$).

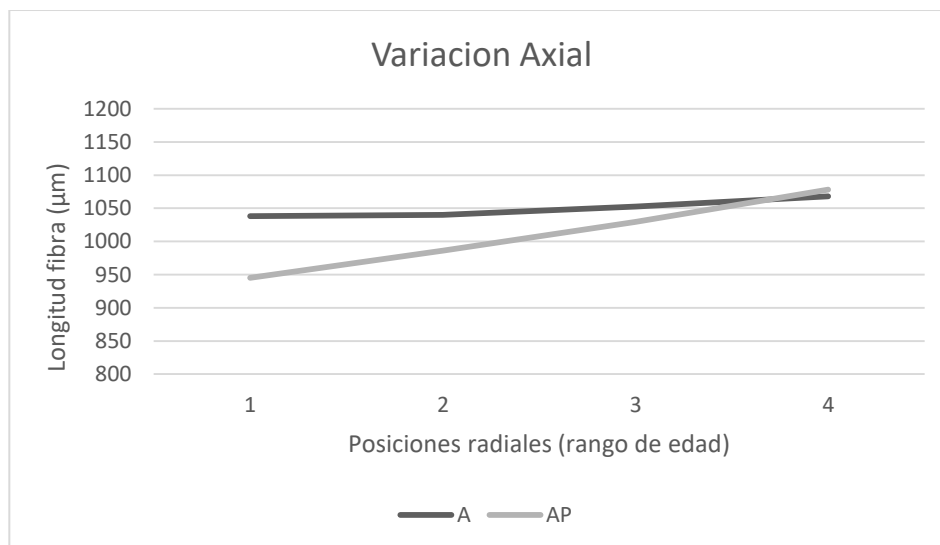


Figura 9: Variación axial de la longitud de fibra en sauce

3.4. Dureza Janka

El valor de dureza Janka obtenido fue de 256 Kg/cm², con un desvío estándar de 48,8 y un coeficiente de variación de 19%

El valor obtenido es similar al encontrado por Cuevas (2002) e Hidalgo Tomé (2014) para *Populus x euramericana*. Según la clasificación de García y García (1949), la madera de sauce Ragonese "131-27" se podría clasificar como blanda, lo que implicaría mejor trabajabilidad, pero menor retención de tornillos o clavos.

3.5. Durabilidad natural



Se presentan los datos obtenidos (Figura 10), el promedio de pérdida para el control fue del $0,09\% \pm 0,04$, para los 20 días de incubación se registró un promedio de $11,91\% \pm 0,99$. Posteriormente para 40 días de incubación el promedio fue $17,09 \pm 0,58$. La mayor pérdida de peso se observó luego de 60 días de incubación y en promedio el valor fue de $27,9\% \pm 0,91$, respecto del peso inicial. Según la Normativa ASTM D2017-62t, el valor obtenido luego de 60 días de incubación, se ubica en el rango de porcentaje de pérdida de peso de entre 25% y 44 %, así se establece que esta madera se encuentra en la categoría medianamente resistente, pudiendo tener una vida útil de entre 5 a 10 años.

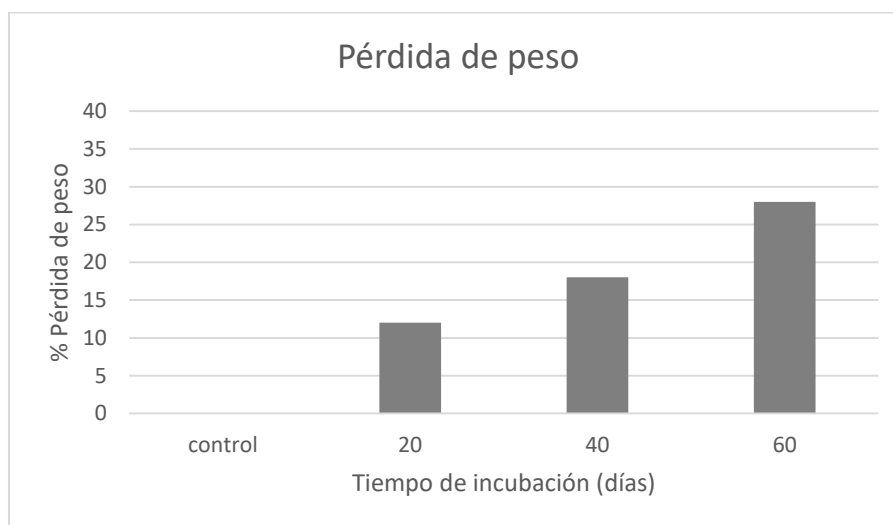


Figura 10: Porcentaje de pérdida de peso

4. CONCLUSIONES

De acuerdo al valor de densidad promedio obtenido, se puede clasificar a la madera de este sauce como semidensa, con una longitud de fibra promedio de $1025 \mu\text{m}$.

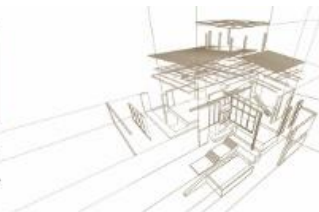
La variación axial y radial para la densidad y la longitud de fibra en la primera troza comercial (base a 2 m) no fue significativa, por lo tanto, se podría considerar homogénea en ese sector.

El valor de dureza Janka obtenido de 256 Kg/cm^2 la clasifica como madera blanda, permitiendo mejor trabajabilidad, pero disminuyendo la retención de tornillos y clavos. La madera de sauce *Salix babylonica x Salix alba* 'Ragonese 131-27' presentó una durabilidad natural medianamente resistente (5 a 10 años) por lo que se tendría que considerar realizar un tratamiento preservante antes de su utilización, principalmente si las condiciones ambientales favorecen el desarrollo de patógenos.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Martín Sánchez Acosta, de INTA Concordia por el aporte de los ejemplares estudiados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



- ASTM D2017-62- Standard Test Method of Accelerated Laboratory Test of Natural Durability.
- ASTM D 143 – 94 (Reapproved 2000) (Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber).
- Barnet, J. y Jeronimidis, G. (2003). Wood Quality and its biological basis. CRC Press.
- Bonavía de Guth, E. y Ragonese, A. (1980). Evaluación de las características del leño en relación a la calidad del papel de algunos híbridos de sauces obtenidos en Castelar (INTA). IDIA n° 393-394: 25–30.
- Cobas, A; Area, M y Monteoliva, S. (2013). Transición de madera juvenil a madura en un clon de *Populus deltoides* implantados en la provincia de Buenos Aires. Maderas. Ciencia y Tecnología. Univ. Bío-Bío. ISSN 0717-3644.
- Cobas, A; Monteoliva, S. y Area, M. (2014). Patrones de variación de la densidad de la madera y morfometría celular de *Salix babylonica* para la determinación de la edad de transición entre madera juvenil y madura. Maderas. Ciencia y Tecnología. Univ. Bío-Bío. vol.16 n°3.
- Cuevas, D. (2002). Propiedades mecánicas de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier creciendo en Valdivia, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 23(2), 93-98.
- DeBell, D., Singleton, R., Harrington, C. y Gartner, B. (2002). Wood density and fiber length in young *Populus* stem: relation to clone, age, growth rate, and pruning. *Wood and Fiber Sci.* 34 (4): 529-539.
- Deka, G., Wong, B. y Roy, D. (1999). Variation of specific gravity, fiber length and cell wall thickness in young *Salix* clones. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 14 (1): 147–158.
- Franklin GL (1945) Preparation of thin sections of synthetic resins and woody resin composites and a new method for wood. *Nature* 155: 3924–3951.
- Hacke U., Sperry, J. (2001). Functional and ecological xylem anatomy. *Perspectives in plant ecology, evolution and systematics* 4 (2): 97-115.
- Herrera R.J., Gomez-Nava y Barretero, G.E. (1980). Durabilidad natural de la madera de catorce especies forestales mexicanas. *Bol. Tec. Instituto Nacional Investigación Forestal.* 67 p.
- Hidalgo Tomé, I. (2014). Estudio de tratamientos alternativos para mejorar la estabilidad dimensional y la dureza de *Populus x euramericana* y *Pinus pinaster*. Universidad de Valladolid. 195.
- IRAM 9544 (1985). Método para la determinación de la densidad aparente. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.
- Martinez-Meier A., Sanchez L., Pastorino M., Gallo L., Rozenberg P. (2008). What is hot in tree rings? The case of surviving Douglas-firs to the 2003 drought and heat wave. *Forest Ecology and Management* 256, 837–843.
- Mátyás, C. y Peszlen, I. (1997). Effect of age on selected wood quality traits of poplar clones. *Silvae Genetica* 46 (2-3): 64-72.
- Monteoliva, S., Senisterra, G. y Marlats, R. (2005). Variation of Wood density and fiber length in six willow clones (*Salix spp.*). *IAWA Journal* 26 (2): 197-202.
- Monteoliva, S. (2010). La madera como material: estructura anatómica y propiedades. - 1a ed. La Plata: Universidad Nacional de La Plata, Internet. ISBN 978-950-34-0646-5.
- Rice KJ, Matzner SL, Byer W, Brown JR. (2004). Patterns of tree dieback in Queensland, Australia: the importance of drought stress and the role of resistance to cavitation. *Oecologia* 139: 190-198.



IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA *Manilkara sp.* ATRAVÉS DE MÉTODOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS

IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF WOOD *Manilkara sp.* THROUGH DESTRUCTIVE AND NON-DESTRUCTIVE METHODS

Silva, Gabriel ^{(1)*}; Sena, Caroline ⁽¹⁾; Santos, Filipe ⁽¹⁾; Cunha, Rita ⁽²⁾ César, Sandro Fábio ⁽³⁾

⁽¹⁾ Mestrando(a). Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador, Brasil

⁽²⁾ Prof. Dra. Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia. Salvador, Brasil

⁽³⁾ Prof. Dr. Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador, Brasil

* Contato: gbrdourado@gmail.com

Resumo

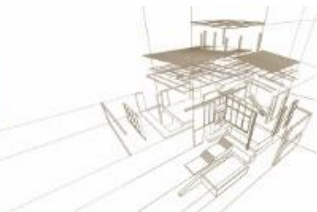
A avaliação das características mecânicas da madeira através de ensaios não destrutivos tem atraído cada vez a atenção da comunidade acadêmica devido as suas vantagens quando comparado com os métodos destrutivos convencionais. Os ensaios não destrutivos apresentam menor custo e são mais rápidos, além de preservarem o material, representando uma opção econômica e prática. Desta forma, o objetivo deste estudo foi caracterizar a madeira de maçanduba (*Manilkara sp.*), de ampla comercialização no Brasil, utilizando os métodos não destrutivos de ultrassom, visando a ampliação da utilização destas técnicas na caracterização tecnológica da madeira e a melhor empregabilidade desta espécie pela indústria madeireira. Para isto, utilizou-se um emissor de ondas ultrassônicas, o qual teve sua sensibilidade avaliada através da comparação com os valores obtidos no ensaio destrutivo de compressão paralela às fibras. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o método não destrutivo adotado classificou a madeira de Maçanduba de forma adequada.

Palavras-Chave: Manilkara sp., Propagação de ondas, ensaio não destrutivo.

Abstract

The evaluation of the mechanical characteristics of wood through nondestructive testing has attracted the attention of the academic community because of its advantages when compared to conventional destructive methods. The non destructive tests are less expensive and faster to gauge, besides preserving the material, representing an economical and practical option. In this way, the objective of this study was to characterize the Maçanduba wood (*Manilkara sp.*), widely commercialized in Brazil, using non-destructive methods of ultrasound, aiming to increase the use of these techniques in the characterization of the wood and the best employability of this species by the timber industry. For this, an ultrasonic wave emitter was used, which had its sensitivity evaluated by comparison with the values obtained in the destructive compression test parallel to the grain. From the obtained results, it was concluded that the non-destructive method classified the Maçanduba wood in an appropriate way.

Keywords: Manilkara sp., wave propagation, non-destructive test.



1. INTRODUÇÃO

A madeira de Maçaranduba pertence ao grupo de espécies de árvores do gênero *Manilkara*, estando englobado na família das *Sapotaceae*. Muito empregada na construção civil no Brasil, é possível verificar a sua ocorrência nos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Paraná, Rio de Janeiro, Rondônia e Santa Catarina. O seu cerne é vermelho, variando de claro a escuro, e sem brilho. A sua densidade é elevada, o que dificulta o seu corte. Possui resistência ao ataque de seres xilófagos e fungos (IPT, 2015).

A qualidade da madeira varia de acordo com a espécie, sendo que escolher sua destinação depende da correta caracterização, o que levará um melhor aproveitamento do material para fabricação do produto final. É necessário traçar um perfil descritivo da madeira com ênfase nas propriedades físicas, mecânicas e organolépticas ao qual devem predizer a melhor utilização deste material, ou como madeira serrada, movelaria ou uso estrutural (Paula et al., 2016).

Nos últimos anos, a avaliação não destrutiva da madeira tornou-se uma importante ferramenta na inferência de propriedades físicas e mecânicas deste material, devido, principalmente, ao baixo custo dos equipamentos, rapidez e praticidade dos testes, que podem ser aplicados por diferentes métodos, na avaliação dos parâmetros de qualidade da madeira (Ballarin e Nogueira, 2005).

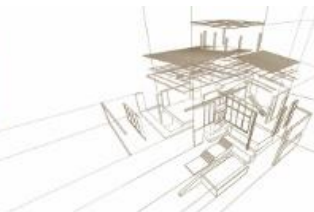
A classificação da madeira a ser determinado pelo ensaio não destrutivo é influenciado pelo tamanho da peça, orientação das fibras, teor de umidade, espécie e umidade. Diversas pesquisas apontam que este método é eficiente para determinação das propriedades mecânicas de resistência a flexão (Stangerlin et al., 2008).

A velocidade de ultrassom também poder ser relacionada com a resistência a compressão, com isso, o objetivo do trabalho foi comparar a eficiência dos métodos de classificação utilizando os métodos propostos na norma brasileira NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeiras (ABNT, 1997) e com ensaios não destrutivos previsto na norma brasileira NBR 15521 – Ensaio não destrutivos – ultrassom – Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas (ABNT, 2007).

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais

Os corpos-de-prova foram produzidos a partir de 15 peças de *Manilkara sp.* com seção comercial de 14,5 x 5,5 cm e comprimento de 300 cm. Em seguida, as peças foram seccionadas em duas partes com comprimento de 180 cm e 120 cm. Extraíu-se a partir das peças de 180 cm, segmentos para confecção de 15 corpos de prova para o ensaio de compressão paralela às fibras com dimensões 5 cm x 5 cm x 15 cm.



2.2. Métodos

2.2.1. Ensaio de Ultrassom

Para determinação do módulo de elasticidade dinâmico da madeira, considerando todos os defeitos de formação presentes nas peças, aproximando-se dos valores de utilização da peça foi realizado os ensaios não destrutivos - Ultrassom - Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas conforme a NBR 15521 (ABNT, 2007).

Neste ensaio, foi utilizado aparelho de ultrassom *Proceq Pundit Lab (+)* com resolução de 0,1 μ s e transdutores de face plana, com frequência de 54 kHz, mostrado na Figura 1. Para a realização da leitura do tempo de percurso do pulso ultrassônico nos corpos de prova, os transdutores foram posicionados na base e no topo das peças, com o auxílio de um gel condutor utilizado como acoplante. O intuito da medição com esse aparelho é determinar propriedades de resistência e elasticidade da madeira através de um ensaio não destrutivo.



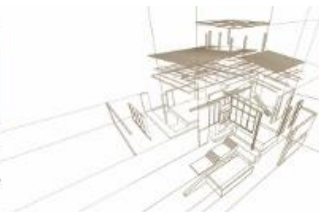
Figura 1: Aparelho de ultrassom utilizado no ensaio não destrutivo.

A determinação da velocidade de propagação das ondas por ultrassom foi feita inicialmente nas peças de 180 cm e de 120 cm, em seguida, foi determinada velocidade de propagação nos corpos de prova confeccionados para os ensaios mecânicos (5x5x15cm). Dessa forma, pretende-se comparar os resultados utilizando diferentes comprimentos de peças, permitindo avaliar a influência dos defeitos na madeira. A velocidade de propagação das ondas foi encontrada através da Equação **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

$$V_{LL} = \frac{L}{t} \quad (1)$$

Sendo V_{LL} a velocidade de propagação das ondas na direção longitudinal; L é o comprimento do percurso e t é o tempo de propagação das ondas.

Tendo em vista que a classificação da norma segundo a velocidade de propagação é feita de acordo com a velocidade saturada, foi feita medição da umidade da peça com medidor xilohigrômetro com agulhas, onde foi encontrado umidade dentro do intervalo de 13% e 30 %. Em seguida, a correção da velocidade para a velocidade na condição saturada foi encontrada na equação (2):



$$V_{LLsat} = -1745 + V_{LL} + 16 x U + \rho_{ap} \quad (2)$$

Sendo V_{LLsat} o valor numérico da velocidade na peça saturada, com teor de umidade maior que 30 %, expresso em metros por segundo (m/s); V_{LL} é o valor numérico da velocidade na peça com teor de umidade entre 12 % e 30 %, expresso em metros por segundo (m/s); U é o valor numérico do teor de umidade da viga, expresso em porcentagem (%); ρ_{ap} é o valor numérico da densidade aparente da viga na umidade $U(\%)$, expresso em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3).

Após obter os resultados de V_{LLsat} para cada corpo de prova ensaiado, a madeira foi enquadrada de acordo com as classes de resistência presentes na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** da NBR 15521 (ABNT, 2007).

Tabela 1: Classificação por ultrassom da madeira de dicotiledônea (UD). Fonte: NBR 15521 (ABNT, 2007).

Classe	V_{LLsat} m/s	C_{LL} 12 % Mpa	E_M 12 % MPa	$f_{c0,k}$ 12 % MPa	$E_{c0,m}$ 12 % MPa
UD-20	$V_{LLsat} < 3040$	< 10620	< 6750	20	8000
UD-25	3040 – 3690	10620 – 13000	6750 – 10420	25	12000
UD-30	3690 – 3950	13000 – 15400	10420 – 13020	30	14000
UD-35	3950 – 4140	15400 – 17800	13020 – 14920	35	15000
UD-40	4140 – 4300	17800 – 20150	14920 – 16520	40	16500
UD-45	4300 – 4390	20150 – 22500	16520 – 17420	45	18500
UD-50	4390 – 4490	22500 – 24900	17420 – 18420	50	19500
UD-55	4490 – 4600	24900 – 27300	18420 – 19120	55	20500
UD-60	$V_{LLsat} > 4600$	> 27300	$E_M > 19120$	60	21200

As classes de resistência encontradas para o ensaio de ultrassom foram posteriormente comparadas entre si (classificação obtida a partir dos diferentes comprimentos das peças) e com os resultados obtidos através dos ensaios destrutivos.

2.2.2. Caracterização das propriedades físicas da madeira

Com o objetivo de determinar as características físicas da madeira foram realizados os ensaios de densidade e da umidade conforme os procedimentos presentes na norma ABNT NBR 7190 (1997). Para estes ensaios, foram produzidos quinze corpos de prova de seção transversal com 2,0 cm x 3,0 cm e comprimento, ao longo das fibras, de 5,0 cm como apresentados na Figura 2.

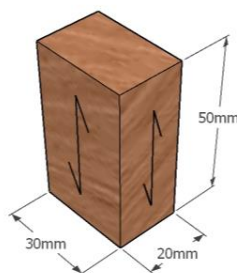


Figura 2: Dimensões do corpo de prova de densidade e umidade



A massa inicial (m_i) dos corpos de prova foi determinada, utilizando uma balança digital, para, em seguida, colocá-los na estufa, à temperatura de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Para a definição da massa seca, os corpos de prova foram pesados em intervalos de 6 horas, até ocorrer uma variação de massa igual ou inferior a 0,5% em relação à medição anterior. Conhecida a massa seca, determinou-se o teor de umidade da madeira, pela Equação (3):

$$U\% = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

Sendo U (%) a umidade à base seca, m_i a massa inicial da madeira (g) e m_s a massa da madeira seca (g). Após a aferição dos pesos secos, os corpos de prova foram submetidos a saturação e de maneira inversa, foram aferidas as massas dos corpos de prova de 6 em 6 horas até se obter uma variação menor do que 0,5%. A densidade básica é a relação entre a massa seca e o volume saturado, expressa na Equação **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

$$\rho_{bas} = m_s / v_{sat} \quad (4)$$

sendo ρ_{bas} a densidade básica (kg/m^3), m_s a massa seca (kg) e v_{sat} volume saturado (m^3).

2.2.3. Ensaio de Compressão Paralela às Fibras

O ensaio de compressão paralela às fibras da madeira foi realizado conforme os métodos previstos na NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira (ABNT, 1997). Foram ensaiados 15 corpos-de-prova prismáticos na dimensão de 5,0 x 5,0 x 15,0 cm (Figura 3).

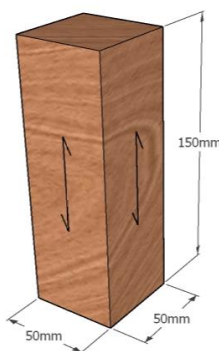
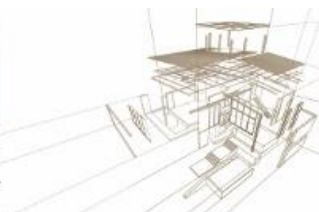


Figura 3: Dimensões do corpo de prova de compressão paralela

Os resultados foram posteriormente comparados com a classificação obtida no ensaio não-destrutivos. A determinação da resistência ($f_{wc,0}$ ou f_{co}) foi obtida por meio da Equação (5):



$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{A} \quad (5)$$

Onde: f_{c0} , resistência a compressão paralela às fibras; $F_{c0,máx}$, força máxima de compressão aplicada no corpo de prova; A , área resistente.

Foi estimada a resistência característica conforme a NBR 7190 (ABNT, 1997) com a utilização da Equação (1).

$$f_k = \left(2 \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{\frac{n-1}{2}}}{\frac{n}{2} - 1} - f_{\frac{n}{2}} \right) \times 1,1 \quad (1)$$

Sendo, f_k o valor característico, n : número total de ensaios. Para o cálculo, os valores das resistências são dispostos do menor para o maior, $f_1 < f_2 \dots < f_n$, caso a quantidade de valores seja ímpar, o maior valor deve ser desconsiderado. Além disso, a norma especifica que a resistência característica é o maior valor entre f_k , f_1 ou 0,7 do valor médio de todos os resultados.

3. ANÁLISES DE RESULTADOS

3.1. Ensaio não destrutivo - Propagação de ondas sonoras

A NBR 15521 (ABNT, 2007) apresenta equações para determinação da velocidade de propagação das ondas, e a partir desse resultado propõe uma classificação da madeira a partir da velocidade encontrada. Essa norma, entretanto, foi elaborada para aplicação em madeiras serradas, e a relação representada na tabela de classificação das madeiras foi obtida por meio de ensaios com madeiras adultas e de espécies com densidade aparente variando de 450 Kg/m³ a 1 100 kg/m³.

Os valores encontrados nos ensaios de densidade foram de 992,74 kg/cm³ para densidade básica do lote e 1180,79 kg/cm³ para densidade aparente. Em comparação com o valor de referência da NBR 7190 (ABNT,1997) para madeira de Maçaranduba, foram encontrados valores de densidade muito próximos 1180,79 kg/m³ para madeira estudada e 1143,00 kg/m³ como valor de referência da norma Na Tabela2 estão contidos os resultados obtidos para o ensaio não -destrutivo, considerando os três comprimentos analisados.

Tabela 2: Resultados do ensaio de propagação de ondas sonoras.

Estatística descritiva	Ensaio de propagação de ondas sonoras		
	Seção 14,5 x 5 cm		Seção 5x5 cm
	Comprimento		
	180 cm	120 cm	15 cm
V_{LLint} – valor médio	4637,6	4876,5	5071,8
V_{LLsat} – valor médio	4366,0	4604,9	4800,2
Desvio padrão	533,6	264,7	255,1



Coefficiente de variação	12%	6%	5%
Quantidade de amostras	15	15	15

Na Tabela 2 observa-se que os valores obtidos para velocidade de propagação de ondas de ultrassom na direção longitudinal às fibras, denominado V_{LLsat} , apresentaram valores superiores à medida que se reduziu o comprimento dos corpos de provas ensaiados. Esta redução implicou também na menor dispersão entre os valores obtidos, como se pode observar através dos valores dos coeficientes de variação (12%, 6% e 5%) para os respectivos comprimentos de 180 cm, 120 cm e 15 cm. A **!Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** 4 ilustra a dispersão dos dados obtidos.

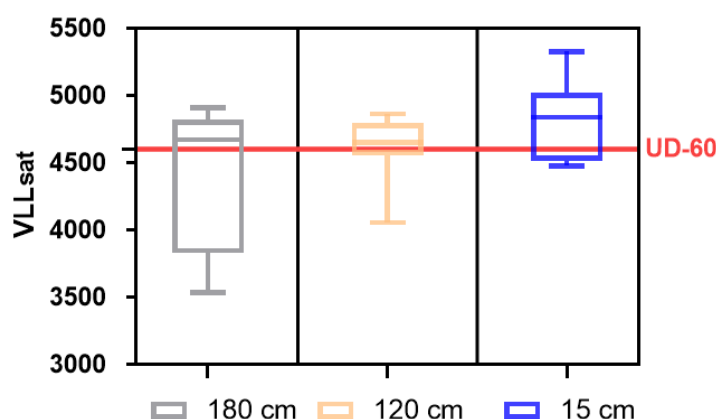


Figura 4: Box-plot da distribuição das classes de resistência obtidas por ensaios não destrutivos.

Ao comparar a classificação obtida para os diferentes comprimentos, percebe-se que os corpos de prova com 180 cm de comprimento apresentaram valores inferiores para o V_{LLsat} , devido a maior presença de defeitos e discontinuidades. Atribui-se esse fato a possibilidade de existência de defeitos internos e mudanças na direção das fibras, que se reduzem à medida que a madeira é serrada.

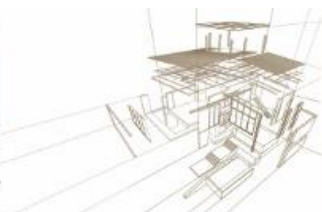
Apesar dos valores mais baixos encontrados na medição das peças maiores, a média do V_{LLsat} para as três situações testadas, desconsiderando os valores discrepantes, alcançou valores acima de 4600 m/s, valor mínimo que classificaria a madeira como UD-60, possuindo valores de resistência a compressão paralela às fibras à 12% de umidade (f_{c0} 12%) iguais a 60 MPa de acordo com a NBR 15521 (ABNT, 2007).

3.2. Ensaio de compressão paralela

Na Tabela 3 estão contidos os resultados obtidos dos ensaios de compressão paralela às fibras e a Figura 3 ilustra a dispersão dos dados para os valores de resistência a compressão paralela.

Tabela 3: Resultados para o ensaio de resistência a compressão paralela às fibras (f_{c0}).

Estatística descritiva	Compressão paralela às fibras
	MOR



Média da umidade instantânea das amostras	13,41%
Valor médio U=12% (MPa)	72,42
Desvio padrão	7,76
Mediana (MPa)	73,05
Coefficiente de variação	10,71%
Valor mínimo (MPa)	57,02
70% do valor médio (MPa)	50,70
Valor característico (MPa)	64,96
Quantidade de amostras	15

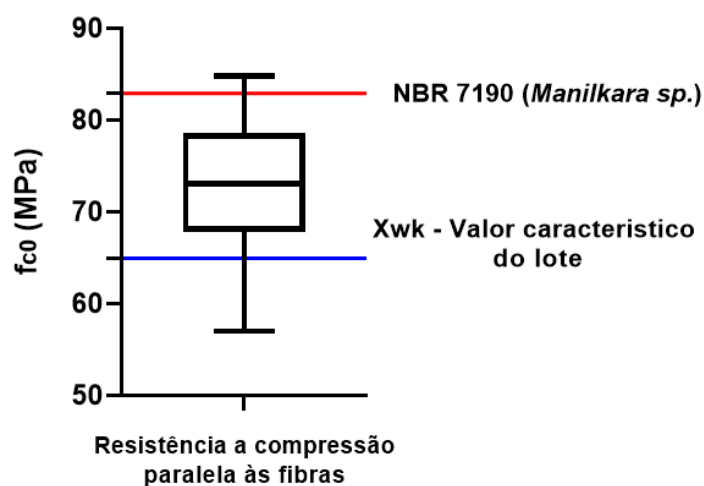
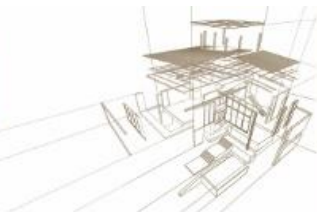


Figura 5: Box-plot – Ensaio de compressão paralela às fibras

Ao analisar a **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, observa-se uma diferença significativa entre os valores de resistência característica do lote e o valor indicado pela norma. Tal diferença pode ser explicada pelo valor mínimo obtido no ensaio do lote estudado de 57,02 Mpa, valor inferior mais discrepante. Através do tratamento estatístico indicado, o valor característico foi de 64,96 MPa. Em comparação com as demais publicações que avaliaram a resistência da madeira de Maçaranduba, o valor médio encontrado para a compressão paralela às fibras foi superior ao citado Souza et al. (2002) que foi de 64,80 Mpa e inferior ao referido por Rosa et al. (2014) correspondente a 98,07 Mpa.

A classificação obtida pelo ensaio não destrutivo que classificou o lote como UD-60, considera o valor de resistência a compressão paralela às fibras de 60 MPa. Logo pode-se considerar que o procedimento disposto na NBR 15521 (ABNT, 2007), na avaliação da madeira de maçaranduba, ofereceu valores condizentes com o ensaio destrutivo proposto pela NBR 7190 (ABNT, 1997) que também classifica a madeira de Maçaranduba como classe C60 definindo valores mínimos de resistência à compressão paralela às fibras de 60 Mpa.



4. CONCLUSÃO

Com base nos valores obtidos pela caracterização mecânica através do ensaio destrutivo, a madeira de maçaranduba estudada foi classificada como de uso estrutural na classe de resistência C60, conforme a normatização técnica.

Os métodos não destrutivos de propagação de ondas ultrassônicas obtiveram boa estimativa da resistência a compressão paralela às fibras. A menor dispersão nos resultados foi encontrada nas peças de menores comprimentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Madeiras (LabMad/UFBA), ao Laboratório de Ensaio em Durabilidade dos Materiais (LEDMa/UFBA) da Universidade Federal da Bahia e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio oferecido na realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2007). NBR 15521 - Ensaio não destrutivo - ultrassom - Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas.(1997). ABNT. NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.

Ballarin, A.W.; Nogueira, M. (2005). Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultrassom. Eng. Agríc., v. 25, n. 1, p.19-28, jan./abr. Jaboticabal.

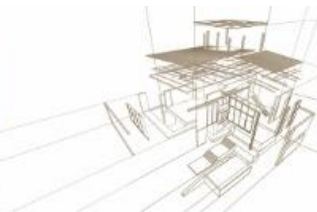
Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). (2015) Informações sobre madeiras - Maçaranduba. Disponível em: <http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/4.htm> Acesso em: 22 julho.

Paula et al. (2016). Utilização de métodos não destrutivos para caracterização simplificada da madeira de cumaru (*Dipteryx odorata Willd*). Biodiversidade, v. 15, n. 2, p. 136.

Rosa, R. A. et al. (2014). Caracterização da madeira de Maçaranduba (*Manilkara sp.*) por métodos destrutivos e não destrutivos Ciência da Madeira (*Braz. J. Wood Sci.*) v. 05, n. 01, p. 68-78, Maio de 2014 ISSN: 2177-6830, Pelotas.

SOUZA, M. H. et al. (2002). Madeiras tropicais brasileiras. 2ed: Edições IBAMA, 152p. Brasília.

Stangerlin, et al. (2008). Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não-destrutivo. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v. 3, n. 2, p. 145–150.



¿DONDE ESTÁ LA MADERA ESTRUCTURAL?: ESTUDIO DE CASO EN PINO PONDEROSA

WHERE IS THE STRUCTURAL GRADE TIMBER?: CASE STUDY IN PONDEROSA PINE

Gonzalo Caballé^{1*}, Oscar Santaclara², Juan P. Diez¹, Federico Letourneau¹, Esther Merlo³,
Alejandro Martinez Meier¹.

⁽¹⁾ Dr. Ing. Ftal., Laboratorio de Ecología, Ecofisiología y Madera (LEEMA), INTA EEA Bariloche, ⁽²⁾ Ing. Ftal., MADERA PLUS Calidad Forestal SL, Ourense, España, ⁽³⁾ Dr. Ing. Ftal., MADERA PLUS Calidad Forestal SL, Ourense, España

*Contacto: Gonzalo Caballé: caballe.gonzalo@inta.gob.ar

Resumen

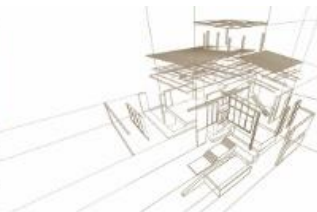
La calidad de la madera para uso estructural se define por sus propiedades físicas y mecánicas, entre las cuales, el módulo de elasticidad (MOE) es una de las principales. La posibilidad de predecir el MOE, a partir de métodos no destructivos sobre árbol en pie o trozas, representa una herramienta de utilidad para los tomadores de decisión a diferentes niveles. El presente trabajo condensa información generada en varios proyectos de investigación que pretenden establecer, a nivel de rodal y de árbol individual, variables de sencilla medición con influencia directa sobre el MOE del pino ponderosa creciendo en forestaciones del NW de la Patagonia de Argentina. A nivel de rodal, la densidad de manejo (300 a 2300 pl/ha), la edad (15 a 83 años) y la calidad de sitio (IS20: 6 a 22m), mostraron correlación positiva con el MOE presentando las dos últimas variables un efecto superior. A nivel de árbol individual, la esbeltez (altura total/diámetro a 1,3m) y la posición sociológica del árbol son dos factores relevantes. Los árboles más esbeltos, en general en posición co-dominante, presentaron mayor MOE. Una vez apeado el árbol, la segunda troza (3 a 6m de altura respecto al suelo) tiene mayor MOE que el resto de las trozas. En base a los resultados expuestos, la producción de madera estructural de pino ponderosa exigiría extender el turno de corta actual (36 años), priorizar los sitios de mayor calidad (IS20 >15m) y dentro de estos, manejar altas densidades de plantación seleccionando los árboles de mayor esbeltez como árbol objetivo.

Palabras-clave: MOE, métodos no destructivos, Patagonia Argentina,

Abstract

The structural grade timber is defined by its physical and mechanical properties, among which, the modulus of elasticity (MOE) is one of the main ones. The possibility of MOE predicting, from non-destructive methods on standing trees or logs, represents a useful tool for decision makers at different levels. The present work link the information generated in several research projects that aim to establish the variables, at stand and individual tree level, which are directly related to the modulus of elasticity of the ponderosa pine grown in Patagonia Argentina. At stand level, management density (300 to 2300 pl / ha), age (15 to 83 years) and site quality (IS20: 6 to 22m), showed positive and significant correlation with MOE. At the individual tree level, the slenderness (total height/diameter at 1.3m) and the social status of the tree are two relevant factors. The most slender trees, generally in a co-dominant position, presented a higher MOE. Once the tree has been felled, the second log (3 to 6m high compared to the ground) has a higher MOE than the rest of the logs. Based on the above results, the production of structural grade timber of ponderosa pine would require extending the current cutting cycle (36 years), giving priority to the highest quality sites (IS20 > 15m) and within these, managing high planting densities and selecting the trees of greater slenderness as a target tree.

Keywords: MOE, Nondestructive methods, Patagonia Argentina.



1. INTRODUCCIÓN

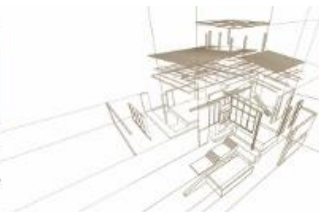
La calidad de madera de grado estructural se define por sus propiedades mecánicas y físicas en las que la rigidez (módulo de elasticidad, MOE), la resistencia a la flexión (módulo de ruptura, MOR) y la densidad, determinan el uso final apropiado y permiten clasificar la madera en clases resistentes (ej. EN 338 CEN 2016). Dentro de una misma especie, los valores que alcanzan estas propiedades son el resultado de las interacciones entre las condiciones ambientales del sitio de crecimiento, la disponibilidad de recursos, el manejo silvícola, e incluso la edad cambial a lo largo del fuste de los árboles, como así también su acervo genético (Zobel et al. 1995; Smith et al. 1997).

La relación entre la calidad estructural de la madera y la edad, el manejo silvícola o la calidad del sitio como fuente de variación ha sido estudiada de manera individual o conjunta para distintas especies en diferentes partes del mundo (Roper et al. 2004; Watt et al. 2009; Merlo et al. 2014; Watt & Trincado 2017). Un elemento clave de estos estudios ha sido el uso de herramientas acústicas portátiles que permiten realizar mediciones en árboles en pie o trozas sin afectar la calidad del árbol o las piezas de madera. La aplicabilidad del método reside en la relación existente entre las propiedades físico-mecánicas de la madera, en particular el MOE, y la velocidad de propagación de las ondas sónicas o ultrasónicas a través de la madera (Bucur 1985). La velocidad será mayor cuanto menor sea la presencia de defectos generales (fendas, rajaduras o desviaciones de fibras) o puntuales (nudos o grupos de nudos) en la madera, provocando la interrupción de la continuidad de transmisión de la onda, y por lo tanto, retardando su llegada al receptor (Bucur & Archer 1984).

En coníferas como el pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) o el pino marítimo (*Pinus pinaster*), se comprobaron correlaciones positivas entre el MOE y la edad cambial y entre el MOE y la calidad de sitio (Merlo et al. 2014; Watt & Trincado 2017). Esta última relación, atribuible en gran medida a los aumentos concurrentes en la esbeltez del fuste (S, altura total/diámetro a la altura del pecho) con la calidad del sitio (Watt et al. 2009). Asimismo, aumentos en la densidad de manejo del rodal (entre 200 y 1100 plantas ha⁻¹) dieron como resultado un mayor MOE para para pino radiata en un amplio rango de calidades del sitio (Lasserre et al. 2005; Waghorn et al. 2007; Zoric 2009). Además, la densidad de manejo afecta la densidad de la madera (Persson et al. 1995), las propiedades de la fibra (Watson et al. 2003) y la proporción de madera juvenil (Yang 1994; Watt & Trincado 2017).

El pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Dougl. Ex Laws) es una especie de amplia distribución en sectores montañosos del oeste de América del Norte. En el NW de la Patagonia Argentina (provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut) se han forestado 96.000 ha con esta especie; algunas de ellas (solo una pequeña proporción) establecidas hace 90 años. Actualmente, no hay información disponible para el pino ponderosa creciendo en estas forestaciones que permita identificar cuáles son las principales fuentes de variación a nivel de rodal o de árbol individual para la producción de madera de grado estructural.

El presente trabajo condensa información generada en varios proyectos de investigación que pretenden establecer, a nivel de rodal y de árbol individual, variables de sencilla medición con influencia directa sobre el MOE del pino ponderosa y en consecuencia, sobre la calidad estructural de la madera creciendo en forestaciones del NW de la



Patagonia Argentina. Esta información representa una herramienta de utilidad para tomadores de decisión a diferentes niveles.

2. METODOLOGÍA

2.1. Relaciones entre variables a nivel de rodal y de árbol individual con el MOE

Se seleccionaron 22 parcelas de una red de parcelas permanentes del programa forestal del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estas parcelas cubren el total de la distribución geográfica de las forestaciones de pino ponderosas en el NW de la Patagonia Argentina (35,75° a 42,5° S), contienen una amplia gama de índices de sitios, edad y manejo silvícola. De cada parcela seleccionada existía información previa, como la edad a la altura del pecho (EAP). En el verano de 2017 (enero-febrero) se estableció dentro de cada una de las 22 parcelas seleccionadas una parcela de muestreo de 160 a 500 m² conteniendo como mínimo 20 árboles (n total = 437). En cada árbol se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP, 1,3m) con forcípula y la altura total (H) y de inicio de la copa (Hic) mediante un hipsómetro Vertex IV (Haglöf, Suecia). Se determinó la esbeltez (S) a partir de la relación H / DAP y se calculó un proxy de su posición social utilizando la relación entre su altura total (H) y la altura dominante de la parcela (H100), que se denominó altura relativa (HR = H / H100). La posición social del árbol refleja la forma y el tamaño de su copa en relación con las características de las copas de los árboles vecinos. A nivel de rodal, la altura dominante (H100) se calculó según Asmann (1970), el índice del sitio a una edad base de 20 años (IS₂₀) según Andenmatten y Letourneau (1997) y el área basal (G), diámetro cuadrático medio (Dg) y el índice de densidad relativa (IDR=G.Dg^{-0,5}) según Curtis (1982), (Tabla 1).

Tabla 1: Valores máximos, mínimos y promedios (Desv.Stnd.) de las variables de árbol individual y de rodal de las 22 parcelas seleccionadas de pino ponderosa en el NW de la Patagonia Argentina.

Variable	Min-Max	Media (DS)
<i>Variables de árbol individual</i>		
EAP [años]	15-83	28 (15)
H [m]	3.8- 46.5	17.9 (8.3)
DAP [cm]	8.2-73.0	32.3 (11.6)
S (m m ⁻¹)	30-101	55 (12.4)
HR	0.54-1.31	0.91 (0.10)
<i>Variables de rodal</i>		
IS ₂₀ [m]	6.2-22.7	15.4 (3.7)
H100 [m]	6.4-43.3	19.5 (8.7)
G [m ² ha ⁻¹]	12.7-132.7	53.3 (30.3)
IDR	2.9-17.6	8.9 (4.0)



DAP: Diámetro a la altura del pecho, EAP: Edad a la altura del pecho, H: Altura total, Hic: Altura inicio de copa, S: Esbeltez, relación H/DAP, H100: Altura dominante, IS20: Índice de sitio, G: Área basal, IDR: Índice de densidad relativa, HR: Altura relativa como indicador de posición sociológica.

En todos los árboles de la parcela de muestreo se determinó el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) empleando el método de tiempo de vuelo de onda acústica. Se midió la velocidad de propagación de onda acústica (V) utilizando el equipo ST300 (FiberGen, New Zeland). La velocidad de propagación se determinó como el promedio de tres mediciones en cada árbol. Cuando la parcela estaba ubicada en pendiente, se realizaron las mediciones en sentido perpendicular a la pendiente, evitando la madera de reacción. En el mismo sector del fuste donde se midió V, se extrajo un tarugo de madera de 7 cm de largo y 5 mm de diámetro a 1,3 m del nivel del suelo utilizando barrenos de incremento tipo Pressler. Los tarugos se envolvieron en papel aluminio para conservar su humedad y se colocaron en una conservadora en bolsas de plástico. Se pesaron en húmedo en balanza digital con precisión de 0,001 gr y el diámetro y la longitud se midieron con calibre y se calculó la densidad en verde de la madera (p_{verde} , $gr\ cm^{-3}$).

A partir de la velocidad de propagación y de la densidad en verde se calculó el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) como:

$$MOEd = p_{verde} * V^2$$

donde:

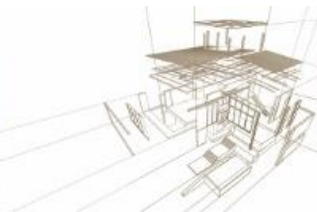
- p_{verde} es la densidad de la madera en verde ($gr\ cm^{-3}$),
- V es el promedio de las mediciones de velocidad de onda en cada árbol ($m\ s^{-1}$),
- MOEd es el módulo de elasticidad dinámico (MPa)

2.2. Relaciones entre la densidad de manejo del rodal y el MOE

Se trabajó sobre un ensayo de raleo instalado en 1999 por el Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP) en un rodal de pino ponderosa que tenía en ese momento 20 años de edad ubicado en la Ea. Santa Lucía, Valle Meliquina, provincia de Neuquén. El ensayo incluye dos repeticiones (parcelas de 2500 m²) de cuatro rangos de densidad definidos en términos del índice de densidad de Reineke (IDR, Bravo et al. 1997) que se han mantenido hasta la actualidad:

1. Testigo. Densidad máxima del pino ponderosa en la región, se observa mortandad de individuos por competencia. IDR = 2300.
2. Densidad alta: IDR = 900-1100. A partir de un 35% del IDR máximo, el sitio comienza a estar completamente poblado, en este caso IDR = 900.
3. Densidad media: IDR = 600-800. El sitio no está completamente poblado, pero los árboles no crecen en forma libre debido a que existe competencia.
4. Densidad baja: IDR = 300-500. Los árboles crecen prácticamente como árboles aislados, ya que la competencia comenzaría a producirse a partir de un 25% del IDR máximo.

Para la evaluación de calidad de estructural de la madera, en el año 2015, se seleccionó una parcela de cada tratamiento de densidad de manejo y dentro de la misma, se estableció una parcela circular de superficie variable con al menos 20 árboles. En todos



los árboles se midió el DAP con forcípula, H y Hic con Vertex IV (Haglöf, Suecia) y a partir de estos datos se calculó la esbeltez (S). Asimismo, se midió la velocidad de propagación de onda acústica sobre árbol en pie utilizando el equipo ST300 (Fibre-Gen, Nueva Zelanda). La medición se realizó en sentido perpendicular a la pendiente de la parcela, efectuando tres mediciones en cada árbol que luego se promediaron. En total se midieron 83 árboles.

Finalizada la medición de los árboles, se seleccionaron 6 por parcela para la caracterización acústica de trozas y tablas. En la selección se abarcó toda la variabilidad de velocidad acústica de cada parcela, 2 árboles de velocidad alta, 2 de velocidad intermedia y 2 de velocidad baja.

Los 24 árboles seleccionados fueron apeados y tronzados de la siguiente forma: una primera troza de 3,15 o 2,65 m, dependiendo del diámetro del árbol para que la punta fina sea superior a 25 cm, una segunda troza de 3,15 m, y el resto del tronco en trozas de 3,15 o 2,65 hasta un diámetro en punta fina de 15 cm. En todas las trozas obtenidas de cada árbol se midieron los diámetros de las caras y la longitud con cinta métrica y la velocidad de propagación de onda acústica con el equipo Hitman HM200 (Fibre-Gen, Nueva Zelanda) basado en el método de resonancia. Se efectuaron tres mediciones sobre la cara de mayor diámetro de cada troza. Por ser un método de medición distinto al utilizado en los árboles en pie, los valores hallados son en general más bajos y no es posible compararlos. En total se midieron 104 trozas, repartidas por tratamiento y posición en altura del tronco.

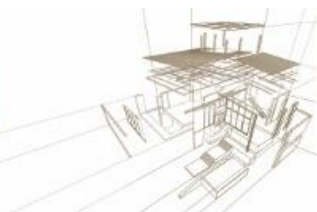
Las segundas trozas de todos los árboles apeados fueron aserradas para obtener tablas. El aserrado se hizo con un esquema de corte paralelo para obtener piezas de 2" (5 cm) de espesor por el ancho de la troza. Se seleccionaron dos piezas, una interior cercana a la médula y otra de la parte externa, que se escuadraron en tablas de 2x5" (13,5 x 5 cm) para la posterior realización de ensayos mecánicos destructivos en laboratorio. El servicio de aserrado lo realizó la empresa Lof Mapuche Vera que acercó un aserradero portátil Wood Mizer LT 40. Se midió la velocidad acústica en todas las tablas con el equipo Hitman HM200 (Fibre-Gen, Nueva Zelanda).

Diferencias significativas para las variables dendrométricas y la velocidad acústica entre tratamientos fueron establecidas mediante el test de comparación de medias de Students. Regresiones lineales simples y coeficientes de correlación de Pearson fueron estimados entre las variables dendrométricas y de rodal y los valores de módulo de elasticidad dinámico. Todos los análisis se realizaron con el software estadístico Infostat (Di Rienzo et al. 2011).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Relaciones entre variables a nivel de rodal y de árbol individual con el MOE

En función del extenso rango de edades, índices de sitio y variables dendrométricas (Tabla 1) se encontró una amplia variación del MOEd, desde 2.13 GPa a 22.1 GPa, con un valor medio de 11.2 Gpa (DE: 3.8). Asimismo, el coeficiente medio de variación del MOEd, dentro de cada parcela, fue del 21% (DE: 7%) con un rango de 8.2% a 39%.



El análisis de correlaciones realizado entre MOEd y las variables de árbol individual y de rodal indicó que todas las variables están significativamente relacionadas con el MOEd ($p \leq 0,05$). Las principales correlaciones positivas y significativas se encontraron para H ($r = 0,78$, $p < 0,001$), H100 ($r = 0,78$, $p < 0,001$) y G ($r = 0,68$, $p < 0,001$) (Tabla 2).

Tabla 2: Correlación de coeficientes de Pearson entre variables del árbol y los rodales y el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) para pino ponderosa del NW de la Patagonia Argentina.

	EAP	IS ₂₀	G	IDR	H100	DAP	H	S
MOEd	0.66	0.49	0.68	0.63	0.78	0.58	0.78	0.66

EAP: Edad a la altura del pecho, IS₂₀: Índice del sitio, G: Área basal, IDR: índice de densidad relativa, H100: Altura dominante, DAP: Diámetro a la altura del pecho, H: Altura total del árbol, S: Esbeltez del fuste.

La edad (EAP), mostró una correlación positiva ($r = 0,66$) y significativa ($p < 0,001$) con MOEd. Al seleccionar índices de sitios intermedios (IS₂₀ = 15-17m), el valor medio de MOEd se duplica, de 7,53 (DE: 2,46) GPa a 15,32 (DE: 2,16) GPa entre 15 y 45 años, alcanzando un máximo valor medio de 18,33 a los 83 años (Fig. 1). La variación del MOEd dentro de cada parcela fue de 8.3 GPa con valores mínimos y máximos de 6.3 y 10.6 GPa respectivamente.

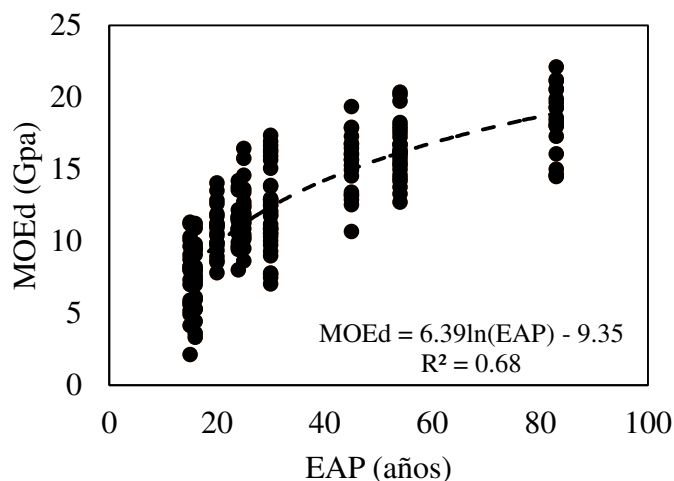
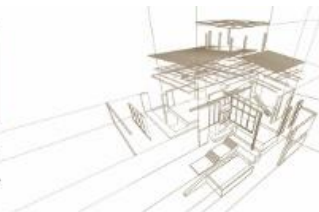


Figura 1: Módulo de elasticidad dinámico (MOEd, GPa) en función de la edad a la altura del pecho (EAP, años) para pino ponderosa en forestaciones del NW de la Patagonia Argentina. Las parcelas incluidas en esta relación se encuentran en un rango de IS₂₀ entre 15 y 17m.

El índice de sitio mostró una correlación más baja pero significativa con el MOEd ($r = 0,49$, $p < 0,001$, Fig. 2). Además, analizando los datos para edades a la altura del pecho (EAP) comprendidas entre 20 y 25 años ($n = 12$), cuando el IS₂₀ aumenta de 6 a 22 m, el valor medio del MOEd aumenta más de dos veces, de 5,13 a 12,94 GPa (Fig.2). La esbeltez, mostró una correlación positiva ($r = 0,66$) y significativa ($p < 0,001$) con el MOEd, con una media de 55 (DE: 12,4) m m⁻¹. El indicador de posición social, HR, mostró una correlación escasa ($r = 0,15$) pero también significativa ($p = 0,004$) con el



MOEd. Los valores más altos de MOEd se encontraron para valores de HR entre 0,85 y 0,95.

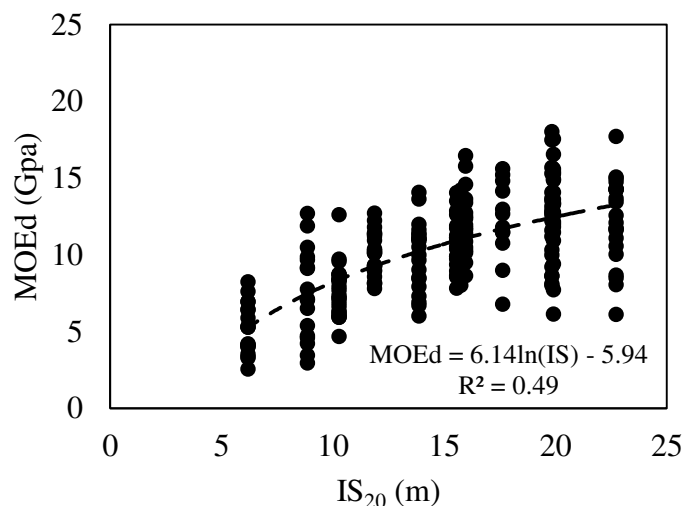


Figura 2: Módulo de elasticidad dinámico (MOEd, GPa) en función del índice de sitio (IS₂₀, m) para pino ponderosa en forestaciones del NW de la Patagonia Argentina. Las parcelas incluidas en esta relación se encuentran en un rango de edades entre 20 y 25 años.

Los resultados coinciden con investigaciones previas y resaltan la importancia de la edad, la esbeltez y el índice de sitios como determinantes clave del MOE y sugieren además, considerar el estatus social como otro factor importante para la predicción del MOE (Lasserre et al. 2005, Watt et al. 2006, Liu et al. 2007, Watt & Zoric 2010, Merlo et al. 2014, Watt & Trincado 2017). El determinante más fuerte del MOE fue la edad del rodal que está relacionada con la proporción de madera juvenil con baja resistencia, baja rigidez y poca estabilidad dimensional que puede presentar el fuste (Macdonald y Hubert 2002). La transición entre la madera juvenil y la madera madura de pino ponderosa en la región patagónica ocurre a los 20 años (Zingoni et al. 2007, Letourneau et al. 2014). Los valores de MOEd obtenidos para madera juvenil y madera madura se encuentran en el rango de los valores citados para pino radiata (Watt et al. 2006, Raymond et al. 2007, Waghorn et al. 2007, Watt & Trincado 2017).

La correlación entre el índice de sitio y el MOEd fue reportada para otras especies como pino marítimo (Merlo et al. 2014) y pino radiata (Watt et al. 2006). El índice del sitio representa la suma total de los efectos ambientales sobre la cantidad de madera producida en un área por una especie forestal (Spurr 1952). Watt y co-autores (2009) sugieren que la relación positiva entre el índice de sitio y el MOE está mediada por la esbeltez del fuste. Sin embargo, los resultados para el pino ponderosa en la Patagonia Argentina, muestran una correlación débil ($r = 0,31$) entre el IS y la esbeltez. Por lo tanto, la relación positiva encontrada puede estar fundada por un aumento en la proporción de leño tardío en los sitios de mejor calidad que influye en la densidad de la madera y en su característica resistente.

3.2. Relaciones entre la densidad de manejo del rodal y el MOE

La velocidad de propagación de onda acústica en los árboles en pie mostró diferencias ($p < 0,05$) entre el testigo (IDR 2300) y el resto de los tratamientos (Tabla 3). Los



tratamientos intermedios no mostraron diferencias entre sí. Los árboles de mayor velocidad de propagación de onda y por ende, mayor calidad resistente, fueron los más esbeltos mostrando una correlación positiva entre velocidad de propagación y esbeltez de $r^2=0,25$).

Tabla 3: Variables dendrométricas promedio (error estándar) y velocidad de propagación de onda acústica en árboles en pie de pino ponderosa de 35 años de edad en función de la densidad de manejo establecida como rangos de IDR, Índice de densidad de rodal de Reineke. Ea. Sta. Lucía, Meliquina, Neuquén, Argentina.

IDR	DAP (cm)	H total (m)	Esbeltez (cm m ⁻¹)	Velocidad de onda (km s ⁻¹)
300-500	52,7 (0,9) d	20,4 (0,4) a	0,4 (0,01) a	3,12 (0,1) a
600-800	41,1 (1,2) c	19,5 (0,4) a	0,47 (0,01) b	3,36 (0,1) a
900-1100	37,3 (1,1) b	20,1 (0,4) a	0,56 (0,02) c	3,37 (0,1)a
Testigo	30,6 (1,3) a	19,9 (0,4) a	0,67 (0,02) d	3,79 (0,1) b

La velocidad de propagación de la onda acústica en las trozas aumentó la diferencia entre los tratamientos. La velocidad en las trozas del testigo fue superior ($p<0,001$) al resto de los tratamientos y la velocidad de ambos tratamientos intermedios fue mayor que en el tratamiento más ralo ($p<0,01$; Fig. 3). En todos los tratamientos, la segunda troza presentó velocidades superiores al resto de las trozas pero estas diferencias tienen significancia estadística solo con la cuarta troza, la cual en general, estaba incluida en la copa de los árboles.

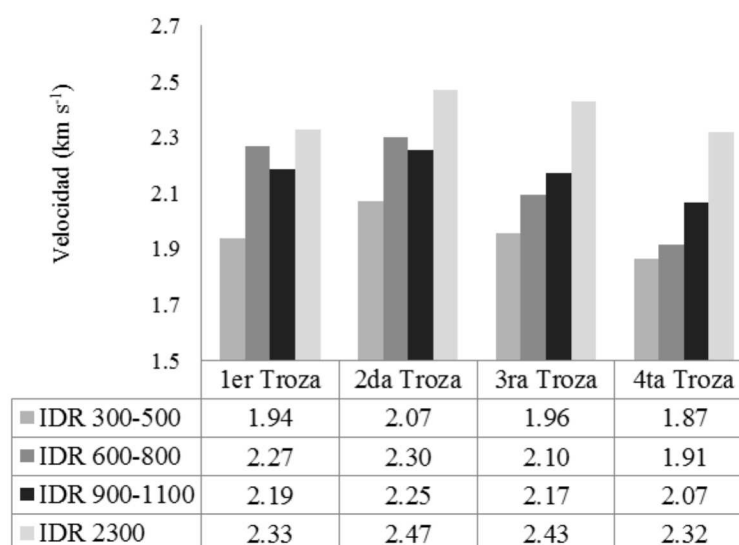
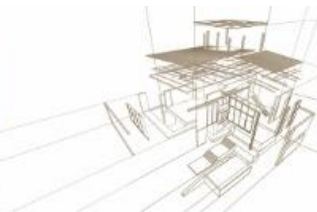


Figura 3: Velocidad de propagación de onda acústica (km s⁻¹) en trozas de pino ponderosa según la densidad de manejo establecida en rango de Índice de Densidad de Rodal de Reineke



(IDR). La primera troza corresponde a la base del árbol. IDR: 300-500; 600-800; 900-1100 y 2300 (Testigo). Ea. Sta. Lucía, Meliquina, Neuquén.

La velocidad de propagación de onda en las tablas obtenidas de la segunda troza de los árboles de cada tratamiento, mantuvieron el mismo patrón encontrado en las trozas. El valor promedio de velocidad de las tablas del tratamiento más ralo fue inferior al resto de los tratamientos y las tablas obtenidas del tratamiento testigo mostraron mayor velocidad que los tratamientos intermedios. Partiendo el rango total de velocidades encontrado en la medición sobre las tablas, en tres clases de igual amplitud; velocidad alta (2,26 a 2,68 kms-1), media (1,84 a 2,26 kms-1) y baja (1,41 a 1,84 kms-1) se puede observar que el total de tablas obtenidas en el testigo (IDR 2300) pertenecen a la clase media y alta. Por el contrario, el 97% las tablas obtenidas en el tratamiento más ralo (IDR 300-500) pertenecen mayoritariamente a la clase media y baja. Estas diferencias en la proporción de tablas por clase acrecienta el efecto de la densidad de manejo sobre la calidad estructural de la madera.

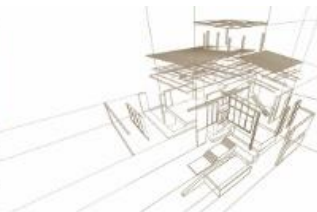
En base a mediciones acústicas sobre árboles en pie, las mejoras en la calidad resistente de la madera del pino ponderosa se darían a niveles de competencia extremos (IDR 2300 máximo para la especie, Gonda 1998), incompatibles con un correcto manejo forestal. No obstante, la medición por el método de resonancia, utilizado en las trozas y las tablas, parece ser más preciso en detectar diferencias por efecto de competencia e indicaría que manejos orientados a la producción de biomasa (IDR 900-1100) o para la producción de madera de calidad (IDR 600-800) producirían cambios positivos en las características resistentes de la madera del pino ponderosa respecto a situaciones de manejo más abiertas, tal el caso de los sistemas silvopastoriles (IDR 300-500).

4. CONCLUSIONES

Para la producción de madera de pino ponderosa con destino estructural deberían promoverse turnos de corta mayores a 50 años, priorizar sitios de calidad media a alta ($IS_{20} > 15$) y manejar los rodales a densidades medias a altas (IDR= 600-900). Dentro de cada rodal, los árboles objetivo deberían ser los más esbeltos, en general, asociados a una posición sociológica co-dominante. Estos resultados sugieren ampliar los turnos de corta propuestos actualmente (36 años) y evaluar la posibilidad de promover raleo por lo alto entre los tratamientos intermedios.

En términos de gestión, a escala regional, la información generada indica la necesidad de conformar cuencas forestales para producción de madera estructural priorizando los sitios de mayor calidad, a escala de predio, priorizar también los sitios de mejor calidad y manejar densidades altas y a nivel industrial, promover la clasificación de trozas por métodos no destructivos e instalar la clasificación visual de tablas por grados de resistencia.

La variabilidad encontrada en los valores del MOEd sugieren la necesidad de considerar entre otras variables, la edad, el índice de sitio, la densidad de manejo y la esbeltez de los árboles a muestrear durante el proceso de la caracterización resistente de la madera. Dado que, el material evaluado se corresponde a plantaciones realizadas con semilla introducida, en algunos casos de EEUU o provenientes de rodales semilleros de la región, sin ningún grado de mejora genética, sería menester explorar el grado de



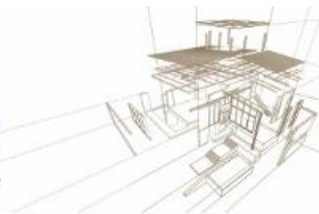
variabilidad genética que pudiera estar presente en el programa de mejora, permitiendo por ende evaluar su factibilidad de mejora conjunta con caracteres de forma y crecimiento.

AGRADECIMIENTOS

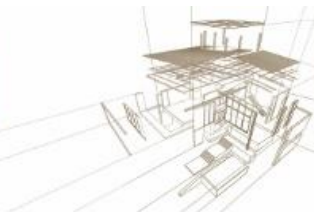
El apoyo financiero para estas investigaciones se proporcionó a través del proyecto TOPWOOD "Herramientas de fenotipado de madera: propiedades, funciones y calidad", Marie Skłodowska-Curie, (RISE), H2020 (2014), Comisión Europea. Los autores agradecen a CORDONE SA, YPF SA, Bosque Andino SA, Municipio de Huínganco y propietarios privados por facilitar sus instalaciones y también por el apoyo en el trabajo de campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andenmatten, E., Letourneau, F.J. (1997). Curvas de Índice de Sitio para *Pinus ponderosa* (Dougl.) Law de aplicación en la región Andino Patagónica de Chubut y Río Negro, Argentina. *Bosque* 18(2): 13-18.
- Assmann, F. (1970). *The Principles of Forest Yield Study: Studies in the organic production, structure, increment, and yield of forest stands.* Pergmon Press, Oxford.
- Bravo, F., Montero, G. and Del Rio, M. (1997). Índices de densidad de las masas forestales. *Ecología*, n°11, pp. 177-187.
- Bucur, V. (1985). *Acoustics of Wood.* CRC Press. New York. U.S.A. 284 p.
- Bucur, V. and Archer, R.R. (1984). Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Sci Technol*, 18:255–265.
- CEN (2016). EN 338:2016 - Structural timber - Strength classes.
- Curtis, R.O. (1982). A Simple Index of Stand Density for Douglas – Fir. *Forest Sci.*, Vol 28 (1): 92-94.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo C.W. (2011). *Infostat versión 11.* Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Gonda HE. 1998. Height-Diameter and Volume Equations, Growth Intercept and Needle Length Site Quality Indicators, and Yield Equations for Young Ponderosa Pine Plantations in Neuquén, Patagonia, Argentina. Tesis de grado PhD. Oregon State University. 198 p.
- Lasserre, J.P., Mason, E., Watt, M. (2005). The effects of genotype and spacing on *Pinus radiata* (D. Don) corewood stiffness in a 11 year old experiment. *For Ecol Manage* 205: 375-383.
- Letourneau, F.J., Medina, A.A., Andia, I.R., Andenmatten, E., De Agostini, N., Mantilaro, N. (2014). Caracterización xilo-tecnológica de la madera de una plantación adulta de *Pinus ponderosa* de la patagonia argentina. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, vol. 40, núm. 2, pp. 196-201. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina.
- Liu, C., Zhang, S.Y., Cloutier, A., Rycabel, T. (2007). Modeling lumber bending stiffness in natural black spruce stands using stand and tree characteristics. *For Ecol Manage* 242: 648-655.
- Macdonald, E. and Hubert, J. (2002). A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry*, 75(2): 107-138.



- Merlo, E., Alvarez-Gonzalez, J.G., Santaclara, O. and Riesco, G., 2014. Modelling modulus of elasticity of *Pinus pinaster* Ait. in northwestern Spain with standing tree acoustic measurements, tree, stand and site variables. *Forest Systems*, 23(1): pp. 153-166.
- Persson, B., Persson, A., Stahl, E.G., Karlmatz, U. (1995). Wood quality of *Pinus sylvestris* progenies at various spacing, *For Ecol. Manage* 76: 127-138.
- Raymond, C.A., Joe, B., Evans, R., Dickson, R.L. (2007). Relationship between timber grade, static and dynamic modulus of elasticity, and silviscan properties for *Pinus radiata* in New South Wales New Zealand. *Journal of Forestry Science* 37(2): 186-196.
- Roper, J., Ball, R., Davy, B., Downes, G., Fife, D., Gaunt, D., Gritton, D., Ilic, J., Koehler, A., McKinley, R., Morrow, A., Northway, R., Penellum, B., Rombouts, J. and Pongracic, S. (2004). Resource evaluation for Future Profit: Part B- Linking grade outturn to wood properties. Report for Forest & Wood Products Research & Development Corporation. Project PN03.3906, 77pp. (http://www.fwprdc.org.au/content/pdfs/PN_03.3906_part_b.pdf).
- Smith, DM., Larson, BC., Kelty, MJ., Ashton, P. (1997). *The practice of silviculture: Applied Forest Ecology*. 9th ed. Wiley, New York, NY. 537 p.
- Spurr, S.H. (1952). *Forest inventory*. 476 pp., illus, New York: Ronald Press Co.
- Waghorn, M.J., Mason, E.G., Watt, M.S. (2007). Influence of initial stand density and genotype on longitudinal variation in modulus of elasticity for 17-year-old *Pinus radiata*. *Forest Ecol Manage* 252: 67-72.
- Watson, P., Garner, C., Robertson, R., Reath, S., Gee, W., Hunt, K. (2003). The effects of initial tree spacing on the fiber properties of plantation grown coastal western hemlock. *Can. J. For. Res.* 33: 2460-2468.
- Watt, M.S. and Trincado, G. (2017). Modelling the influence of environment on juvenile modulus of elasticity in *Pinus radiata* grown in Chile. *For Ecol Manage* 400: 238-245.
- Watt, M.S. and Zoric, B. (2010). Development of a model describing modulus of elasticity across environmental and stand density gradients in plantation-grown *Pinus radiata* within New Zealand. *Can. J. For. Res.* 40: 1558-1566.
- Watt, M.S., Clinton, P.W., Parfitt, R.L., Ross, C., Coker, G. (2009). Modelling the influence of site and weed competition on juvenile modulus of elasticity in *Pinus radiata* across broad environmental gradients. *For Ecol Manage* 258: 1479-1488.
- Watt, M.S., Moore, J.R., Facon, J.P., Downes, G.M., Clinton, P.W., Coker, G., Davis, M.R., Simcock, R., Parfitt, R.L., Dando, J., Mason, E.G., and Bown, H.E. (2006). Modelling the influence of stand structural, edaphic and climatic influences on juvenile *Pinus radiata* dynamic modulus of elasticity. *For Ecol Manag* 229 (1-3):136-144.
- Yang, K.C. (1994). Impact of spacing on width and basal area of juvenile and mature wood in *Picea mariana* and *Picea glauca*. *Wood Fiber Sci.* 26: 479-488.
- Zingoni, M.I., Andia, I.; Mele, U. (2007). Longitud de traqueidas y madera juvenil en el fuste de un árbol de pino ponderosa de 50 años. III Congreso Iberoamericano de Productos Forestales IBEROMADERA 2007. 3 al 5 de julio, Buenos Aires, Argentina.
- Zobel, B., Jett, BJ. (1995). *Genetics of wood production*. Berlin-Heidelberg, Germany. Springer-Verlag. 337 p.
- Zoric, B. (2009). Modelling the influence of stocking on longitudinal and radial variation in wood properties of *Pinus radiata* on a warm Northland site. Masters thesis (M. For. Sci.) undertaken at the School of Forestry, University of Canterbury, Christchurch, N.Z.



PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Eucalyptus pellita* PARA ELEMENTOS DE CONSTRUÇÃO

PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF *Eucalyptus pellita* WOOD FOR STRUCTURAL ELEMENTS IN CONSTRUCTION

Santos, Filipe Luigi ⁽¹⁾; Sena, Caroline ⁽¹⁾*; Silva, Gabriel ⁽¹⁾; Cunha, Rita ⁽²⁾; César, Sandro ⁽³⁾

⁽¹⁾ Mestrando(a). Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador, Brasil

⁽²⁾ Prof. Dra. Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia. Salvador, Brasil

⁽³⁾ Prof. Dr. Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador, Brasil

* Contacto: klorac@hotmail.com

Resumo

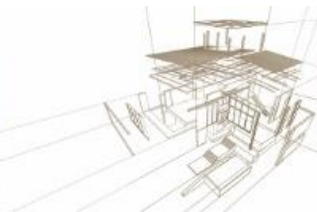
A ascendente demanda por celulose, o investimento na indústria florestal e boas condições climáticas levaram a América Latina a bater recordes de produção de madeira de eucalipto nos últimos anos. Diante da diversidade de espécies desse gênero plantadas na região, muitas delas ainda possuem suas propriedades físicas e mecânicas pouco exploradas. Sendo a madeira de *Eucalyptus pellita* uma dessas espécies pouco conhecidas, este trabalho tem como objetivo investigar as propriedades físicas (densidade aparente, densidade básica) e mecânicas (resistência a compressão paralela às fibras, módulo de elasticidade na compressão paralela, resistência ao cisalhamento e flexão) visando o uso dessa espécie na construção civil. Os ensaios físicos-mecânicos seguiram o método previsto na norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997). Os resultados mostraram que a madeira de *Eucalyptus pellita* atende adequadamente quanto a suas características físicas e mecânicas para uso na construção, especialmente para a produção de pisos estruturais, madeira laminada colada, painéis estruturais, entre outros.

Palabras-clave: Eucalyptus pellita; Resistência; Caracterização; Estruturas de madeira

Abstract

The demand of paper industry, the development of forestry and adequate weather conditions have led Latin America to records in the production of eucalyptus wood in the recent years. Due to the diversity of species, many species are still having their physical and mechanical properties not properly explored. The *Eucalyptus pellita* timber is one of the species that needs further investigation in order to guarantee appropriate knowledge, by that the aim of this paper is to investigate the physical properties (specific density and shrinkage) and mechanical properties (compressive strength parallel to grain, modulus of elasticity in parallel compression, shear strength and bending resistance) of *Eucalyptus pellita* timber for construction propose. The tests followed the method established in the Brazilian standard NBR 7190 (ABNT, 1997). The results show that *Eucalyptus pellita* timber has appropriate physical and mechanical characteristics for using in construction elements such as structural floors, glulam, structural panels.

Keywords: Eucalyptus pellita; Strengths; Characterization; Timber Structures



1. INTRODUÇÃO

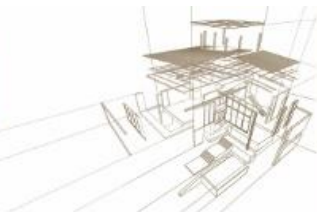
No Brasil, a Indústria Brasileira de Árvores IBÁ (2017) registrou uma área de 7,84 milhões de hectares de reflorestamento. O destino de 91% de toda a madeira produzida é para fins industriais e isso corresponde a 6,2% do PIB (Produto Interno Bruto) industrial no país. As madeiras oriundas de reflorestamento são principalmente dos gêneros *Eucalyptus ssp.* e *Pinus ssp.* e representam uma matéria-prima de extrema importância para o setor florestal. O gênero *Eucalyptus ssp.* possui centenas de espécies registradas, das quais apresentam boa adaptação às condições do solo e do clima brasileiros. Além disso, é a mais utilizada, nos reflorestamentos brasileiros, devido a suas características de rápido crescimento, capacidade de adaptação às diversas regiões ecológicas e pelo potencial econômico (Salazar et al, 2016).

Segundo Santos et al. (2014), os avanços nas técnicas silviculturas, no melhoramento genético e nos processos tecnológicos colocaram o Brasil em posição de grande destaque frente aos demais países que cultivam o eucalipto para atender as necessidades energéticas, a fabricação de celulose e papel, a manufatura de painéis, a obtenção de produtos serrados e a produção de madeira roliça para os mais diversos fins.

A madeira é um material heterogêneo que apresenta propriedades físicas, químicas, anatômicas e mecânicas que podem variar entre espécies, dentro da mesma espécie e até na mesma árvore. Por isso, conhecer suas propriedades e a interação dessas propriedades é fundamental para a correta utilização dessa matéria-prima (Palermo et al., 2013). De acordo com Valle et al. (2017), as propriedades físico-mecânicas dessas madeiras tornam-nas versáteis e estratégicas para os segmentos industriais citados, podendo ser utilizadas em vários outros setores, tais como na construção civil.

O estudo da espécie *Eucalyptus pellita* para a produção de peças estruturais é importante, uma vez que visa gerar subsídios para uma futura utilização dessa madeira em escala comercial e aumentar as fontes de matéria-prima qualificada para peças serradas ou produtos engenheirados. Com isso, este trabalho objetivou determinar as propriedades físicas (densidade aparente, densidade básica) e mecânicas (resistência a compressão paralela às fibras, módulo de elasticidade na compressão paralela, resistência ao cisalhamento e flexão simples) do *Eucalyptus pellita* visando o uso dessa espécie na construção civil.

Assim, o conhecimento tecnológico sobre madeiras que têm potencial para utilização na indústria, como é o caso do eucalipto, contribui de forma significativa para justificar a utilização dessas espécies no mercado. Além disso, Silva (2018) considera que as condições favoráveis ao plantio de eucalipto no Brasil, a utilização desta matéria prima no setor da construção civil pode funcionar inclusive como fomento à atividade de silvicultura certificada. Estudos mais detalhados podem considerar a localização das madeiras no percurso do transporte, de forma a verificar se estas contribuem para o aumento das distâncias, e apresentar as lacunas e oportunidades de mercado para a madeira plantada e certificada.



2. METODOLOGIA

2.1. Materiais

Os corpos de prova foram extraídos das toras do *Eucalyptus pellita* jovem (com cerca de 7 anos a 10 anos de idade) originadas do plantio em Araçás– BA. Para a caracterização do lote estudado foram produzidos cinquenta e dois protótipos com dimensões especificadas pela norma brasileira NBR 7190 – Projeto de Estrutura de Madeira (ABNT, 1997) para cada tipo de ensaio.

2.2. Métodos

2.2.1. Propriedades Físicas

A caracterização física consistiu nos ensaios de umidade, densidade. Neste experimento foram retiradas discos de 5 cm de altura localizadas em três pontos diferentes da peça: na base, na altura do DAP (diâmetro na altura do peito) e no topo. Em seguida, foram retirados de cada disco um corpo de prova com dimensão de 2,0 x 3,0 x 5,0 cm com presença de albarno e cerne mostrada na Fig. 1a. A Figura 1b mostra a seção transversal do corpo de prova, mostrando as três direções principais das fibras.

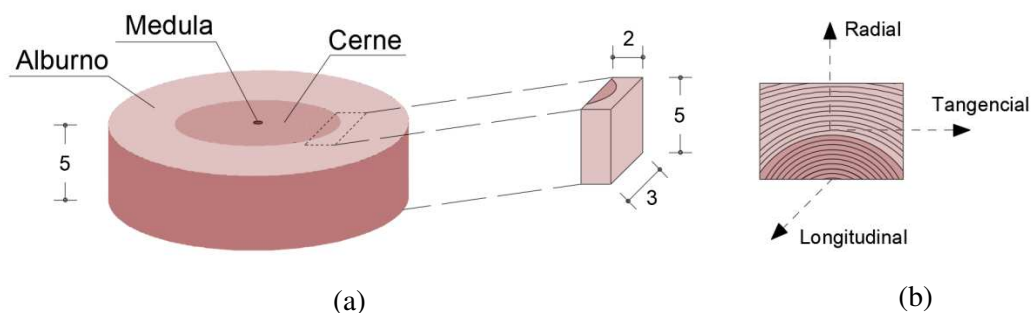


Figura 1: Corpo de prova para ensaio de umidade e densidade

O experimento foi realizado segundo procedimentos previstos na NBR 7190 (ABNT, 1997), segundo os itens: B.5.4 para determinação da umidade do lote; B.6.4 para determinação da densidade do lote.

2.2.2. Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas são medidas como propriedades de resistência da madeira á condições solicitantes em uma peça. A NBR 7190 (ABNT, 1997) indica que para a caracterização simplificada das propriedades mecânicas em peças estruturais sejam realizados ensaios de resistência a flexão, resistência a compressão paralela às fibras e resistência ao cisalhamento. A Tabela 1 apresenta a descrição dos ensaios realizado, assim como a dimensão dos corpos de prova utilizada para a pesquisa.

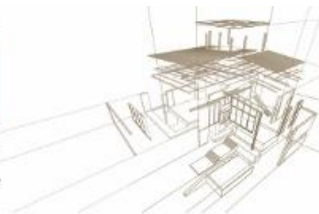
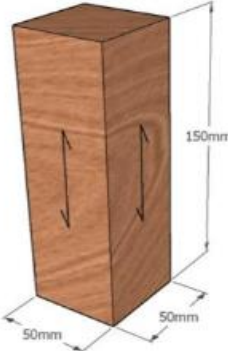
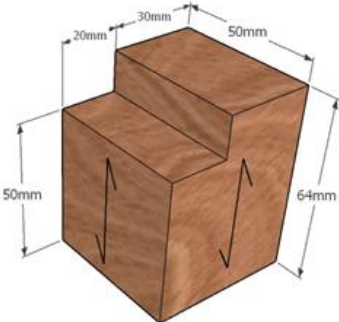
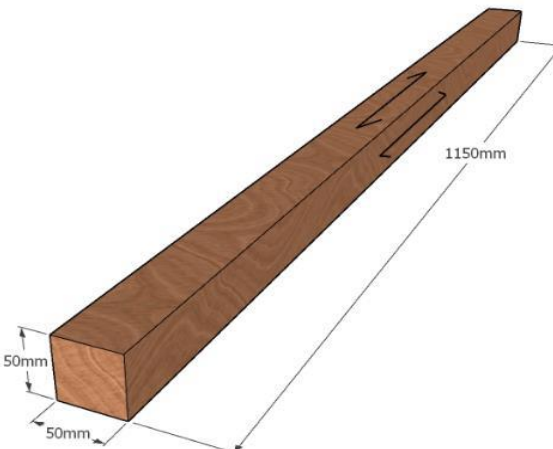
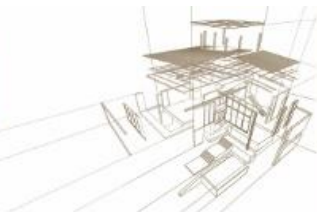


Tabela 1: Ensaio Mecânicos e dimensões dos protótipos

Ensaio	Dimensões dos Corpos de Prova (mm)
<p>Compressão Paralela às Fibras</p>	<p>Objetivo: determinar a resistência e a rigidez à compressão paralela às fibras para um lote considerado homogêneo.</p>
	<p>Cisalhamento paralelo às fibras</p> <p>Objetivo: determinar a resistência de cisalhamento da madeira pela tensão máxima de ruptura no cisalhamento de um corpo de prova.</p>
	<p>Flexão simples</p>
<p>Objetivo: determinar a resistência e a rigidez à flexão para um lote considerado homogêneo.</p>	

Além dos valores médios específicos para cada espécie, a NBR 7190 (ABNT, 1997) permite também a caracterização das madeiras segundo sua classe de resistência, do qual leva em consideração os valores característicos, obtidos a partir da Equação (1). A Tabela 2 apresenta os valores característicos de resistência e módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras e densidade aparente para madeiras de dicotiledôneas.



$$f_{w0,k} = \left(2 \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2}-1} - x_{\frac{n}{2}} \right) 1,1 \quad (1)$$

Tabela 2: Valores característicos para madeiras de dicotiledôneas, segundo classes de resistência, na condição padrão de referência $U=12\%$. Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).

Classe	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	ρ_{ap} (kg.m ⁻³)
C20	20	4	9500	650
C30	30	5	14500	800
C40	40	6	19500	950
C60	60	8	24500	1000

Oliveira (1997) citou que o gênero *Eucalyptus spp.* não apresenta restrições quanto à resistência mecânica que pode variar de baixa a muito elevada. Essa grande variabilidade se deve ao fato da existência de mais de 600 espécies, adaptadas aos mais diferentes tipos de solo e condições climáticas.

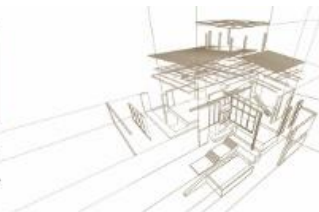
3. ANÁLISES DOS RESULTADOS

3.1. Propriedades Físicas

Na Tabela 3 são apresentados os resultados da densidade básica e aparente, cujos valores médios, obtidos a partir do volume da madeira a 12% de umidade. Em relação à densidade aparente da espécie estudada, observa-se que o valor médio encontrado (988 kg.m⁻³) não é discrepante em relação aos mostrados do gênero eucalipto na tabela de valores médios de madeiras dicotiledôneas nativas e de florestamento pela NBR 7190 (ABNT, 1997), se aproximando muito do valor do *E. citriodora* (999 kg.m⁻³), utilizado bastante na construção civil no Brasil.

Tabela 3: Densidade aparente e básica

Amostras	ρ_{bas} (kg.m ⁻³)	ρ_{ap} 12% (kg.m ⁻³)
1	672	1.038
2	610	1.005
3	694	1.139
4	591	975
5	555	955
6	664	1.105
7	375	649
8	708	1.140
9	641	1.074
10	492	775
11	746	1.194
12	489	832
13	600	970
Média	599	988
CV (%)	17,07	15,95
Mínimo	375	649
Máximo	746	1.139



Como parâmetro, para esta pesquisa, têm-se os valores médios para densidade básica relacionada com as idades das amostras do *Eucalyptus pellita*, encontrados na literatura, descritos na Tabela 4. A espécie estudada possui idade de sete anos a dez anos. Nota-se que apresentou uma densidade básica parecida com encontrada na literatura. O valor médio da densidade básica das amostras estudadas foi de 599 kg.m^{-3} , enquanto as densidades de *E.pellita*, a partir de 15 anos, variam de 512 a 634 kg.m^{-3} .

Tabela 4: Valores médios de densidade básica da espécie *E. pellita*. Fonte: (Silva, 2018)

Densidade básica	Idade das amostras
558 kg.m^{-3}	5 anos
602 kg.m^{-3}	5 anos
512 kg.m^{-3} a 634 kg.m^{-3}	15 anos
620 kg.m^{-3}	17 anos

Destaca-se que as espécies de maior densidade são mais recomendadas quando se desejam maior durabilidade e resistência mecânica da estrutura, portanto a espécie estudada tem potencial para produção de peças estruturais. Destaca-se que estas peças devem ser tratadas contra agentes xilófagos para aumentar sua durabilidade.

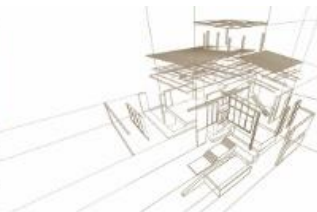
3.2. Propriedades Mecânicas

3.2.1. Resultados de compressão paralela às fibras

A Tabela 5 apresenta os valores médios do ensaio da resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c0,m}$) e módulo de elasticidade ($E_{c0,m}$) a 12% de umidade. As amostras estavam com uma umidade média de 17,5% no momento de realização do ensaio, por este motivo houve a necessidade de correção dos valores apresentados. Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), lotes homogêneos de materiais estruturais apresentam coeficientes de variação de até 15%, mas para a madeira, admite-se até 18%. Logo, este lote estudado é considerado homogêneo apresentando coeficientes abaixo de 15%.

Tabela 5: Resultados do ensaio de compressão paralela às fibras

Amostras	U%	E_{c0} (GPa)	E_{c0} 12% (GPa)	f_{c0} (MPa)	f_{c0} 12% (MPa)
1	17,0	8,87	9,76	43,44	49,96
2	18,5	8,79	9,93	44,09	52,69
3	16,9	7,43	8,15	43,66	50,07
4	16,0	8,37	9,04	35,65	39,93
5	19,3	10,04	11,50	30,15	36,75
6	17,0	7,46	8,20	34,73	39,94
7	16,6	10,68	11,66	48,72	55,44
8	18,5	8,96	10,12	45,04	53,82
9	17,5	7,37	8,18	32,88	38,31
10	18,0	8,81	9,87	40,15	47,37
11	16,0	10,11	10,92	40,32	45,15
12	18,1	8,84	9,92	37,02	43,79
Média	17,52	8,81	9,77	39,65	46,10
CV (%)	5,90	12,22	12,43	14,13	13,92
Mínimo	19,30	10,68	11,66	48,72	55,44
Máximo	16,00	7,37	8,15	36,15	36,75



O valor característico ($f_{c0,k}$) do lote calculado para essa amostra e corrigido para o equivalente à condição de 12% de umidade foi de 37,36 MPa, a partir deste resultado, a madeira desta espécie pode ser considerada como pertencente à classe C30 de dicotiledôneas, segundo o critério de classificação da NBR 7190 (ABNT, 1997), baseado na resistência à compressão paralela às fibras mostrada na Tabela 1 supracitada em propriedades mecânicas. Nascimento et al (2012), ao ensaiar a madeira de *Eucalyptus pellita* de 17 anos de idade, encontraram valores de resistência à compressão paralela às fibras, a 12% de umidade, equivalente a 63,2 MPa, confirmando que esta madeira, no geral, poder chegar a elevada resistência à compressão paralela às fibras.

3.2.2. Resultado de cisalhamento paralelo às fibras

A Tabela 6 mostra os valores médios de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras do lote de madeira ensaiada. Assim como, nos ensaios de compressão paralela às fibras o lote estudado também apresentou coeficientes abaixo de 15% para este ensaio, sendo considerado homogêneo. As amostras estavam com uma umidade média de 13,34% no momento de realização do ensaio, por este motivo houve a necessidade de correção dos valores apresentados com exceção das amostras 1, 2, 5 e 8 que apresentam uma umidade de 12%.

Tabela 6: Resultado de cisalhamento paralelo às fibras

Amostra	U%	f_{v0} (Mpa)	f_{v0} (Mpa) (12%)
1	12,6	13,57	13,57
2	12,6	11,57	11,57
3	14,0	9,26	9,81
4	14,0	8,59	9,11
5	12,6	9,18	9,18
6	14,2	8,28	8,82
7	13,2	13,38	13,86
8	12,4	12,04	12,04
9	14,2	10,63	11,33
10	13,4	12,71	13,24
11	12,8	8,55	8,55
12	14,1	10,51	11,18
Média	13,34	10,69	11,02
CV	5,43	18,15	17,39
Máximo	13,40	13,57	13,86
Mínimo	12,40	8,28	8,55

De acordo com a norma brasileira, para as coníferas e também para as dicotiledôneas o valor da resistência ao cisalhamento fornecido para a classe de resistência C30 corresponde a 5,0 MPa, o valor encontrado correspondeu a 13,72 MPa. Observa-se que o valor da resistência característica ao cisalhamento obtidos no ensaio é relativamente maior que o valor fornecido pela norma brasileira, destaca-se a importância desta propriedade na construção civil, onde a determinação da resistência ao cisalhamento é fundamental na fabricação de tesouras para as coberturas e em ligações.



3.2.3. Resultados de resistência à flexão simples

A Tabela 7 mostra os resultados de resistência dos corpos de prova do ensaio de flexão simples, com o teor de umidade em média de 16,56%, devido a isso foi feita uma correção dos valores apresentados para uma umidade de 12%. O lote estudado é homogêneo devido aos parâmetros citados anteriormente. Os corpos de prova apresentaram resistência média de 1039,1 Mpa, sendo um valor abaixo do esperado para classe C30 para madeiras dicotiledôneas, apresentada na tabela 1.

Tabela 7: Resultados de resistência à flexão simples

Amostra	U%	E_M (Mpa)	E_M (Mpa) (12%)
1	16,6	8827	1004,5
2	16,4	9134	1034,0
3	19,8	6420	7922
4	16,2	7596	8553
5	14,8	9444	1023,7
6	18,7	8718	1047,0
7	17,0	1101,2	1266,4
8	15,7	8174	9081
9	16,5	1128,8	1281,1
10	16,4	9360	1059,6
11	16,5	1030,8	1169,9
12	14,1	9670	1027,9
Média	16,56	9162	1039,1
CV	9,61	15,73	14,91
Máximo	19,8	1128,8	1266,4
Mínimo	14,1	6420	7922

Destaca-se que o módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) são dois parâmetros normalmente avaliados em testes de flexão estática, sendo o módulo de elasticidade de maior importância na caracterização tecnológica da madeira, pois representa a resistência do material submetido a uma força aplicada perpendicularmente ao eixo longitudinal da madeira (Scanavaca Júnior; Garcia, 2004).

Silva (2018) aponta que o *E. pellita* possui um bom desempenho sob esforços de flexão, portanto também pode ser utilizada para a fabricação de peças horizontais de painéis para sistema *wood frame*, como travessas inferiores e superiores, vergas, contravergas.

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos para a madeira de *E. pellita* pode-se concluir que:

- O lote estudado pode ser considerado como homogêneo, pois o coeficiente de variância nos ensaios foi menor que 18%;
- A espécie apresenta alta resistência ao cisalhamento paralelo as fibras e média resistência ao módulo de elasticidade à flexão estática e compressão paralela às fibras e alta densidade básica;

- Em função destes resultados a espécie de *E. pellita* apresenta resistência mecânica para produção de peças estruturais empregadas na construção civil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Madeiras (LabMad/UFBA), ao Laboratório de Ensaios em Durabilidade dos Materiais (LEDMA/UFBA) da Universidade Federal da Bahia e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) do Governo Federal do Brasil pelo apoio oferecido na realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro.

Nascimento, A. et al (2012). Resistências à compressão e ao embutimento e densidade das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus paniculata*. Anais do XIII EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Vitória.

Oliveira, J. (1997). Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil. Tese, Pós Doutorado em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Palermo, G. et al. (2013). Delimitação entre os lenhos juvenil e adultos de *Pinus elliottii* Engelm. Revista *Árvore*, Viçosa-mg, v. 37, n. 1, p. 191-200.

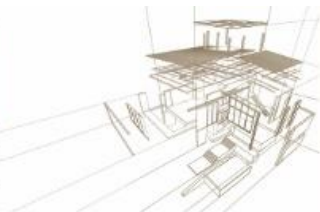
Salazar et al. (2016). *Eucalyptus* cell wall architecture: clues for lignocellulosic biomass deconstruction. *Bioenergy Resource*, v. 9, p. 969-979.

Scanavaca Júnior, L.; Garcia, J. N. (2004). Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. *Scientia Forestalis*, v. 65, p.120-129.

Santos et al. (2014). Cultivo do Eucalipto. Embrapa Florestas. Sistema de Produção, Ed.4, Março.

Silva, J. (2018). Parâmetros construtivos para painéis verticais adaptados do sistema wood frame em madeira de eucalipto jovem. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

Valle, M. et al. (2013). Retenção e penetração de CCA em madeira de primeira e segunda rotação de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. *Ciência Florestal*, v. 23, n. 2, p. 481-490.



RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN FLEXIÓN Y COMPRESIÓN DEL EUCALYPTUS GRANDIS DE ARGENTINA

RELATIONSHIP BETWEEN BENDING AND COMPRESSION MECHANICAL PROPERTIES OF ARGENTINEAN EUCALYPTUS GRANDIS

Sosa Zitto, M. Alexandra^{(1)*}; Ramos, M. del Rocío⁽²⁾; Torrán, Eduardo A.⁽³⁾;
Fank, Pamela Y.⁽¹⁾; Piter, Juan C.⁽¹⁾

⁽¹⁾ Dr. Ing., Investigador, GEMA. Depto. de Ingeniería Civil. Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional. Concepción del Uruguay, Argentina.

⁽²⁾ Ing., Investigador, GEMA. Depto. de Ingeniería Civil. Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional. Concepción del Uruguay, Argentina.

⁽³⁾ Mg. Ing., Investigador, GEMA. Depto. de Ingeniería Civil. Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional. Concepción del Uruguay, Argentina.

* Contacto: alexandrasosazitto@gmail.com

Resumen

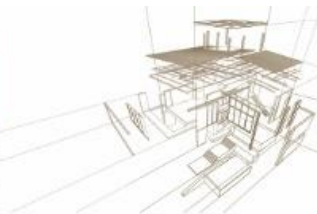
Este artículo presenta los resultados de una investigación experimental sobre madera aserrada de *Eucalyptus grandis* que incluyó 50 piezas ensayadas en flexión y 50 piezas ensayadas en compresión paralela a la fibra, de acuerdo a la norma argentina IRAM 9663 (2013). El análisis de los resultados de la muestra completa y los correspondientes a submuestras obtenidas por medio de la clasificación visual de las piezas mostró que la relación entre la resistencia en flexión y en compresión aumenta cuando crece la calidad de la madera. El valor del 5º percentil para la resistencia a compresión obtenido experimentalmente fue entre el 22% y el 39% mayor que el determinado a partir de la resistencia a flexión empleando la expresión provista por la norma IRAM 9664 (2013). Los valores medios del módulo de elasticidad obtenidos en compresión paralela a la fibra fueron entre 10% y 57% más altos que los determinados en flexión, pero no se encontró una relación clara entre estas propiedades. Los resultados mostraron que la adopción del criterio de la normativa argentina para relacionar las propiedades mecánicas de flexión y compresión puede conducir a un diseño conservador de los miembros de esta especie sometidos a compresión.

Palabras-clave: flexión, compresión, Eucalyptus grandis.

Abstract

The results of an empirical research project of Argentinean *Eucalyptus grandis* sawn timber enclosing 50 specimens tested in bending and another 50 tested in compression parallel to the grain, in both cases according to IRAM 9663 (2013), were studied. The analysis of the results corresponding to the wholes samples and to the grades obtained by visually strength grading the specimens showed that bending strength increased in relation to compression strength when timber quality increased. The 5-percentile values obtained for compression strength were between 22 % and 39 % higher than those derived from the bending strength results by applying the equation established in IRAM 9664 (2013). The modulus elasticity mean values obtained in compression parallel to the grain were between 10 % and 57 % higher than those determined in bending, but no clear relationship was found between these properties. These results showed that the adoption of the Argentinian standard to relate bending and compression mechanical properties may lead to a conservative design of compression members of this timber species.

Keywords: bending, compression, Eucalyptus grandis.



1. INTRODUCCIÓN

Resultados experimentales han demostrado que la madera de uso estructural presenta una relación entre las principales propiedades resistentes y de rigidez. Sin embargo, debido a las diferentes estructuras anatómicas presentadas por especies latifoliadas y coníferas, la relación encontrada entre algunas propiedades en coníferas difieren de la encontrada en latifoliadas (Glos 1995). Aunque con diferentes criterios, que pueden explicarse por la gran cantidad de especies incluidas en las normas de diversos países, la relación entre las principales propiedades de resistencia y rigidez es considerada por las normas (IRAM 9664 2013; NDS 2005; ABNT 2010).

De acuerdo con la normativa de Argentina, que está en línea con el criterio europeo, todas las propiedades de resistencia y rigidez se pueden calcular a partir de la resistencia y el módulo de elasticidad en flexión y la densidad. En particular, la resistencia característica a la compresión paralela a la fibra se puede derivar de la resistencia característica a la flexión mediante la aplicación de la Ecuación 1, de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013), que puede aplicarse a todos los grados de resistencia, tanto en coníferas como en latifoliadas.

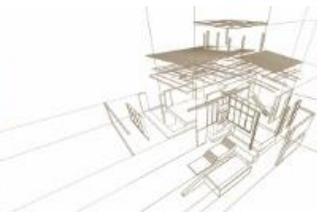
$$F_{c,0,k} = 5 (F_{m,k})^{0.45} \quad (1)$$

donde:

- $F_{c,0,k}$ es la resistencia característica a la compresión paralela a la fibra
- $F_{m,k}$ es la resistencia característica a la flexión

De acuerdo con este criterio, los resultados del módulo de elasticidad obtenidos de los ensayos de flexión también son aplicables al diseño de miembros estructurales cargados axialmente. Sin embargo, es importante enfatizar que algunos aspectos del problema como la influencia de la calidad de la madera en la relación entre propiedades no son bien conocidos y, en consecuencia, son necesarias más investigaciones para mejorar la precisión del sistema. Contrariamente al criterio adoptado en Argentina, las reglas de diseño de Brasil (ABNT 2010) establecen que, en ausencia de datos completos de ensayos mecánicos, todos los valores característicos de las propiedades de resistencia y rigidez se pueden calcular a partir de los resultados obtenidos del ensayo de compresión paralela a la fibra.

El *E. grandis* es una de las especies renovables más importantes cultivadas en Argentina (Dirección de Producción Forestal 2016) y su uso para fines estructurales es cada vez más frecuente. Esta especie de rápido crecimiento ha sido ampliamente investigada a través de ensayos sobre especímenes de tamaño estructural sometidos a flexión pero su comportamiento bajo cargas axiales ha sido escasamente analizado (Piter et al., 2003; Piter et al., 2004a y b; Torrán et al., 2008 Sosa Zitto et al., 2009). Un método de clasificación visual por resistencia fue adoptado por la norma argentina IRAM 9662-2 (2015), el cual se desarrolló basado en resultados de ensayos de flexión. No obstante, razones económicas y técnicas -relacionadas con la confiabilidad del diseño estructural- fundamentan la necesidad de examinar empíricamente otras propiedades mecánicas. En particular, el conocimiento del comportamiento de esta especie cuando se somete a compresión paralela a la fibra es de gran importancia para el diseño de columnas y estructuras reticuladas.



El objetivo de este trabajo es presentar y discutir los resultados de una investigación sobre la relación entre las propiedades mecánicas en flexión y en compresión en madera aserrada de *E. grandis* argentino. Los resultados obtenidos de ensayos realizados de acuerdo a la norma IRAM 9663 (2013) se analizan y comparan con los criterios adoptados por normas y reglas de diseño de diversos países.

2. METODOLOGÍA

Con el objetivo de obtener una muestra representativa de la variación de calidad en la madera, 50 piezas con tamaños nominales de 50 mm x 75 mm x 4000 mm se seleccionaron al azar. El 50% de las piezas procedió de una plantación de 16 años cultivada en Virasoro, Corrientes, y el otro 50% procedió de una plantación de 19 años cultivada en Concordia, Entre Ríos, que constituyen la principal procedencia de *E. grandis* en Argentina (INTA 1995).

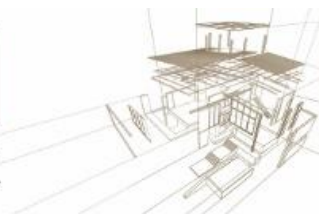
Después de un período de secado al aire en ambiente exterior protegido, el material se cepilló y se acondicionó en una cámara a una temperatura de 20 +/- 2 °C y una humedad relativa de 65 +/- 5%. Con el fin de minimizar las variables fuera de control y para una mejor comparación de las propiedades mecánicas analizadas, de cada pieza se cortó un cuerpo de prueba con una longitud nominal de 1500 mm para ensayar en flexión y otro cuerpo con una longitud nominal de 300 mm para ensayar en compresión.

Todos los datos relacionados con la resistencia y la rigidez se obtuvieron de las pruebas llevadas a cabo según los procedimientos de la norma IRAM 9663 (2013). Para todas las pruebas estáticas se utilizó una máquina de ensayos Shimadzu UH 1000kN, capaz de aplicar cargas con una velocidad de movimiento adecuada del cabezal y una precisión del 1% de la carga aplicada.

Para las pruebas de flexión los cuerpos de prueba se dispusieron con los apoyos separados entre sí una distancia igual a 18 veces la altura de la sección de la pieza (1350 mm). Las cargas fueron aplicadas simétricamente en los tercios de dicha distancia. Cada cuerpo de prueba se preparó ubicando una sección transversal crítica en el tercio central de la pieza, es decir, la zona de mayor tensión. Para determinar el módulo de elasticidad global, se registraron las deformaciones en el centro del tramo mediante un extensómetro Somet, capaz de registrar 0,01 mm. La resistencia a la flexión (F_m) y el módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$) se calcularon utilizando la expresión estándar.

Los cuerpos de prueba para ensayar en compresión paralela a la fibra se prepararon con una longitud igual a 6 veces la mínima dimensión de la sección transversal y se cargaron en forma centrada. Las deformaciones se midieron en una longitud igual a 4 veces la mínima dimensión de la sección transversal (200 mm), zona en la cual se ubicó una sección transversal crítica. Se utilizaron dos extensómetros Kafer capaces de registrar 0,001 mm, y ubicados en dos caras opuestas para minimizar los efectos de la distorsión. La resistencia ($F_{c,0}$) y el módulo de elasticidad ($E_{c,0}$) se determinaron usando la expresión estándar.

Los valores del 5-percentil de la resistencia a la flexión ($F_{m,05}$) y a la compresión ($F_{c,05}$) se determinaron por ordenamiento de acuerdo con el criterio de la norma IRAM



9664 (2013). El contenido de humedad y la densidad (ρ) se determinaron sobre un trozo de sección transversal completa, libre de defectos, obtenido de una zona cercana a la rotura, tomado del cuerpo de prueba después de la prueba estática.

Se relevaron los principales parámetros visuales para la clasificación por resistencia de esta especie, como la presencia de médula, fisuras, grandes defectos y dimensiones de los nudos. La nudosidad (K) se expresó como la relación del ancho del nudo más grande -medido entre las líneas tangentes al nudo en dirección paralela a los bordes de la pieza- y el ancho total de la superficie sobre la que apareció. Para los nudos de borde se consideró el valor más bajo de K (IRAM 9662-2, 2015).

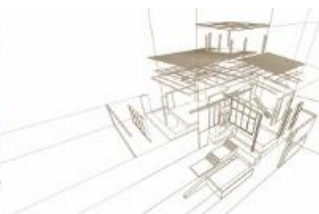
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El valor medio del contenido de humedad alcanzó 14% y 15% para todas las muestras analizadas en flexión y compresión paralelas al grano, respectivamente. Los valores medios de densidad, ajustados a un contenido de humedad del 12% según IRAM 9664 (2013), alcanzaron 560 kg/m^3 y 586 kg/m^3 para las probetas sometidas a prueba en flexión y compresión, respectivamente, y los valores de COV correspondientes fueron del 19% y 18%. Estos resultados de densidad son congruentes con otros valores previamente reportados para esta especie de madera por Sosa Zitto et al. (2009).

La Tabla 1 resume los principales resultados obtenidos para las propiedades mecánicas analizadas; con el objetivo de estudiar la influencia de la calidad de la madera sobre la relación entre las propiedades mecánicas en flexión y en compresión, los resultados se presentan por separado para distintos perfiles de calidad, indicando en cada caso el número de cuerpos de prueba correspondiente a cada perfil.

Tabla 1: Resumen de los resultados de resistencia y módulo de elasticidad

Perfil ⁽¹⁾	Grado ⁽¹⁾	n ⁽⁴⁾	Resistencia		Módulo de elasticidad	
			Flexión ⁽²⁾	Compresión ⁽³⁾	Flexión ⁽³⁾	Compresión ⁽³⁾
a	Muestra completa	n ⁽⁴⁾	50	50	50	50
		valor medio (N/mm ²)	45.5	39.9	13300	18400
		COV (%)	31	19	21	51
		$F_{m,0.05}$ y $F_{c,0.05}$ (N/mm ²)	31.3	30.1	-	-
b	b.1	n	37	37	37	37
		valor medio (N/mm ²)	47.8	40.5	13800	20200
		COV (%)	31	19	21	50
		$F_{m,0.05}$ y $F_{c,0.05}$ (N/mm ²)	32.5	31.2	-	-
b	b.2	n	13	13	13	13
		valor medio (N/mm ²)	38.9	38.3	12000	13200
		COV (%)	26	16	18	23
		$F_{m,0.05}$ y $F_{c,0.05}$ (N/mm ²)	27.4	29.7	-	-



c	c.1	n	32	30	32	30	
		valor medio (N/mm ²)	49.6	40.7	14000	20100	
		COV (%)	28	18	19	52	
			$F_{m,05}$ y $F_{c,0,05}$ (N/mm ²)	35.7	30.5	-	-
	c.2	n	18	20	18	20	
		valor medio (N/mm ²)	38.3	38.8	12100	15800	
		COV (%)	30	19	21	43	
			$F_{m,05}$ y $F_{c,0,05}$ (N/mm ²)	28.0	30.4	-	-
	IRAM 9662-2 (2015)	VSG 1	n	19	20	19	20
valor medio (N/mm ²)			51.5	42.3	13900	21800	
COV (%)			32	18	23	56	
			$F_{m,05}$ y $F_{c,0,05}$ (N/mm ²)	36.7	35.1	-	-
VSG 2		n	9	8	9	8	
		valor medio (N/mm ²)	49.9	38.8	14200	17400	
		COV (%)	21	12	16	29	
			$F_{m,05}$ y $F_{c,0,05}$ (N/mm ²)	35.3	31.8	-	-
VSG 3		n	22	22	22	22	
	valor medio (N/mm ²)	38.5	38.1	12400	15600		
	COV (%)	28	20	19	42		
		$F_{m,05}$ y $F_{c,0,05}$ (N/mm ²)	28.5	29.8	-	-	

(1) Límites de los parámetros visuales correspondientes a los grados resistentes, a: muestra completa, sin límites para los parámetros; b.1: piezas sin médula; b.2: piezas restantes; c.1: piezas sin médula, fisuras que no exceden el máximo establecido en IRAM 9662-2 (2015) y sin grandes defectos; c.2: piezas restantes; VSG 1: los mismos parámetros de c.1 y nudosidad $K \leq 1/3$; VSG 2: los mismos parámetros de c.1 y nudosidad $1/3 < K \leq 2/3$; VSG 3: piezas restantes.

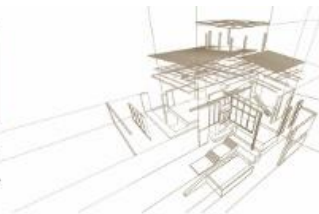
(2) Ajustados a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la IRAM 9664 (2013).

(3) Corregidos al contenido de humedad de referencia de 12 % de acuerdo a la IRAM 9664 (2013).

(4) n: número de cuerpos de prueba de cada perfil de calidad.

Respecto de la resistencia, la Tabla 1 muestra que $F_{m,05}$ fue mayor que $F_{c,0,05}$ con la única excepción de los grados más pobres de cada perfil (b.2, c.2 y VSG 3). También se puede apreciar una mayor resistencia a la flexión que a compresión comparando los valores medios correspondientes, aunque en este caso las diferencias encontradas para las clases más bajas son insignificantes.

En contraste con los resultados de resistencia, el valor medio del módulo de elasticidad obtenido en compresión paralela a la fibra ($\bar{E}_{c,0}$) fue mucho más alto que el obtenido en flexión ($\bar{E}_{m,g}$) para las muestras totales y para todos los grados visuales, con diferencias



que van del 10% al 57%. Es interesante observar que los valores de COV indican una mayor dispersión de resultados para la resistencia a flexión que para la resistencia a compresión pero, contrariamente, indican una variabilidad mucho mayor de los resultados para el módulo de elasticidad en compresión que para el módulo de elasticidad en flexión.

La comparación de los resultados obtenidos para los grados b.1 y b.2 permite apreciar una influencia similar de la presencia de médula en la resistencia a la flexión y la rigidez. $F_{m,05}$ fue 19% más alto para b.1 que para b.2 y $\bar{E}_{m,g}$ fue 15% más alto para b.1 que para b.2. Estas diferencias son congruentes con las encontradas previamente por Sosa Zitto et al. (2009) que informaron que esta característica visual es un parámetro importante de reducción de la resistencia y la rigidez para esta especie de madera. En relación con las propiedades de compresión, la influencia de la presencia de médula fue muy importante en la rigidez, pero fue leve en cuanto a la resistencia. $\bar{E}_{c,0}$ fue un 53% mayor para b.1 que para b.2, mientras que $F_{c,0,05}$ fue solo un 5% mayor para b.1 que para b.2 y se obtuvo una diferencia similar al comparar los valores medios de resistencia correspondientes. Al comparar los resultados encontrados para el Perfil c) con los presentados para el Perfil b) es posible apreciar una mayor influencia de grandes fisuras y defectos en la flexión que en las propiedades mecánicas de compresión. Para la flexión, las diferencias entre los resultados obtenidos para c.1 y c.2 aumentaron en comparación con las diferencias encontradas entre los resultados obtenidos para b.1 y b.2. Por el contrario, las diferencias correspondientes disminuyeron en la compresión paralela a la fibra.

Los resultados presentados para los tres grados obtenidos por la clasificación visual de las muestras según el método adoptado por la norma argentina IRAM 9662-2 (2015) permiten apreciar la influencia de la nudosidad (K) tanto en la resistencia a la flexión como a la compresión. El módulo de elasticidad en compresión muestra una clara influencia de K pero, curiosamente, esta influencia no se encontró para el módulo de elasticidad en flexión. Con el propósito de explicar este comportamiento particular, se llevó a cabo un análisis detallado de la correlación entre K y las propiedades mecánicas analizadas. Los resultados mostraron un coeficiente de correlación (R) mucho más bajo entre K y $E_{m,g}$ ($R = -0.19$) que aquellos encontrados entre K y F_m (-0.38), $F_{c,0}$ (-0.47) y $E_{c,0}$ (-0.34), respectivamente. Estos resultados explican la particular baja influencia de K sobre el módulo de elasticidad en flexión encontrada en este caso.

Con el propósito de verificar el nivel de correlación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión paralela al grano, se realizó un análisis de regresión entre la rigidez y la resistencia con todas las muestras analizadas en este proyecto. Los resultados mostraron solo una modesta correlación entre $F_{c,0}$ y $E_{c,0}$ ($R = 0.35$) en comparación con la encontrada entre F_m y $E_{m,g}$ ($R = 0.84$). Por otro lado, un análisis de regresión llevado a cabo entre la densidad y la resistencia mostró una correlación mucho mayor entre ρ y $F_{c,0}$ ($R = 0.67$) que entre ρ y F_m ($R = 0.34$). Los resultados de R encontrados en esta investigación entre F_m y $E_{m,g}$ y entre F_m y ρ son congruentes con los publicados por Piter et al. (2004a), pero no se encontraron informes con respecto a la correlación entre $F_{c,0}$ y ρ o entre $F_{c,0}$ y $E_{m,g}$ para esta especie de madera.

Para apreciar mejor la relación encontrada entre las resistencias en flexión y compresión, la relación $F_{m,05} / F_{c,0,05}$ se presenta frente a $F_{m,05}$ en la Figura 1.a) para las



muestras completas y para todos los perfiles presentados en la Tabla 1. Con el objetivo de comparar estos resultados experimentales con los calculados según los criterios adoptados por normas y reglas de diseño de diversos países, en la misma figura se grafica la relación $F_{m,k} / F_{c,0,k}$ según la norma IRAM 9664 (2013); según la relación obtenida a partir de los valores de resistencia característicos proporcionados por las reglas de EEUU (NDS 2005) para el diseño por factores de carga y resistencia (LRFD) con madera clasificada mecánicamente; y según la relación propuesta por la norma NBR 7190 de Brasil (ABNT 2010).

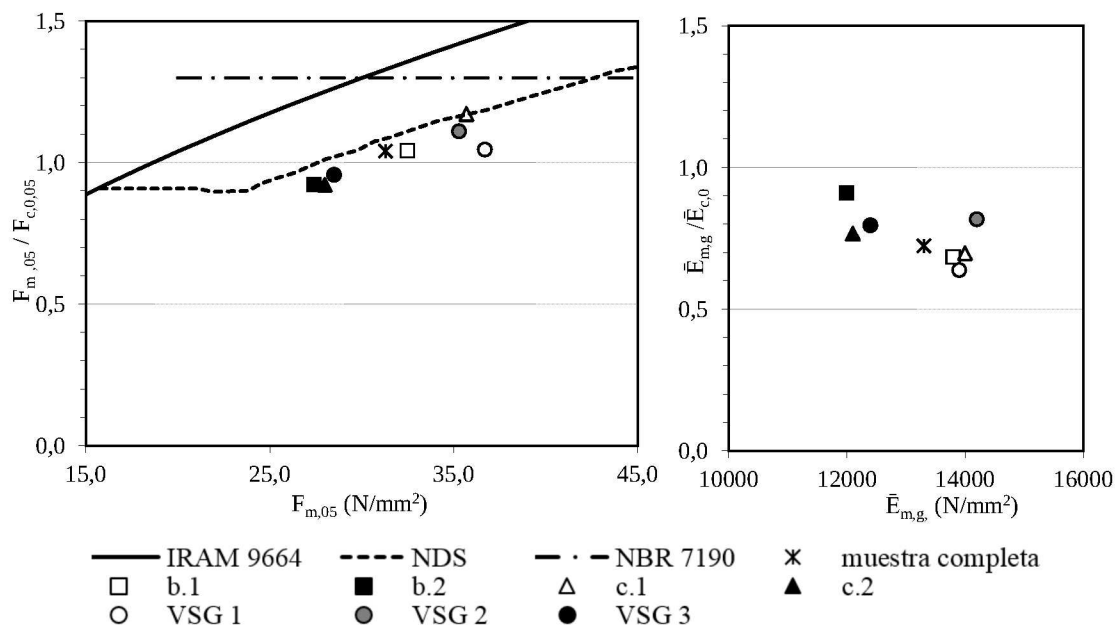
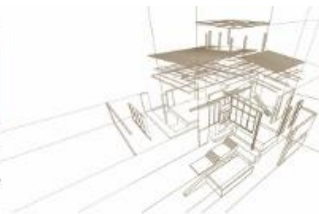


Figura 1: a) Relación $F_{m,05}/F_{c,0,05}$ de cada perfil b) Relación $\bar{E}_{m,g}/\bar{E}_{c,0}$ de cada perfil

En la Figura 1.a) se puede apreciar que, con la única excepción de VSG 1, la relación $F_{m,05}/F_{c,0,05}$ aumenta cuando $F_{m,05}$ (calidad de la madera) aumenta y solo las proporciones obtenidas para los grados más pobres de cada perfil (b.2: 0.92, c.2: 0.92 y VSG 3: 0.96) resultan menores que 1. Esta figura también muestra que la tendencia general de los resultados experimentales obtenidos en esta investigación es similar a las pendientes de las curvas que representan las relaciones de la normativa argentina y estadounidense y que el comportamiento de esta especie de madera no es congruente con el criterio brasileño (ABNT 2010), el cual adopta una relación constante entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión, independientemente de la calidad de la madera. Es importante señalar que la curva obtenida según NDS (2005) también presenta una primera parte donde se asume una relación prácticamente constante de 0.9 para la madera con $F_{m,k} < 24.0$ N/mm². Sin embargo, considerando que el valor más bajo de $F_{m,05}$ encontrado en este estudio alcanzó 27.4 N/mm², no es posible comparar los resultados empíricos con el criterio estadounidense en los niveles de resistencia a la flexión incluidos en la primera parte de la curva. La Figura 1.a) también permite apreciar que los valores de $F_{m,05} / F_{c,0,05}$ encontrados en este proyecto son más cercanos a los calculados según NDS (2005) que a los obtenidos de acuerdo a la norma argentina IRAM 9664 (2013). La relación encontrada para el grado c.1 (1.17) es igual a

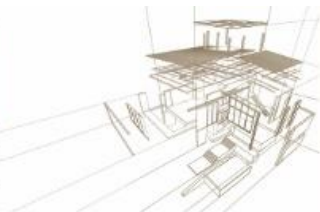


la correspondiente a NDS (2005), mientras que las otras 7 proporciones encontradas en esta investigación son ligeramente menores que las calculadas de acuerdo con el criterio adoptado por la regla de diseño estadounidense. Estas diferencias, que son muy inferiores a las encontradas entre los resultados empíricos y los calculados según la normativa argentina, pueden considerarse aceptables para fines prácticos relacionados con el diseño estructural.

La Figura 1.b) muestra la relación $\bar{E}_{m,g} / \bar{E}_{c,0}$ frente a $\bar{E}_{m,g}$ para las muestras completas y para los grados presentados en la Tabla 1. A diferencia de la resistencia, no se aprecia una relación clara entre las variables que se muestran en esta figura. De acuerdo con las reglas de diseño de Argentina (INTI CIRSOC 601 2016) y las de EEUU (NDS 2005), los resultados del módulo de elasticidad obtenidos en los ensayos de flexión también son aplicables al diseño estructural de los miembros cargados axialmente. Por el contrario, la regla de diseño de Brasil (ABNT 2010) adopta ensayos de compresión para determinar la rigidez de la madera aserrada y los resultados también se aplican a los miembros sometidos a flexión. Los resultados presentados en la Tabla 1 y la Figura 1.b) muestran claramente que el uso del módulo de elasticidad en flexión para calcular la deformación de los miembros comprimidos (INTI CIRSOC 601 2016; NDS 2005) sitúan del lado de la seguridad las decisiones relacionadas con las condiciones de servicio en las estructuras construidas con esta especie. Más aún, como $\bar{E}_{c,0}$ fue del 10% (b.2) al 57% (VSG 1) mayor que $\bar{E}_{m,g}$, estas decisiones pueden ser demasiado conservadoras en algunos casos. Por otro lado, la adopción del criterio de Brasil (ABNT 2010) para determinar el módulo de elasticidad puede conducir a un diseño que no satisfaga los requerimientos de servicio de una estructura.

4. CONCLUSIONES

La relación entre las propiedades mecánicas de flexión y compresión se verificó para la madera aserrada de *Eucalyptus grandis* argentino sobre cuerpos de prueba de variada calidad y ensayadas según IRAM 9663 (2013). Los resultados mostraron que, con la única excepción de los grados visuales más pobres, la resistencia a la flexión fue mayor que la resistencia a la compresión y que la resistencia a la flexión aumentó en relación con la resistencia a la compresión cuando aumentó la calidad de la madera. Estos resultados están en línea con el criterio adoptado por las reglas de diseño de Argentina y EEUU pero contrastan con el criterio adoptado Brasil. Los valores de los 5º percentiles obtenidos experimentalmente en este proyecto para la resistencia a la compresión fueron 22% a 39% más altos que los derivados de los resultados de resistencia a la flexión según la aplicación de la norma IRAM 9664 (2013) y, en consecuencia, la adopción de este criterio puede conducir a un diseño excesivamente conservador de miembros comprimidos de esta especie de madera. Los valores medios del módulo de elasticidad obtenidos en compresión paralela a la fibra fueron 10% a 57% más altos que los determinados en la flexión, y no se encontró una relación clara entre estas propiedades. Estos resultados mostraron que el uso del módulo de elasticidad de flexión para calcular la deformación de los miembros comprimidos sitúa del lado de la seguridad la capacidad de servicio de las estructuras construidas con esta especie. Los resultados también mostraron que el uso del módulo de elasticidad de compresión para el diseño de



vigas, de acuerdo con los procedimientos de la norma de Brasil, puede afectar fuertemente los requisitos de servicio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2010) Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto de revisão NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira. Brasil.

Dirección de Producción Forestal. 2016. Argentina: Plantaciones forestales y gestión sostenible. 15 pp. Disponible en <<https://goo.gl/064alb>>, acceso el 23/12/2016.

Glos P. (1995) Solid timber – Strength classes. In: Timber Engineering STEP 1, pp. A7/1-A7/8. Centrum Hout, The Netherlands.

INTA (1995) Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Manual para Productores de Eucaliptos de la Mesopotamia Argentina. Grupo Forestal, EEA Concordia, Argentina.

INTI CIRSOC 601 (2016) Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones. CIRSOC 601. Buenos Aires.

IRAM 9662-2 (2015) Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia, Parte 2: Tablas de *Eucalyptus grandis*. IRAM 9662-2. Buenos Aires.

IRAM 9663 (2013) Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. IRAM 9663. Buenos Aires.

IRAM 9664 (2013) Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. IRAM 9664. Buenos Aires.

NDS (2005) National Design Specification for Wood Construction. American Forest & Paper Association, Washington.

Piter J.C., Zerbino R. L., Blaß H. J (2003) Relationship between global and local Modulus of Elasticity in beams of Argentinean *Eucalyptus grandis*. *Maderas: Ciencia y Tecnología* 5(2): 107-116.

Piter J.C., Zerbino R. L., Blaß H. J. (2004a) Machine strength grading of Argentinean *Eucalyptus grandis*. Main grading parameters and analysis of strength profiles according to European standards. *Holz als Roh- und Werkstoff* 62(1): 9-15.

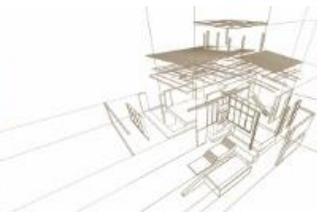
Piter J.C., Zerbino R. L., Blaß H. J. (2004b). Visual strength grading of Argentinean *Eucalyptus grandis*. Strength, stiffness and density profiles and corresponding limits for the main grading parameters. *Holz als Roh- und Werkstoff* 62(1): 1-8.

Sosa Zitto M.A., Torrán E. A., Cuffré A. G., Piter J.C. (2009) Relationship between timber quality and the influence of moisture content above fibre saturation on



mechanical properties in beams of fast-growing Argentinean *Eucalyptus grandis*. *Holz als Roh- und Werkstoff* 67(1): 47-53.

Torrán E.A., Sosa Zitto M.A., Gonzalez A. A., Piter J.C. (2008) Creep in beams of Argentinean *Eucalyptus grandis* loaded in unseasoned state. *Holz als Roh- und Werkstoff* 66(3): 201-205.



CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA DE LA MADERA *ACACIA DEALBATA* DEL MUNICIPIO DE LA CALERA-CUNDINAMARCA, COLOMBIA PARA SU APLICACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD VARIETY *Acacia dealbata* FROM THE MUNICIPALITY OF LA CALERA, CUNDINAMARCA, COLOMBIA, FOR USE IN STRUCTURES' CONSTRUCTION

Sánchez Escobar, Laura Catalina ^{(1)*}; Guerra Riaño, Andrés Felipe ⁽²⁾

⁽¹⁾ MSc Arquitecta. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

⁽²⁾ MSc Ing. Civil. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

* Laura Catalina Sánchez Escobar: lsancheze@unal.edu.co

Resumen

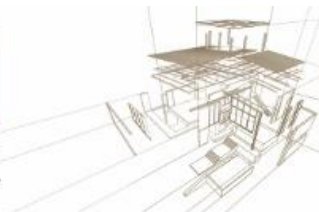
Esta especie de madera fue seleccionada con el fin de darle una alternativa de uso, teniendo en cuenta que según la resolución 1766 del 17 de octubre de 2016 del Ministerio de ambiente de Colombia, "*Por medio de la cual se adopta el Plan de Manejo de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá*", se busca sustituir 13.000 hectáreas de especies foráneas de los Cerros Orientales, por otras especies que permitan el surgimiento de bosque nativo a través de procesos de restauración ecológica y se prohíbe la siembra de pino, eucalipto, ciprés y *acacia*, además propone talar 2.123 ha. de estas especies. El objetivo de esta investigación es determinar las propiedades físico-mecánicas de la *Acacia dealbata* del municipio de La Calera-Cundinamarca, Colombia para utilizar esta variedad en la construcción de estructuras. Para la elaboración de los ensayos, se fabricaron probetas siguiendo los procedimientos indicados en la Norma Técnica Colombiana NTC 3377 MADERAS. ENSAYOS CON PROBETAS PEQUEÑAS. Los resultados obtenidos de las pruebas fueron analizados para determinar los valores correspondientes de los esfuerzos admisibles y al módulo de elasticidad requeridos en el NSR-10 para la construcción de estructuras en madera. Como resultado se obtuvo un esfuerzo ultimo a compresión de 34.08 MPa, flexión de 17.058 MPa, Tensión paralela a la fibra de 77.98 MPa y Corte paralelo a la fibra de 10.94 MPa, un MOE promedio de 11231.05 MPa y una densidad de 665.04 kg/m³. [1], [2]

Palabras-clave: Acacia dealbata, pruebas físico-mecánicas, contenido de humedad, esfuerzo admisible, módulo de elasticidad.

Abstract

This kind of wood was chosen with the objective to find an alternative use for it, considering the resolution 1766 of October 17th of 2016 of the Environment Ministry of Colombia, "through was adopted the plan of management for the nature reserve Eastern Forest of Bogota", the goal is replace 13.000 ha. of foreign species from the eastern mountains, in exchange for others that allows the growth of native forest through ecological restoring processes, it's forbidden the planting of pine, eucalyptus, cypress and acacia, furthermore, there was purposed to cut 2.123 ha. of these species. The objective of this research is to find the physical and mechanical properties of *Acacia dealbata* from the municipality of La Calera-Cundinamarca, Colombia to use this specie in the construction of structures. To realize the tests, there were made following the procedures described in the Technical Standard of Colombia 3377" WOOD. TEST WITH SMALL SAMPLES." The obtained results were analyzed to collect the respective information to allowable stress and elastic modulus required in the seism resistant standard NSR-10 for the wood structures' construction. The obtained results for maximum stress for compression test were 34.08 MPa, bending stress 17.058 MPa, traction stress parallel to fibers 77.98 MPa and shear stress parallel to fibers 10.94 MPa.

Keywords: Acacia dealbata, physical and mechanical tests, moisture content, allowable stress, elastic modulus.



1. INTRODUCCIÓN

En esta investigación se estudian propiedades físicas y mecánicas de la madera *Acacia Dealbata* presente en el municipio de La Calera, Cundinamarca, con el fin de encontrar parámetros de diseño y usos técnicos en construcción para el aprovechamiento de esta especie foránea, así mismo, estimular los procesos de restauración ecológica en la zona de los cerros orientales de Bogotá, Colombia que propone el Plan de Manejo Ambiental (PMA) adscrito a la Resolución 1766 del 17 de octubre de 2016.

Teniendo en cuenta que según la resolución 1766 del 17 de octubre de 2016 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible de Colombia, "Por medio de la cual se adopta el Plan de Manejo de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá...", entre otras cosas, busca sustituir gradualmente las 13.000 hectáreas de especies foráneas de los Cerros Orientales de Bogotá (CAR,2017), por otras que permitan el surgimiento de bosque nativo a través de procesos de restauración ecológica, a causa de esto se prohíbe la siembra de pinos, eucaliptos, ciprés y *acacia*, y además propone talar cerca de 2.123 hectáreas de estas especies allí presentes (Resolución 1766, 2016). [3]

Teniendo en cuenta el déficit de vivienda y equipamientos públicos con el que cuentan las comunidades rurales en Colombia, la construcción de edificaciones aprovechando esta especie de madera aporta a los procesos de restauración de los cerros orientales de Bogotá a partir de un uso productivo, dinamizando el desarrollo de las comunidades rurales.

El objetivo general de esta investigación es caracterizar mediante ensayos mecánicos la *Acacia Dealbata* procedente del municipio de La Calera siguiendo los estándares técnicos de la Norma técnica colombiana NTC 3377, respondiendo a los siguientes objetivos específicos: Realizar las pruebas físico mecánicas nombradas en la NTC 3377 con el fin de determinar el comportamiento de la madera seleccionada. Realizar análisis de los resultados de las pruebas físico mecánicas realizadas según lo indicado en las normas NTC 4113-1 y 4113-2.[4], [5] [1]

2. MADERA *Acacia dealbata*

El material que se desea caracterizar física y mecánicamente es la madera es la especie *Acacia dealbata*. La madera se obtuvo en el municipio de La Calera Cundinamarca, se escogió este municipio debido a los procesos de desarrollo social que se llevan a cabo y a los procedimientos de tala de esta variedad con el fin de reforestar con bosque nativo y aprovechar la madera para actividades de construcción.

Luego de seleccionar el lugar de origen de la madera se procederá a escoger los tarugos que cumplan con los siguientes requisitos según lo estipulado en la NTC 3377. El material debe constar de grano recto y debe estar libre de pudrición y defectos.[1]

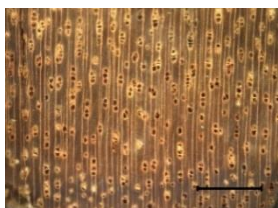


Figura 1: Fotografía de sección transversal de la *Acacia dealbata* ampliada 2x

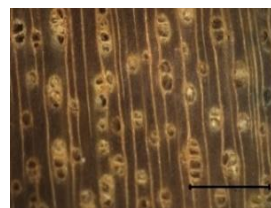
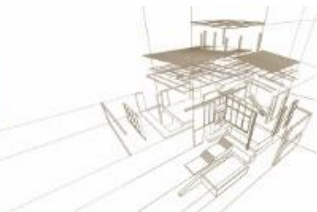


Figura 2: Fotografía de sección transversal de la *Acacia dealbata* ampliada 5x



3. ENSAYOS

3.1. Contenido de humedad

Es importante conocer el contenido de humedad de la madera al momento del ensayo, teniendo en cuenta que la relación entre el contenido de humedad y la resistencia de la madera es inversamente proporcional. Para ejecutar este ensayo se siguieron las indicaciones dadas por la NTC 3377. [1]

3.1.1. Instrumentos

Balanza de precisión, horno de Secado, calibrador.

3.1.2. Probetas

Para determinar el contenido de humedad se preparan inmediatamente después de cada ensayo mecánico. La cantidad de probetas debe ser igual a la cantidad de probetas para los ensayos mecánicos y físicos. La forma de la probeta es prismática, con anchura aproximada de 50 mm altura de 50 mm. Las muestras se tomaron cerca del lugar de la falla y se almacenaron en condiciones que garanticen que el contenido de humedad no cambie.

3.1.3. Procedimiento

- Las probetas se deben pesar con una precisión de 0.02% y se deben secar a una temperatura de 103° C durante 24 horas seguidas.
- Pasadas las 24 horas se deben monitorear las probetas cada 2 horas registrando los cambios en las dimensiones y peso de cada elemento.
- El secado se da por finalizado cuando las diferencias de masa entre mediciones sucesivas no superan los 0.01 g.

3.2. Densidad básica (DB)

Se define como el cociente entre la masa en estado anhidro y el volumen de la madera en estado verde.

Balanza de precisión, Horno de Secado, Calibrador.

3.2.1. Instrumentos

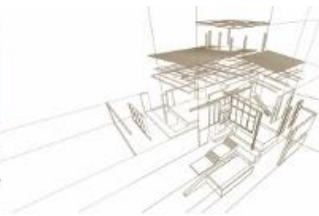
Balanza de precisión, Horno de Secado, Calibrador.

3.2.2. Procedimientos

Luego de realizar las pruebas correspondientes a los ensayos de Contenido de Humedad, se procederá a calcular la densidad siguiendo la siguiente fórmula:

$$\rho = (m/V) \times 10^6 \quad (1)$$

3.3. Esfuerzo de compresión paralela a la fibra (Fc)



Este ensayo tiene la finalidad de calcular el esfuerzo último de compresión de la probeta y el módulo nominal de elasticidad.

3.3.1. Instrumentos

Máquina de ensayo, con capacidad para medir la carga con exactitud de 1 % de la escala utilizada y la deflexión con exactitud de mm.

3.3.2. Probetas

Para este ensayo se requieren probetas prismáticas de 50mm x 50mm x 300mm.

3.3.3. Procedimiento

Se realizó el montaje según las especificaciones de la NTC 3377 (figura 3), se verifica que los extremos de la probeta estén paralelos entre sí y ortogonales al sentido longitudinal para garantizar la aplicación uniforme de la carga en todo el elemento. La carga del ensayo se aplicó de forma continua a una velocidad de 0,003 mm/min * mm de longitud de la probeta.



Figura 3: Montaje de ensayo de compresión paralela a la fibra.

El esfuerzo último de compresión se debe determinar con la siguiente ecuación:

$$F_c = (f/A) \quad (2)$$

Donde:

f = Fuerza en N.

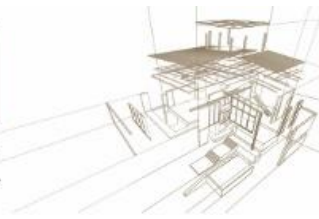
A = Área en mm²

El módulo de elasticidad E se debe calcular a partir del valor medio de la lectura de la máquina como una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, en un rango entre el 10 % y el 60 % de F_{ult}.

El esfuerzo último promedio de la muestra de ensayo se debe calcular con aproximación de 0,5 MPa como la media aritmética de los resultados de ensayo de las probetas. (Tabla 3).

3.4. Esfuerzo de flexión (Fb)

Este ensayo tiene la finalidad de calcular el esfuerzo último de flexión de la probeta y determinar el módulo de elasticidad.



3.4.1. Instrumentos

Se debe utilizar una carga central y un espaciamiento de 710 mm entre los apoyos (ver figura 4), máquina de ensayo, con capacidad para medir la carga con exactitud de 1 % de la escala utilizada y la deflexión con exactitud de mm.



Figura 3: Montaje del ensayo de flexión

3.4.2. Probetas

Los elementos de ensayo no deben tener defectos visibles. Para lograr una falla en flexión, la probeta debe medir 50 x 50 x 760 mm

3.4.3. Procedimiento

Se realizó el montaje de las probetas según lo descrito en la NTC 3377, se ubicó cada probeta de tal forma que la carga se aplicó sobre la superficie tangencial más cercana a la médula. La velocidad del ensayo es de 2,5 mm/min.

Al finalizar el ensayo se debe tomar muestras para realizar el ensayo de contenido de humedad según lo especificado en la NTC 3377.

3.5. Esfuerzo de corte paralelo a la fibra (Fv)

Este ensayo tiene la finalidad de hallar la carga máxima para el esfuerzo de corte paralelo a las fibras de cada probeta.

3.5.1. Instrumentos

Se utiliza una herramienta de corte como se muestra en la Figura 5, proporcionando un desplazamiento de 3 mm entre el borde interno de la superficie de apoyo y el plano donde ocurre la falla.

Máquina de ensayo, con capacidad para medir la carga con exactitud de 1 % de la escala utilizada.

3.5.2. Probetas

Los ensayos de esfuerzo de corte paralelo al grano se deben efectuar en probetas de 50 mm por 50 mm por 63 mm.

3.5.3. Procedimiento

Se aplica la carga a las superficies extremas de grano y se apoya la probeta sobre estas. Se debe estar seguro de que, al colocar la muestra en el aparato de corte, la barra transversal esté ajustada para que los extremos de la probeta queden verticales y el extremo repose uniformemente en el soporte sobre la superficie de contacto. Se observa solo la carga máxima. Los ensayos deben realizarse a una velocidad de 0,6 mm/min (Figura 5).

El esfuerzo último de corte paralelo a la fibra se halla con la siguiente ecuación:

$$F_v = (f/A) \quad (3)$$

En donde:

f = Fuerza en N.

A = Área sometida a acorte en mm²

Al finalizar el ensayo se debe tomar muestras para realizar el ensayo de contenido de humedad según lo especificado en la NTC 3377.



Figura 4: Montaje para el ensayo de Corte paralelo a la fibra

3.6. Esfuerzo de tracción paralela a la fibra (Ft)

Este ensayo tiene la finalidad de hallar el esfuerzo admisible y el módulo de elasticidad ante el esfuerzo a tracción paralela a las fibras.

3.6.1. Instrumentos

- Extensómetro electromecánico, Adquisidor de datos, Máquina de ensayo, con capacidad para medir la carga con exactitud de 1 % de la escala utilizada.

3.6.2. Probetas

Las probetas deben tener las dimensiones especificadas en la Figura 6.

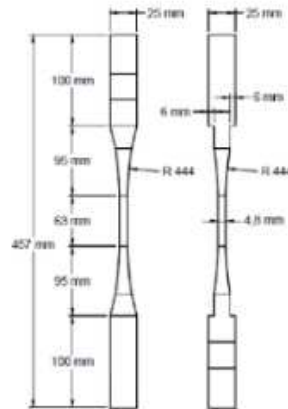


Figura 5: Montaje para el ensayo de tracción paralela a la fibra

Este ensayo tiene la finalidad de hallar el esfuerzo admisible y el módulo de elasticidad ante el esfuerzo a tensión paralela a las fibras.

3.6.3. Procedimiento

Se ajustan las probetas durante el ensayo con mordazas, Se debe aplicar la carga en forma continua durante todo el ensayo con el cabezal móvil a una velocidad de 2,5 mm/min.

El esfuerzo último de tracción paralelo a la fibra se halla con la siguiente ecuación:

$$F_v = (f/A) \quad (4)$$

Donde:

f = Fuerza de tracción en N.

A = Área sometida a tracción en mm²

Al finalizar el ensayo se debe tomar muestras para realizar el ensayo de contenido de humedad según lo especificado en la NTC 3377 (Figura 7).



Figura 6: Montaje del ensayo de tracción paralela a las fibras

3.7. Módulo de elasticidad (MOE)

El módulo de elasticidad fue calculado con los datos obtenidos del ensayo de compresión paralela a las fibras, hallando la pendiente de la recta tangente de la curva esfuerzo vs deformación dentro del rango elástico del material.



4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados del estudio.

Como resultado se obtuvo un Contenido de Humedad de 44.35%.

Tabla 1: Resultado del ensayo de Densidad Básica

	MASA (g)	BASE 1 (mm)	BASE 2 (mm)	ALTURA (mm)	VOLUMEN (m ³)	DENSIDAD (kg/m ³)
CH01	39.14	23.14	23.76	98.28	5.403.E-05	724.35
CH02	37.58	24.30	23.47	99.81	5.692.E-05	660.18
CH03	37.96	23.73	24.20	101.72	5.841.E-05	649.84
CH04	37.87	23.75	23.65	100.57	5.649.E-05	670.40
CH05	42.75	23.63	24.31	102.01	5.860.E-05	729.53
CH06	37.69	24.86	23.69	99.86	5.881.E-05	640.87
CH07	39.59	23.71	24.33	101.33	5.845.E-05	677.29
CH08	36.93	24.92	24.07	101.48	6.087.E-05	606.70
CH09	38.30	24.71	23.72	100.75	5.905.E-05	648.58
CH10	44.23	24.49	24.79	102.16	6.202.E-05	713.13
CH11	36.55	24.83	24.17	102.57	6.156.E-05	593.76
CH12	38.82	23.97	24.01	101.30	5.830.E-05	665.86
	Densidad Promedio (kg/m ³)=					665.04
	Desviación estándar S =					42.39

Como resultado del ensayo de Densidad Básica DB se obtuvo un resultado de Densidad promedio de 665.04 kg/m³ y una Desviación estándar de 42.39 kg/m³.

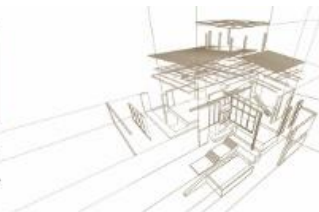
Tabla 2: Resultados del ensayo de Compresión paralela a la fibra

Esfuerzo ultimo promedio (MPa)=	34.08
Desviación estándar S (MPa)=	5.77
Datos atípicos - criterio de Chauvenet	
K (para n=14 datos) =	2.1
Mínimo aceptable=	21.97
Máximo aceptable=	46.20
Coefficiente de variación (%) =	16.93%
Percentil 5% =	25.18

Como resultado del ensayo de compresión paralela a la fibra FC se obtuvo un Esfuerzo último promedio de 34.08 MPa, una Desviación estándar de 5 MPa, un Coeficiente de variación de 16.93% y un valor de Quinto percentil de 25.18 MPa.

Tabla 3: Resultado del ensayo de flexión

Esfuerzo ultimo promedio (MPa)=	4492,42
Desviación estándar S (MPa)=	590,51
Datos atípicos - criterio de Chauvenet	
K (para n=14 datos) =	2,1
Mínimo aceptable=	3252,35
Máximo aceptable=	5732,48
Coefficiente de variación (%) =	13,14%
Percentil 5% =	3751,89



Como resultado del ensayo de flexión FB se obtuvo un Esfuerzo último promedio de 4492.42 MPa, una Desviación estándar de 590.51 MPa, un Coeficiente de variación de 13.14% y un valor de Quinto percentil de 3751.89 MPa.

Tabla 4: Resultados del ensayo de corte paralelo a la fibra

Esfuerzo ultimo promedio (MPa)=	10.94
Desviación estándar S (MPa)=	3.53
Datos atípicos - criterio de Chauvenet	
K (para n=14 datos) =	2.1
Mínimo aceptable=	3.53
Máximo aceptable=	18.34
Coeficiente de variación (%) =	32.24%
Percentil 5% =	4.08

Como resultado del ensayo de corte paralelo a la fibra FV se obtuvo un Esfuerzo último promedio de 10.94 MPa, una Desviación estándar de 3.53 MPa, un Coeficiente de variación de 32.24% y un valor de Quinto percentil de 4.08 MPa.

Tabla 5: Resultados del ensayo de tensión paralela a la fibra

Esfuerzo ultimo promedio (MPa)=	77.98
Desviación estándar S (MPa)=	36.29
Datos atípicos - criterio de Chauvenet	
K (para n=14 datos) =	2.1
Mínimo aceptable=	1.78
Máximo aceptable=	154.19
Coeficiente de variación (%) =	46.53%
Percentil 5% =	32.95

Se obtuvo un esfuerzo de tracción paralela último promedio de 77.98 MPa, una Desviación Estándar de 36.29 MPa, un Coeficiente de variación de 46.53% y un VALOR de Quinto Percentil de 32.95 MPa.

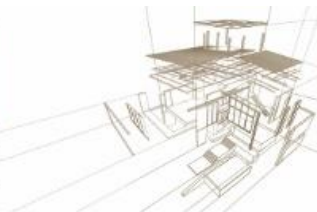
Tabla 6: Resultados del MOE

Esfuerzo ultimo promedio (MPa)=	11231,05
Desviación estándar S (MPa)=	1476,27
Datos atipicos - criterio de Chauvenet	
K (para n=14 datos) =	2,1
Mínimo aceptable=	8130,88
Maximo aceptable=	14331,21
Coeficiente de variación (%) =	13,14%
Percentil 5% =	9379,73

Se obtuvo un MOE promedio de 11231.05 MPa, una Desviación estándar de 8130.88 MPa, un Coeficiente de variación de 13.14% y un valor de Quinto Percentil de 9379.73 MPa.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los ensayos se realizaron con un contenido de humedad promedio de 44.35%.
- La densidad promedio de la *Acacia dealbata* del municipio de La Calera es de 665.04 kg/m³.



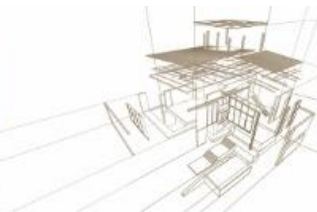
- Se obtuvo un esfuerzo último a compresión de 34.08 MPa y un quinto percentil corregido con el 12% CH de 33.58 MPa.
- Se obtuvo un esfuerzo último a flexión de 12776.61 MPa y un quinto percentil corregido con el 12% CH de 183.45 MPa.
- Se obtuvo un esfuerzo último a corte de 10.94 MPa y un quinto percentil corregido con el 12% CH de 4.8 MPa.
- Se obtuvo un esfuerzo último a tensión de 77.98 MPa y un quinto percentil corregido con el 12% CH de 41.19 MPa.
- Se obtuvo un módulo de elasticidad promedio de 11231.05 MPa.
- Esta madera presenta esfuerzos admisibles dentro de los rangos establecidos por los grupos estructurales del código de construcción sismo resistente colombiano NSR-10, por sus propiedades mecánicas puede tener uso estructural siempre y cuando se validen sus características de durabilidad.
- Se recomienda continuar el estudio de esta madera en cuanto a su vulnerabilidad ante humedad, hongos y fuego.
- Se puede aprovechar su uso articulándolo con planes de aprovechamiento forestal que permitan la recuperación del bosque nativo de los cerros orientales de Bogotá.
- Los ensayos fueron realizados bajo la norma NTC 3377 MADERAS. ENSAYOS CON PROBETAS PEQUEÑAS, con esta metodología se espera que los resultados sean muy cercanos a ensayos realizados en probetas de tamaño estructural, se recomienda elaborar ensayos en probetas de tamaño estructural con el fin de determinar su dispersión.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a las comunidades que habitan los cerros orientales de Bogotá por motivar esta investigación, a Selene Lozano Sotelo y a *La Casa de los Colores* por los procesos sociales que lleva con estas comunidades que dieron origen al presente trabajo, además de suministrar la madera necesaria para realizar los ensayos mecánicos, así mismo, al grupo de investigación Madera y Guadua de la Universidad Nacional de Colombia por facilitar el laboratorio de madera y guadua para poder llevar a cabo esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC, *NTC 3377*. 1992.
- [2] AIS, *NSR-10 (Reglamento Colombiano De Construccion Sismoresistente)*. 2010, pp. 334-469–997.
- [3] Ministerio de ambiente y desarrollo, *RESOLUCIÓN 1766.pdf*. 2016.
- [4] Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC, *NTC 4113 GESTIÓN AMBIENTAL. CALIDAD DE SUELO. MUESTREO. GUÍA PARA EL DISEÑO DE PROGRAMAS DE MUESTREO E*: 1997.
- [5] Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC, “*NTC 4113-2 GESTIÓN AMBIENTAL. CALIDAD DE SUELO. MUESTREO. GUÍA SOBRE TÉCNICAS DE MUESTREO E*,” 1997.



DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus pellita* POR MÉTODO NÃO DESTRUTIVO

NONDESTRUCTIVE TEST METHOD TO DETERMINE THE MODULUS OF ELASTICITY OF *Eucalyptus pellita* TIMBER

Sena, Caroline^{1*}; Silva, Gabriel¹; Santos, Filipe¹; Fábio César, Sandro¹; Cunha, Rita¹

¹Universidade Federal da Bahia, Brazil

Resumo

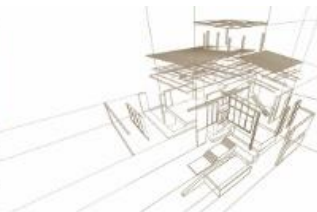
A aplicação de técnicas não destrutivas para avaliação da resistência mecânica da madeira é muito atrativa, sobretudo por não exigir a extração de protótipo. Pesquisas desenvolvidas com técnicas de ultrassom mostraram o potencial para a determinação de propriedades mecânicas da madeira validadas por meio da comparação com resultados de ensaios destrutivos. Tendo em vista que a concepção da norma brasileira NBR 15521 (ABNT, 2007) foi feita baseado em madeiras adultas, esse artigo tem como objetivo discutir as faixas de classificação de resistência prevista norma brasileira para a madeira de eucalipto jovem. Para este trabalho foram realizados os ensaios estabelecidos pela NBR 15521 (2007) que visa à classificação mecânica da madeira serrada por meio de ultrassom e o ensaio destrutivos de flexão estática e compressão paralela às fibras conforme os procedimentos descritos na NBR 7190 (1997). Os resultados deste estudo mostraram uma boa relação entre a determinação da resistência a flexão estática e da resistência a compressão paralela às fibras da madeira, no entanto, foi encontrada baixa relação para determinação do módulo de elasticidade à flexão (MOE) e o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}). Os resultados indicaram que esta técnica de avaliação não destrutiva pode ser usada para avaliação da resistência a flexão simples e compressão paralela às fibras de peças de madeira de eucalipto jovem.

Palavras-chave: Ensaio não destrutivo; Ultrassom. Módulo de elasticidade.

Abstract

Non-destructive test to evaluate the timber mechanical properties is very attractive especially because it does not require prototype extraction. Researchers indicated that ultrasound techniques have potential for determining validated mechanical properties of wood by comparing it with destructive tests. Known that the conception of the Brazilian standard NBR 15521 (ABNT, 2007) was based on adult woods, this article aims to discuss the resistance classification ranges foreseen Brazilian standard for young eucalyptus wood. For this result, the paper carried out tests established by NBR 15521 (2007) which aims at the mechanical classification of sawn wood by ultrasound test method and the destructive testing of static flexion and parallel compression to grain according to the procedures described in NBR 7190 (1997). The results of this study showed a good relationship between the determination of the static flexural strength and the compressive strength parallel to the wood fibers. However, a low relation was found to determine the flexural modulus of elasticity (MOE) and the modulus of elasticity. in parallel compression to grain (E_{c0}). The results indicated that this non-destructive evaluation technique can be used to evaluate the resistance to bending and parallel compression to grain of juvenile eucalyptus wood.

Keywords: Non-destructive test; Ultrasonic waves test; Modulus of elasticity.



1. INTRODUÇÃO

A caracterização das propriedades mecânicas da madeira é fundamental para garantia dos requisitos de segurança e durabilidade em elementos estruturais. A norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) determina as propriedades mecânicas da madeira a partir de ensaios destrutivos realizados em corpos de prova pequenos e isentos de defeitos retirados da amostragem de um lote considerado homogêneo. Kretschmann e Hernandez (2006) explicam que a caracterização da madeira partir desse método produzem valores característicos de projeto superiores do que se considerado os defeitos existentes nas peças.

O método de determinação das características mecânicas da madeira a partir de ensaios destrutivos foi proposto no momento em que era comum a utilização de madeira proveniente de árvores com grande diâmetro de tronco, onde podia-se selecionar peças com pouco ou nenhum defeito (Kretschmann; Hernandez, 2006). No entanto, atualmente grande parte da madeira destinada para a construção civil é produzida em florestas plantadas que possuem idades variando entre 5 e 15 anos e pequeno diâmetro de tronco (Boscana; Boragno, 2019; IBÁ, 2017), o que dificulta a extração de peças sem a presença de defeitos como rachaduras, nós e bolsas de resina.

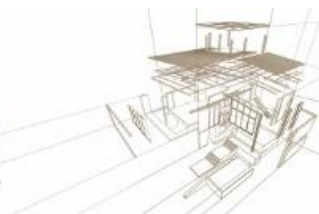
Dessa forma, os ensaios não-destrutivos surgem como uma opção eficaz para avaliar as peças de madeira com a existência de defeitos, descontinuidades ou indícios de degradação biológica, sem alteração da dimensão e das propriedades físicas, químicas e mecânicas. Assim, este método proporciona a determinação das propriedades de uma peça para sua correta destinação ou avaliação de uma estrutura existente (Targa; Ballarin; Biaggioni, 2005).

Diversos métodos não destrutivos podem ser utilizados para a caracterização da madeira, dentre eles: propagação de ondas de tensão (*stress wave timer*), espectrofotometria do infravermelho próximo, tomografia, raio X e a propagação de ondas ultrassônicas. Dentre os ensaios de ondas acústicas, o ensaio por ondas ultrassônicas é interessante por ser de fácil manuseio, baixo custo de obtenção e a facilidade de orientar as ondas.

A norma brasileira NBR 15521 – Ensaio não destrutivo – ultrassom – Classificação mecânica da madeira serrada de dicotiledôneas (ABNT, 2007) apresenta faixas de caracterização da resistência da madeira por meio de ensaio de ultrassom de acordo com a velocidade de propagação das ondas ou da constante de rigidez das peças. Para esta norma, foi utilizado uma amostragem de madeira nativa com idade de 45 anos e densidade aparente entre 450 kg/m³ e 1100 kg/m³. Tendo em vista que a concepção da norma foi feita baseado em madeiras adultas, esse artigo tem como objetivo discutir as faixas de classificação de resistência prevista norma brasileira NBR 15521 (ABNT, 2007) para a madeira de eucalipto jovem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O ensaio de propagação de ondas ultrassônicas é composto por um gerador que transforma energia elétrica em pulsos de ondas ultrassônicas com frequência entre 20 Hz e 20 kHz emitidos por um transdutor emissor e recebido por um transdutor receptor.



Esse ensaio é baseado em mensurar o tempo de viagem da onda entre o transdutor emissor e o transdutor receptor da máquina. O tempo de viagem é influenciado pela frequência, sendo que à medida que a frequência aumenta, menor é o comprimento de onda e maior são as perdas de energia durante viagem no material. Os defeitos da madeira como descontinuidades, nós, trincas, rachaduras, mudança na orientação das fibras, anatomia da madeira e umidade são fatores que variam a velocidade da onda (Ross, 2015).

Após a combinação entre a segunda Lei de Newton e a Lei de Hooke generalizada, em que se relaciona as tensões e deformações em um material, por meio deduções da equação de Cristoffel, foi possível descrever a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em materiais ortotrópicos a partir da matriz de rigidez (Buccur, 2006). A simplificação apresentada por Buccur (2006) diz que a madeira possui doze constantes elásticas principais: três módulos de elasticidades (E_L, E_T, E_R), três módulos de cisalhamento (G_{RT}, G_{TL}, G_{RL}) e seis coeficientes de Poisson ($\nu_{LR}, \nu_{LT}, \nu_{RT}, \nu_{RL}, \nu_{TR}, \nu_{TL}$). Para o estudo de madeira, é comum a utilização da relação entre a constante de rigidez longitudinal (C_{LL}) e o módulo de elasticidade longitudinal (MOE) na mesma direção. A Equação (1) mostra como determinar a constante de rigidez longitudinal, em megapascals, em função da densidade aparente da madeira e a velocidade de transporte das ondas ultrassônicas.

$$C_{LL} = \rho_{12} \cdot V_{LL}^2 \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

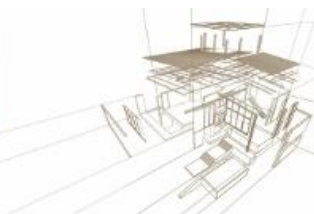
Onde, ρ_{12} é a densidade aparente na condição de umidade de equilíbrio, em kg/m^3 , e V_{LL} é a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas na mesma condição de umidade, em m/s . A velocidade de propagação das ondas é determinada pela Equação (2).

$$V_{LL} = \frac{L}{t} \quad (2)$$

Onde, L é o comprimento da peça, em metros, e t é o tempo de viagem da onda, em segundos.

O ensaio de ultrassom é eficiente para determinação da resistência a flexão estática em espécies adultas de madeira nativa. Gonzalez, Valle e Costa (2001) mostram equações de relação entre o módulo de elasticidade, módulo de ruptura e o módulo de elasticidade dinâmico, sua pesquisa obteve coeficientes de determinação (R^2) para as equações propostos superior a 0,67. Faria et al. (2018) estudaram o ensaio de ultrassom em lâminas de madeira de seringueira, este estudo identificou que quanto menor a quantidade de vazios, maior seria a velocidade de propagação da onda. Wimmer et al. (2018) ensaiaram peças prismáticas de $5 \times 5 \times 76$ cm de 50 árvores de espécies nativas do interior do nordeste brasileiro, o estudo mostrou boa relação entre a caracterização por meio de ensaio de ultrassom e ensaios destrutivos ($R^2 = 0,87$).

Para a espécie de eucalipto, o estudo feito por Andrade Jr et al. (2016) mostram uma correlação satisfatório ($R^2 = 0,93$) entre os resultados por ensaio não-destrutivo e ensaio destrutivo e concluiu que o método é confiável para classificação da madeira da espécie de *E. grandis* com 25 anos de idade. Miná et al. (2004) ensaiaram postes de madeira



com comprimento entre 7,5 e 9,0 metros da espécie *E. citriodora* com idade entre 12 e 15 anos de idade, após o estudo, os autores concluíram que os ensaios são satisfatórios para a avaliação de postes, no entanto, foi encontrado baixa correlação ($R^2 = 0,55$), indicando que método é menos eficaz em madeiras jovens.

Carrasco e Azevedo Junior (2003) buscaram relacionar os valores de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas com a resistência a compressão paralela às fibras, a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e resistência a tração normal às fibras em madeiras da espécie de *Manilkara spp.* (maçaranduba), *Hyminaea spp.* (jatobá) e *Eucalyptus tereticornis*. Esse estudo mostra uma forte relação entre a equação apresentada em função da velocidade de propagação das ondas e a resistência a compressão paralela às fibras ($R^2 = 0,77$), os valores encontrados nessa relação são próximos aos relatados por Stangerlin et al. (2008). No entanto, mostra baixa relação entre o resultado no ensaio e a resistência a tração normal às fibras ($R^2 = 0,56$), assim como não foi possível encontrar relação entre o ensaio de ultrassom e a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

A NBR 15521 (ABNT, 2007) propõe classes de resistência para o módulo de elasticidade à flexão (MOE), a compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}12\%$) e módulo de elasticidade à compressão ($E_{c0}12\%$) na condição de umidade a 12%, de acordo com a constante de rigidez ou velocidade de propagação das ondas. A tabela 1 mostra os valores de resistência para as classes apresentados na NBR 15521 (ABNT, 2007).

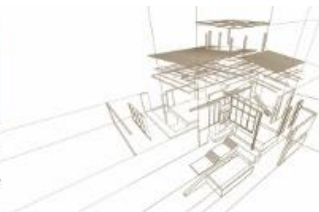
Tabela 1: Classes de rigidez, segundo NBR 15521 (ABNT, 2007).

Classe	V_{LL} (m/s)	C_{LL} (MPa)	MOE (MPa)	$f_{c0,k} 12\%$ (MPa)	$E_{c0} 12\%$ (MPa)
UD-20	< 3040	< 10620	< 6750	20	8000
UD-25	3040 – 3690	10620 – 13000	6750 – 10420	25	12000
UD-30	3690 – 3950	13000 – 15400	10420 – 13020	30	14000
UD-35	3950 – 4140	15400 – 17800	13020 – 14920	35	15000
UD-40	4140 – 4300	17800 – 20150	14920 – 16520	40	16500
UD-45	4300 – 4390	20150 – 22500	16520 – 17420	45	18500
UD-50	4390 – 4490	22500 – 24900	17420 – 18420	50	19500
UD-55	4490 – 4600	24900 – 27300	18420 – 19120	55	20500
UD-60	> 4600	> 27300	> 19120	60	21200

3. METODOLOGIA

3.1. Ensaio de propagação de ondas ultrassônicas

Para a realização dessa pesquisa foram utilizadas 12 toras de madeira de *Eucalyptus pellita* com 1,75 metros de comprimento, diâmetro médio de 15,0 cm no topo e idade variando entre 7 e 10 anos de idade. A determinação da umidade foi feita com medidor de umidade com agulhas Digisystem DL 2000 com faixa de umidade entre 6% e 60%, sendo coletado dados em três pontos da tora (base, meio e topo). As peças estavam em condição saturada no momento de realização do ensaio ($U_{médio} > 30\%$), sendo necessário a correção da velocidade para a condição de equilíbrio ($12\% < U_{médio} < 30\%$), de acordo com a Equação (3).



$$V_{LL} = V_{LL,sat} - 16 \cdot U - \rho_{ap} + 1745 \quad (3)$$

A determinação da densidade aparente do lote foi feito através de retirada de corpo de prova de cada peça com dimensão de 2,0 x 3,0 x 5,0 cm e realizado a partir de método previsto na norma brasileira NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeiras (ABNT, 1997) em estufa SL-100 com secagem em temperatura de 103°C ± 2°C. Foi utilizado emissor de ondas ultrassônicas Proceq Pundit Lab com resolução de 0,1 μs e frequência de 54 kHz.

O ensaio foi feito segundo métodos previstos na NBR 15521 – Ensaio não destrutivo – ultrassom – Classificação mecânica de madeira de dicotiledôneas. Para determinação da velocidade de percurso do pulso ultrassônico foram obtidas leituras de tempo de propagação da onda em três pontos diferentes na face da peça considerando a posição do transdutor de compressão na direção paralela às fibras da madeira (Figura 1). A velocidade foi determinada de acordo com a Equação (2). O da velocidade média ($V_{LL,m}$) foi determinado pelo valor intermediário entre os três valores encontrados, sendo desconsiderado medições com diferença superior a 10%. A constante de rigidez (C_{LL}) foi determinada de acordo com a Equação (1).

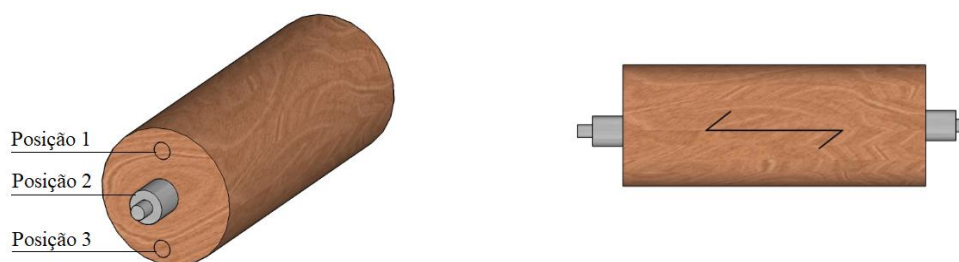


Figura 1: Pontos de medição das velocidades

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foi dado pela Equação (4). Segundo Pedroso (2014), os coeficientes de Poisson para a madeira de *Eucalyptus pellita* são: $\nu_{RL} = 0,128$; $\nu_{TL} = 0,101$; $\nu_{LR} = 0,771$; $\nu_{TR} = 0,397$; $\nu_{LT} = 0,951$; $\nu_{RT} = 0,623$.

$$E_d = C_{LL} \frac{(1 - \nu_{LR} \cdot \nu_{RL} - \nu_{RT} \cdot \nu_{TR} - \nu_{TL} \cdot \nu_{TL} - 2 \cdot \nu_{RL} \cdot \nu_{TR} \cdot \nu_{LT})}{(1 - \nu_{RT} \cdot \nu_{TR})} \quad (4)$$

3.2. Ensaio de flexão estática e compressão paralela às fibras

Para determinação da resistência a flexão estática, foram produzidos corpos de prova com dimensão de 5 x 5 x 115 cm ao longo das fibras (Figura 2). O procedimento adotado seguiu as recomendações de ensaio da NBR 7190 (ABNT, 1997), onde o corpo de prova foi vinculado a dois apoios articulados móveis e efetuada a aplicação de carga monotônica no meio do vão, por meio de um cutelo acoplado ao atuador.

O módulo de elasticidade na flexão (MOE) é determinado pela Equação (6), onde $F_{M,10\%}$ e $F_{M,50\%}$ são correspondentes a 10% e 50% da carga máxima e $v_{10\%}$ e $v_{50\%}$ são os deslocamentos no meio do vão a 10% e 50% da carga máxima, respectivamente.



$$MOE = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%}) \cdot L^3}{(v_{50\%} - v_{10\%})} \quad (6)$$

O procedimento adotado para determinação da resistência a compressão paralela às fibras segue as recomendações de ensaio da NBR 7190 (ABNT, 1997), para isso, foram confeccionados corpos de prova com seção quadrada de 5 x 5 cm e comprimento de 15 cm ao longo das fibras. A determinação da resistência (f_{c0}) foi obtida por meio da Equação (7):

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,m\acute{a}x}}{A} \quad (7)$$

Onde f_{c0} , resistência a compressão paralela às fibras; $F_{c0,m\acute{a}x}$, força máxima de compressão aplicada no corpo de prova; A é a área resistente. Para a determinação da rigidez por meio do módulo de elasticidade, aplicou-se a Equação (8):

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (8)$$

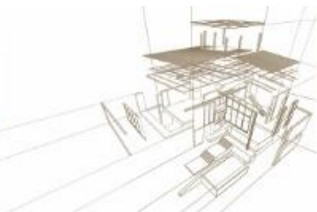
Sendo E_{c0} , módulo de elasticidade a compressão paralela às fibras; $\sigma_{50\%}$ e $\sigma_{10\%}$, tensão de compressão a 50% e 10% da tensão máxima (f_{c0}); $\varepsilon_{50\%}$ e $\varepsilon_{10\%}$, deformações específicas correspondentes às tensões de $\sigma_{50\%}$ e $\sigma_{10\%}$.

4. ANÁLISES DOS RESULTADOS

A Tabela 2 mostra os valores de densidade aparente, constante de rigidez, módulo de elasticidade dinâmico, módulo de elasticidade na flexão, resistência e módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras na condição de umidade de equilíbrio.

Tabela 2: Valores de densidade aparente, módulo de elasticidade dinâmico e propriedades mecânicas da madeira de E. pellita.

Amostra	ρ_{ap} (g/cm ³)	C_{LL} (GPa)	E_d (GPa)	MOE (GPa)	$f_{c0}12\%$ (MPa)	$E_{c0} 12\%$ (MPa)
1	1,038	30743,7	16,59	12,94	49,96	9,76
2	1,005	20096,7	10,85	8,68	52,69	9,93
3	1,139	22485,8	12,14	9,95	50,07	8,15
4	0,975	19230,6	10,38	8,72	39,93	9,04
5	0,955	25518,0	13,77	11,85	36,75	11,50
6	1,105	22195,7	11,98	10,54	39,94	8,20
7	0,649	19770,9	10,67	9,60	55,44	11,66
8	1,140	20914,7	11,29	10,39	53,82	10,12
9	1,074	27587,0	14,89	14,00	38,31	8,18
10	0,775	19012,1	10,26	9,85	47,37	9,87
11	1,194	21706,9	11,72	11,48	45,15	10,92
12	0,832	18424,4	9,94	9,94	43,79	9,92
Média	0,990	22307,21	12,04	10,66	46,10	9,77
CV(%)	16,63	17,01	17,01	15,23	13,92	12,43
Máximo	1,194	30743,73	16,59	14,00	55,44	11,66



Mínimo	0,649	18424,42	9,94	8,68	36,75	8,15
--------	-------	----------	------	------	-------	------

A densidade aparente média do lote está dentro da faixa estudada na norma NBR 15521 (ABNT, 2007) para madeiras de dicotiledôneas ($0,450 \text{ g/cm}^3 < \rho_{ap} < 1,100 \text{ g/cm}^3$). A velocidade de propagação das ondas é diretamente afetada pela porosidade da madeira, onde, quanto mais porosa a madeira, mais tempo a onda levará para viajar no corpo. No lote ensaiado, a amostra 6 registrou a menor densidade aparente (menos porosa), no entanto, não registrou o menor valor de constante de rigidez (C_{LL}). Esse fato pode ser explicado devido a não conformidade do corpo de prova de densidade para representar a tora, ou devido a tortuosidade das toras no momento de leitura do ensaio. Dessa forma, nota-se que o procedimento do ensaio de ultrassom é mais eficiente em peças aparelhadas com seção prismática.

As peças que contenham somente alborno, ou somente cerne, também aumentam a confiabilidade do ensaio. Poubel et al. (2011) mostram que na madeira de *E. pellita* a densidade pode variar em torno de 12% entre o cerne e alborno. De modo geral, o coeficiente de variância (CV) encontrado para C_{LL} foi satisfatório para ensaios em madeira. Os valores registrados para o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) são similares ao encontrados por Lorensani (2013) e Silva (2018), respectivamente: 11,22 GPa e 12,23 GPa.

Os valores de E_d e MOE variaram até 28% na amostra e, em média, o valor de E_d foi 13% maior que MOE. Miná et al. (2004) encontraram valores médios de E_d de 5% a 14% mais altos que o de MOE em peças roliças de eucalipto, com coeficiente de variância de 8,1% e 12,7%, valores compatíveis ao encontrado. Os fatores que levam essa variação ainda são discutidos por autores. Para Gonçalves et al. (2018), a correção da velocidade de propagação em madeira saturada ($U > 30\%$) para a velocidade em condição de equilíbrio por meio da Equação (3), apresentada na NBR 15521 (ABNT, 2007) resultam em valores até 9% mais altos.

O coeficiente de determinação entre módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e o módulo de elasticidade estático (MOE) é apresentado na Figura 2. O lote registrou valor de $R^2 = 0,7478$ e está dentro do intervalo esperado pela literatura mencionado na revisão bibliográfica.

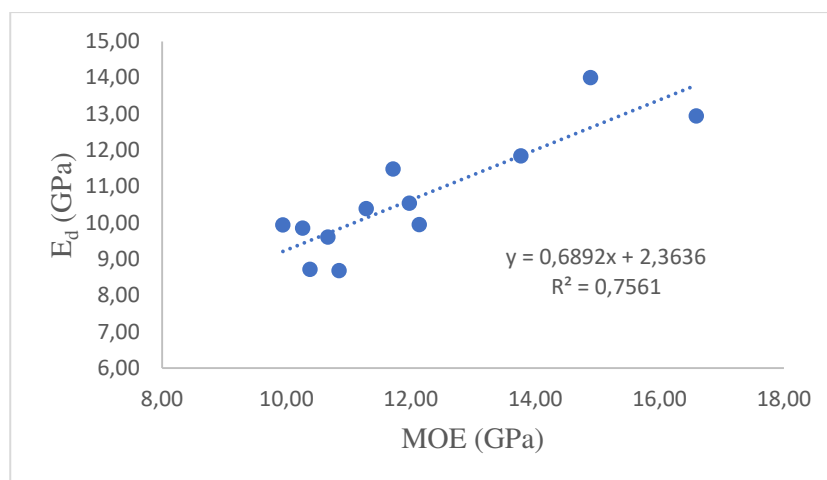
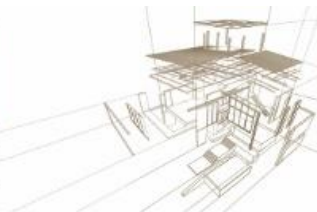


Figura 2: Linha de tendência e determinação de correlação entre E_d e MOE do lote

Quanto a classificação apresentada na NBR 15521 (ABNT, 2007), mostrada na Tabela 1, o lote ensaiado seria caracterizado, de acordo com o coeficiente de rigidez (C_{LL}), como classe UD-45 ($20150 < C_{LL} = 22307,21 < 22500$). Dentro dessa classe, são esperados valores de MOE entre 16,52 GPa e 17,42 GPa, valores consideravelmente maiores que o E_d calculado pela própria norma e os valores de MOE encontrados em ensaio destrutivo. Nesse caso, conclui-se que para a madeira estudada a classificação da norma não é adequado, pois oferece valores superestimados que podem comprometer a segurança de projeto ou avaliação de estruturas existentes.

Ruy (2016) afirma que para se obter valores de segurança deve-se aplicar coeficientes de minoração de até 28% dos valores encontrados na Tabela 1. Para esta pesquisa, se for aplicado o coeficiente de minoração de 1,28 sobre o valor mínimo de MOE para classe UD-45 (16,52 GPa), será encontrado 12,90 GPa, sendo este valor ainda maior do que o encontrado experimentalmente. Para madeiras jovens de eucalipto, a faixa proposta pela Tabela 1 é inadequada, sendo recomendado a aproximação do valor real de MOE pelo cálculo de E_d .

Para a classificação da resistência a compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$ 12%), pela classificação da Tabela 1, a classe UD-45 deve atingir resistência de 45 MPa. Nesse caso, o lote obteve resistência característica de compressão paralela às fibras de 44,95 MPa, não havendo diferença entre o valor indicado por norma e o encontrado por meio de ensaios destrutivos. Para a comparação do módulo de elasticidade à compressão (E_{c0}), o valor obtido no ensaio (9,91 GPa) foi 86% maior que o esperado pela classificação da norma (18,50 GPa).

Os valores encontrados na pesquisa divergem dos encontrados por Stangerlin et al. (2008), onde afirma que, para a madeira de eucalipto, os valores de módulo de elasticidade a compressão medido do ensaio de ultrassom podem ser entre 19% e 29% superiores do que determinados por ensaios destrutivos. Essa divergência pode ser explicada pela proporção de madeira juvenil presente no tronco da amostra ensaiada. Em madeiras jovens, a quantidade de extrativos e a angulação microfibrilar reduz significativamente o módulo de elasticidade da peça, mas alterando pouco a resistência

à compressão paralela às fibras, sendo esta propriedade mais influenciada pela presença de nós e rachaduras de crescimento.

5. CONCLUSÃO

A pesquisa mostra que os métodos de avaliação não destrutivos por meio de ensaio de propagação de ondas ultrassônicas é eficiente para determinação das propriedades mecânicas da madeira, destacando:

- Foi encontrado uma forte relação ($R^2 = 0,7478$) entre o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e o módulo de elasticidade estático (MOE);
- O valor de módulo de elasticidade pelo ensaio de ultrassom (E_d) foi 13% superior que o determinado por ensaios destrutivos (MOE), sendo necessária aplicação de coeficiente de minoração em favor da segurança.
- A classificação da norma NBR 15521 (ABNT, 2007) para determinação do módulo de elasticidade, neste estudo, não é recomendado, pois os valores de módulo de elasticidade na flexão (MOE) foram superestimados em até 54%.
- A classificação da norma NBR 15521 (ABNT, 2007) foi satisfatória para a classificação da resistência na compressão paralela às fibras. No entanto, os valores de módulo de elasticidade foram, em média, 86% mais altos, mostrando grande discrepância.
- A presença de madeira juvenil reduz significativamente as propriedades de rigidez da madeira, logo, a classificação segundo a norma NBR 15521 (ABNT, 2007) deve ser utilizada com cautela. São necessários novos estudos para determinação de novas classes para madeiras jovens de dicotiledôneas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Madeiras (LabMad/UFBA), ao Laboratório de Ensaio em Durabilidade dos Materiais (LEDMA/UFBA) da Universidade Federal da Bahia e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) do Governo Federal do Brasil pelo apoio oferecido na realização desse trabalho.

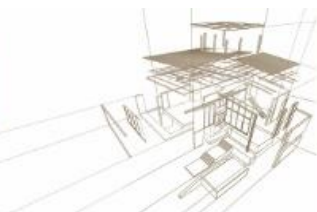
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1997). NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro.

____ (2007). NBR 15521 - Ensaio não destrutivo - ultrassom - Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas. Rio de Janeiro.

Andrade Jr, J. et al. (2016). Comparação entre o módulo de elasticidade obtido por ondas de tensão e por flexão em madeiras de *E. grandis*. Anais do XV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Curitiba.

Boscana, M.; Boragno, L (2018). Actualidad del sector forestal - Anuario 2018 - Análisis sectorial y cadenas productivas. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.



Montevideo.

Bucur, V. (2006) *Acoustics of Wood*. 2 ed. Springer, p. 393. New York, USA.

Carrasco, E.; Azevedo Jr, A. (2003). Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som – fundamentos físicos e resultados experimentais. *Revista Cerne*, Lavras, v. 9, n. 2, p. 178–191.

Faria, D. et al. (2018). Relação entre o módulo de elasticidade (MOE) e o Módulo de elasticidade dinâmico (MOEd) de lâminas da madeira de seringueira para produção de vigas de madeira laminada colada (MLC). *Anais do XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira e III Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira*, São Carlos.

Gonçalez, J.; Valle, A.; Costa, A (2001). Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). *Revista Cerne*, Lavras, v. 7, n. 2, p. 81–92.

Gonçalves, R. et al (2018). Moisture-related adjustment factor to obtain a reference ultrasonic velocity in structural lumber of plantation hardwood. *Journal of Wood Material Science and Engineering*, v. 13, n. 5, p. 254–261.

Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2017). *Relatório Anual*. Indústria Brasileira de Árvores, Brasília.

Kretschmann, D.; Hernandez, R. (2006). Grading timber and glued structural members. In: *Forest Products Laboratory. Primary Wood Processing: Principles and Practice*. Madison: US Department of Agriculture, Forest Service, v. 2, p. 339–390.

Lorensani, R (2013). *Classificação mecânica de peças estruturais de eucalipto utilizando ultrassom*. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas.

Miná, A. et al (2004). Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som. *Scientia Forestalis*, n. 1995, p. 188–196.

Pedroso, C. (2014). *Propriedades de resistência e de rigidez da madeira obtidas a partir da avaliação acústica na árvore*. Tese, Universidade Estadual de Campinas.

Poubel, D. et al. (2011). Estrutura Anatômica e Propriedades Físicas da Madeira de *Eucalyptus pellita* F. Muell. *Floresta e Ambiente*, v. 18, n. 2, p. 117–126.

Ross, R. (2015). *Nondestructive evaluation of wood*. 2. ed. US Department of Agriculture, Forest Service. Madison.

Ruy, M. (2016). *Classificação de madeira roliça de eucalipto por ultrassom*. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas.

Silva, J. (2018). *Parâmetros construtivos para painéis verticais adaptados do sistema wood frame em madeira de eucalipto jovem*. Dissertação, Universidade Federal da Bahia.

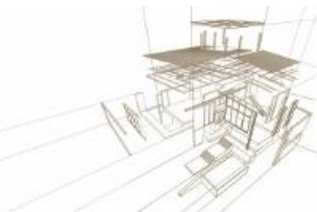
Stangerlin, D. et al. (2008). Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não-destrutivo. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 3, n. 2, p. 145–150.

Targa, L.; Ballarin, A.; Biaggioni, M. (2005). Avaliação do módulo de elasticidade de



madeiras de reflorestamento com uso do método não-destrutivo de vibração transversal. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 25, n. 2, p. 291–299.

Wimmer, P. et al. (2018). Correlação entre avaliações não destrutivas e flexão estática para madeira de dez espécies da caatinga. *Anais do XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira e III Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira*, São Carlos, Março.



MÓDULO ELÁSTICO DE PINO Y EUCALIPTO URUGUAYO A PARTIR DE LA FRECUENCIA LONGITUDINAL DE VIBRACIÓN

ESTIMATION OF THE MODULUS OF ELASTICITY OF URUGUAYAN PINE AND EUCALYPTUS FROM LONGITUDINAL NATURAL FREQUENCY

Baño, Vanesa ⁽¹⁾; Moltini, Gonzalo ^{(2)*}; Aulet, Alina ⁽³⁾; Cetrangolo, Gonzalo ⁽⁴⁾; Quagliotti, Sebastián ⁽⁵⁾; Moya, Laura ⁽⁶⁾

⁽¹⁾Dr. Ing. Montes. Fac. de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay / CESEFOR, España

⁽²⁾Ing. Civil. ⁽³⁾Dra. Física ⁽⁴⁾Dr. Ing. Civil: Fac. Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

⁽⁵⁾Ing. Agr. Laboratorio Tecnológico del Uruguay-LATU. Montevideo, Uruguay

⁽⁶⁾ PhD Arq. Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay. Montevideo, Uruguay

* Contacto: gmoltini@fing.edu.uy

Resumen

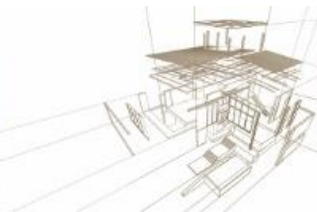
El uso de la madera como material estructural en Uruguay es muy reciente. Las primeras normas de clasificación visual estructural de madera aserrada de las especies *Pinus elliottii/taeda* y *Eucalyptus grandis* se han publicado en el año 2018. Con el fin de mejorar la predicción de las propiedades mecánicas obtenidas mediante este método, algunas normas internacionales ya incorporan otros parámetros de estimación, como son los valores de módulo de elasticidad o la densidad. Con este fin, el objetivo del presente trabajo es proponer las ecuaciones de predicción del módulo de elasticidad estático a partir de mediciones de frecuencia natural de vibración longitudinal con el fin de incluirlo en un futuro como parámetro complementario en la clasificación visual. Para ello, se realizaron ensayos estáticos y de vibración en 86 vigas de eucalipto de sección 30x90 mm² clasificada visualmente como EF0 según la norma UNIT 1262 y en 72 vigas de pino de sección 50x150 mm² clasificadas visualmente como EC0 y EC1 según la norma UNIT 1261 (51 y 21 respectivamente). Se calculó el módulo de elasticidad estático, obtenido a partir de ensayos de flexión de 4 puntos según la norma EN 408, y el módulo de elasticidad dinámico, a partir de la frecuencia de vibración medida con acelerómetros. Los resultados, corregidos al contenido de humedad del 12%, permitieron obtener las ecuaciones lineales que posibilitan estimar el módulo estático a partir del dinámico para ambas especies y para las distintas calidades, mostrando buena correlación entre ellos.

Palabras-clave: ensayos no destructivos, vibración, módulo de elasticidad, pino, eucalipto

Abstract

The use of wood as a structural material in Uruguay is very recent. The first standards of structural visual grading of *Pinus elliottii/taeda* and *Eucalyptus grandis* species have been published in 2018. In order to improve the prediction of mechanical properties obtained by this method, some international standards already incorporate other estimation parameters, such as modulus of elasticity and density values. To this end, the aim of this paper is to propose the prediction equations of the static elastic modulus from measurements of natural frequency of longitudinal vibration to include it in the future as a complementary parameter in the visual grading. Static and vibration tests were carried out on 86 eucalyptus beams of cross-section 30x90 mm² graded as EF0 according to the UNIT 1262 and 72 pine beams of cross-section 50x150 mm² graded as EC0 and EC1 according to the UNIT 1261. The static elastic moduli were obtained from 4-point bending tests and the dynamic elastic moduli were calculated from the vibration frequency measured with accelerometers. The results showed high correlation between the static and dynamic modulus for both species and the linear equations for estimation of the static modulus from non-destructive tests are proposed.

Keywords: non-destructive tests, vibration, modulus of elasticity, Pinus, Eucalyptus



1. INTRODUCCIÓN

El uso de madera de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) y pino (*Pinus elliottii*), producida en Uruguay con fines estructurales es muy reciente. Ambas especies de rápido crecimiento, suministran aproximadamente 4,2 millones de m³ para la industria de transformación mecánica, *i.e.*, productos para la construcción y carpintería (Baño et al. 2018).

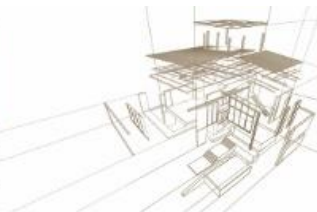
Las primeras normas de clasificación visual por resistencia de madera aserrada de estas especies de pino y eucalipto se han publicado en el año 2018. Con el fin de mejorar la predicción de las propiedades mecánicas obtenidas mediante este método, algunas normas internacionales incorporan otros parámetros de estimación, tales como los valores de módulo de elasticidad o los de la densidad. Algunas normas como la NBR 15521 (2007) de Brasil, la ASTM E1876 (2015) de EEUU y la UNE EN 14081-1 (2016) europea, establecen procedimientos para determinar el módulo de elasticidad mediante NDT generalmente a partir de la densidad y de la velocidad de propagación de una onda o la frecuencia de vibración medida en una pieza del material estudiado.

Las técnicas no destructivas (NDT) resultan muy útiles para el proceso de caracterización y evaluación de madera y productos de ingeniería de madera. Varios autores realizaron revisiones exhaustivas sobre técnicas NDT aplicadas a la madera (Brashaw et al. 2009, Vega 2013, Cavalheiro et al. 2018), destacándose el resumen cronológico presentado por Fernández Llana 2016. El autor indicó además, que el primer registro de ensayos de vibraciones longitudinales para obtener el módulo de elasticidad dinámico de la madera data de 1848 y fue atribuido a Chevandler y Wertheim.

Las técnicas de vibraciones han sido empleadas para obtener las propiedades elásticas de la madera, tanto en cuerpos de prueba de pequeñas dimensiones y libre de defectos, como en tamaño estructural. En el primer caso, se reportaron altas correlaciones ($r=0,95$) entre el módulo de elasticidad estático y el dinámico obtenido por método de vibración longitudinal para *Eucalyptus delegatensis* (Ilic 2001).

En el segundo caso, el método de análisis de vibraciones, las técnicas de ultrasonidos, rayos X, han sido adoptadas por la industria por su rapidez y alta correlación con las propiedades mecánicas de la madera (Franca et al. 2019). En particular, el método de vibración longitudinal ha sido reportado como la técnica NDT que ofrece la predicción más cercana del módulo de elasticidad de madera de *Pinus radiata* de España (Arriaga et al. 2014) y de *Pinus Pinaster* de Portugal (Martins et al. 2017). Adicionalmente, se han encontrado altas correlaciones ($r=0,86$) entre módulo de elasticidad estático y módulo de elasticidad dinámico obtenido mediante técnicas de vibración longitudinal, para vigas *Eucalyptus grandis* argentino (Piter 2003).

El objetivo principal de este trabajo es proponer las ecuaciones de predicción del módulo de elasticidad estático a partir de mediciones de frecuencia natural de vibración longitudinal en vigas de madera de pino y eucalipto de Uruguay. Se prevé que estas ecuaciones sean incluidas como un parámetro complementario para la clasificación visual estructural.



2. MATERIAL Y METODOLOGÍA

El material estudiado corresponde a dos muestras comerciales de vigas de tamaño estructural de las dos especies más comúnmente utilizadas con fines estructurales en Uruguay: *Eucalyptus grandis*, y *Pinus elliottii*. Todas las vigas fueron cepilladas en sus cuatro caras y equilibradas a un contenido de humedad ambiente de aproximadamente 16%, en el Departamento de Proyectos Forestales del LATU. La primera muestra (MF), constituida por 86 vigas de eucalipto, de sección 30 mm x 90 mm, que fue clasificada visualmente como EF1 de acuerdo con los lineamientos de la norma UNIT 1262 (UNIT 2018). La segunda (MC), compuesta por 72 vigas de pino, de sección 50 mm x 150 mm, fue clasificada en dos calidades visuales, obteniéndose 51 y 21 piezas clasificadas como EC0 y EC1, respectivamente, según la norma UNIT 1261 (UNIT 2018), tal y como se describe en la Tabla 1. Para cada viga, se registraron las dimensiones reales promedio (anchura, altura y luz); la masa con una balanza electrónica de 0,1 g de precisión (Mettler Toledo), y el contenido de humedad con xilohigrómetro de resistencia eléctrica (Lignomat) de acuerdo con la norma UNE-EN 13183-2 (AENOR 2002). La densidad aparente (ρ) de cada viga se calculó como el cociente entre su masa y su respectivo volumen.

Tabla 1: Muestras de estudio

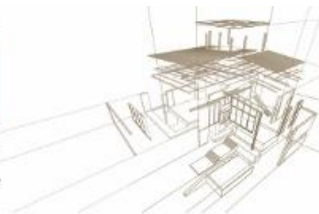
Muestra	Especie	Sección (mm ²)	Norma	Calidad visual	Nº probetas	CH (%)
1	<i>E. grandis</i>	30x90	UNIT 1262	EF1	18	13.2
2	<i>E. grandis</i>	30x90		Rechazo	68	12.5
3	<i>P. elliottii</i>	50X150	UNIT 1261	EC0	51	11.5
4	<i>P. elliottii</i>	50X150		EC1	21	11.4
5	<i>P. elliottii</i>	50X150		EC0+EC1	72	11.5

2.1. Ensayos de vibración

Luego de clasificadas visualmente, las vigas de las dos muestras fueron ensayadas mediante técnicas de análisis de vibraciones para estimar el módulo de elasticidad dinámico.

La metodología consiste en excitar mecánicamente una testa de la viga a través de un impacto mecánico que provoca la propagación de ondas mecánicas a través de la longitud de la misma. Con un acelerómetro se adquiere en la otra testa de la viga las señales de aceleración en función del tiempo, que arriban debido a esa propagación. Para obtener la frecuencia de vibración longitudinal de cada viga se tuvieron en cuenta las normas ASTM E1876 (2015) y ASTM C215 (2014), que contemplan la geometría de las vigas analizadas. Tal y como contemplan dichas normas, donde el eje nodal en la vibración longitudinal ocurre en el centro de la viga, y con el fin de evitar el acoplamiento con otros tipos de vibraciones, las vigas fueron apoyadas en su centro, de forma transversal a su eje longitudinal, el apoyo se materializó con un material elástico.

Este procedimiento se llevó a cabo conectando el acelerómetro a un osciloscopio modelo DS1M12 que, a través del software "EasyScopeII", permitió que las señales



temporales de aceleración fueran adquiridas cada 0.2 ms. Estas señales fueron procesadas con software de análisis numérico para la obtención del espectro en frecuencias a través de la aplicación de la transformada rápida de Fourier (FFT).

Los valores de frecuencia obtenidos mediante este método de vibración longitudinal, fueron usados para el cálculo del módulo de elasticidad dinámico, aplicando la ecuación 1 y teniendo en cuenta un factor de corrección por la humedad de la velocidad de $1/(1.12-\omega)$ con respecto al 12% (ω) de referencia.

$$E_{dyn} = \rho v^2 = \rho (2 l f)^2 \quad (1)$$

donde, E_{dyn} es el módulo de elasticidad dinámico; ρ es la densidad (kg/m^3); v es la velocidad de transmisión de la onda (m/s); l es la longitud de la viga (m) y f es la frecuencia de vibración (Hz).

2.2. Ensayos estáticos

Inmediatamente después de la realización de los ensayos de vibraciones, todas las vigas fueron ensayadas a flexión estática de cuatro puntos de acuerdo con la norma UNE-EN 408:2011, en tramo el elástico de comportamiento. Los ensayos fueron realizados hasta lograr una carga máxima de aproximadamente el 40% de la carga de rotura estimada, la cual fue estimada previamente a partir de 10 vigas de cada muestra ensayadas hasta la rotura. Para ello se utilizó una máquina universal Minebea con una celda de carga de 250 kN y con capacidad para aplicar cargas a velocidad constante. La deformación fue medida con dos extensómetros ubicados en el eje longitudinal y según el canto de la pieza. Para cada viga se calculó el módulo de elasticidad local (E_m) en flexión a partir de la ecuación del módulo de elasticidad global (2) y considerando el valor de $G=E/16$.

$$E_m = \frac{3aL^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb} \right)} \quad (2)$$

donde, a es la distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo (mm); L es la luz de ensayo (mm); b y h son base y altura (mm), respectivamente; G es el módulo de elasticidad transversal, calculado como $E_m/16$ (UNE-EN 384:2016) $F_2 - F_1$ es el incremento de carga en la línea recta de regresión entre el 10% y 40% de la carga máxima estimada (N), y $w_2 - w_1$ es el incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$ (mm).

El módulo de elasticidad y la densidad se ajustaron al 12% de contenido de humedad de referencia de acuerdo con UNE-EN 384:2016.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Ensayos estáticos

En la Tabla 2 se presentan los valores promedios del módulo de elasticidad obtenido de los ensayos estáticos y de la densidad para las muestras analizadas. Se presentan los datos en según la calidad visual asignada a la muestra y corregidos al 12 % de contenido de humedad de referencia.

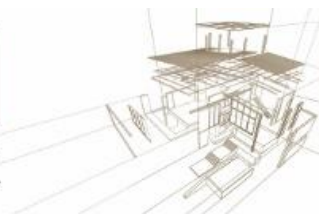


Tabla 2: Valores medios del módulo de elasticidad y la densidad por muestra, corregidos al 12% de contenido de humedad

Muestra	Especie	Calidad visual	$E_{m,12}$ (N/mm ²)	ρ_{12} (kg/m ³)
1	<i>E. grandis</i>	EF1	14.12	599.8
2	<i>E. grandis</i>	Rechazo	11.84	528.6
3	<i>P. elliotii</i>	EC0	6.07	403.0
4	<i>P. elliotii</i>	EC1	6.79	399.0
5	<i>P. elliotii</i>	EC0+EC1	6.29	401.0

Como se puede observar, las propiedades de la madera de eucalipto son mayores a las de pino. En una comparación entre las calidades visuales de cada especie mediante un estudio de diferencias significativas mediante un análisis ANOVA, se encontraron diferencias significativas entre los valores de módulo de elasticidad y densidad de la madera clasificada como EF1 y Rechazo en el eucalipto. Sin embargo, los valores de módulo de elasticidad y densidad de las calidades EC1 y EC0 en el pino no muestran diferencias significativas, considerando así que estos valores son similares.

3.2. Ensayos dinámicos

En la Tabla 3 se muestran los valores promedio de la frecuencia longitudinal medida para cada muestra y calidad visual, así como el valor promedio del módulo de elasticidad dinámico (E_{dyn}) corregido al 12 % de contenido de humedad.

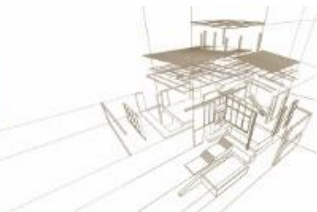
Tabla 3: Valores medios de frecuencia natural y del módulo de elasticidad dinámico por muestra, corregidos al 12% de contenido de humedad

Muestra	Especie	Calidad visual	f (Hz)	$E_{dyn,12}$ (N/mm ²)
1	<i>E. grandis</i>	EF1	1389.8	14.64
2	<i>E. grandis</i>	Rechazo	1331.4	12.31
3	<i>P. elliotii</i>	EC0	635.2	5.93
4	<i>P. elliotii</i>	EC1	667.9	6.89
5	<i>P. elliotii</i>	EC0+EC1	645.2	6.22

3.3. Relación entre los resultados estáticos y dinámicos

3.3.1. *Eucalyptus grandis*

Los resultados mostraron una buena correlación entre el módulo de elasticidad estático y dinámico en la madera de eucalipto. La Figura 1 muestra un coeficiente de correlación de 0,91 en la totalidad de la población de eucalipto (86 vigas de calidades EF1 y rechazo). Curiosamente, el coeficiente de determinación para la madera clasificada como EF1 disminuye ligeramente, tomando un valor de $R^2=0,89$ (Figura 2).



En base a estos resultados, la ecuación de estimación del módulo de elasticidad estático en función del dinámico en la madera de eucalipto clasificada como EF1 se podría representar como (3):

$$E_m = 0,87 E_{dyn} + 1,78 \quad (R^2=0,89) \quad (3)$$

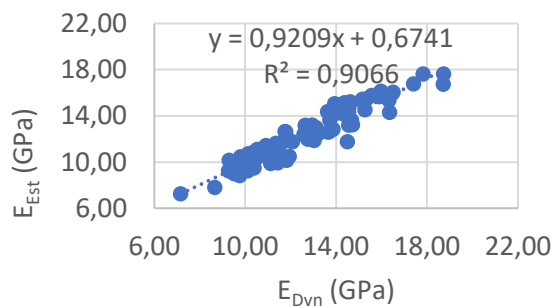


Figura 1: Correlación entre el E_{dyn} y el E_{est} en la población de eucalipto (EF1+Rechazo)

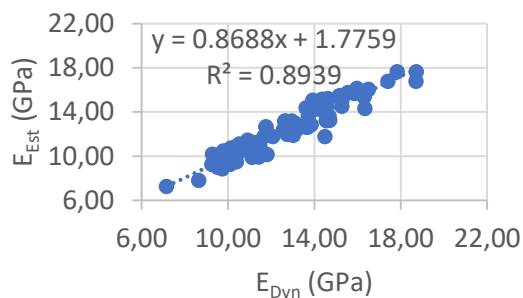


Figura 2: Correlación entre el E_{dyn} y el E_{est} en la muestra de eucalipto clasificada como EF1

3.3.2. *Pinus elliottii*

Las correlaciones entre el módulo de elasticidad dinámico y estático obtenidas en la madera de pino son también altas y se presentan en las Figuras 3 y 4. El coeficiente de determinación para la totalidad de la población (EC0+EC1) es de 0,93, y valores muy similares en los coeficientes de determinación de la madera clasificada como EC0 ($R^2=0,96$) y EC1 ($R^2=0,95$).

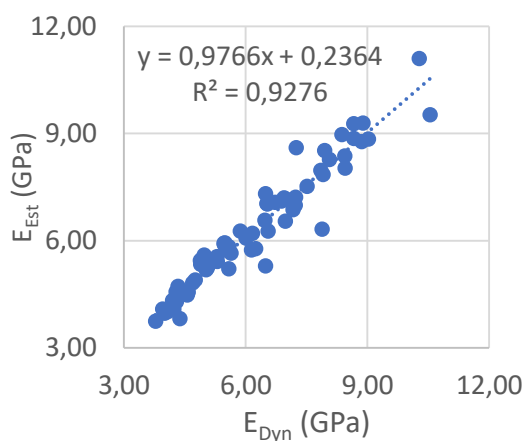


Figura 3: Correlación entre el E_{dyn} y el E_{est} en la población de pino (EC0+EC1)

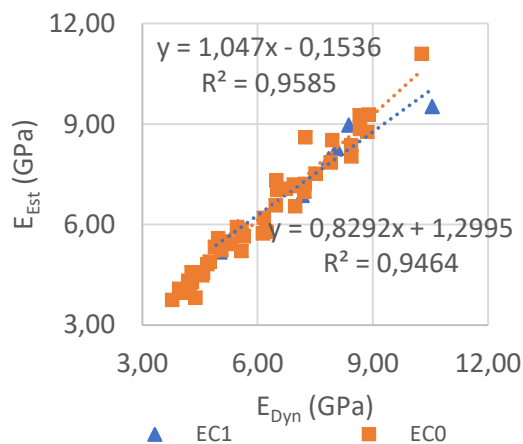


Figura 4: Correlación entre el E_{dyn} y el E_{est} en las muestras clasificadas como EC0 y EC1



En base a estos resultados, la ecuación genérica para ambas calidades de pino (EC1+EC0), de estimación del módulo de elasticidad estático en función del dinámico se podría representar como (4):

$$E_m = 0,98 E_{dyn} + 0,24 \quad (R^2=0,93) \quad (4)$$

3.3.3. Modelos de regresión con varias variables independientes

Con el fin de buscar otros parámetros predictores del módulo de elasticidad estático, se estudió la correlación entre este y la velocidad de transmisión de onda (v) y la densidad (ρ) en la madera de pino. La Tabla 4 presenta los valores del coeficiente de determinación en la madera pino, mostrando que la correlación con la velocidad de onda no es tan buena como con el módulo de elasticidad dinámico. Con respecto a la relación con la densidad para esta especie, muestra valores de R^2 de 0.32, lo que indica un grado de dependencia y linealidad entre ambas variables, valores similares a los obtenidos por Hermoso et al. (2007) para *pino radiata* de procedencia española ($R^2=0,39$).

Tabla 4: Coeficiente de determinación (R^2) para correlaciones lineales entre E_m y varias variables independientes en pino

CALIDAD	VARIABLE DEPENDIENTE	VARIABLE INDEPENDIENTE	R^2
EC1	E_m	v	0.74
		ρ	0.43
EC0	E_m	v	0.84
		ρ	0.21
E_m : módulo de elasticidad estático; v : velocidad de onda; ρ : densidad			

La asignación de la clase resistente a la madera de pino uruguayo está limitada mayormente por la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad (Moya et al. 2017).

Dado que en la madera de eucalipto se habían registrado datos de los parámetros visuales, se generaron modelos de regresión lineal usando el módulo de elasticidad estático (E_m) como variable dependiente y los valores de velocidad de onda (v), densidad (ρ), módulo de elasticidad dinámico (E_{dyn}), diámetro de nudo mayor en la cara (D), diámetro de nudo mayor en el canto (d) y desvío de fibra (df) como variables independientes. También se evalúa la resistencia a flexión (f_m), en comparación con las variables independientes descritas anteriormente.

En la Tabla 5 se muestran los resultados, correspondiente a la calidad EF1 de eucalipto, de correlaciones lineales entre el módulo de elasticidad estático y la resistencia a flexión, y las variables independientes (explicitadas en tabla anterior).

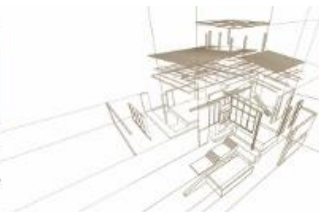


Tabla 5: Coeficiente de determinación para las variables independientes f_m y E_m para EF1

CALIDAD	VARIABLE DEPENDIENTE	VARIABLE INDEPENDIENTE	R2
EF1	E_m	v	0.31
		ρ	0.36
		$E_{dyn}+D$	0.90
		$E_{dyn}+d$	0.90
		$\rho+D+d+df$	0.70
		$E_{dyn}+D+df$	0.91
	f_m	E_{dyn}	0.001
		$E_{dyn}+D$	0.18
		$E_{dyn}+D+df$	0.25

Se puede observar que la inclusión de parámetros visuales en el modelo de regresión para la madera de eucalipto apenas mejora la correlación con el módulo de elasticidad estático. Se incrementa el valor de R^2 de 0,89 a 0,90 introduciendo parámetros de diámetros de nudo de cara o de canto. Con respecto a la correlación con la densidad, se obtuvo un R^2 de 0.36, lo que indica una baja correlación entre el módulo elástico dinámico y la densidad.

La correlación entre E_m y ρ es similar a la obtenida en otras frondosas, como es el caso de castaño de procedencia española, donde se obtuvo un valor de R^2 de 0,47. Sin embargo, la correlación entre E_m y ρ obtenida en la madera de eucalipto uruguayo fue mayor que la obtenida en madera de castaño, que presentó un valor de $R^2=0,67$ entre E_m y E_{dyn} , obtenido por el método de vibración. Con el fin de intentar predecir la resistencia a flexión para esta especie, se realizó una comparativa entre la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad, observándose que no existe correlación entre ambos para las muestras estudiadas, con valores de $R^2=0.001$ entre f_m y E_{dyn} . Incluyendo los parámetros visuales como, el R^2 aumento a 0.25 para la combinación de $E_{dyn}+D+df$.



La dificultad en la predicción de f_m a partir del módulo de elasticidad ha sido ampliamente reportada (Franca et al. 2019) y atribuida a la presencia y ubicación de las singularidades de la madera (Falk et al. 1990). Por este motivo, se estima necesario realizar mayor número de ensayos y buscar indicadores que permitan predecir la resistencia a flexión de la madera de eucalipto a partir de técnicas no destructivas y parámetros visuales.

4. CONCLUSIONES

Se calculó el módulo de elasticidad estático, obtenido a partir de ensayos de flexión en cuatro puntos, y el módulo de elasticidad dinámico obtenido a partir de la frecuencia de vibración longitudinal medida con acelerómetros. Los resultados, corregidos al contenido de humedad del 12%, permitieron obtener las ecuaciones lineales que posibilitan estimar el módulo estático a partir del dinámico para ambas especies: *Pinus elliottii* y *Eucalyptus grandis* y para las distintas calidades, mostrando buena correlación entre ellos.

Las correlaciones entre el módulo de elasticidad estático y dinámico mostraron valores similares entre las diferentes calidades de madera, estando R^2 en el entorno de 0.9. Posibilitando una buena estimación del módulo elástico estático mediante un método de medición de la vibración longitudinal, independientemente a la calidad de la madera.

El método de vibración aplicado resulta ser altamente eficiente para obtener el módulo elástico dinámico en ambas especies, siendo de fácil aplicación en un aserradero, evitando de esta forma un procedimiento de ensayo en prensa más lento.

Dado que el módulo de elasticidad es el parámetro que determina la clase resistente en la madera de pino uruguayo, la clasificación mecánica mediante técnicas no destructivas de vibración resultaría ser un buen método para la determinación de uno de los parámetros que afectan la clase resistente en esta especie.

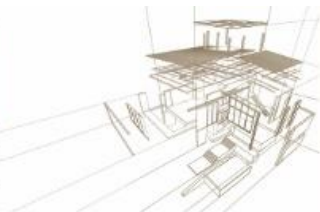
En la madera de eucalipto, la clase resistente está limitada principalmente por la resistencia a flexión, por lo que asignar dicha clase sólo en base al módulo de elasticidad dinámico no estaría del lado de la seguridad.

Se estudió la correlación entre distintas variables independientes y la resistencia a flexión de las vigas de eucalipto, encontrándose una baja correlación lineal entre ellos.

Este trabajo supone una primera aproximación a la estimación de las propiedades mecánicas de las especies de pino y eucalipto uruguayos en base a mediciones realizadas con técnicas no destructivas, siendo necesario continuar los trabajos de investigación en esta línea con el fin de poder incluirlos en la norma de clasificación estructural.

AGRADECIMIENTOS

A la Mag. Ing. Agr. Alicia Sánchez y al Téc. Ignacio Torino por su ayuda a la hora de realizar los ensayos correspondientes en prensa y horno en el LATU.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arriaga, F., Monton, J., Segues, E., Iñiguez-González, G. (2014). Determination of the mechanical properties of radiata pine timber by means of longitudinal and transverse vibration methods. *Holzforschung* 68(3):299-305.

American Society for Testing and Materials ASTM E1876: 2015. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. US.

American Society for Testing and Materials ASTM C215 (2014). Standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional resonant frequencies of concrete specimens. ASTM International. West Conshohocken, PA.

Baño, V.; Domenech, L.; Godoy, D.; Sánchez, A.; Quaglioti, S.; Moya, L. (2018) Informes Técnicos de Normalización de Madera Estructural. Informe 2: madera aserrada de *Eucalyptus grandis*. ISBN:978-9974-0-1573-9. Montevideo, Uruguay

Baño, V., Mazzei, C., Moya, L., Dieste, S. (2018). Diseño de puentes realizados con madera de procedencia local para el paso de vehículos pesados en el sector agrícola y forestal. Informe Técnico. Serie FPTA-INIA, Uruguay. ISSN: 1688-924X.

Brashaw, B.K., Bucur, V., Divos, F., Goncalves, R., Lu, J., Meder, R., Pellerin, R.F., Potter, S., Ross, R.J., Wang, X., Yin, Y. (2009). Nondestructive testing and evaluation of wood: A worldwide research update. *Forest Prod. J.* 59(3): 7-14.

Cavalheiro, R. S., de Almeida, D. H., de Almeida, T. H., Christoforo, A. L., Rocco Lahr, F.A. (2018). Estimation of modulus of elasticity in static bending of Wood in structural dimensions as a function of longitudinal vibration and density. *Current Journal of Applied Sc and Technology* 26(1):1-8.

Comité Europeo de Normalización CEN - EN 408 (2010) Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization. Bélgica.

Comité Europeo de Normalización CEN, EN 16929 (2018). Test Methods. Timber floors. Determination of vibration properties Contents European Committee for Standardization. Bélgica.

Falk, R.H., Patton-Malory, M., McDonald, K.A. (1990). Non-destructive testing of wood products and structures: State of the art and research needs. 137-147 in Proc. Conf. Non-destructive testing and evaluation for manufacturing and construction, August 9-12, 1988.

Fernández Llana, D. (2016). Influencia de factores físicos y geométricos en la clasificación estructural de la madera mediante técnicas no destructivas. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.

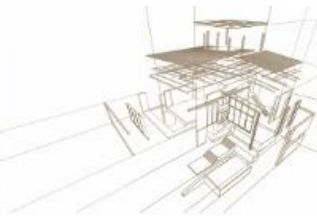
Franca, F.J.N, Seale, R.D., Shmulsky, R., Franca, T.S.F.A. (2019). Assessing southern pine 2 x 4 and 2 x 6 lumber quality: longitudinal and transverse vibration. *Wood Fiber Sc.* 51(1): 1-14.

Hermoso E., Carballo J. and Fernández-Golfín J.I. (2007) Caracterización estructural de la madera de *Pinus radiata* D. Don del País Vasco (España) acorde a las modificaciones normativas. *Maderas. Ciencia y tecnología* 9(3): 223-232.

Ilic, J. (2001). Variation of the dynamic elastic modulus and wave velocity in the fibre direction with other properties during the drying of *Eucalyptus*. *Wood Sci Technol* 35:157-166.

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas UNIT 1261 (2018). Madera aserrada de uso estructural. Clasificación visual. Madera de pino taeda y *Pinus elliottii* (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*).

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas UNIT 1262 (2018). Madera aserrada de uso estructural. Clasificación visual. Madera de eucalipto (*Eucalyptus grandis*).



Martins, C. E. J., Dias, A. M. P. G., Marques, A. F. S., and Dias, A. M. A. (2017). "Non-destructive methodologies for assessment of the mechanical properties of new utility poles," *BioRes.* 12(2), 2269-2283.

Moya, L.; Domenech, L.; Cardoso, A.; O'Neill, H. y Baño, V. (2017) Proposal of visual strength grading rules for Uruguayan pine timber, *Eur. J. Wood Wood Prod.* 75 p.1017–1019 doi:10.1007/s00107-017-1208-5.

Norma Brasileira NBR 15521 (2007). Ensaio não destrutivo- ultra-som- classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledóneas. 8p. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Norma Española UNE-EN 384:2016 Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.

Norma Española UNE-EN 13183-1/AC (2004). Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa.

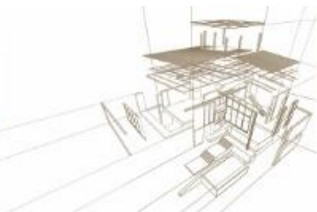
Norma Española UNE- EN 13183-2 (2002). Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Determinación por el método de resistencia eléctrica.

Norma Española UNE- EN 408 :2011 Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.

Norma Española UNE EN 14081-1 (2016). Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales.

Piter, J.C. (2003). Clasificación por resistencia de la madera aserrada como material estructural. Desarrollo de un método para el *Eucalyptus grandis* de Argentina. Tesis doctoral, Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ingeniería., La Plata.

Vega, A. (2013). Caracterización estructural de madera de castanea sativa Mill. Clasificación visual y evaluación mediante métodos no destructivos. Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, E.P.S., Lugo.



CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE COMPENSADO PRODUZIDO COM LÂMINA TERMORRETIFICADA E RESINA POLIURETANA

PHYSICAL CHARACTERIZATION OF PLYWOOD PRODUCED WITH THERMORRETIFICATED VENEERS AND POLYURETHANE RESIN

Danilo Soares Galdino^{1*}, João Vítor Felipe Silva¹, Maria Fernanda Felipe Silva², Bruno Santos Ferreira², Ricardo Marques Barreiros², Cristiane Inácio de Campos^{1,2}

⁽¹⁾ Facultad de Ingeniería de Guaratinguetá. Universidad Estatal de São Paulo (UNESP), Guaratinguetá/SP, Brasil

⁽²⁾ Facultad de Ingeniería Industrial en Madera. Universidad Estatal de São Paulo (UNESP), Itapeva/SP, Brasil

* Contacto: danilo.galdino@unesp.br

Resumen

Los tableros contrachapado son productos de amplia aplicación, principalmente en la industria del mueble y en el sector de la construcción. Los adhesivos comerciales utilizados comúnmente para su producción contienen resinas a base de formaldehído que son perjudiciales para la salud y el medio ambiente, para que la resina de poliuretano a base de aceite de ricino se convierta en una alternativa para reemplazar este adhesivo. Además, en los últimos años, el tratamiento térmico ha ganado importancia en la industria maderera como la técnica más sostenible para mejorar algunas propiedades inherentes de la resistencia a la biodegradación de la madera. En base a esto, el presente trabajo tuvo como objetivo analizar la influencia del tratamiento térmico en láminas de *Pinus taeda*, en la producción de tablero contraplacado con resina poliuretana a base de ricino. En la producción de los tableros se utilizaron cinco láminas de 2,3 mm de espesor (nominal). Las láminas fueron sometidas a tratamiento térmico en prensa termomecánica por 30 minutos, en tres diferentes temperaturas (160, 180 y 200 °C). Los ensayos físicos realizados fueron densidad, contenido de humedad, absorción y hinchazón del espesor después de la inmersión en agua durante 24 horas, evaluadas de acuerdo con los documentos normativos de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT). La termorrección en el tablero contrachapado demostró ser una alternativa para obtener un producto con menor higroscopicidad y mejor estabilidad dimensional.

Palabras-clave: contrachapado, tableros, adhesivo poliuretano, termorrección.

Abstract

Plywood is a product of wide application, mainly in the furniture industry and in the construction sector. Commercial adhesives commonly used for their production contain formaldehyde-based resins that are harmful to health and the environment. Castor oil based polyurethane resin is an alternative to replace this adhesive. In addition, in recent years, heat treatment has gained importance in the wood industry as the most sustainable technique to improve some inherent properties of wood biodegradation resistance. Based on this, the objective of this work was to analyze the influence of heat treatment on *Pinus taeda* veneer for plywood production with polyurethane resin. In the production of panels, five veneer with 2.3 mm thickness were used, analyzing the thermoregulation process of veneer in press for 30 minutes and three different temperatures (160, 180 and 200 °C). The physical tests performed were density, moisture content, absorption and swelling of the thickness after immersion in water for 24 hours, evaluated in accordance with the normative documents of the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). The heat treatment in the plywood panel proved to be an alternative to obtain a product with lower hygroscopicity and better dimensional stability.

Keywords: plywood, panels, polyurethane resin, heat treatment.



1. INTRODUCCIÓN

Los tableros contrachapados, así como la madera, pueden mejorar su resistencia a la humedad y las propiedades de ataque del xilófago a través de la técnica de tratamiento conservante, siendo lo tratamiento térmico una solución sostenible.

Además de contribuir al medio ambiente, esta práctica es una excelente herramienta para la innovación, como lo es el uso de adhesivos libres del compuesto de formaldehído que es químicamente ofensivo para el hombre y el medio ambiente.

En Brasil, la resina de poliuretano derivada del aceite de ricino parece ser una sustitución viable, que tiene la ventaja de proceder de materias primas naturales y renovables a precios razonables.

Algunas investigaciones ya han demostrado su viabilidad para su uso en la industria maderera, cuya calidad de unión es cercana o incluso superior a los tableros producidos con resinas tradicionales (CAMPOS et. al., 2009). Sin embargo, se sabe poco sobre la influencia del tratamiento térmico y su uso para este tipo de adhesivo.

Es común encontrar en la literatura que la termorrección disminuye la higroscopicidad de la madera, mejora la estabilidad dimensional y reduce la humedad de equilibrio (TJEERDSMA y MILITZ, 2005; YILDIZ, GEZER e YILDIZ, 2006; POUBEL et al. 2013). Además, la termorrección altera las propiedades de humectabilidad de los tableros e interfiere con la calidad de la unión (FERREIRA, CAMPOS y RANGEL, 2018).

La explicación de este fenómeno es que durante el tratamiento se produce la degradación de los componentes químicos esenciales de la madera, especialmente las hemicelulosas sensibles al calor y más hidrófilas de la madera, lo que reduce la afinidad de la madera por el agua (WEILAND; GUYONNET, 2003; PONCKSAC, 2006).

Tjeerdsma y col. (1998) explican que la reducción de la higroscopicidad también puede explicarse debido a una red de lignina más firme e inelástica, que ha sufrido reacciones de reticulación y condensación alrededor de las microfibrillas de celulosa. Esto hace que disminuya la capacidad de expansión de las microfibrillas de celulosa y, por lo tanto, su capacidad de absorber agua, evitando que la pared celular se hinche como resultado, y también disminuyendo el punto de saturación de las fibras.

Los estudios realizados por Yildiz, Gezer e Yildiz (2006) y Poubel et al. (2013) llevaron a la conclusión de que la estabilidad dimensional de la madera causada por la termorrección da como resultado una reducción de la humedad de equilibrio y menos contracciones e hinchazón del panel terminado.

La aplicación del tratamiento térmico, como puede verse, da como resultado un producto con características diferenciadas en comparación con la madera utilizada originalmente, desarrollando así aplicaciones diferenciadas del producto bajo el efecto de termorrección (BRITO et al, 2006).

Por lo tanto, este trabajo tuvo como objetivo investigar los efectos de la rectificación térmica de la lámina sobre las propiedades físicas del tablero contrachapado producido con resina de poliuretano.



2. METODOLOGÍA

2.1. Tratamiento de las láminas

Para la producción del tablero de madera contrachapado, se utilizaron especies de *Pinus taeda* de 2,3 mm de espesor (nominal). Las láminas para la investigación fueron donadas por la empresa Miraluz - Industria e Comercio de Madeiras Ltda., productora de tablero contrachapado en la ciudad de Sengés / PR. Los tableros secos se cuadraron a dimensiones de 450 x 450 mm, y estas dimensiones se determinaron especialmente debido al tamaño de la prensa involucrada en la investigación.

El tratamiento térmico se realizó en prensa durante 30 minutos cuando entonces los tableros fueron sometidos individualmente a la aplicación de 50 bares de presión y temperatura inherentes a cada tratamiento térmico (160, 180 y 200 °C).

2.2. Producción de los tableros

La resina utilizada fue el poliuretano derivado del aceite de ricino de dos componentes, que se aplicó manualmente con una espátula, usando un peso adhesivo de 395 g / m² con una línea de doble pegamento. Solo un lado de las láminas se llena con el adhesivo. Así, para cada línea de pegamento se usaron 63,2 g y, en consecuencia, se produjeron 390 g de adhesivo por tablero.

Los cinco tableros se superpusieron sobre láminas ortogonales y se pre prensaron en frío, en una prensa neumática manual con una presión de 2 kgf / cm² durante 15 minutos. Posteriormente, la prensa caliente se hizo en una prensa hidráulica calentada con una presión máxima de 6 kgf / cm², a una temperatura de 90°C durante un tiempo de 10 minutos. Este tiempo de prensado se dividió en 3 ciclos, cada uno de 3 minutos de duración y 30 segundos añadidos para aliviar la presión entre ciclos. Después de presionar, el tablero se acondicionó en un clima de 25 ° C y 60% de humedad relativa, durante 72 horas antes de ser seccionado para hacer las muestras.

2.3. Caracterización

Los tableros producidos se caracterizaron físicamente de acuerdo con las regulaciones brasileñas: Determinación de la densidad (ABNT NBR 9485: 2011), Determinación del contenido de humedad (ABNT NBR 9484: 2011), Determinación de la absorción de agua (ABNT NBR 9486: 2011) y Determinação do inchamento (ABNT NBR 9535: 1986). Para cada ensayo, el número de muestras fue de seis. Los ensayos se realizaron en el Campus Experimental de Itapeva – UNESP, de acuerdo con la metodología que se describe a continuación.

2.3.1. Ensayo de densidad [d] - ABNT NBR 9485: 2011

Para la determinación de la densidad, las probetas tomadas de lo tablero contrachapado de cada tipo de tratamiento tenían unas dimensiones de 100 x 50 x 12,0 mm. La densidad se encontró a través de la expresión (1):



$$\rho = \frac{m}{c \times l \times e} \quad (1)$$

Donde:

- ρ - densidad, en g / cm³;
- m - masa de la probeta, en g;
- c - longitud promedio de la probeta, en cm;
- l - ancho promedio de la probeta, en cm;
- e – espesor promedio de la probeta, en cm.

2.3.2. Ensayo de contenido de humedad [u] - ABNT NBR 9484: 2011

Las dimensiones de las probetas para este procedimiento fueron iguales a las dimensiones de las probetas utilizadas para el procedimiento de masa aparente, ya que se requería que fueran al menos 10 g. El contenido de humedad se calculó mediante la siguiente expresión (2):

$$TU = \frac{mu - ms}{ms} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

- TU - contenido de humedad, en %;
- mu - masa húmeda, en g;
- ms - masa seca, en g.

2.3.3. Ensayo de absorción [A_m] - ABNT NBR 9486: 2011

Las dimensiones de las probetas producidas fueron 75 x 25 x 12,0 mm. Especificado por el estándar, las probetas tenían la longitud ortogonal a la dirección de las fibras de la chapa exterior.

Primero, se pesaron las probetas para determinar su masa inicial y luego se sumergieron en agua durante un período de 24 horas y se volvieron a pesar para determinar la masa final. Para calcular la absorción de agua de las muestras, se utilizó la siguiente expresión (3):

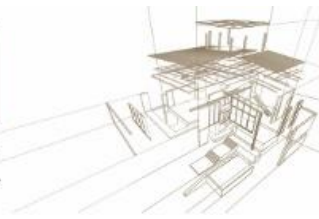
$$Ab = \frac{M_f - M_i}{M_i} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

- Ab - cantidad de agua absorbida, en %;
- M_f - masa final de la probeta, en g;
- M_i - masa inicial de la probeta, en g.

2.3.4. Ensayo de hinchamiento en espesor [G₁] - ABNT NBR 9535:1986

Para las probetas de hinchamiento de espesor se produjeron probetas con dimensiones de 60 x 10 x 12.0 mm. La longitud, según lo prescrito por la norma, se mecanizó



ortogonalmente a las fibras de madera y las piezas se lijaron para eliminar imperfecciones del corte.

Inicialmente, el espesor de las probetas se midió y dividió en dos series de tres, una serie, como lo indica la norma, es de control. Para la serie de control, las muestras se secaron al horno a una temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, que al final de 24 horas en esta condición se midió nuevamente su espesor. Se colocaron otras tres muestras en agua y se sumergieron durante 24 horas, que al final de este período se midió su espesor (Figura 1). Las mismas muestras de este procedimiento fueron sometidas a estufa de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, también por el mismo período de 24 horas. Al final de este período, se midieron nuevamente los espesores.

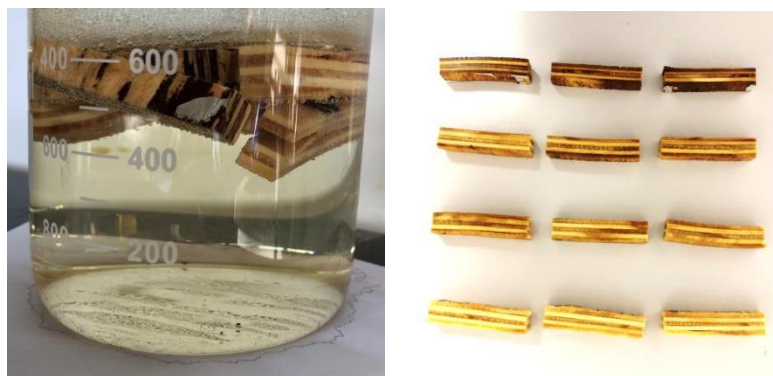


Figura 1: Probetas en lo ensayo de hinchamiento en espesor.

Después fueron calculadas la recuperación del espesor por expresión (4) y la hinchazón más la recuperación del espesor por expresión (5):

$$R = \left(\frac{e_1 \times e_5}{e_2 \times e_3} \right) \times 100 \quad (4)$$

Donde:

R - recuperación de espesor, en%;

e1 - suma de lo espesor inicial de las probetas utilizadas en el control, en mm;

e2: suma de lo espesor de las probetas utilizadas en el control y secadas al horno, en mm;

e3 - suma de lo espesor inicial de las probetas antes de la inmersión en agua, en mm;

e5 - suma de lo espesor después de la inmersión en agua, en mm.

$$IR = \left(\frac{e_1 \times e_4}{e_2 \times e_3} - 1 \right) \times 100 \quad (5)$$

Donde:

IR - hinchazón más recuperación de espesor en%;

e4 - suma del espesor de las probetas después de la inmersión en agua y secar en estudio, en mm.



Finalmente, el porcentaje de hinchazón se calculó por la diferencia entre los valores obtenidos para la hinchazón más la recuperación del espesor (RI) y la recuperación del espesor (R).

2.4. Análisis estadísticos

A partir de los resultados obtenidos, el análisis de varianza (ANOVA) se realizó mediante la prueba de Tukey con un 5% de significación para todos los resultados de las pruebas realizadas. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software R versión 3.4.2 (2016).

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Tabla 1 muestra los valores de los ensayos físicos de densidad, contenido de humedad, absorción e hinchamiento del espesor después de la inmersión en agua durante 24 horas para tableros contrachapado con resina de poliuretano y láminas termo rectificado para cada temperatura de tratamiento.

Tabla 1: Densidad, contenido de humedad, absorción e hinchazón en agua en función de los tratamientos térmicos aplicados.

Temperatura (°C)	d (g/cm ³)	U (%)	A _m (%)	G ₁ (%)
Control (0)	0,589 ^(0,019) a	6,67 ^(0,13) a	46,49 ^(1,16) a	4,73 ^(0,16) a
160	0,553 ^(0,007) a	6,22 ^(0,20) a	28,28 ^(2,05) b	4,66 ^(0,18) a
180	0,525 ^(0,012) a	5,76 ^(0,60) a	31,47 ^(1,59) b	4,43 ^(0,06) ab
200	0,563 ^(0,019) a	5,66 ^(0,24) a	32,03 ^(1,74) b	3,37 ^(0,14) b

* Las medias seguidas de la misma letra en la columna no difieren estadísticamente entre sí en la prueba de Tukey con una significancia del 5%. Desviación estándar entre paréntesis.

A continuación se presentan algunos comentarios sobre los resultados presentados.

3.1. Densidad

Los resultados mostraron que los tableros tratados térmicamente tenían baja pérdida de masa, lo que resultaba en un tablero de masa específico equivalente al control. Los valores obtenidos en este experimento para cada tratamiento se muestran gráficamente en la Figura 2.

La diferencia en los resultados para cada tipo de tratamiento se asoció principalmente con la heterogeneidad de las láminas, específicamente en relación con la variación en su espesor y constitución anatómica, que superpuso la termodegradación. La densidad de los tableros producidos en el trabajo varió de 0.469 a 0.705 g / cm³ utilizando maderas del mismo lote, una variación de más del 50%.

Benjamin (2002) explica que es común verificar esta variabilidad en la densidad de las piezas de madera tomadas del mismo lote e incluso del mismo árbol debido a sus



características anatómicas como proporción relativa entre madera juvenil y adulta, temprana y tardía, duramen y albura y el lugar de origen.

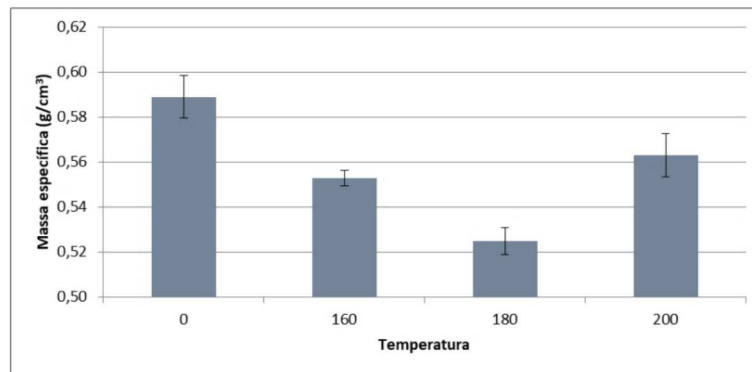


Figura 2: Valores medios de densidad para cada tratamiento.

Resultados similares fueron encontrados por Brito et al. (2006) donde se estudió la termorrectificación en madera de *Eucalipto grandis* a temperaturas de 120 ° C, 140 ° C, 160 ° C, 180 ° C y 200 ° C. En el estudio no se detectó ninguna influencia significativa del tratamiento sobre la densidad básica de la madera. Lo mismo ocurre en estudios realizados por Ferreira (2017) con el mismo tipo de material (contrachapado) y a las mismas temperaturas utilizadas, donde no se observó, así como este trabajo, influencia significativa del tratamiento térmico en la densidad de los tableros.

Por lo tanto, no se puede afirmar que el tratamiento térmico sea el único responsable del cambio en la densidad, ya que otros factores influyen más significativamente.

3.2. Contenido de humedad

Con respecto a la humedad de equilibrio higroscópico, aunque estadísticamente equivalente a los resultados, se observa una ligera reducción en los valores a medida que aumenta la temperatura, como se observa en la Figura 3.

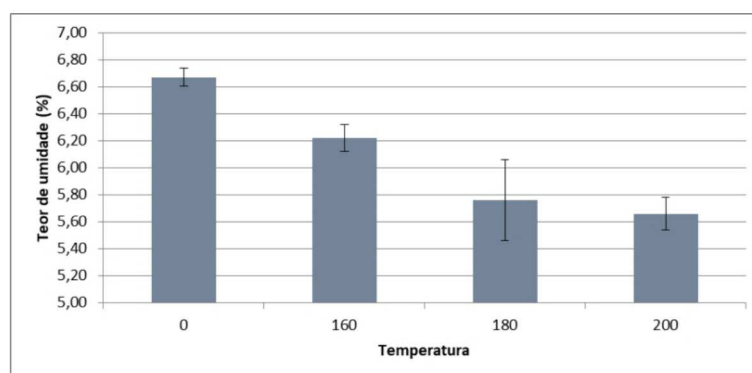


Figura 3: Valores medios de contenido de humedad para cada tratamiento.



La tendencia a la reducción de la humedad es consistente con los estudios realizados por Tjeerdsma y Militz (2005) e Yildiz, Gezer e Yildiz (2006) en el sentido de que la termorrección disminuye la humedad de equilibrio de la madera.

3.3. Absorción de agua

Los resultados mostraron cambios significativos en la absorción de agua para los tableros tratados térmicamente, como se muestra en la Figura 4, siendo que ninguno de los tableros tratados fue estadísticamente equivalente al control en la prueba de Tukey con una significancia del 5%.

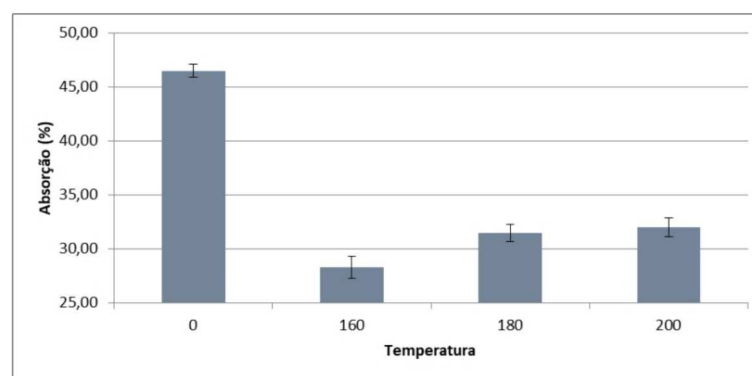


Figura 4: Valores medios de absorción de agua para cada tratamiento.

La reducción en la absorción de agua se explica por la característica hidrofóbica adquirida por la chapa del tratamiento térmico, que según Weiland y Guyonnet (2003) señalaron en sus estudios, la hemicelulosa, además de ser el componente más hidrofílico de la madera, también es el más térmicamente sensible, siendo el primer componente que se destruye en el rango de temperatura trabajado, lo que lleva a la desaparición de los sitios de adsorción de agua (principalmente grupos hidroxilo).

3.4. Hinchamiento en espesor

Los problemas de contracción e hinchazón pueden reducirse minimizando la capacidad de la madera para intercambiar agua con el medio. La Figura 5 representa gráficamente los valores de hinchamiento para los paneles tratados en comparación con el panel no tratado.

En general, se observó que la propiedad de hinchamiento del espesor de los paneles se redujo de acuerdo con el tratamiento térmico, porque como se muestra en la sección anterior, las muestras tratadas térmicamente alcanzaron una humedad de equilibrio con un contenido de humedad menor en comparación con el control, lo que evidencia pérdida higroscopiedad.

En comparación con el panel de control, las reducciones promedio en la hinchazón fueron aproximadamente: 10.15% para la temperatura de 160°C, 20.29% para la temperatura de 180°C y 46.89% para la temperatura de 200°C.

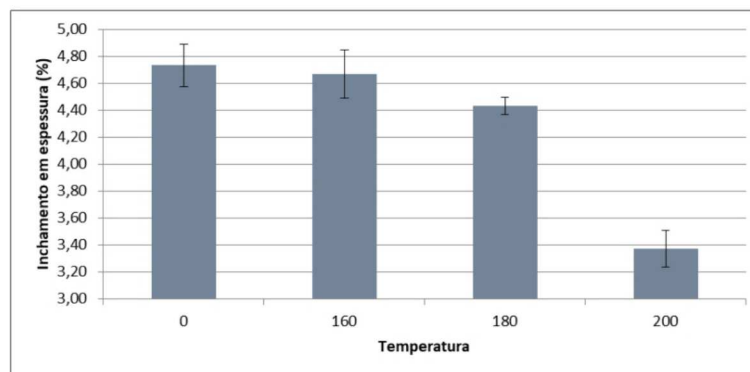


Figura 5: Valores medios de hinchazón de espesor para cada tratamiento.

La mejor estabilidad dimensional se obtuvo para los tratamientos en las temperaturas más altas, con el tablero producido con láminas termo rectificadas a 200 °C que difieren significativamente del panel de control.

Varios estudios relacionaron la higroscopicidad con el tratamiento térmico, entre los cuales podemos mencionar Brito et. al (2006), Esteves; Graça y Pereira (2008) y Kartal y Hwang e Imamura (2007), de modo que cuanto mayor es la temperatura del tratamiento térmico, menor es su capacidad de absorción de agua y, en consecuencia, menor es su variación dimensional.

La menor variación en la estabilidad dimensional de la pieza permite obtener un producto con mayor calidad y valor agregado, permitiendo su uso en situaciones previamente descartadas.

4. CONCLUSIONES

El estudio de contrachapados hechos de láminas tratadas térmicamente y resina de poliuretano a base de ricino fue interesante en vista de la comprensión de su rendimiento físico para su uso general.

Los resultados muestran que la termorrectificación de las láminas no produce un cambio significativo en la masa específica y el contenido de humedad, aunque en relación con este último sus valores parecen reducir a medida que aumenta la temperatura de termorrectificación.

La pérdida de higroscopicidad del tablero producido con láminas tratadas térmicamente permite un producto con mejor estabilidad dimensional, que absorbe menos agua, lo que lleva a la conclusión de que la termorrectificación es una alternativa viable para mejorar estas propiedades.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el CNPq (Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico), por el financiamiento al desarrollo del trabajo – Processo: 425102/2016-5. Los autores también están agradecidos por la donación de láminas por parte de la empresa Miraluz - Industria e Comercio de Madeiras Ltda., productora de tablero contrachapado en el municipio de Sengés/PR, Brasil.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo, S. O.; Vital, B. R.; Mendoza, Z. M. S. H.; Vieira, T. S.; Carneiro, A. C. O. (2012) Propriedades de madeiras termorretificadas de *Eucalyptus grandis* e SP. *Sci. For.*, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 327-336.

Benjamim, C.A. (2002) Comparação entre três critérios de amostragem para a avaliação da densidade básica da madeira de florestas implantadas de eucaliptos. 2002. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu.

Brito, J.O. et al (2006). Densidade básica e retrabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorretificação. *Cerne*, Lavras, v. 12, n. 2, p 182-188.

Campos, C. I.; Morais, R. D. V.; Nascimento, M. (2009). Caracterização físico-mecânica de painéis de madeira compensada produzidos com *Pinus* sp. e resina poliuretana bi-componente. *Revista Madeira, Arquitetura & Engenharia*, São Carlos, ano 10, n.24, p. 37-50.

Esteves, B.; Graça, J.; Pereira, H. (2008). Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood. *Holzforschung*, v.62, p. 344–351.

Ferreira, B. S.; Campos, C. I.; Rangel, E. C. (2018). Efeito da termorretificação na qualidade de colagem de lâminas de madeira para a produção de compensado. **Ciência Florestal**, [s.l.], v. 28, n. 1, p.274-282.

Kartal, S.P.; Hwang, W.; Imamura, Y. (2007). Water absorption of boron-treated and heat-modified wood. *Journal Wood Science*, v.53, p.454–457.

Poncsák, S. et al (2006). Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). *Wood Science Technology*, v.40, p.647-663.

Poubel, D. S.; Garcia, R. A.; Santos, W. A.; Oliveira, G. L.; Abreu, H. S. (2013). Efeito da termorretificação nas propriedades físicas e químicas da madeira de *Pinus carieba*. *Cerne*, v. 19, n. 3, p. 391–398.

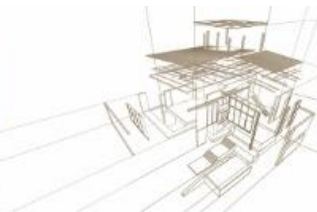
Sernek, M., Boonstra, M., Pizzi, A., Despres, A., and Gerardin, P. (2008). “Bonding performance of heat-treated wood with structural adhesives,” *Holz Roh-Werkst.* 66(3), 173-180.

Tjeerdsma, B. F.; Boonstra, M.; Pizzi, A.; Tekely, P.; Militz, H. (1998). Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Holz als Roh- und Werkstoff*, v. 56, p. 149–153.

Tjeerdsma, B. F.; P. Militz, H. (2005). Chemical changes in hydrothermal treated wood: ftir analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *Holzforschung*, v. 63, p. 102–111, 2005.

Weiland, J. J.; Guyonnet, R (2003). Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. *Holz als Roh- und Werkstoff*, v. 61, p. 216–220.

Yildiz, S.; Gezer, E. D.; Yildiz, U. C. (2006). Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. *Building and Environment*, v. 41, n. 12, p. 1762–1766.



MODELOS GENERALIZADOS ADITIVOS APLICADOS A LA CLASIFICACIÓN VISUAL ESTRUCTURAL DE PINO URUGUAYO

GENERALIZED ADDITIVE MODELS APPLIED TO VISUAL GRADING OF URUGUAYAN PINE

Cardoso, Andrea ^{(1)*}; O'Neill, Hugo ⁽²⁾; Borges, Alejandra ⁽³⁾; Baño, Vanesa ⁽⁴⁾; Moya, Laura ⁽⁵⁾

(1) Mag. Ing. Agr. Centro Universitario de la Región Este. Universidad de la República. Rocha, Uruguay.

(2) Per. Agr. Depto. de Proyectos Forestales, Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Montevideo, Uruguay

(3) Mag. Ing. Agr. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

(4) Dra. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

(5) PhD. Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay. Montevideo, Uruguay

* Contacto: andrea10del85@gmail.com

Resumen

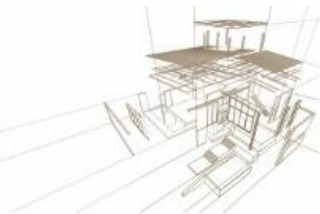
En las últimas tres décadas, se ha incrementado la disponibilidad de madera aserrada uruguaya proveniente de plantaciones de rápido crecimiento. Parte de esa madera puede tener potencial uso estructural en la medida que cuente con especificaciones técnicas conocidas, usualmente estimadas mediante metodologías de clasificación no destructivas. Este trabajo plantea el diseño de un método de clasificación visual estructural para madera aserrada de pino proveniente de plantaciones de rápido crecimiento del noreste de Uruguay. Para ello se evaluaron dos muestras de madera procedentes de plantaciones comerciales, una de *Pinus taeda* de 14 años, y otra de *P. elliottii* de 27 años. Sobre 233 piezas de tamaño estructural se midió una serie de variables visuales. Posteriormente las piezas se ensayaron a flexión estática según EN 408 determinándose la resistencia y la rigidez de flexión, y la densidad. Se aplicaron Modelos Generalizados Aditivos para determinar las variables visuales significativas en la predicción del módulo de elasticidad. Número de anillos de crecimiento, diámetro de nudo, torcedura y encorvadura, resultaron ser las variables relevantes en la predicción del módulo de elasticidad. Se definieron dos calidades visuales: EC7 con propiedades que permiten su asignación a la clase de resistencia C14 de EN 338, y EC5 con propiedades físicas y mecánicas inferiores ($E_0=5458$ MPa; $E_{0,k}=3563$ MPa; $f_{m,k}=12$ MPa; $\rho_k=0,317$ g/cm³).

Palabras-clave: madera estructural, flexión estática, anillos de crecimiento, calidades visuales

Abstract

The promotion of fast-growing plantations in the last thirty years has led to an increase in the availability of Uruguayan sawn timber. Part of this timber could be used for structural applications, if the timber is graded and its structural properties are known. Visual grading is one of the most popular used methods. This paper presents the design of a structural visual grading method for Uruguayan sawn pine timber from fast growing plantations. Two samples from two commercial plantations in northeastern Uruguay were evaluated: one from 14 years old *Pinus taeda*, and a second from 27 years old *P. elliottii*. A series of visual variables was measured on 233 structural size beams. The beams were then tested in static bending according to EN 408, for strength and stiffness, and density determination. A Generalized Additive Model was used to define the relevant variables for the modulus of elasticity prediction. Number of growth rings, knot diameter, and warp were the most relevant variables in the prediction of modulus of elasticity. A structural visual grade EC7 with properties similar to those of C14 strength class (EN 334), and a visual grade EC5 with lower physical and mechanical properties ($E_0=5458$ MPa; $E_{0,k}=3563$ MPa; $f_{m,k}=12$ MPa; $\rho_k=0.317$ g/cm³) were defined.

Keywords: structural timber, static bending, strength, growth rings, visual grades.



1. INTRODUCCIÓN

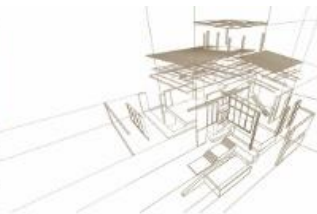
En Uruguay la superficie efectiva forestada es de 990.030 hectáreas, de las cuales 26% está plantada principalmente con especies de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* (MGAP 2012). El 72% de la superficie ocupada por estas plantaciones, está ubicada al noreste del país entre los departamentos de Rivera y Tacuarembó (MGAP 2012), donde además se encuentran instaladas las principales industrias de transformación mecánica de pino. Para el período 2010-2030, Dieste (2012) estimó en 3 millones de m³ la oferta anual de madera de pino proveniente de la zona norte del país con este destino, de los cuales 1,3 millones de m³/año quedan sin capacidad instalada de industrialización. MGAP (2016) presentó resultados similares, donde la tasa de crecimiento promedio de la producción de madera aserrada de coníferas para el período 2010-2015 fue de 1,7 millones m³/año.

En comparación con otras zonas de Uruguay, la región noreste se caracteriza por presentar mayores precipitaciones y mejor distribuidas (1200-1300 mm promedio anuales), mayor radiación solar incidente, factores que aceleran el crecimiento de las plantaciones de *P. elliottii* y *P. taeda* (Brussoni y Cabris 2006). Como consecuencia, la madera de estas plantaciones se cosecha a edades tempranas: entre 10-15 años se comercializa la madera obtenida de los raleos y, no superando en general los 20-25 años la madera cosechada al turno final. Varios autores indican que el mayor porcentaje de madera juvenil se desarrolla desde los 5 o 10 años hasta los 20 años en las coníferas (Green *et al.* 1999; Tuset y Durán 2008). La madera de pino con mayor porcentaje de madera juvenil, entre otras, es la causa principal de los valores bajos de las propiedades físicas y mecánicas de estas especies (Moya *et al.* 2015). En relación a las especies de coníferas más plantadas, no se han encontrado diferencias significativas de los valores de las propiedades físicas y mecánicas entre *P. taeda* y *P. elliottii* de plantaciones uruguayas (O'Neill *et al.* 2004; O'Neill y Tarigo 2008). Es usual encontrar en el mercado madera con la misma denominación, que pertenecen indistintamente a una especie u otra (Baño *et al.* 2015; Moya *et al.* 2015) razón fundamental por la que se estudian juntas.

La clasificación visual estructural asigna a cada pieza una calidad visual asociada a sus propiedades físicas y mecánicas según ciertos parámetros visuales. Los parámetros relacionados con la velocidad de crecimiento de los árboles, las nudosidades y alabeos, entre otros, influyen sobre estas propiedades y en particular sobre su rigidez (Moya *et al.* 2015), propiedad fundamental para el diseño estructural (Moore 2012).

La técnica estadística de Modelos Generalizados Aditivos (MGA) propuesta por Hastie y Tibishirani (James *et al.* 2013) permite predecir los valores de una propiedad, por ejemplo del módulo de elasticidad longitudinal (E_0), a partir de varias variables independientes continuas o categóricas, sin restricciones de normalidad u homocedasticidad de sus residuos, a diferencia de las técnicas comúnmente usadas en clasificación visual estructural, como las regresiones lineales simples o múltiples (James *et al.* 2013; Yee y Mitchell 1991). Estudios realizados por el autor (Cardoso *et al.* 2018) muestran que la técnica de MGA permite obtener un modelo adecuado para predecir E_0 de la madera de pino uruguayo.

En Uruguay se han realizado varios estudios de caracterización de madera de pino proveniente de diferentes zonas del país (Pérez Favaro *et al.* 2000; Pérez del Castillo 2001; O'Neill *et al.* 2002; O'Neill *et al.* 2003; O'Neill y Tarigo 2003; Pérez del Castillo y Venturino 2003; O'Neill *et al.* 2004; O'Neill y Tarigo 2008), así como también se ha estudiado la influencia de los parámetros visuales sobre las propiedades físicas y mecánicas, buscando asignarle una calidad visual estructural a la madera de pino nacional (Baño *et al.* 2015; Moya *et al.* 2015; Moya *et al.* 2017). En 2015, se publicó un informe (Baño *et al.* 2015) que incluye documentación técnica para generar un cuerpo normativo nacional sobre madera estructural. En ese informe se argumentan las ventajas para Uruguay de alinearse al cuerpo normativo europeo al que refiere como “consistente y coherente” porque incluye indicaciones técnicas de fabricación de



productos, metodologías de ensayos, interpretación y análisis de resultados, entre otras. Adoptar ese cuerpo normativo permite el ahorro de tiempo destinado a la generación de normas de características similares y su actualización periódica. Finalmente, en 2018, fue aprobada la norma UNIT 1261 de Clasificación visual de madera de pino como resultado de los esfuerzos de estos trabajos. Esta norma provee al usuario de valores característicos para dos clases estructurales, usando como base dos muestreos de madera de *P. elliotii* y *P. taeda* del litoral oeste y sur del Uruguay. En línea con estos estudios se plantea la necesidad de ampliar la base de datos de madera aserrada de pino para mejorar la representatividad de su caracterización. Además, publicaciones previas (Moya *et al.* 2017) indicaron que una regla de clasificación visual para madera de pinos uruguayos que incluya la medición de los anillos de crecimiento, posiblemente mejoraría la predicción de la rigidez de la madera.

El objetivo general de este trabajo fue contribuir con resultados que permitan mejorar las reglas de clasificación visual estructural para madera aserrada de pino uruguayo. Los objetivos específicos incluyeron: i) predecir el módulo de elasticidad longitudinal a partir de los parámetros visuales con mayor influencia en la madera, incluyendo el número de anillos por centímetro; y ii) contribuir en la definición de calidades visuales para la madera estructural de pino uruguayo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó madera proveniente de dos aserraderos ubicados en la zona noreste de Uruguay. Los muestreos se realizaron en el aserradero, en uno se seleccionó madera aserrada de una plantación de 14 años de *Pinus taeda* con manejo silvícola de podas (M1), y en otro, madera de árboles de 27 años de *Pinus elliotii* sin manejo silvícola (M2). La disparidad de edad, procedencia y manejo silvícola es representativa de la oferta de madera en el mercado nacional. Las vigas fueron secadas en horno hasta 12% de contenido de humedad (CH), cepilladas hasta dimensiones promedio finales de 50 mm x150 mm x2800 mm y trasladada al laboratorio del Departamento de Proyectos Forestales del LATU.

Sobre 111 piezas de M1 y 122 piezas de M2, se midió una serie de parámetros visuales que se denominaron en este trabajo como: diámetro de nudo mayor de cara (DCARA), diámetro de nudo mayor de canto (DCANTO), posición de nudo mayor de cara (PDCARA), posición de nudo mayor de canto (PDCANTO), número de anillos de crecimiento por centímetro (NAPCP), orientación de los anillos de crecimiento (TC), presencia y posición de médula (MEDULA), combado (COMB), encorvadura (ENC) y torcedura (TOR). La elección de los parámetros estuvo pautada por la facilidad de su medición en aserradero, y el potencial nivel de asociación entre el parámetro visual y las propiedades de flexión, o la densidad, buscando discriminar por clases. Es importante destacar que en esta selección se incluyeron variables que dependen mayoritariamente de las propiedades físico-mecánicas de la madera, y variables relacionadas con los procesos de secado, tales como los alabeos.

La forma de medición de los parámetros se basó preliminarmente en la norma de clasificación visual UNE EN 1310 (1997). Algunas variables como la posición de los nudos, la orientación de los anillos y el número de anillos de crecimiento fueron medidas como se indica a continuación: PDCARA y PDCANTO refieren a la posición del nudo en relación al largo de la pieza dividida en tercios, TC es la disposición predominante de los anillos respecto a la cara de la pieza y NAPCP es el número de anillos completos (leños temprano y tardío) medidos sobre el segmento de recta más largo que siendo perpendicular a los anillos pasa por la médula en caso de estar presente, o por el centro de la sección transversal.

Luego de clasificadas, las 233 vigas fueron ensayadas a flexión estática en cuatro puntos de acuerdo a EN 408 (2011) en máquina universal Minebea con una celda de carga de 250 kN y



con capacidad para aplicar cargas a velocidad constante. Para cada viga se determinó el módulo de elasticidad longitudinal (E_0) y la resistencia a flexión (f_m). Luego de finalizado el ensayo, de cada viga se extrajo una probeta para estimar la densidad aparente corriente (ρ) y el CH. Los valores E_0 , f_m y ρ fueron calculados según EN 384 (2010b) para cada uno de los muestreos, realizando las correcciones por CH correspondientes para las variables E_0 y ρ .

2.1. Análisis de datos

2.1.1. Modelo de predicción del módulo de elasticidad

Se utilizaron Modelos Generalizados Aditivos (MGA) para predecir el módulo de elasticidad. Las variables incluidas en el modelo como regresoras fueron las que resultaron significativas en la predicción de E_0 (p-valor $<0,05$). Como indicadores de la capacidad de predicción del modelo se utilizó el porcentaje de variabilidad explicada (%VE) por el modelo y el porcentaje de error de predicción (%EP) por muestra de prueba respecto a E_0 medio. El %VE indica el porcentaje de variabilidad que puede ser explicada por el modelo a partir de los datos en estudio; por tanto se considerará mejor cuanto más cercano sea el valor a 100%. El %EP cuantifica el error de predicción al clasificar una nueva pieza. Para el cálculo del error se tomó al azar una sub-muestra compuesta por dos tercios del total de las piezas en estudio, denominada muestra de entrenamiento, a partir de la cual se ajustó el modelo de predicción. El tercio restante se usó para evaluar las diferencias entre los valores reales y los predichos a partir del modelo ajustado. Esta operación de sub-muestreo se repitió cincuenta veces sobre el total de las piezas y el error de predicción fue calculado en cada repetición. El promedio de estos errores es el error por muestra de prueba promedio, que se indicó como un porcentaje de la media de E_0 .

Para el análisis de datos se utilizó el paquete de análisis *mgcv* (Wood 2011) del software R (R Core Team 2014). El resultado del MGA devuelve gráficos de curvas de nivel o de contorno, donde los valores de las variables visuales que resultaron significativas (p-valor $<0,05$) están representadas de a pares sobre los ejes, y los valores de E_0 predichos sobre curvas de contorno. El valor de rigidez para la clase resistente inferior, C14 de EN 338 (2010a) es de 7000 MPa. En base a las salidas gráficas de MGA y considerando el %EP del modelo, se obtuvieron los rangos de valores de las variables visuales significativas que predicen un valor de E_0 superior a 7000 MPa.

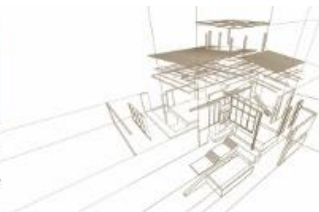
2.1.2. Formulación de la propuesta de clasificación visual

Utilizando estos rangos, se analizaron todas las posibles combinaciones de valores de las variables visuales teniendo en cuenta los requisitos de EN 384 (2010b), y se seleccionó una combinación de variables visuales que presentó valores medios y característicos de E_0 , f_m y ρ que alcanzó las propiedades asociadas a una clase de resistencia de EN 338 (2010a). Se calculó el porcentaje de rechazo de piezas que no alcanzaron ésta clase de resistencia. A partir de la combinación de variables seleccionadas, se formuló la propuesta de clasificación visual estructural. Vale señalar que en este trabajo no se utilizó la versión actual de EN 384:2016 porque el análisis de los datos fue realizado previo a la publicación de dicha norma.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Modelos de predicción del módulo de elasticidad

De la aplicación de MGA para la predicción de E_0 a partir de los parámetros visuales, las variables que resultaron seleccionadas fueron: NAPCP, TOR, ENC, DCANTO y DCARA. A



pesar que las variables TOR y ENC están más relacionadas con los procesos de secado de la madera que con las propiedades mecánicas, en este modelo son seleccionadas como variables explicativas del módulo de elasticidad y se mantienen con el fin de describir la variabilidad y discriminar clases.

Este modelo presentó %VE de 54%, y el %EP respecto a E_0 medio fue de 21% (1295 MPa). Estos resultados son similares a los reportados por Hermoso *et al.* (2007) que encontró un coeficiente de determinación de 41,5% para explicar la variabilidad del módulo de elasticidad a flexión para madera de *Pinus radiata* del País vasco (España) a partir de la densidad y nudosidad.

A partir de los gráficos de contorno del modelo, se definieron los posibles rangos de valores de las variables visuales que predicen en conjunto un grupo de vigas con $E_{0,m} \geq 7000 \pm 1295$ MPa. Para la variable NAPCP se estima que será algún valor entre 0,5 y 1,0 anillos/cm, para la variable DCARA entre 20 y 40%, DCANTO entre 40 y 70%, ENC entre 3 y 11 mm en 2 m de largo y TOR entre 6 y 10 mm en 150 mm de ancho y 2 m de largo.

El rango para los anillos de crecimiento por centímetro es inferior a los valores indicados en la normativa española UNE 56544 (2011), que señala los límites dependiendo de la especie desde 1,0 a 2,2 anillos por centímetro. Valores similares a los propuestos por el modelo son los que adopta la normativa argentina IRAM 9662-3 (2005) de clasificación visual para *P. elliottii* y *P. taeda*, donde el límite se fijó entre 0,5 a 1,0 anillos por centímetro según la clase. En relación al rango de valores de DCARA y DCANTO los valores son similares a los propuestos por la norma española y argentina. En UNE 56544 (2011) se presenta 20 y 50% para nudo de cara, y 50 y 66% para nudo de canto, según la clase de la pieza. En la norma IRAM 9662-3 (2005), se presenta 33% y 66% como límites de las nudosidades según la clase. El rango de valores de torcedura y encorvadura obtenidos en este estudio, resultó más exigente que el indicado en la norma argentina, que fija 12 mm como límite para ambas clases y deformaciones. En cambio fueron similares a los indicados por la norma española, que señala 8 - 12 mm para la encorvadura y 6 - 12 mm para la torcedura, según la clase.

3.2. Formulación de la propuesta de clasificación visual

Se analizó una serie de combinaciones de variables visuales, utilizando los rangos obtenidos en la sección anterior y considerando los requerimientos indicados en EN 384 (2010b). La combinación de variables visuales que resultó con mayores propiedades mecánicas quedó determinada por valores de vigas con NAPCP > 0,7 anillos/cm, DCARA < 30%, DCANTO < 70%, TOR < 8 mm en 150 mm de ancho y 2 m de largo y ENC < 9 mm en 2 m de largo.

A partir de éste resultado se propone una calidad visual denominada EC7, cuyas propiedades indicadas en la Tabla 1, permiten asignarla a la clase de resistencia C14 de EN 338 (2010a).

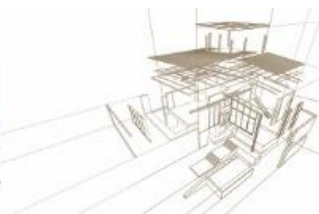
Tabla 1: Módulo de elasticidad medio y característico, resistencia y densidad característica de ambos muestreos asociadas a la calidad visual EC7.

	n^1	$E_{0,m}^2$ [MPa]	$E_{0,k}^3$ [MPa]	$f_{m,k}^4$ [MPa]	ρ_k^5 [g/cm ³]
M1	46	6138	4398	17	0,302
M2	51	8136	5183	18	0,337
Población	97	7189	4811	15	0,320

¹número de vigas clasificadas

²módulo de elasticidad medio. ^{3,4,5}valores característicos de módulo de elasticidad, resistencia y densidad aparente corriente respectivamente.

⁴para los valores por muestreo, $f_{m,k}$ se corrigió por altura ($kh=1$). En los totales, $f_{m,k}$ se corrigió por número y tamaño de la muestra ($ks=0,85$) y por tipo de clasificación ($kv=1$).



El porcentaje de piezas rechazadas de *M1* y *M2* fue de 62% y 54%, respectivamente. Similares resultados se reportaron en Baño *et al.* (2015), donde el porcentaje de rechazo fue de 71% y 50% para dos muestreos de 15 y 25 años de *Pinus elliottii/taeda* del suroeste y litoral de Uruguay, respectivamente. Se evidencia que la madera de pino proveniente de árboles con edad de corte de 14-15 años presenta propiedades físicas y mecánicas inferiores que la madera de edades mayores (25-27 años). Se recomienda estudiar edades intermedias buscando conocer las rotaciones óptimas para obtener madera estructural.

Fank *et al.* (2016) aplicando normativa de clasificación visual de su país reportó un porcentaje de rechazo de 33% para dos muestreos de 27 y 30 años de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* respectivamente de Misiones (Argentina), 25% más bajo que el obtenido en nuestro estudio. Otro trabajo de *Pinus radiata* del norte de España que aplicó la norma UNE 56544:2005, obtuvo un 37% de rechazo para vigas clasificadas (Hermoso *et al.* 2007).

Un 58% de las piezas de la base de datos no alcanzaron la calidad visual propuesta EC7, entonces se propone otra calidad visual que reduzca éste porcentaje de rechazo total, y permita un mejor aprovechamiento de la madera aserrada de pino disponible en el país para usos menos exigentes. Moya *et al.* (2015) definieron una categoría “E5” que refiere al valor de elasticidad medio (5000 MPa) para un grupo de piezas de madera de *P. elliottii/taeda* de edades similares que no alcanzó la clase de resistencia mínima de la norma europea EN 338 (2010a) pero que pueden utilizarse por ejemplo como pie derecho en una estructura de bajas solicitaciones. A nivel nacional también, Baño *et al.* (2016) sugir el uso de madera con propiedades físicas y mecánicas inferiores a EC7 como materia prima en la producción de madera contralaminada (CLT). Otros países como Nueva Zelanda, presenta en su normativa NZS 3603:1993 clases de resistencia en seco para estructuras con menores solicitaciones. El grado estructural “SG6” o “MSG6” que requiere una resistencia característica a flexión de 10 MPa y una rigidez media a flexión de 6000 MPa corresponde a madera que puede ser utilizada por ejemplo en muros de cargas bajas o correas de cerchas (Moore 2012). La normativa chilena NCh 1198 (2006) para las especies de pino cultivadas en ese país (excepto *Pinus radiata*), también presenta clases de resistencia para estructuras de menores solicitaciones. Por ejemplo “F4” y “F5” que admiten un módulo de elasticidad medio de 5000 MPa y 5500 MPa respectivamente.

Siguiendo la misma metodología usada para definir la calidad visual EC7, se analizaron nuevamente los resultados del MGA, buscando valores de las variables visuales que predigan $E_{0,m} = 5000$ MPa con un error de predicción de ± 1295 MPa. Se obtuvo una restricción para NAPCP $\geq 0,5$ anillos/cm, se mantuvieron los rangos de valores posibles para DCARA entre 20% - 40% y para DCANTO entre 40% - 70%. No encontrándose restricciones para TOR y ENC.

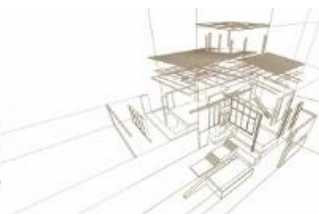
Utilizando estas nuevas restricciones para NAPCP, DCARA y DCANTO, se analiza una serie de combinaciones de valores de estas tres variables visuales buscando obtener el menor rechazo posible y se define una calidad visual EC5. La calidad visual EC5 quedo restringida a las piezas con NAPCP $\geq 0,5$ anillos/cm, DCARA $\leq 50\%$ y DCANTO $\leq 70\%$. En la Tabla 2 se presentan las propiedades físicas y mecánicas asociadas a EC5.

Tabla 2: Módulo de elasticidad medio y característico, resistencia y densidad característica de ambos muestreos asociadas a la calidad visual EC5.

	n ¹	$E_{0,m}$ ² [MPa]	$E_{0,k}$ ³ [MPa]	f_{mk} ⁴ [MPa]	ρ_k ⁵ [g/cm ³]
<i>M1</i>	59	5287	3765	16	0,305
<i>M2</i>	40	5709	3263	11	0,336
Población	99	5458	3563	12	0,317

¹ número de vigas clasificadas

² módulo de elasticidad medio.



^{3,4,5} valores característicos de módulo de elasticidad, resistencia y densidad aparente corriente respectivamente.

⁴ para los valores por muestreo, $f_{m,k}$ se corrigió por altura ($kh=1$). En los totales, $f_{m,k}$ se corrigió por número y tamaño de la muestra ($k_s=0,85$) y por tipo de clasificación ($k_v=1$).

Fue posible reducir el porcentaje de rechazo total de 58% a 16%. El porcentaje de rechazo para *M1* y *M2* fue de 14% y 18%, respectivamente.

A partir de los resultados de este estudio se formuló la propuesta de clasificación visual estructural para *Pinus elliottii/taeda* del noreste de Uruguay (Tabla 3), que incluye los límites de las variables visuales obtenidas para las clases de resistencia EC7 y EC5. Además, en la propuesta se incluyen límites para las singularidades: grietas y rajaduras, bolsillos de resina, corteza, arista faltante y alteraciones biológicas tomados de la norma española UNE 56544.

Tabla 3: Propuesta de clasificación visual estructural para *Pinus elliottii/taeda* del noreste de Uruguay.

Variable visual	EC7	EC5
Diámetro de nudo mayor de cara (%)	< 1/3 h (30%)	< 1/2 h (50%)
Diámetro de nudo mayor de canto (%)	< 2/3 h (70%)	
Número de anillos por centímetro	> 0,7 anillos/cm	> 0,5 anillos/cm
Médula	Se admite	
<u>Alabeos:</u>	Sin restricciones	
Combado	< 15 mm (*)	
Encorvadura	< 9 mm (*)	
Torcedura	< 8 mm (**)	
Grietas y rajaduras	< 1,0 m o < 1/4 l (***)	
Bolsillo de resina	< 1,5 h (***)	
Corteza	< 1,5 h (***)	
Arista faltante	< 1/3 l (***)	
<u>Alteraciones biológicas:</u>		
Pudriciones	No se admite (***)	
Mancha azul	Se admite (***)	
Orificios de insectos	No se admite (***)	

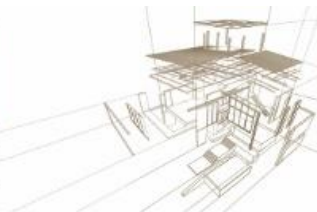
EC7 es la calidad visual asociada a las propiedades físico-mecánicas $E_0=7189$ MPa; $E_{0,k}=4811$ MPa; $f_{m,k}=15$ MPa; $\rho_k=0,320$ g/cm³; EC5 es la calidad visual asociada a las propiedades $E_0=5458$ MPa; $E_{0,k}=3563$ MPa; $f_{m,k}=12$ MPa; $\rho_k=0,317$ g/cm³

(*) en 2 m de largo (l); (**) en 150 mm de altura (h) en 2 m de largo; (***) Tomado de la norma española UNE 56544 (2011). Las piezas deben clasificarse en seco (contenido de humedad = 12%), de dimensiones $h=150$ mm y $l=2,8$ m.

4. CONCLUSIONES

Se definió una calidad visual EC7 asociada a la clase de resistencia C14 de EN 338 (2010a). Adicionalmente, se estableció otra calidad visual EC5 con propiedades físicas y mecánicas inferiores ($E_{0,m}=5458$ MPa, $f_{m,k}=12$ MPa, $\rho_k=0,317$ g/cm³) que puede ser empleada como pie derecho en construcciones de bajo compromiso estructural o como materia prima para producir madera contralaminada.

El número de anillos de crecimiento por centímetro fue una variable visual importante que resultó estar muy relacionada con E_0 , pero no fue suficiente para definir una calidad visual estructural. Fue necesario considerar también el tamaño de los nudos y los alabeos, particularmente torcedura y encorvadura.



La madera proveniente de plantaciones de mayor edad (27 años) presentó mayores valores de propiedades físicas y mecánicas, y menores porcentajes de rechazo que la madera de menor edad (14 años). Por ello se recomienda continuar los estudios sobre madera de pino con destino estructural de ciclos de corte mayores a 25 años.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer especialmente a la Dirección Nacional de Industrias de Ministerio de Industria Energía y Minería de Uruguay (Proyecto 1318/011) por proveer los fondos para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asociación Española de Normalización. (1997). Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de las singularidades. UNE EN 1310. AENOR, Madrid, España.

Asociación Española de Normalización. (2011). Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. UNE 56544. AENOR, Madrid.

Baño, V.; Godoy, D.; Vega, A. (2016). Experimental and numerical evaluation of cross-laminated timber (CLT) panels produced with pine timber from thinnings in Uruguay. World Conference on Timber Engineering, Vienna.

Baño, V.; Moya, L.; O'Neill, H.; Cardoso, A.; Cagno, M.; Cetrangolo, G.; Domenech, L. (2015). Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera. Informe final. Facultad de Ingeniería, Montevideo. ISBN 978-9974-0-1344-5

Brussoni, A.; Cabris, J. (2006). Regímenes silvícolas y retorno financiero para *Pinus taeda* en las zonas litoral oeste y noreste de Uruguay. Agrociencia Uruguay v. 10, n. 2, p. 125-135.

Cardoso, A.; Moya, L.; Borges, A. (2018). Prediction of bending stiffness of Uruguayan loblolly and slash pine timber applying different statistics techniques. BioResources v. 14, n. 4, p. 755 – 768.

Comité Europeo de Normalización. (2010a). Madera estructural. Clases resistentes. EN 338. CEN, Bruselas.

Comité Europeo de Normalización. (2010b). Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. EN 384. CEN, Bruselas.

Comité Europeo de Normalización. (2011). Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. EN 408. CEN, Bruselas.

Dieste A. (2012). Programa de promoción de exportaciones de productos de madera. [Disponible en línea]. http://gp.gub.uy/sites/default/files/documentos/programa_de_promocion_de_exportaciones_de_productos_de_madera_-_informe_preliminar_andres_dieste_-_2012.pdf [acceso Agosto 2014]

Fank, P.Y.; Stefani, P.M.; Piter, J.C. (2016). Análisis de la relación entre las propiedades mecánicas de flexión y tracción paralela a las fibras en la madera de pino resinoso cultivado en el nordeste de Argentina. XV EBRAMEM. Curitiba, Brasil.

Green, D.W.; Winandy, J. E.; Kretschmann, D. E. (1999). Mechanical properties of wood. Capítulo 4. Wood handbook. Wood as an engineering material. Forest Products Society, USA.



Hermoso, E.; Carballo, J.; Fernández-Golfín, J.I. (2007). Caracterización estructural de la madera de *Pinus radiata* D. Don del país vasco (España) acorde a las modificaciones normativas. *Maderas. Ciencia y tecnología* v. 9, n. 3, p. 223 – 232.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2005). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y *elliottii* (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*). IRAM 9662-3. IRAM, Argentina.

Instituto Nacional de Normalización. (2006). Madera. Construcciones en madera. Cálculo. NCh 1198. INN, Chile.

James, G.; Witten, D.; Hastie, T.; Tibshirani, R. (2013). An introduction to statistical learning with application to R. Springer, New York.

Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. (2012). [Disponible en línea] <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,dgf,dgf-cartografia-forestal-2012,O,es,0>, [acceso setiembre 2016]

Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. (2016). [Disponible en línea] <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,dgf,dgf-extraccion-produccion-consumo,O,es,0>, [acceso setiembre 2016]

Moore, J. (2012). Growing fit-for-purpose structural timber. What is the target and how do we get there? *New Zealand Journal of Forestry* v. 57, n. 3, p. 17-24.

Moya, L.; Cardoso, A.; Cagno, M.; O'Neill, H. (2015). Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. *Maderas. Ciencia y Tecnología*. v. 17, n. 3, p. 597 – 612.

Moya, L.; Domenech, L.; Cardoso, A.; O'Neill, H.; Baño, V. (2017). Proposal of visual strength grading rules for Uruguay pine timber. *European Journal of wood and wood products* v. 75, p. 1017 – 1019.

O'Neill H., Tarigo F., Trambauer C. (2002). Propiedades mecánicas de *Pinus elliottii* Eng. del litoral de Uruguay. Informe 1. Grupo técnico de madera aserrada de pino GT3. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 41 pp.

O'Neill H., Tarigo F., Trambauer C. (2003). Propiedades mecánicas de *Pinus taeda* L. del litoral de Uruguay. Informe 2. Grupo técnico de madera aserrada de pino GT3. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 47 pp.

O'Neill, H.; Tarigo, F. (2003). Comportamiento en flexión de *E. grandis*, *P. taeda* y *P. elliottii* de madera de tamaño real y de pequeñas probetas sin defectos. Nota técnica. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 6 pp.

O'Neill, H.; Tarigo, F.; Iraola, P. (2004). Propiedades mecánicas de *Pinus taeda* L. del norte de Uruguay. Informe3. Grupo técnico de madera aserrada de pino GT3. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 48 pp.

O'Neill, H.; Tarigo, F. (2008). Propiedades mecánicas de *Pinus elliottii* Eng.del norte de Uruguay. Informe7. Grupo técnico de madera aserrada de pino GT3. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 42 pp.

Pérez del Castillo A. (2001). Módulo de elasticidad y módulo de rotura en tablas de tamaño real de *Pinus elliottii* del sur del Uruguay. Informe 7. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 29 pp.



Pérez del Castillo A.; Venturino A. (2003). Inspección visual de tablas de tamaño real de *E. grandis*, *P. taeda* y *P. elliottii* de diferentes sitios del Uruguay. Informe 15. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 28 pp.

Pérez Favaro A.; De Castro R.; Otha S. (2000). Ensayos de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos. Informe 1. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo, 24 pp.

R Core Team. (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>

Tuset, R.; Durán, F. (2008). Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. Edición 2. Hemisferio Sur, Buenos Aires.

Wood, S. (2011). Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society (B)* v. 73, n. 1, p. 3-36.

Yee, T.W.; Mitchell, N.D. 1991. Generalized additive models in plant ecology. *Journal of Vegetation Science* v. 2, p. 587 – 602.



USO DO ULTRASON NAS FACES RADIAL E TANGENCIAL DA MADEIRA DE FREIJÓ (*Cordia goeldiana* Huber)

ULTRASOUND ON RADIAL AND TANGENTIAL FACES OF FREIJÓ WOOD (*Cordia goeldiana* Huber)

Adrianna Amorim de Sousa Pinto^{1*}, Joaquim Carlos Gonzalez², Niliane Pereira Campos², Alexandre Florian da Costa², Mirian de Almeida Costa², Myla Medeiros Fortes².

¹Master en Ciencias forestales. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil

²Universidade de Brasília. Brasília, Brasil

* Contacto: adriannamorim@gmail.com

Resumen

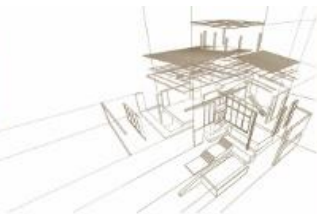
El objetivo del presente trabajo fue estimar los módulos de elasticidad dinámica (MOEd) y módulo de elasticidad estática (MOE) de la madera de freijó (*Cordia goeldiana* Huber) por medio de pruebas no destructivas y pruebas destructivas. Fueron fabricadas 14 las muestras, con dimensiones de 2 x 2 x 30 cm. Se realizó pruebas convencionales (flexión estática) y no destructivas (ultrasonido). La densidad media obtenida fue de 0,56 g/cm³. El valor promedio obtenido de la MOEd a través de la ecografía para la especie en estudio fue superior a la MOE estática, 16685,38 MP y 9194,30 MPa respectivamente. El coeficiente de variación de la MOEd fue 11,05%, y el coeficiente de variación de la MOE (flexión estática) fue de 15,04%, de esta manera reveló menos variabilidad el método no destructivo comparado con el destructivo. El valor medio obtenido de propagación de la onda fue de 5505,82 m/s, el trabajo mostró una fuerte correlación entre la velocidad de propagación de la onda (VEL) y el módulo dinámico de elasticidad (MOEd) especies con valor de 0,8887. Se encontró que la correlación entre las variables MOEd y de la MOE fue muy baja, ya que el coeficiente obtuvo un valor de 0,3067. El método de ondas de ultrasonoras constituye un importante instrumento no destructivo para determinar el módulo de elasticidad de la madera. El método no destructivo y la comparación con el destructivo mostraron menor variabilidad. El análisis realizado en este trabajo demostró la necesidad de una mayor cantidad de muestras, por lo que el muestreo sería más representativo en la especie de estudio.

Palabras-clave: Ondas, no destructivos, Módulo dinámico.

Abstract

The ultrasonic wave method is an important non-destructive instrument to determine the modulus of elasticity of the wood. The present work aimed to estimate the modulus of elasticity (MOE) of Freijó Wood (*Cordia goeldiana* Huber) obtained by destructive and a non-destructive method. USLab ultrasonic equipment with plane faces transducers of 45 kHz were used in fourteen specimens with dimensions of 2 x 2 x 30 cm. To evaluate the sensitivity of the ultrasonic method, the specimens was submitted to destructive conventional static bending tests according to ASTM D143/09 with determination of modulus of elasticity. The mean apparent density obtained for freijó wood was 0,56 g/cm³. The mean value of dynamic MOE (MOEd) obtained with the ultrasound tests was higher than the static MOE, 16685,38 MPa and 9194,30 MPa respectively. The coefficient of variation of MOEd was 11,05%, lower than the coefficient of variation of the static MOE (15,04%), showing lesser variability of the non-destructive method. The mean value of wave propagation speed (VEL) was 5505,82 m/s, and presented a strong correlation with MOEd with a value of 0,8887. It was found a low correlation between the variables MOEd and MOE, presenting a value of 0,3067. The statistical analysis carried out in this work confirmed the necessity of greater number of specimens, so the sampling would be more representative.

Keywords: Waves propagation, non-destructive method, dynamic modulus of elasticity



1. INTRODUCCIÓN

Uno de los métodos prometedores y basado en el principio de la onda mecánica de propagación es a través de la emisión de ondas de ultrasonido, siendo una evaluación no destructiva (Stangerlin et al., 2010). Métodos no destructivos, es posible realizar la caracterización de la madera, sin necesidad de realizar la extracción de muestras, el análisis se hace en el juego, o en el árbol de estructura (Ribeiro et al., 2016).

Se clasifican como ondas de ultrasonido, las ondas acústicas con frecuencias superiores a 20.000 Hz (González; Valle; Costa, 2001). Según los autores el método se basa en el análisis de la propagación de una onda y su dependencia entre la respuesta al ultrasonido y la constante elástica de madera.

El presente trabajo pretende estimar los elasticidad dinámica (MOEd) módulos de elasticidad estático (MOE) de freijó (*Cordia goeldiana* Huber) para ensayos no destructivos y ensayos destructivos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Colección de material

El material utilizado en esta investigación fueron de muestras de madera Freijó (*Cordia goeldiana* Huber). Se hicieron 14 muestras para cada uno, con dimensiones de 2 x 2 x 30 cm. Las pruebas convencionales realizadas fueron flexión y no destructivo prueba (ultrasonido). Los análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de tecnología de la madera en el Departamento de silvicultura en la Universidad de Brasilia.

2.2. Prueba destructiva

En el ultrasonido fue USLab aparatos con una potencia de 700 V, resolución de la 0,1 μ s y transductores de onda longitudinal y sección plana funcionando en la frecuencia de 45 kHz según la figura 1. El equipo fue calibrado y después de la calibración, cada uno de los transductores recibió un gel para ayudar en la adhesión de las muestras.

Se determinó la densidad aparente al 12% por realizar medidas de los lados de la radial, tangenciales y longitudinales y la obtención de la masa de cada cuerpo, ecuación (1).



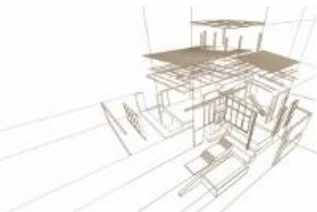
Figura 1: ultrasonido USLab.

$$D_{12\%} = P/Vol \quad (1)$$

$$MOE_{du} = D_{12\%}/Vel^2 \quad (2)$$

Dónde:

D_{12%}: densidad de la muestra a 12% de humedad



(g/ cm³); P= masa de la muestra a 12% de humedad (g);

V= volumen de muestra (cm³);

MOEd = Módulo de elasticidad dinámica (MPa);

VEL = velocidad de onda ultrasónica (m/s).

2.3. Análisis estadístico

Se utilizó estadística descriptiva: máximo, mínimo, desviación estándar y coeficiente de variación. También se realizó correlación para evaluar la correlación entre las variables. El análisis de datos se llevó a cabo en Excel.

3. RESULTADOS

La velocidad obtenida por medio de ultrasonido para la especie freijó tiene valores similares con el citado en la literatura para Del Menezzi et al (2010).

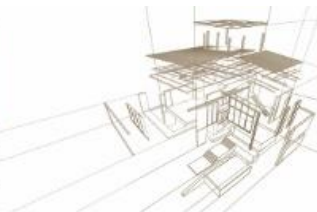
Tabla 1: Valores promedio, densidad, velocidad, módulo elasticidad dinámico, Módulo de elasticidad elástico, obtenidos a través de ultrasonido y flexión

	DENS	VEL	MOEd	MOE
	(g/cm ³)	(m/s)	(MPa)	(MPa)
Média	0,56	5505,82	16685,38	9194,30
Mínimo	0,50	5160,00	15060,76	7432,35
Máximo	0,60	6222,22	22056,58	11552,66
DP	0,03	244,09	1844,39	1382,59
CV (%)	4,97	4,43	11,05	15,04

DENS: Densidad, VEL= Velocidad de propagación de la onda, MOEd= Ecografía dinámica constante elástica, MOE= Módulo de elasticidad, DP= Desviación estándar y CV= Coeficiente de variación.

El valor promedio obtenido de la MOEd a través de la ecografía para la especie en estudio fue superior a la MOE estática, como se señala en la tabla 1. El coeficiente de variación del MOEd fue menor que el coeficiente de variación de la MOE (flexión estática), de esta manera mostrando menos variabilidad del método no destructivo para el destructor.

La correlación entre la prueba de ultrasonido y de flexión se presenta en la tabla 2. El análisis muestra una fuerte correlación entre la velocidad de propagación de la onda (VEL) y el módulo dinámico de elasticidad (MOEd) para las especies estudiadas. Calderon (2012) cuenta con cuatro



especies amazónicas con ultrasonido encontró una alta correlación entre VEL e MOEd como se señaló en este trabajo.

Se encontró que la correlación entre las variables MOEd e MOE fue demasiado bajo, porque el coeficiente encontrado fue 0,3067. La obra presenta una correlación de baja densidad con el MOEd, ya MOE la correlación fue negativa. La densidad de la madera, así como otros elementos anatómicos afectan la transmisión de las ondas (BUCUR, 2006).

La correlación entre la MOEd y MOE no fue significativa a pesar de los dos módulos se han determinado en la misma muestra.

Tabla 2: Correlación entre el ultrasonido y la flexión de la madera de freijó (Cordia goeldiana).

	DENS	VEL	MOEd	MOE
	(g/cm ³)	(m/s)	MPa	MPa
DENS (g/cm ³)	1			
VEL (m/s)	0,0728	1		
MOEd MPa	0,5207	0,8887	1	
MOE MPa	-0,0017	0,3638	0,3067ns	1

DENS: Densidad, VEL= Velocidad de propagación de la onda, MOEd= Ecografía dinámica constante elástica, MOE= Módulo de elasticidad.

4. CONCLUSIONES

El método de ondas de ultrasonoras es un importante instrumento no destructivo, para determinar el módulo de elasticidad de la madera.

Los valores de los coeficientes de variación del módulo dinámico MOEd son menor que el módulo estático de elasticidad MOE y son satisfactoria, así que presenta menos variabilidad del método no destructivo y comparación con los destructivos.

El análisis realizado en este trabajo demostró la necesidad de una mayor cantidad de número de muestras, para que el muestreo más representativo de la especie bajo estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALDERON, C. M. A. (2012). O segmento moveleiro na região do Alto Juruá – AC: Perfil e uso de tecnologias alternativas para a caracterização das principais espécies madeireiras. 158p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília.



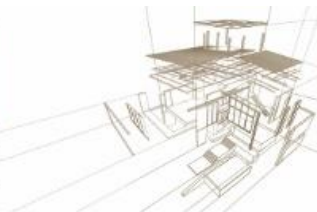
Bucur, V. (2006). *Acoustics of Wood*. 2nd Edition. Springer Series in Wood Science. Printed in Germany. 393p.

Del Menezzi, C. H. S. Del; Silveira, R. R.; Souza, M. R. De. Estimativa das propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras amazônicas por meio da técnica não-destrutiva de ondas de tensão. **Acta Amazônica**, v. 40, n. 2, p. 325–332, 2010.

Gonçalez, J. C.; Valle, A. T.; Costa, A. F. (2001). Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). **Cerne**, v. 7, n. 2, p. 81–92,.

Ribeiro, E. S. et al. (2016). Avaliação de propriedades mecânicas da madeira por meio de métodos destrutivos e não-destrutivos. **Nativa**, v. 4, n. 2, p. 103–106.

Stangerlin, D. M. et al. (2010) Avaliação De Tipos De Ondas Geradas Por Dois Modelos De Transdutores Para Determinação Do Módulo De Elasticidade Dinâmico. **Floresta**, v. 40, n. 4, p. 691–700.



INFLUENCIA DEL ANILLO DE CRECIMIENTO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL PINO RESINOSO ARGENTINO

GROWTH RING INFLUENCE ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ARGENTINEAN RESINOUS PINE

Fank, Pamela ⁽¹⁾; Ramos, M. del Rocío ⁽²⁾; Sosa Zitto, M. Alexandra ⁽¹⁾ *; Piter, Juan Carlos ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Dr., Ing., Investigador, GEMA - Depto. de Ingeniería Civil - Facultad Regional Concepción del Uruguay - Universidad Tecnológica Nacional. Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina.

⁽²⁾ Ing. Civil, Investigador, GEMA, Depto. de Ing. Civil – Facultad Regional Concepción del Uruguay – Universidad Tecnológica Nacional. Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina.

* Contacto: alexandrasosazitto@gmail.com

Resumen

En las coníferas los anillos de crecimiento anual son claramente visibles debido a la diferencia entre madera temprana y tardía. Normalmente a mayor espesor de anillo corresponde una menor densidad y previsiblemente una menor resistencia, sin embargo, esta afirmación no puede ser generalizada para todas las maderas ya que dicho comportamiento depende de la combinación especie/procedencia. Este trabajo presenta los resultados de un estudio orientado a conocer la calidad predictiva de los anillos de crecimiento sobre la resistencia a flexión, rigidez y densidad de la madera aserrada estructural de pino resinoso (*Pinus taeda/elliottii*) cultivado en el nordeste de Argentina. El programa experimental involucró 233 tablas y 225 vigas de diferentes secciones transversales, las primeras fueron flexionadas de plano y las segundas de canto. La determinación de las propiedades físico-mecánicas se realizó a través de ensayos a flexión estática siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 9663 (2013). Los resultados revelaron que en las vigas los anillos de crecimiento no explican más de un 12% de la variabilidad de las propiedades mecánicas en flexión, por lo que se discute su utilización como criterio predictivo de la calidad de tales piezas. Respecto de las tablas, en cambio, el espesor de los anillos explicó el 27% de la variabilidad de la resistencia y el 43% de la variabilidad de la rigidez, por lo que resulta conveniente su consideración en la clasificación por calidades resistentes para este elemento estructural.

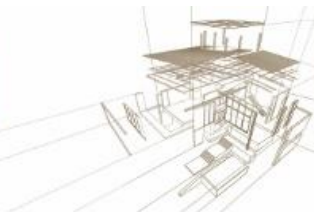
Palabras-clave: Pinus taeda/elliottii, resistencia, rigidez, densidad.

Abstract

Annual growth rings are easily seen in conifers due to the difference between early- and latewood. A greater ring thickness normally corresponds to a lower density and predictably, to a lower strength. However, this statement cannot be generalized because wood behavior depends on the species/provenance combination. This paper reports the results of an investigation regarding the predictive quality of growth rings on bending strength, stiffness and density in structural sawn timber from resinous pine (*Pinus taeda/elliottii*), which is grown in the Northeast of Argentina. An empirical project that included a total of 233 boards and 225 beams with different nominal cross-section sizes was designed. Physical and mechanical properties were determined by bending tests following the procedure of Argentinean IRAM 9663 (2013). Results showed that in the beams, growth rings do not explain more than 12% of the mechanical properties variability, so its use as a quality predictor is discussed. Regarding boards, however, growth ring width explained 27% of the strength variability and 43% of the stiffness variability, so for this case it is appropriate to consider this visual parameter in the strength grading rules.

Write in this page the abstract of the paper in English, followed by the keywords. The abstract should have a length of 200 to 250 words. The Abstract must have the same format as the summary.

Keywords: Pinus taeda/elliottii, strength, stiffness, density.



1. INTRODUCCIÓN

La superficie de bosques cultivados en Argentina alcanza aproximadamente 1,12 millones de hectáreas de las cuales el 64% se corresponde a plantaciones con coníferas, el 78% (560.000 hectáreas) de éstas se ubican en las provincias de Misiones y Corrientes, donde se destacan las especies de crecimiento rápido: *Pinus taeda* y *Pinus elliottii*. Actualmente las mismas se explotan en ciclos cortos de rotación y proveen aproximadamente 3 millones de m³ de madera aserrada por año, equivalente al 50% del total producido en el país (Dirección de Producción Forestal 2016). Como la madera de ambas especies presenta una apariencia similar y no existen estudios que evidencien una diferencia significativa entre sus propiedades físico-mecánicas (Fank, Stefani y Piter 2017; Moya *et al.* 2015), usualmente éstas son comercializadas en forma conjunta y, a su vez, son consideradas como un grupo de especies en las normativas nacionales vinculadas al diseño estructural (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2002, 2015; Instituto Nacional de Tecnología Industrial 2016).

En las coníferas, como puede observarse en la Figura 1, cada anillo de crecimiento anual consta de dos zonas claramente diferenciadas, la madera temprana -o de verano- es oscura y densa mientras que la tardía -o de primavera- suele ser clara y ligera. Como generalmente la capa de verano aparece en franjas de espesor prácticamente constante, la variación del ancho del anillo está originada por el cambio en el espesor de la capa de primavera (Álvarez Lazo *et al.* 2011). La existencia de anillos grandes normalmente suele ser un indicador de la presencia de madera juvenil, la cual se destaca por mostrar un comportamiento diferente al de la madera madura, adquiriendo especial importancia en coníferas de crecimiento rápido donde su proporción crece a medida que disminuye la edad de rotación de los árboles. Un criterio ampliamente difundido indica que a mayor espesor de anillo se corresponde una menor densidad de la madera y previsiblemente una menor resistencia y rigidez (Hermoso Prieto 2001; Hoffmeyer 1995). Sin embargo esta afirmación no puede ser generalizada para todas las maderas ya que dicho comportamiento depende de la especie y la procedencia (Coronel 1994).



Figura 1: Anillos de crecimiento en una sección de madera de pino resinoso

Basado en el criterio antes mencionado, las normas de clasificación visual para piezas aserradas estructurales procedentes de coníferas generalmente consideran a los anillos de crecimiento -entre otros parámetros de inspección visual- como predictores de las propiedades mecánicas de la madera. La restricción es realizada usualmente a través del establecimiento de un límite superior para el espesor del anillo, ya sea el promedio o el mayor, o de una cantidad máxima de anillos en un radio determinado. Particularmente la norma argentina IRAM 9662-3 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación



2015) de clasificación por resistencia de tablas aserradas de *Pinus taeda/elliottii* del nordeste, al igual que ciertas normas europeas como la DIN 4074-1 (Deutsches Institut für Normung 2008) aplicable en secciones estructurales de variadas dimensiones, incorporan al ancho máximo del anillo de crecimiento como parámetro penalizador de calidad. Mientras que otras normas de clasificación, como la argentina IRAM 9670 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2002) aplicable a vigas aserradas de la especie y procedencia antes mencionada, únicamente limitan el número promedio de anillos por pulgada con el fin de distribuir a las piezas en clases estructurales pero no como medida de descarte.

En contraste, existen reportes sobre especies de crecimiento rápido que cuestionan la fiabilidad predictora de las propiedades mecánicas por parte de los anillos de crecimiento (Fernández Golfín-Seco y Diez Barra 1995; Hermoso Prieto 2001). En correspondencia con esto, algunos métodos de clasificación visual de piezas estructurales no contemplan a dicha característica visual como parámetro clasificatorio con el fin de no condicionar inadecuadamente a la madera aserrada de ciertas especies de crecimiento rápido donde la proporción de madera juvenil suele ser de importancia respecto de las de crecimiento lento (Wagner 2008). Como ejemplo se pueden citar la norma NCh 1207 (Instituto Nacional de Normalización 2005) referida al Pino radiata cultivado en Chile y las recientes propuestas de clasificación visual tanto del pino resinoso (*Pinus elliottii/taeda*) procedente de Brasil (Ballarin, Ballarin y Calil Júnior 2017) como del cultivado en la república del Uruguay (Moya *et al.* 2017).

El objetivo del presente trabajo es evaluar la calidad predictiva del ancho de los anillos de crecimiento sobre la resistencia a flexión, rigidez y densidad tanto en vigas como en tablas de madera aserrada de pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*) cultivado en el nordeste de Argentina.

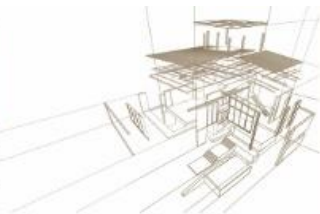
2. METODOLOGÍA

2.1. Materiales

El material destinado a la investigación empírica estuvo compuesto por 458 cuerpos de prueba en tamaño estructural de madera aserrada de pino resinoso cultivado en la provincia de Misiones (Argentina). El mismo fue dividido en dos muestras como se aprecia en la Tabla 1. M_V integrada por 225 piezas (54% *P. taeda* y 46% *P. elliottii*) con secciones típicas para vigas y M_T conformada por 233 piezas (50% *P. taeda* y 50% *P. elliottii*) con la sección más usual para tablas.

Tabla 1: Detalle de las muestras diseñadas

Muestra	Ancho [mm]	Alto [mm]	Cantidad (n)
M_V	45	100	64
	45	150	61
	70	150	50
	70	200	50
M_T	105	25	233



2.2. Métodos

La metodología empleada fue similar para ambas muestras y todas las pruebas fueron llevadas a cabo en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional (Entre Ríos, Argentina).

Luego de preparar los cuerpos de prueba, los mismos se climatizaron a una temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa ambiente de $65\pm 5\%$. Posteriormente fueron registradas las dimensiones reales de cada uno junto al espesor del máximo anillo de crecimiento anual (e_{max}). Este parámetro fue medido en dirección radial sobre la mayor línea recta que fue posible trazar en los extremos de la pieza, despreciando aquellos anillos ubicados en un radio de 25 mm alrededor de la médula, de acuerdo a lo establecido por la norma IRAM 9662-3 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2015).

Los ensayos estáticos de flexión se efectuaron siguiendo el procedimiento de la norma IRAM 9663 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013a), la cual está basada en la norma europea EN 408 (European Committee for Standardization 2010b). Las piezas de la muestra M_V fueron flexionadas de canto mientras que las de M_T fueron flexionadas de plano, en la Figura 2 se puede observar una fotografía de ambas disposiciones de ensayo.

Los cuerpos de prueba fueron ubicados con una separación entre apoyos igual a $18h$, siendo h la altura de la sección transversal, y cargados simétricamente a una distancia igual a $6h$ desde cada apoyo. Para la aplicación de las cargas se utilizó una máquina de ensayos universales con capacidad de desplazar el cabezal a velocidad constante y precisión igual al 1% de la carga aplicada. En cada caso particular se utilizaron adecuados dispositivos de aplicación de cargas y de apoyo con el objeto de reducir el aplastamiento localizado de la madera en esas zonas (ver Figura 2).

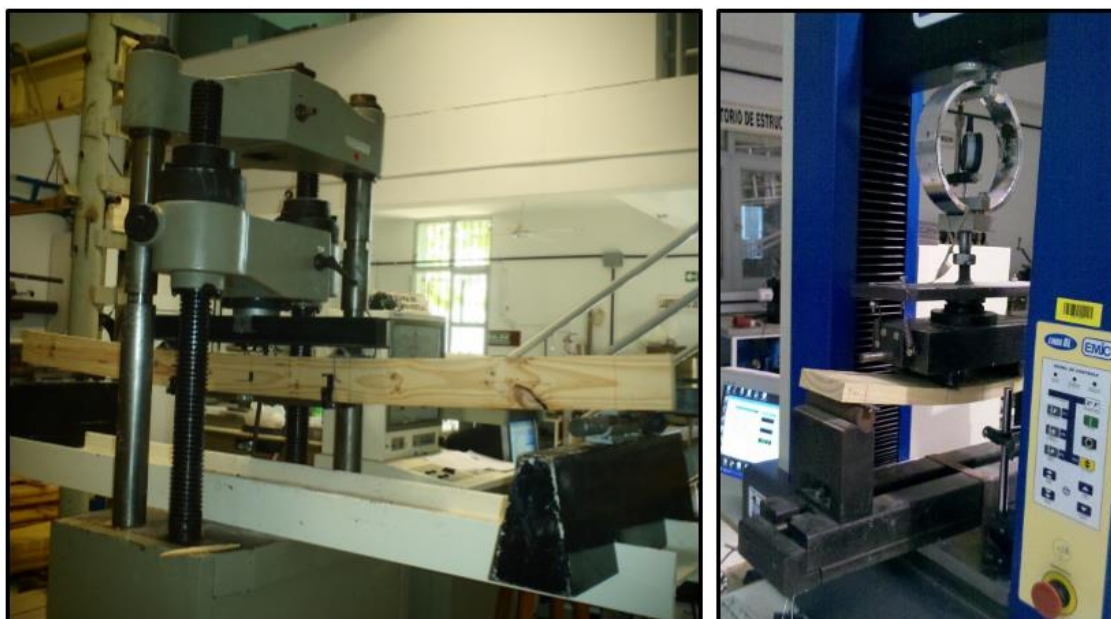
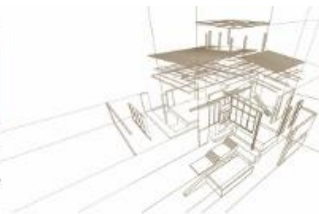


Figura 2: Ensayo estático de flexión. Izq.: Flexión de canto. Der.: Flexión de plano.



La velocidad de avance del cabezal de carga fue constante y provocó un desplazamiento menor a 0,003h (mm) en la unidad de tiempo (s). Durante el período elástico se registraron las deformaciones empleando un comparador micrométrico con precisión de 0,01 mm ubicado en la parte inferior del centro de la luz. El ensayo continuó hasta alcanzar la rotura de la pieza en el tiempo establecido (300 +/- 120 s), registrándose la carga máxima y el tiempo empleado en alcanzarla. La tensión de rotura y el módulo de elasticidad global se calcularon con las ecuaciones provistas por la norma IRAM 9663 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013a).

Inmediatamente después de finalizado cada ensayo se cortó un trozo libre de defectos, cercano a la zona de rotura involucrando a toda la sección transversal, destinado a la determinación del contenido de humedad y de la densidad conforme a los lineamientos de las normas ISO 3130 e ISO 3131 (International Organization for Standardization 1975a,b). Las medidas del trozo se registraron con un calibre de precisión de 0,01 mm y para la medición de las masas se empleó una balanza electrónica de precisión de 0,01 g. El secado del trozo hasta lograr su masa anhidra se realizó en estufa a una temperatura de 103+/-2°C.

Con el fin de obtener resultados comparables, los valores de las propiedades fueron ajustados a las condiciones de referencia según la norma IRAM 9664 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013b) basada en la norma europea EN 384 (European Committee for Standardization 2010a). Los valores de la resistencia se ajustaron a una altura de referencia de 150 mm, y los valores del módulo de elasticidad y de la densidad a un contenido de humedad del 12%.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 3 se presenta el histograma de frecuencia del mayor anillo de crecimiento discriminado por muestra. En este gráfico se observa que la mayoría de las piezas (47%) presentaron anillos de crecimiento anual comprendidos entre 10 mm y 15 mm de ancho, registrándose proporciones similares tanto en vigas (45%) como en tablas (48%).

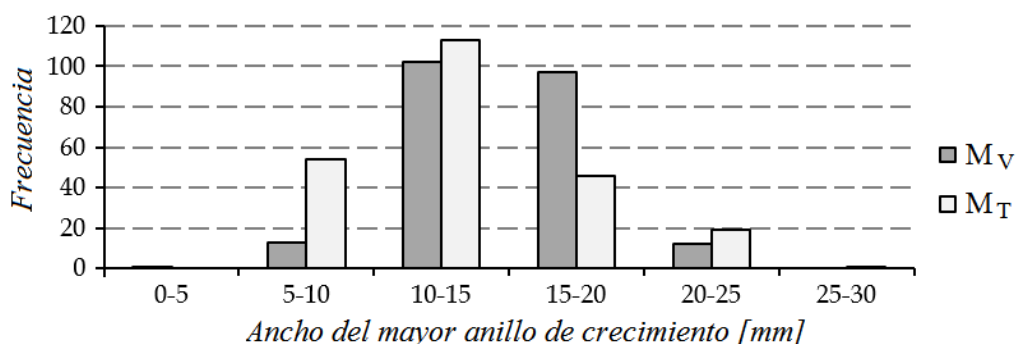
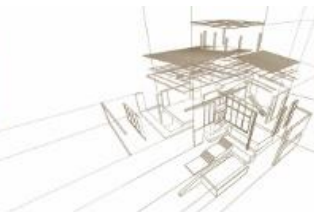


Figura 3: Histograma de frecuencias del ancho del mayor anillo de crecimiento

El contenido de humedad mostró valores medios del 12,7% y 11,9% asociados a coeficientes de variación (CV) menores al 5% y 9% para las muestras M_V y M_T, respectivamente. Como en ambos casos la humedad resultó cercana al 12% vinculada a



un bajo CV, se puede descartar una influencia desigual de esta variable sobre la resistencia de las distintas muestras.

En la Tabla 2 son expuestos los resultados obtenidos para las relaciones encontradas entre el ancho del mayor anillo de crecimiento (e_{max}) y cada propiedad en estudio: resistencia a flexión (f_m), módulo de elasticidad a flexión ($E_{m,g}$) y densidad (ρ). A su vez, tales relaciones son exhibidas gráficamente en la Figura 4, indicándose en cada caso el valor del coeficiente de determinación (R^2) junto a la ecuación de la recta de regresión.

Tabla 2: Relación entre las propiedades físico-mecánicas y el ancho del anillo de crecimiento

Muestra	$f_m^{(1)}$		$E_{m,g}^{(2)}$		$\rho^{(2)}$	
	R^2	R	R^2	R	R^2	R
M_V (n = 225)	0,11	-0,34	0,12	-0,34	0,23	-0,48
M_T (n = 233)	0,27	-0,52	0,43	-0,65	0,23	-0,48

Nota. (1) Valor ajustado a la altura de referencia de 150 mm de acuerdo a la norma IRAM 9664 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013b); (2) Valores corregidos al contenido de humedad de referencia (12%) de acuerdo a la norma IRAM 9664 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2013b); n: cantidad de cuerpos de prueba; R^2 : Coeficiente de determinación; R: Coeficiente de correlación de Pearson.

Para las vigas, como puede apreciarse en la Tabla 2, el coeficiente de correlación obtenido para ambas propiedades mecánicas fue similar ($R = -0,34$), explicándose a través del mismo tan solo un 11% y 12% de la variabilidad de f_m y $E_{m,g}$ respectivamente. Estudios llevados a cabo sobre piezas estructurales de *Pinus pinaster*, *P. radiata* y *P. sylvestris* también arrojaron una reducida predicción de la calidad de la madera a través de la consideración del ancho de los anillos de crecimiento (Diéz Barra y Fernández-Golfín 1998; Fernández-Golfín Seco y Diéz Barra 1994; Hermoso Prieto 2001). En cambio, la correlación alcanzada en la muestra integrada por tablas (M_T) fue notoriamente superior a la registrada para las vigas (M_V), obteniéndose valores R negativos de 0,52 para f_m y de 0,65 para $E_{m,g}$. Estos resultados están en correspondencia con el criterio adoptado por ambas normas argentinas referidas a la clasificación visual por resistencia del pino resinoso del nordeste (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2002, 2015), ya que la IRAM 9662-3 referida a tablas considera al e_{max} como parámetro penalizador de la calidad de las piezas aserradas, mientras que la IRAM 9670 aplicable a vigas, aunque contempla otro modo de medición de los anillos de crecimiento, lo aplica simplemente con el fin de dividir a las piezas en dos clases estructurales pero no como medida de descarte.

Al evaluarse las tablas, los resultados obtenidos (Tabla 2) también dejaron en evidencia una mayor influencia del ancho del anillo sobre la rigidez respecto de la resistencia, ya que a través de e_{max} fue posible explicar un 43% de la variabilidad de $E_{m,g}$ y tan sólo un 27% de la correspondiente a f_m . En cuanto a la relación anillo-densidad, ambas muestras (M_V y M_T) presentaron idéntica correlación ($R = -0,48$) asociada a un coeficiente de determinación de 0,23. Esta cifra supera –en algunos casos en varios órdenes de magnitud– a las encontradas para vigas estructurales procedente de diferentes pinos de crecimiento rápido (*P. pinaster*, *P. radiata* y *P. sylvestris*) (Fernández-Golfín Seco y Diéz Barra 1995).

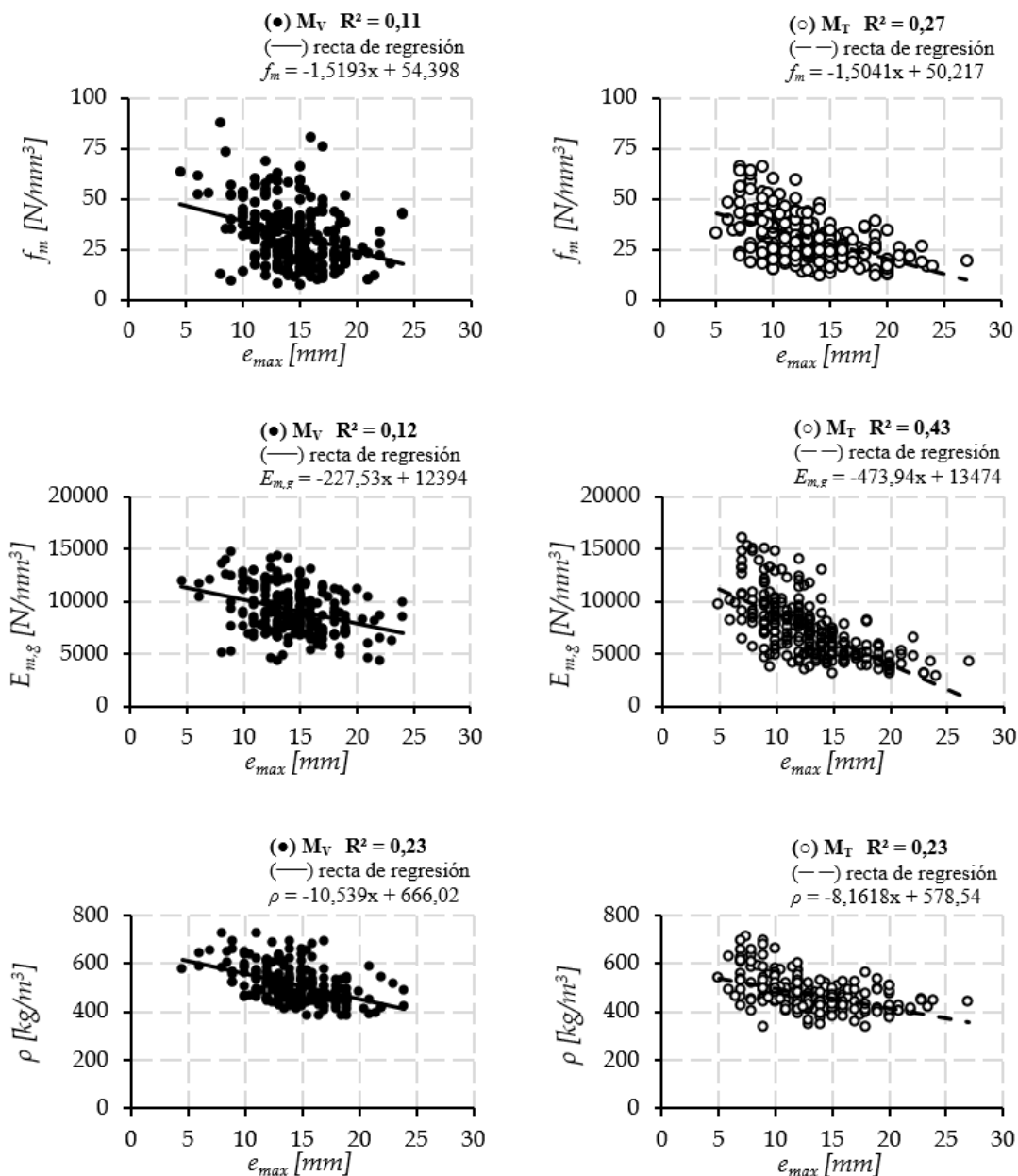
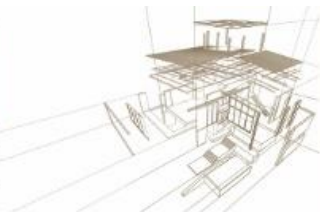


Figura 4: Relación entre el ancho del mayor anillo de crecimiento (e_{max}) y la resistencia a flexión (f_m), el módulo de elasticidad en flexión ($E_{m,g}$) y la densidad (ρ)

4. CONCLUSIONES

Los resultados revelaron que en las vigas aserradas de *Pinus taeda/elliottii* la capacidad de predicción del ancho del anillo de crecimiento tanto para la resistencia como para la rigidez es reducida, por lo que es razonable prescindir de este parámetro como criterio predictivo de la calidad de tales piezas. Respecto de las tablas, en cambio, el espesor de los anillos explica el 27% de la variabilidad de la resistencia y el 43% de la variabilidad de la rigidez, cifras notoriamente superiores a las determinadas para las vigas (11% y 12% respectivamente), por lo que se considera apropiada la inclusión de este parámetro



visual en los métodos de clasificación por resistencia de tablas estructurales, tal como lo contempla la norma IRAM 9662-3 (Instituto Argentino de Normalización y Certificación 2015).

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a la empresa *Laharrague Chodorge S.A.* por la donación del material de ensayo, al jefe de laboratorio por su participación en el acondicionamiento del equipamiento y a los becarios del grupo GEMA por su colaboración en la realización de los ensayos del programa empírico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarez Lazo, D.; Dorado, M.; Camusso, C. y Lubrano, P. (2011). Tecnología de la madera. Edit. UNIVERSITAS, Córdoba, Argentina.

Ballarin, A.; Ballarin, A. y Calil Júnior, C. (2017). Classificação visual e mecânica simplificada da madeira de *pinus spp.* II CLEM + CIMAD, Buenos Aires, Argentina.

Coronel, E. O. (1994). Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. 1º parte: Fundamentos de las propiedades físicas de las maderas. ITM, FCF, UNSE, Argentina.

Deutsches Institut für Normung (2008). Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadelschnittholz. DIN 4074-1. Berlin.

Diéz Barra, M.; Fernández-Golfín, J. (1998). Influencia de diversos factores en la calidad de la madera de uso estructural de *P. Sylvestris* L. Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales v. 7, n. 1 y 2, p. 41-51.

Dirección de Producción Forestal. 2016. Argentina: Plantaciones forestales y gestión sostenible. 15 pp. Disponible en <<https://goo.gl/064alb>>, acceso el 23/12/2016.

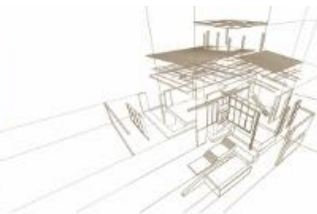
European Committee for Standardization (2010a). Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density. EN 384. Brussels.

European Committee for Standardization (2010b). Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. EN 408. Brussels.

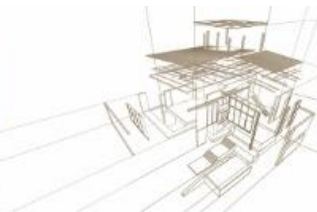
Fank, P.; Stefani, P. y Piter, J. (2017). Clasificación mecánica de tablas de pinos resinosos cultivados en el nordeste de Argentina. Maderas. Ciencia y tecnol. v.19, n. 2, p.: 247-264.

Fernández-Golfín Seco, J.; Diéz Barra, M. (1994). Influencia de la anchura del anillo de crecimiento en la densidad y otras propiedades físico-mecánicas de la madera estructural de diversas especies. Invest. Agraria, Sistemas y Recursos Forestales v. 3, n. 2, p. 211-219.

Fernández-Golfín Seco, J. y Diez Barra, M. (1995). La anchura del anillo de crecimiento. Predictor de la calidad de la madera aserrada para uso estructural. Información técnica AITIM n. 173, p. 59-62.



- Hermoso Prieto, E. (2001). Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pynus sylvestris* L. Tesis Doctoral, Esc. Téc. Sup. de Ing. de Montes, Univ. Politécnica de Madrid, Madrid.
- Hoffmeyer, P. (1995). Wood as a building material. Timber Engineering. Basis of design, material properties, structural components and joints. STEP 1: pp. A4/1-A4/21. The Netherlands.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2015). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y ellioti (*Pinus taeda* y *elliottii*). IRAM 9662-3. Buenos Aires.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2013a). Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. IRAM 9663. Buenos Aires.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2013b). Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. IRAM 9664. Buenos Aires.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2002). Madera estructural. Clasificación y requisitos. Clasificación en grados de resistencia para la madera aserrada de pinos resinosos del noreste argentino mediante una evaluación visual. IRAM 9670. Buenos Aires.
- Instituto Nacional de Normalización (2005). Pino radiata, Clasificación visual para uso estructural, especificaciones de los grados de calidad. NCh 1207. Santiago de Chile.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial (2016). Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones. CIRSOC 601. Buenos Aires.
- International Organization for Standardization (1975a). Wood – Determination of moisture content for physical and mechanical tests. ISO 3130.
- International Organization for Standardization (1975b). Wood – Determination of density for physical and mechanical tests. ISO 3131.
- Moya, L.; Cardoso, A.; Cagno, M. y O'Neill, H. (2015). Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. Maderas. Ciencia y tecnología v. 17, n. 3, p. 597-612.
- Moya, L.; Domenech, L.; Cardoso, A.; O'Neill, H. y Baño, V. (2017). Proposal of visual strength grading rules for Uruguayan pine timber. Eur. J. Wood Products v. 75, n. 3, p. 1017–1019.
- Wagner, M. (2008). Antecedentes que fundamentan la actualización de las propiedades mecánicas admisibles asignadas a la madera aserrada de Pino radiata en Nch 1198 en su redacción of.2006. CI 5224-1 Diseño y construcción en madera, Universidad de Chile.



DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD POR ULTRASONIDO Y VIBRACIONES EN VIGAS DE PINO PONDEROSA

DETERMINATION OF THE MODULUS OF ELASTICITY BY ULTRASOUND AND VIBRATIONS IN PONDEROSA PINE BEAMS

Roberto D. Manavella^{1*}, Alfredo A. Guillaumet², María C. Filippetti³, Lía C. Meyer⁴

⁽¹⁾ Profesor Titular. GIDEC UTN FRVT, Venado Tuerto. Argentina

⁽²⁾ Profesor Titular. GIDEC UTN FRVT, Venado Tuerto. Argentina

⁽³⁾ Profesor Adjunto. GIDEC UTN FRVT, Venado Tuerto. Argentina

⁽⁴⁾ Ayudante de Trabajos Prácticos. GIDEC UTN FRVT, Venado Tuerto. Argentina

* Contacto: Roberto D. Manavella: rdmvt@yahoo.com

Resumen

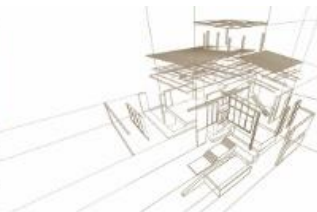
El uso de métodos no destructivos para la predicción del comportamiento elástico de madera aserrada en piezas de tamaño estructural es una práctica frecuente y avalada por numerosas publicaciones. Estas técnicas son utilizadas con eficacia para la clasificación mecánica y la determinación de parámetros de diseño. El objetivo de este trabajo es verificar la efectividad de las técnicas de vibraciones y ultrasonido como herramientas válidas para predecir el valor del módulo de elasticidad en madera de pino ponderosa (*Pinus ponderosa Dougl. ex Laws*) de la Patagonia Norte, Argentina. Se ensayaron 173 vigas de tamaño estructural de diferentes escuadrías. En cada una de las piezas se determinaron los valores del módulo de elasticidad mediante tres técnicas: por flexión estática según norma UNE-EN 408, por ultrasonido mediante equipo Fakkop Microsecond Timer y por vibraciones longitudinales inducidas. Los resultados de módulo de elasticidad calculados a partir de los ensayos de flexión según UNE-EN 408 comparados con los obtenidos por ultrasonido presentan una correlación de 0,90 ($R^2 = 0,81$), en tanto que, comparados con los determinados por vibraciones longitudinales inducidas muestran una correlación de 0,93 ($R^2=0,87$). Estos resultados indican que las técnicas de ultrasonido y de vibraciones longitudinales inducidas pueden usarse con suficiente exactitud y seguridad para la predicción del módulo de elasticidad en madera de Pino ponderosa.

Palabras claves: pino ponderosa, módulo de elasticidad, MOE, vibraciones, ultrasonido.

Abstract

The use of non-destructive methods for the prediction of the elastic behavior of sawn wood in pieces of structural size is a frequent practice and endorsed by numerous publications. These techniques are used effectively for the mechanical classification and determination of design parameters. The objective of this work is to verify the effectiveness of vibration and ultrasound techniques as valid tools to predict the value of the modulus of elasticity in ponderosa pine wood (*Pinus ponderosa Dougl. ex Laws*) of North Patagonia, Argentina. 173 beams of structural size from different squads were tested. In each of the pieces the values of the modulus of elasticity were determined by three techniques: by static bending according to UNE-EN 408 norm, by ultrasound using Fakkop Microsecond Timer equipment and by induced longitudinal vibrations. The values of modulus of elasticity calculated from the bending tests according to UNE-EN 408 compared with those obtained by ultrasound show a correlation of 0,90 ($R^2=0,81$), whereas, compared with those determined by induced longitudinal vibrations show a correlation of 0,93 ($R^2=0,87$). These results indicate that the techniques of ultrasound and induced longitudinal vibrations can be used with sufficient accuracy and safety for the prediction of the modulus of elasticity in ponderosa pine wood.

Keywords: ponderosa pine., Modulus of elasticity, MOE, vibrations, ultrasound



1. INTRODUCCIÓN

Debido al sostenido aumento de la construcción con madera y a la demanda de este material para uso estructural que se está observando en Argentina, se hace imprescindible contar con valores precisos de las propiedades mecánicas de las especies de mayor comercialización, ya que esto permitirá poner a disposición de los profesionales, información precisa para el diseño y cálculo de estructuras de madera más confiables, seguras y económicas.

Es deseable que el aporte de valores sea realizado utilizando métodos rápidos, sencillos, que mantengan intacta las características del material original, siendo las técnicas de evaluación no destructivas las más indicadas para este fin, ya que dan resultados ciertos, válidos y comparables con los obtenidos por ensayos destructivos, con la ventaja de preservar la integridad de la madera.

Existen numerosas publicaciones que abordan este tema y certifican lo pertinente del uso de métodos no destructivos. Los END (Ensayos No Destructivos) se pueden definir como técnicas que permiten examinar los materiales o sus componentes sin que se vean afectadas sus propiedades, su integridad y su utilidad final, siendo el interés práctico tratar de predecir las características resistentes con el mayor grado de acierto, sin dañar el material, Acuña *et al.* (2006), Casado *et al.* (2010). La estimación de las propiedades resistentes de la madera, tales como la densidad, el módulo de elasticidad o la tensión de rotura, se puede realizar mediante la medición de una serie de parámetros físicos que se utilicen como predictores, por ejemplo, la velocidad de propagación de ultrasonidos, Íñiguez González *et al.* (2007). En particular, el ensayo de ultrasonidos se basa en hacer pasar una onda ultrasónica a través de la madera, donde recorrerá el camino más directo entre el punto de emisión y el punto de recepción, dependiendo su velocidad de propagación de las características elásticas del material atravesado, Balmori *et al.* (2016), Conde García *et al.* (2007). La velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas varía con cada especie por lo que resulta de interés realizar una evaluación previa y los ajustes necesarios antes del uso de estos métodos. Se debe tener en cuenta que las mediciones se verán afectadas por las singularidades y defectos internos de la madera y su grado de deterioro, entre otros, Pellerin *et al.* (1985). En los ajustes se deberá considerar, además, las variaciones en función de la longitud de la pieza, Diab *et al.* (2013).

Una gran cantidad de trabajos de investigación corroboran la correlación existente entre los valores del módulo de elasticidad dinámico, determinado a través de ensayos por ultrasonido o vibraciones, con los calculados a partir de ensayos de flexión estática, Ilic (2001). De acuerdo a Rajeshwar *et al.* (1997), es común encontrar altas correlaciones lineales entre el MOE, la densidad y la resistencia de la madera, del orden del 0,6 a 0,8. Para el Pino del Sur (*pinus do sul*), Calil *et al.* (2003), ha informado coeficientes de correlación lineal entre el módulo elasticidad dinámica y el módulo estático de $R = 0,98$. Casado *et al.* (2013) ha evaluado, para trozas y tablas aserradas de *Populus x euramericana* una función de predicción para el MOE con la velocidad ultrasónica longitudinal indirecta medida con equipo Fakopp alcanzando un R^2 de 0,50, lo que considera un buen predictor de la calidad de la madera. En piezas de gruesa escuadría de pino laricio, se ha encontrado un alto grado de correlación entre el módulo de



elasticidad dinámica obtenido a partir de la frecuencia longitudinal de vibración, y las propiedades mecánicas, *Íñiguez González et al. (2007)*.

La estimación del módulo de elasticidad dinámico puede hacerse de manera sencilla y acertada por ultrasonidos. Esta técnica puede ser aplicada, esencialmente, siguiendo los procedimientos de transmisión o pulso eco, siendo los primeros los que mayor aplicación tienen en la madera, utilizándose muy ampliamente aquellos que consisten en dos transductores, uno emisor y otro receptor que, perfectamente acoplados a la madera, miden el tiempo que tarda la onda ultrasónica en llegar de uno a otro, *Acuña et al. (2006)*. En estudios realizados sobre probetas pequeñas libres de defectos se han obtenido buenos resultados en la predicción del módulo de elasticidad a través de la velocidad de propagación de ultrasonidos y la densidad, *Boström L. (1994)*.

Para la predicción del módulo de elasticidad dinámico, también pueden utilizarse la técnica de vibraciones longitudinales inducidas con resultados muy satisfactorios. Los valores obtenidos mediante el empleo de la técnica de vibraciones longitudinales permiten definir las propiedades del material con un alto grado de precisión, superando en eficacia y facilidad de empleo a otras técnicas no destructivas, incluida la clasificación visual, *Íñiguez González et al. (2007)*.

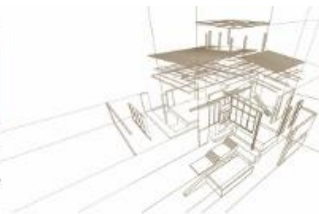
El objetivo del presente trabajo, es determinar los valores del módulo de elasticidad dinámico de 173 piezas de tamaño estructural de Pino ponderosa, utilizando las técnicas de ultrasonido y vibraciones longitudinales inducidas y compararlos con los resultados obtenidos por flexión estática, a fin de verificar que dichos métodos no destructivos proporcionan valores aceptables para la estimación del módulo de elasticidad en madera aserrada de esta especie.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Material de ensayo

La madera de Pino ponderosa (*Pinus ponderosa Dougl. ex Laws*) proviene de la Patagonia Andina Norte, República Argentina, específicamente de plantaciones de la cuenca Arroyo del Medio, cercana a San Carlos de Bariloche. El material se obtuvo de trozas provenientes de un primer raleo comercial, en tres predios diferentes de la zona mencionada, con edades de 25, 26 y 32 años. Las trozas fueron aserradas, secadas y cepilladas en Bariloche y trasladadas, previo acondicionamiento, a la ciudad de Venado Tuerto. Las piezas fueron recibidas en el Laboratorio de la Facultad Regional Venado Tuerto, de la Universidad Tecnológica Nacional donde se prepararon los cuerpos de prueba con una longitud igual a 20 veces su altura nominal y se colocaron en cámara, a una temperatura de 20 ± 2 °C y una humedad relativa ambiente de $65 \pm 5\%$, para su almacenamiento y estabilización. En la Tabla 1 se presentan las dimensiones de las muestras a ensayar.

Se efectuaron mediciones sobre un total de 173 piezas de madera aserrada de tamaño estructural, sin clasificar, correspondientes a cuatro muestras de diferentes escuadrías y longitudes. En todos los casos se determinó el módulo de elasticidad mediante tres técnicas: por flexión estática de acuerdo a la UNE-EN 408:2012, por ultrasonido y por vibraciones longitudinales inducidas.



Previo al ensayo a flexión, para cada cuerpo de prueba, se realizó un relevamiento de sus singularidades de acuerdo a las prescripciones de la norma IRAM 9662-3 (2015) y de sus características geométricas.

Tabla 1: Dimensiones y cantidad de los cuerpos de prueba

Muestra N° :	1	2	3	4
Base (mm) :	50	50	50	50
Altura (mm) :	50	75	100	125
Largo (mm) :	1000	1500	2000	2500
Cantidad :	34	40	50	49

2.2. Procedimiento operatorio y de cálculo para la determinación del Módulo de Elasticidad Global según UNE-EN 408:2012

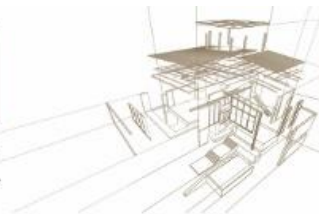
Los ensayos de flexión estática y la determinación de los valores de módulo de elasticidad global y de resistencia a flexión se hicieron de acuerdo a las prescripciones de la norma EN 408:2012. Para la determinación del módulo de elasticidad global se consideró al módulo de elasticidad transversal “G” igual a infinito, (procedimiento idéntico a la normativa IRAM 9663:2013).

En el procedimiento experimental se adoptó una separación entre apoyos igual a 18 veces la altura del cuerpo de prueba. Las cargas se aplicaron en los tercios de la viga con velocidad constante. Para su medición se utilizó una celda de carga máxima 50.000 N y lectura mínima 10 N. Para la determinación del módulo de elasticidad global en flexión se empleó un comparador digital de 0,01 de precisión, ubicado en el centro de la luz, sobre la cara inferior. Se usaron escalones de carga de 500 N con la medición de las deformaciones correspondientes para la determinación de los módulos de elasticidad. En los apoyos de la viga y en los puntos de aplicación de la carga, se colocaron placas de acero de ancho igual a la mitad de la altura de la viga, con el objeto de reducir el aplastamiento localizado de la madera. Para el ensayo de los cuerpos de prueba de mayor escuadría, se colocaron dispositivos especiales capaces de proporcionar arriostramiento lateral sin obstaculizar las deformaciones verticales, para evitar el pandeo lateral de la pieza.

Los valores de los ensayos fueron corregidos a condiciones de referencia de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013). Una vez finalizado el ensayo, se procedió a aserrar un trozo de material de las proximidades de la zona de rotura, abarcando toda la sección transversal y libre de defectos, sobre el cual se determinó el contenido de humedad y la densidad aparente de acuerdo a norma ISO 3130 (1975) e ISO 3131 (1975) respectivamente.

Para la determinación del módulo de elasticidad global se eligió la parte de la curva carga-deformación con correlación superior a 0,99. Se trató de incluir un tramo que estuviera comprendido entre el 20% y el 30% de la carga estimada de rotura. Se utilizó la siguiente expresión dada por la norma UNE EN 408 (2012):

$$MOE_{Global} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (1)$$



Donde:

MOE_{Global} : Módulo de elasticidad global en flexión, en N/mm^2 .

a : Distancia entre el punto de carga y apoyo más próximo, en milímetros.

l : Longitud de flexión entre apoyos, en milímetros.

b : Anchura de la sección, en milímetros.

h : Altura de la sección, en milímetros.

G : Módulo de elasticidad transversal en N/mm^2 . Se utilizó para el módulo de elasticidad transversal el valor $G = \infty$.

$F_2 - F_1$: Incremento de carga en la recta de regresión con un coeficiente de correlación superior a 0,99 con las deformaciones, en Newton.

$w_2 - w_1$: Incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$, en milímetros.

2.3. Procedimiento operatorio y de cálculo para la determinación del Módulo de Elasticidad Dinámico por Ultrasonidos.

La determinación del módulo dinámico por Ultrasonido se realizó usando un equipo Fakkop Microsecond Timer compuesto de un generador de ultrasonidos y dos sensores, uno emisor y otro receptor, los que se clavan en las caras extremas de la pieza a una distancia L conocida, coincidente con la longitud de la viga. Esta disposición permite medir el tiempo, en microsegundos, que tarda la onda ultrasónica en atravesar la viga de sensor a sensor y calcular, a posteriori, la velocidad de propagación longitudinal del sonido. La distancia entre testas se determinó con cinta métrica. Los transductores se clavan, mediante martillo de goma, hasta lograr una fijación firme y un contacto franco y directo entre el sensor y el material.

El procedimiento consiste en golpear sobre el sensor emisor con un martillo de peso conocido, que el equipo dispone para tal fin y medir el tiempo de propagación de la onda. Se efectuaron tres mediciones para cada viga con los sensores clavados en las caras extremas, paralelos al eje longitudinal de la pieza. El valor del Módulo de Elasticidad Dinámico se calcula aplicando las siguientes fórmulas:

$$v = l / t \quad (2)$$

$$MOE_{Din,Ultr} = \rho v^2 \quad (3)$$

Donde:

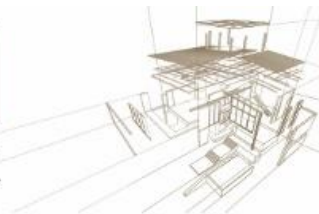
$MOE_{Din,Ultr}$: Módulo de Elasticidad Dinámico determinado por medición de la velocidad de propagación del sonido, en newton por metro cuadrado.

ρ : Densidad de la madera, en kg/m^3 .

v : Velocidad de propagación del sonido en metros por segundo.

l : Distancia entre testas, en metros.

t : Tiempo que tarda la onda, en segundos.



2.4. Procedimiento operatorio y de cálculo para la determinación del Módulo de Elasticidad Dinámico por Vibraciones longitudinales inducidas.

Para la implementación del método de las vibraciones longitudinales inducidas se ha utilizado una computadora provista de un software gratuito para el análisis de la transformada rápida de Fourier (FFT Analyzer) y un micrófono de uso corriente. El procedimiento consiste en provocar una excitación con un impacto de martillo sobre un extremo de la viga, y colocar un micrófono en el otro extremo para efectuar la medición. Mediante el software FFT Analyzer se determina la frecuencia principal de vibración del sonido, la cual se utiliza para calcular el $MOE_{Din,Vibr}$. El Módulo de Elasticidad Dinámico por vibraciones longitudinales inducidas se determinó aplicando las fórmulas siguientes:

$$v = 2 l f \quad (4)$$

$$MOE_{Din,Vibr} = \rho v^2 \quad (5)$$

Donde:

$MOE_{Din,Vibr}$: Módulo de Elasticidad Dinámico determinado por medición de la velocidad de propagación del sonido, en newton por metro cuadrado.

ρ : Densidad de la madera, en kg/m^3 .

v : Velocidad de propagación del sonido en metros por segundo.

l : Distancia entre testas, en metros.

f : Frecuencia natural de vibración, en Hertz. (1/s)

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Resultados de los ensayos

En la Tabla 2 se presentan los valores de módulo de elasticidad global (MOE_{Global}) calculados por flexión estática según Norma UNE-EN 408:2012. En la Tabla 3 se presentan los valores de módulo de elasticidad dinámico calculados por ultrasonido ($MOE_{Din,Ultr.}$) y en la Tabla 4 se presentan los valores de módulo de elasticidad dinámico calculado por el método de vibraciones longitudinales inducidas ($MOE_{Din,Vibr.}$). En cada una de las tablas se muestran los valores mínimos, máximos y promedio para cada muestra y para el conjunto. Se incluye el valor del COV en % y la cantidad de piezas.

Tabla 2: Módulo de elasticidad global según UNE-EN 408: 2012

Muestra N° :		1	2	3	4	Todas 1+2+3+4
Mínimo	(N/mm ²)	1919	2054	2479	2459	1919
Promedio	(N/mm ²)	3787	4828	5111	4868	4717
Máximo	(N/mm ²)	5830	6891	8053	8069	8069
COV	(%)	26	27	27	28	29
Cantidad	(n)	34	40	50	49	173

Se puede observar que los valores medios calculados por ultrasonidos son superiores a los obtenidos por flexión estática, para cada una de las muestras y para la muestra total, dando variaciones mínimas y máximas del 13% y 27% respectivamente.

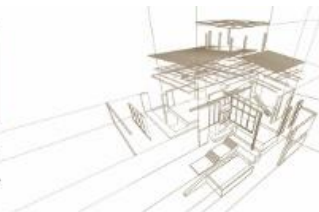


Tabla 3: Módulo de elasticidad dinámico por Ultrasonidos

Muestra N° :		1	2	3	4	Todas 1+2+3+4
Mínimo	(N/mm ²)	1832	2694	3382	2957	1832
Promedio	(N/mm ²)	4287	6120	6118	5859	5685
Máximo	(N/mm ²)	7596	9436	9226	9458	9458
COV	(%)	31	26	28	29	31
Cantidad	(n)	34	40	50	49	173

Los valores medios obtenidos por el método de las vibraciones longitudinales inducidas dan valores muy cercanos a los calculados a partir de los ensayos de flexión, apreciándose variaciones poco significativas menores al 3 %.

Tabla 4: Módulo de elasticidad dinámico por vibraciones longitudinales inducidas

Muestra N° :		1	2	3	4	Todas 1+2+3+4
Mínimo	(N/mm ²)	1992	2121	2847	2395	1992
Promedio	(N/mm ²)	3694	4760	5033	4885	4665
Máximo	(N/mm ²)	5983	7278	7758	8573	8573
COV	(%)	41	24	28	30	29
Cantidad	(n)	34	40	50	49	173

Se observa que los valores obtenidos por vibraciones longitudinales inducidas dan resultados mucho más aproximados a los de flexión estática que los calculados por la técnica de ultrasonidos. Los coeficientes de variación (COV), considerando la determinación de todos los módulos, presentan valores entre 24 % y 41 %, guarismos compatibles con un lote de esta cantidad de piezas sin clasificar.

3.2. Comparación entre los valores de módulo de elasticidad por flexión estática y por métodos no destructivos.

En la Tabla 5 se muestran las correlaciones entre el módulo estático y los módulos dinámicos obtenidos por ambos métodos, para cada una de las muestras y para el conjunto.

Tabla 5: Correlaciones entre el módulo de elasticidad estático y los dinámicos

PARÁMETROS	Muestras N°				
	1	2	3	4	1+2+3+4
Correlación MOE _{Global} - MOE _{Din,Ultr.}	0,86	0,88	0,89	0,91	0,90
Correlación MOE _{Global} - MOE _{Din,Vibr.}	0,90	0,91	0,91	0,96	0,93

En todos los casos se observa una fuerte correlación con valores mínimos de 0,86 y máximos de 0,96. Se aprecia que los valores de la correlación aumentan progresivamente para ambos métodos no destructivos desde la muestra 1 a la muestra 4, coincidente con el aumento de la escuadría y la longitud de los elementos ensayados.



Las piezas de mayores dimensiones, coincidentes con las más usadas estructuralmente, son las que muestran mejor correlación.

En la Figura 1 se muestra el gráfico de correlación entre el módulo de elasticidad global y el módulo de elasticidad dinámico por ultrasonido, para las 173 piezas. En el esquema se incluye la ecuación de la regresión lineal y el valor de R^2 . Se verifica una alta correlación entre los valores de los módulos, con un $R^2 = 0,81$ que corresponde a un $R = 0,90$.

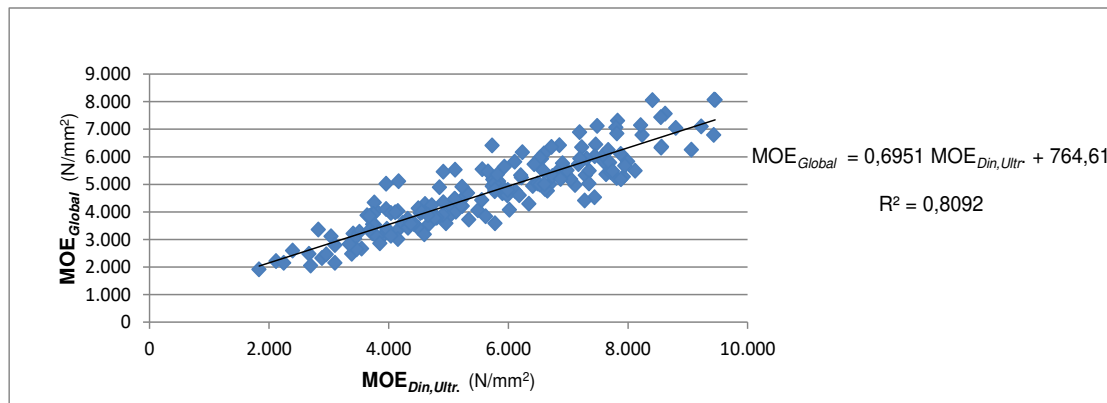


Figura 1: Gráfico de correlación entre el módulo de elasticidad global y el módulo de elasticidad dinámico por ultrasonido.

Estos valores de correlación resultan menores a los obtenidos por Acuña *et al.* (2006) para piezas de madera de tamaño estructural y calidad visual ME1 de 5 especies diferentes, *Pinus sylvestris* L. (pino silvestre), *Pinus radiata* D.Don (pino insignis), *Pinus pinaster* Ait. (pino resinero), *Fagus sylvatica* L. (haya) y *Chlorophora excelsa* Benth & Hook (iroko) donde informó valores del coeficiente R^2 , ajustado para todas las especies, en torno a 0,90.

La recta de regresión lineal es la siguiente:

$$MOE_{Global} = 0,6951 MOE_{Din,Ultr} + 764,61 \quad (6)$$

Donde:

MOE_{Global} : Módulo de elasticidad global en flexión estática en N/mm^2 .

$MOE_{Din,Ultr}$: Módulo de elasticidad dinámico por ultrasonido, en N/mm^2 .

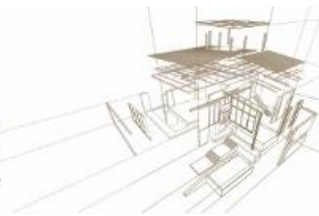
En la Figura 2 se muestra el gráfico de correlación entre el módulo de elasticidad global y el módulo de elasticidad dinámico por vibraciones longitudinales inducidas, para las 173 piezas. En el esquema se incluye la ecuación de la regresión lineal y el valor de R^2 . Se verifica una alta correlación entre los valores de los módulos con un $R^2 = 0,87$ que corresponde a un $R = 0,93$. Este valor es consistente y algo superior al obtenido por Íñiguez González *et al.* (2007) para la madera aserrada estructural de pino laricio donde se verificó un $R^2 = 0,83$.

La recta de la regresión lineal es la siguiente:

$$MOE_{Global} = 0,9139 MOE_{Din,Vibr} + 453,1 \quad (7)$$

Donde:

MOE_{Global} : Módulo de elasticidad global en flexión estática en N/mm^2 .



$MOE_{Din,Vibr}$: Módulo de elasticidad dinámico por ultrasonido, en N/mm^2 .

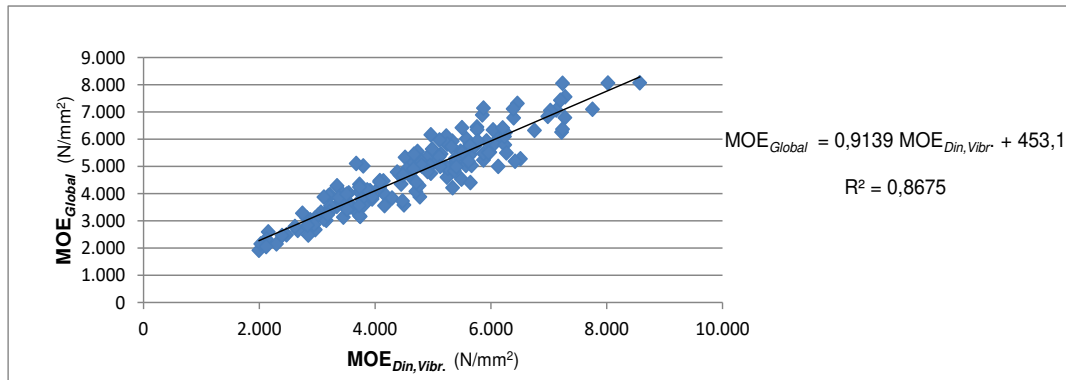


Figura 2: Gráfico de correlación entre el módulo de elasticidad global y el módulo de elasticidad dinámico por vibraciones longitudinales inducidas

4. CONCLUSIONES

El módulo de elasticidad dinámico determinado por ultrasonido presenta una alta correlación ($R=0,90$ y $R^2 = 0,81$) con el módulo de elasticidad determinado por ensayo estático.

El módulo de elasticidad dinámico determinado por vibraciones longitudinales inducidas presenta una alta correlación ($R=0,93$ y $R^2 = 0,87$) con el módulo de elasticidad determinado por ensayo estático.

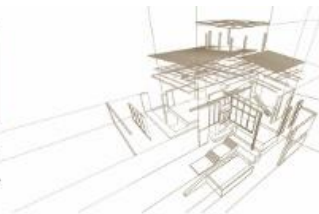
La determinación del módulo de elasticidad dinámico a través de ensayos no destructivos se presenta como un método rápido, sencillo y preciso a la hora de predecir el módulo de elasticidad en piezas de tamaño estructural de Pino ponderosa y se convierten en una alternativa válida para el diseño de un posible método de clasificación mecánica.

AGRADECIMIENTOS

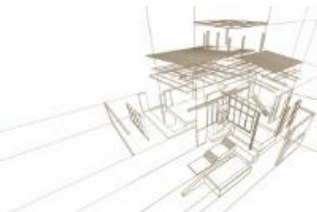
A los becarios alumnos y graduados del grupo GIDEC de la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional por su responsable colaboración en los ensayos. A la Comisión Forestal y Maderera Bariloche.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña L., Díez M. R., Casado M. (2006), Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a *Pinus pinaster* ait. Boletín Informativo CIDEU, 2, 7-26.
- Balmori, J.A.; Acuña, L.; Basterra, L.A. (2016). Estudio de la influencia de la dirección de la fibra en la velocidad de propagación de ultrasonidos (fakopp) en madera estructural de “*Pinus sylvestris* l.” y “*Pinus radiata* d. Don.”. REHABEND 2016. May 24-27, 2016. Burgos, Spain.
- Böstrom, L. (1994). Machine strength grading: comparison of four different systems. Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology SP Report 49, 57 pp.



- Calil Júnior C.; Alexandre J. S. Miná A.J.S. (2003). *Vibração transversal: Um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira*. Rev. Bras. De Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.2, p.335-338.
- Casado, M.; Acuña Rello, L.; Basterra Otero, L.; A.2, Heredero Muñoz, S; San Martín, R. (2013). *Estimación de la calidad de la madera en rollo de Populus x euramericana mediante ultrasonidos*. 6º Congreso Forestal Español. Victoria-Gasteiz. España.
- Casado, M.; Acuña, L.; Vecilla, D.; A. Basterra, A; Relea E; López, G.; Ramón,G. (2010). *The influence of size in predicting the elastic modulus of Populus x euramericana timber using vibration techniques*. Structures and Architecture – Cruz (Ed.) Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-49249-2. 8 Pp.
- Diab, J.; Manavella, R.; Guillaumet, A.; Filippetti, M. (2013). *Influencia de la longitud y posición de terminales en la det. de la vel.de propagación del sonido en vigas de madera de Álamo y pino Paraná*. 4to Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Iguazú. Argentina.
- Ilic, J. (2001). *Relationship among the dynamic and static elastic properties of air-dry Eucalyptus delegatensis R. Baker*. Holz als Roh- und Werkstoff 59:169-175.
- INTI CIRSOC 601. (2016). Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Centro de Investigación de los Regl. Nac. de Seguridad en Obras Civiles. (2016). *Reglamento Argentino de Estructuras de Madera*. Buenos Aires.
- Íñiguez González G.,F. Arriaga Martitegui, M.E. Herrero, R. Argüelles Álvarez.(2007). *Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural*. Inf. de la Construcción Vol. 59, 506, 97-105 abril-junio 2007.ISSN: 0020-0883.
- IRAM 9662-3 (2015). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. *Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 3: Tablas de Pino taeda - elliotti*. Buenos Aires.
- IRAM 9663(2013). *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- IRAM 9664 (2013). *Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- ISO 3130 (1975). International Organization for Standardization. *Wood – Determination of moisture content for physical and mechanical tests*.
- ISO 3131 (1975). International Organization for Standardization. *Wood – Determination of density for physical and mechanical tests*.
- M. Conde García, J. I. Fernández-Golfín Seco, E. Hermoso Prieto.(2007). *Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual*. Mat. de Construcción Vol. 57, 288, 49-59- Octubre-Diciembre 2007. ISSN: 0465-2746
- Pellerin, R., De Groot, R.C., Esenther, G.R. (1985). *Nondestructive stress wave measurements of decay and termite attack in experimental wood units*. Proceedings of the 5th Nondestructive Testing of Wood Symposium. Pp.319-352. Pullman WA.
- Rajeshwar, B.; Bender, D. A.; Bray, D. E.; McDonald. K. A.(1997). *An ultrasonic technique for predicting tensile strength of southern pine lumber*; American Society of Agricultural Engineers 0001-2351; VOL. 40(4):1153-1159.
- UNE EN 408 (2012). *Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.



UTILIZACIÓN DEL STRESS WAVE EN LA EVALUACIÓN DE LA MADERA DE FREIJÓ (CORDIA GOELDIANA HUBER)

USE OF STRESS WAVE IN WOOD OF FREIJÓ (CORDIA GOELDIANA HUBER)

CAMPOS, Niliane^{1*}; GONÇALEZ, Joaquim Carlos ²; DEL MENEZZI, Cláudio Henrique ²; COSTA, Mírian ³; PINTO, Adrianna ³; VALE, Larissa ³

¹ Estudiante de maestría en ciencias forestales. Universidad de Brasilia. Brasilia, Brasil.

² Profesor Doctor en la Facultad de tecnología. Universidad de Brasilia. Brasilia, Brasil.

³ Departamento de Ingeniería forestal. Laboratorio de tecnología de madera. Brasilia, Brasil.

*Contacto: Niliane Pereira Campos, nilianecampos92@hotmail.com

Resumen

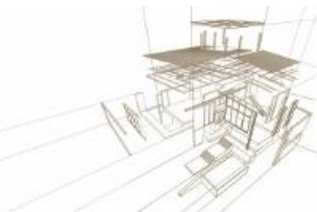
Se objetivó con el presente trabajo correlacionar los módulos de elasticidad dinámica (MOEd) y el estático (MOE) de la madera freijó (*Cordia goeldiana* Huber), utilizando para el ensayo no destructivo el aparato de la Metriguard Stress Wave Timer. Se han confeccionado 14 cuerpos de prueba en las dimensiones 2 x 2 x 30 cm (tangencial, radial y longitudinal, respectivamente). Los ensayos convencionales se realizaron conforme a la norma ASTM D143 / 09, con la obtención MOE. La estadística utilizada fue la descriptiva, donde los valores máximos y mínimo y desviación estándar fueron obtenidos, así como la correlación de Pearson para evaluar la correspondencia entre las variables. Los valores del MOEd fueron mayores que el MOE, siendo 24.836,62 y 9.334,17 MPa respectivamente. El coeficiente de variación del MOEd (7,03%) fue menor que el coeficiente de variación del MOE estático (15,52%), indicando una menor variabilidad de los datos en el método no destructivo que en el método destructivo. La correlación entre la velocidad de propagación de onda (VEL) y el MOE fue de 0,0014, muy inferior a la correlación establecida entre la VEL y el MOEd de 0,7575. La correlación entre MOEd y MOE fue baja, indicando una baja asociación entre las variables; se recomienda evaluar una mayor cantidad de muestras.

Palabras-clave: evaluación no destructiva; módulo dinámico de elasticidad; propagación de ondas.

Abstract

Researchers have found strong relationships between stress wave and transverse vibration parameters (e.g., wave velocity and modulus of elasticity predicted using non-destructive measurements) with the static bending properties (e.g., modulus of elasticity from static bending tests) of wood. Therefore, the objective of this work was to correlate modulus of elasticity (MOE) of freijó wood (*Cordia goeldiana* Huber) obtained by destructive and a non-destructive method. Metriguard Stress Wave Timer was used to measure wave propagation velocity in 14 samples with dimensions of 2x2x30 cm (radial, tangential and longitudinal respectively). To evaluate the sensitivity of the ultrasonic method, the specimens were submitted to conventional destructive static bending test according to ASTM D143/09 with determination of modulus of elasticity. Descriptive statistics were used to describe the basic features of the data, including maximum and minimum values, standard deviation and Pearson correlation, to measure the linear correlation between the variables. The dynamic MOE (MOEd) of 24.836,6 MPa, obtained by the ultrasonic method, was higher than the MOE obtained from conventional tests, 9.334,1 MPa. The non-destructive method presented a lower coefficient of variation in comparison to the conventional tests (7,03% and 15,52% respectively), expressing less variability of the non-destructive data. The Pearson correlation established between MOEd and wave propagation velocity was 0,7575, revealing a strong correlation between them. There was not a significant relationship between MOEd and MOE. It is recommended the use of greater number of samples.

Keywords: non-destructive evaluation; dynamic modulus of elasticity; waves of propagation.



1. INTRODUCCIÓN

La caracterización de la madera (en sus diversas formas) se realiza tradicionalmente mediante ensayos destructivos. Sin embargo, con el avance de la tecnología y los estudios aplicados a esta área, se desarrollaron algunas técnicas basadas en métodos no destructivos para estimar las propiedades físicas y mecánicas, sin cambiar las características estructurales y el uso final de la madera (PELLERIN & ROSS, 2002; BUCUR, 2006; MELO & DEL MENEZZI, 2016; GAFF et al., 2017). Além de não inutilizar o produto, outro grande diferencial dos ensaios não destrutivos, se comparado à caracterização destrutiva, é a rapidez na obtenção da informação almejada (STANGERLIN et al., 2010).

Según Ross (1999), las propiedades vibracionales, los rayos X, el análisis químico y la transmisión de ondas sonoras son algunas de las diversas tecnologías de evaluación de la madera no destructivas.

Se objetivó con el presente trabajo correlacionar los módulos de elasticidad dinámica (MOEd) y el estático (MOE) de la madera freijó (*Cordia goeldiana* Huber), utilizando para el ensayo no destructivo el aparato de la Metriguard Stress Wave Timer.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y recogida de material

La investigación se desarrolló en el laboratorio de tecnología de la madera del departamento de Ingeniería Forestal de la Universidad de Brasilia - Campus Darcy Ribeiro. Se hicieron catorce especímenes en dimensiones de 2 x 2 x 30 cm (tangencial, radial y longitudinal, respectivamente). Los ensayos convencionales se realizaron de acuerdo con COPANT 30: 1 -006/72 (Figura 1).

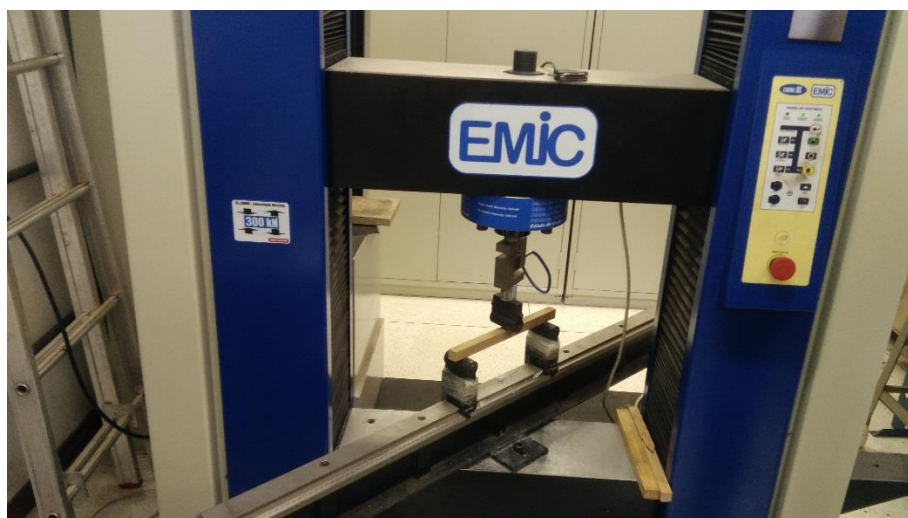
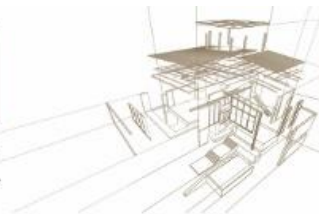


Figura 1: Máquina de prueba universal EMIC DL 30kM, utilizada en la prueba de flexión estática.

2.2. Pruebas no destructivas (*Stress wave*)



Para este ensayo se usó el aparato Stress Wave Timer modelo 239A (Metriguard Inc.). El dispositivo mide el tiempo de propagación de la onda de voltaje en toda la muestra, a través de dos transductores con acelerómetros, uno es un emisor de péndulo y el otro un receptor plano y un reloj registrador da velocidad de onda (Figura 2).

Para cada muestra, el volumen (cm³) se determinó midiendo la longitud (cm), el ancho (cm) y el grosor (cm) con un calibrador digital. Posteriormente, se determinó la masa (g) de cada muestra en una escala digital, modelo Marconi AS 2000, con una precisión de 0,01 g. Las muestras se fijaron al dispositivo mediante abrazaderas de palanca.

El péndulo unido a la pinza inicial indujo la onda de voltaje que atravesó toda la muestra hasta llegar al otro acelerómetro (Figura 2).

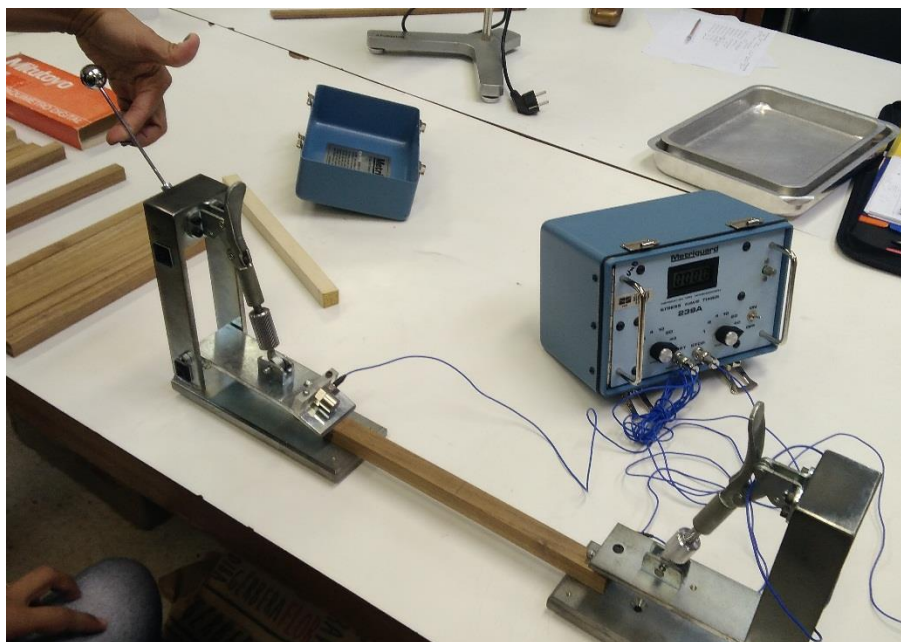


Figura 2: Stress Wave Timer modelo 239A (Metriguard Inc.).

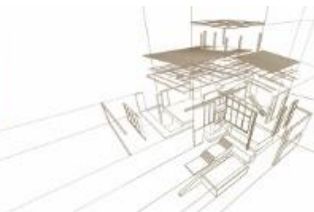
En cada muestra se tomaron tres lecturas del tiempo de propagación de onda obteniendo un valor promedio para el mismo (CALDERON. 2012). Para determinar la velocidad, se usó la Ecuación 1:

$$V = \frac{L}{t \times 10^{-6}} \quad (1)$$

Donde:

V = velocidad de propagación de la onda de voltaje (m/s); L = distancia recorrida por la onda de voltaje (m); t = tiempo de tránsito de la onda de voltaje (μs).

Para los módulos de prueba de módulo elástico dinámico (MOEDs) se usó un espacio de 28 cm de longitud para la flexión estática, de acuerdo con el estándar COPANT 555. El tiempo utilizado para el cálculo fue el promedio obtenido en las tres lecturas del dispositivo. El módulo dinámico de elasticidad se obtuvo por la ecuación 2:



$$MOEDs = V^2 D_{12\%} \frac{1}{g} \quad (2)$$

Donde:

MOEds = módulo dinámico de elasticidad (N/mm²);

V = velocidad de propagación de la onda de voltaje (m/s); D_{12%} = densidad a 12% de humedad (kg/m³); y g = aceleración por gravedad (9.804 m/s²).

2.3. Análisis estadístico

La estadística utilizada fueron descriptivas: máxima, mínima, desviación estándar y coeficiente de variación. La correlación de Pearson también se realizó para evaluar la correspondencia entre las variables.

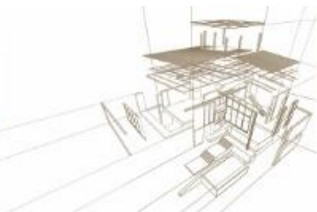
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La velocidad obtenida a través de Stress Wave analizando madera Freijó fue de entre 4.110.95 y 4.756.03 m/s⁻¹.

Tabla 1: Valores de velocidad media, Módulo de Elasticidad Dinámica, Módulo de Elasticidad Estática, obtenidos a través del equipo Stress Wave.

Stress Wave			
	VEL (m/s⁻¹)	MOEd (MPa)	MOE (MPa)
Media	4484.909	24836.627	9334.170
Mínimo	4110.958	21409.764	7432.350
Máximo	4756.039	27144.282	11552.658
DP	193.736	1747.395	1448.646
CV	4.319	7.035	15.519

VEL = Velocidad de propagación de la onda de voltaje. MOEd= Elástico dinámico constante *Stress Wave*. MOE = Módulo de elasticidad. DP = Desviacion estandar y CV = Coeficiente de variación.



Los valores MOE dinámicos de la onda de tensión fueron más altos que los MOE estáticos.

El coeficiente de variación de MOEds dinámicos fue menor que el coeficiente de variación de MOE (flexión estática). Tal comportamiento da un resultado positivo al manifestar menos variabilidad del método no destructivo en comparación con el destructivo.

La correlación de Pearson establecida entre la prueba de la onda de estrés y la flexión estática muestra una fuerte correlación entre la velocidad de propagación de la onda (VEL) y ser de 0.7575 m / s. Iwakiri y col. (2013) encontraron una fuerte correlación entre Vel X MOEds de 0.8389 m / s al estimar el módulo elástico dinámico de *Tectona grandis* utilizando métodos de onda acústica.

La correlación entre la velocidad de propagación de la onda (VEL) y el módulo de elasticidad estática (MOE) fue de 0.0014 m / s, siendo muy baja. La correlación entre el módulo dinámico de elasticidad (MOEds) y MOE (flexión estática) no fue significativa.

La regresión lineal entre el MOEd y el MOE obtenidos por la prueba de flexión estática no fue significativa, con $R^2 = 0.0004$, lo que puede explicarse por la baja cantidad de muestras evaluadas.

*Tabla 2: Correlación de Pearson entre la onda de tensión y la flexión estática para madera freijó (*Cordia goeldiana*).*

	Dens. kg/m ³	VEL (m/s)	MOEds (MPa)	MOE (MPa)
Dens.	1			
VEL	0.2199	1		
MOEds	0.8031	0.7575	1	
MOE	0.0505	0.0014	0.0222 NS	1

VEL= velocidad de propagación de olas; MOEds= constante elástica dinàmica *Stress Wave*; MOE= módulo de elasticidad.

4. CONSIDERACIONES FINALES

Con base en los datos experimentales, se observa que el método no destructivo que utiliza *Stress Wave* es eficiente para determinar el módulo de elasticidad de varias maderas.

El hecho de que la correlación entre el módulo dinámico de elasticidad (MOEds) y el MOE (flexión estática) no fuera significativo puede estar relacionado con la baja representatividad de las muestras.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bucur. V. (2006). **Acoustics of wood**. 2. ed. Basileía: Birkhäuser. 393 p.

CALDERON. C. M. A. (2012). O segmento moveleiro na região do Alto Juruá – AC: Perfil e uso de tecnologias alternativas para a caracterização das principais espécies madeireiras. 158p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Departamento de Engenharia Florestal. Universidade de Brasília. Brasília. 2012.

Gaff. M. et al. (2016). Bending characteristics of hardwood lamellae in the elastic region. *Composites Part B: Engineering*. v. 116. n. 1. p. 61- 75. 2017. DOI: j.compositesb. 12.058.

IWAKIRI. S.; MATOS. J. L. M.; TRIANOSKI. R.; PRATA. J. G.; ROCHA. V. Y.; IWAKIRI. V. T. (2013). Estimativa do módulo de elasticidade dinâmico nas diferentes posições do tronco das árvores de *Tectona grandis* utilizando método de ondas acústicas. *Scientia Forestalis*. Piracicaba. v. 41. n. 100. p. 523-532.

Melo. R. R. & Del Menezzi. C. S. (2016). Estimativas das propriedades físico-mecânicas de compostos LVL confeccionados com Paricá por meio de ultrassom. *Ciência Florestal*. v. 26. n. 1. p. 263-272.. DOI:10.5902/1980509821118.

Pellerin. R. F. & Ross. J. R. (2002). *Nondestructive evaluation of wood*. Madison: Forest Products Laboratory. 210 p.

ROSS. R.J. (1999). Using sound to evaluate stading timber: review. *Forest products journal*. p. 43-44.

Stangerlin. D. M. et al. (2010). Estimativa do módulo de elasticidade em painéis aglomerados por meio de emissão de ondas ultra-sonoras. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*. v. 5. n. 3. p. 17-22.



SELEÇÃO DE MADEIRAS DA AMAZÔNIA COM ANÁLISE DE CLUSTER PARA CANOAS DE PESCA NA CIDADE DE MANAUS

SELECTION OF AMAZON WOODS WITH CLUSTER ANALYSIS FOR FISHING CANOES IN THE CITY OF MANAUS

Almeida, Ana Célia ⁽¹⁾*; De Lima Mesquita, Antônio ⁽²⁾; Monteiro de Paula, Estevão ⁽³⁾;
Catanhede do Nascimento, Claudete ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Acadêmica de Eng. Naval. UEA – Universidade do Estado do Amazonas. Manaus, Brasil

⁽²⁾ Doutor, UEA – Universidade do Estado do Amazonas. Manaus, Brasil

⁽³⁾ Doutor, UEA – Universidade do Estado do Amazonas. Manaus, Brasil

⁽⁴⁾ Doutora, INPA – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Manaus, Brasil

* Contato: almeidaceliap@gmail.com

Resumo

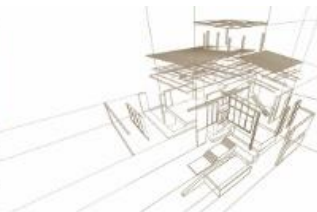
A frota pesqueira que abastece a cidade de Manaus engloba a maioria dos municípios do Estado do Amazonas. Sabe-se que é considerável a atuação do setor no fornecimento alimentício e principal fonte de renda dos ribeirinhos. No Amazonas, foram relatados que cinquenta e seis por cento (56%) dos armadores vivem exclusivamente da pesca, o que implica na grande exploração madeireira no setor naval. Observa-se que o manejo florestal sustentável é uma alternativa para a valorização das embarcações de pesca na região amazônica e para o desmatamento consciente dos recursos naturais. Com o decorrer dos anos, o homem tornou-se o principal responsável pelo cenário exploratório no Amazonas, um exemplo a ser destacado é a exploração da madeira Itaúba (*Mezilaurus itauba*) utilizada na região amazônica com foco principal na construção de canoas de pesca. A fim de minimizar os danos causados a Itaúba, realizou-se um estudo de seleção de espécies com potencial para substituir a mesma na construção das canoas, favorecendo o melhor aproveitamento das espécies nativas da região Norte. Os critérios de seleção se deram por meio de análise estatística multivariada com o uso dos métodos de clusterização e dendrogramação, onde os dados foram obtidos a partir do estudo realizado na área da Hidrelétrica de Balbina, reunindo um total de 40 espécies madeireiras nativas da Amazônia.

Palavras-chave: Análise de clusters, manejo florestal sustentável, pesca de subsistência.

Abstract

The fishing fleet supplying the city of Manaus encompasses most municipalities in the state of Amazonas. It is known that the sector's performance in food supply and the main source of income of the riverside communities is considerable. In Amazonas, 56% were reported off the shivers live exclusively from fishing, which implies the large logging in the naval sector. It is observed that sustainable forest management is an alternative for the valuation of fishing vessels in the Amazon region and for the conscious deforestation of natural resources. Over the years, man has become the main responsible for the exploratory scenario in Amazonas, an example to be highlighted is the exploitation of the wood Itaúba (*Mezilaurus itauba*) used in the Amazon region with main focus on the construction of canoes of Fishing. In order to minimize the damage caused to Itaúba, a study of species selection was carried out with the potential to substitute the same in the construction of canoes, favoring the better use of native species in the North region. The selection criteria were based on multivariate statistical analysis with the use of clustering and dendrogramation methods, where data were obtained from the study conducted in the area of the Balbina hydroelectric plant, gathering a total of 40 species Native timber from the Amazon.

Keywords: Cluster analysis, sustainable forest management, subsistence fishing.



1. INTRODUCCIÓN

La región norte de Brasil se beneficia geográficamente al tener la segunda vía fluvial más grande del mundo, el Río Amazonas con una longitud de 6,992 km, además de tener el Bosque Amazónico con toda su heterogeneidad de especies maderables. Como resultado de estos factores, es común encontrar en los ríos de la región embarcaciones fabricadas de forma artesanal con el uso de bosques nativos de la región. Teniendo los ríos como uno de los principales medios de transporte por el Estado del Amazonas, estas comunidades utilizan las canoas como su medio de transporte característico, que a su vez también se utilizan en la pesca de subsistencia para garantizar la fuente de proteínas de estas familias.

Según Araújo (2011), la gran región amazónica tiene una naturaleza biológica que está determinada por sus condiciones físicas / climáticas, con los factores meteorológicos de brillo solar, volumen de agua, lluvia, humedad relativa, que proporcionan una gran diversidad. Es de conocimiento que la selva amazónica, cuenta con alrededor de 600 millones de hectáreas, tiene un enorme potencial exploratorio, favoreciendo el desarrollo exponencial del sector maderero. Sin embargo, existe la presencia del ser humano en realizar prácticas de explotación en los bosques brasileños de manera inapropiada. De Paula (1997), afirma que desde la colonización del país, especies como la Secoya/ Palo Brasil (*Caesalpinia echinata*) han sido explotadas de manera depredadora.

El hombre a lo largo de los años, se convirtió en el principal responsable de este escenario de explotación, un ejemplo a destacar es la explotación de la madera Itaúba (*Mezilaurus itauba*) utilizada en la región norte con aplicación en la construcción de canoas. En un informe técnico de la Secretaría Municipal de Medio Ambiente y Sostenibilidad - SEMAS, desde 2009 esta especie maderera ha sido presentada y es vulnerable a la extinción.

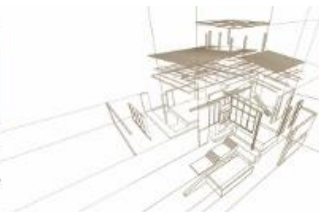
Al realizar una identificación de las especies presentes en el área de la planta hidroeléctrica Balbina, fue posible reunir datos de 40 bosques presentes en la región, con respecto a sus características estructurales y anatómicas. Para minimizar el daño causado a la madera de Itaúba, se realizó un estudio para seleccionar especies con potencial para reemplazar su uso en la construcción de canoas de pesca, proporcionando el mejor uso sostenible de las especies nativas de la flora amazónica.

Los criterios de selección de especies se obtuvieron mediante análisis estadísticos multivariados mediante métodos de dendrogramas y agrupación, obteniendo familias y agrupaciones de especies similares entre sí. Por lo tanto, se determinó qué bosques tienen mayores niveles de similitud con *Mezilaurus itauba*.

2. METODOLOGÍA

2.1. Análisis multivariado

Inicialmente, se define que para que dos cosas sean similares deben tener un nivel de equivalencia. Mediante el estudio del análisis estadístico multivariado, fue posible analizar el comportamiento de todas las variables que ocurren simultáneamente. Las



especies de madera se reorganizaron por el nivel de similitud entre ellas y a partir de esta premisa, se agruparon teniendo en cuenta los factores de las características estructurales y anatómicas.

Grus (2018) afirma que cuando se observa alguna fuente de datos, es normal que los datos formen grupos de alguna manera. Sobre la base de esta premisa, las variables del sistema se definieron donde se utilizaron para ambos métodos de agrupación. La resistencia estructural se dividió en cuatro variables: módulo de elasticidad en flexión con valores que varían de 7.06 MPa a 18.72 MPa, módulo de ruptura en la compresión que varía de 28.22 MPa a 120.54 MPa, El esfuerzo cortante, que oscila entre 5,10 MPa y 21,56 MPa, y las densidades básicas de madera se clasificaron en baja, media y alta. Para la resistencia natural, se eligió la resistencia de los bosques a hongos y termitas. Clasificándolos como: no resistentes, poco resistentes, moderadamente resistentes, resistentes y altamente resistentes.

El modelo realizado en el estudio se puede ver en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**(diagrama de flujo), que resume todo el proceso metodológico realizado para alcanzar el objetivo final a través de dos líneas de investigación, dendrogramación y agrupación.

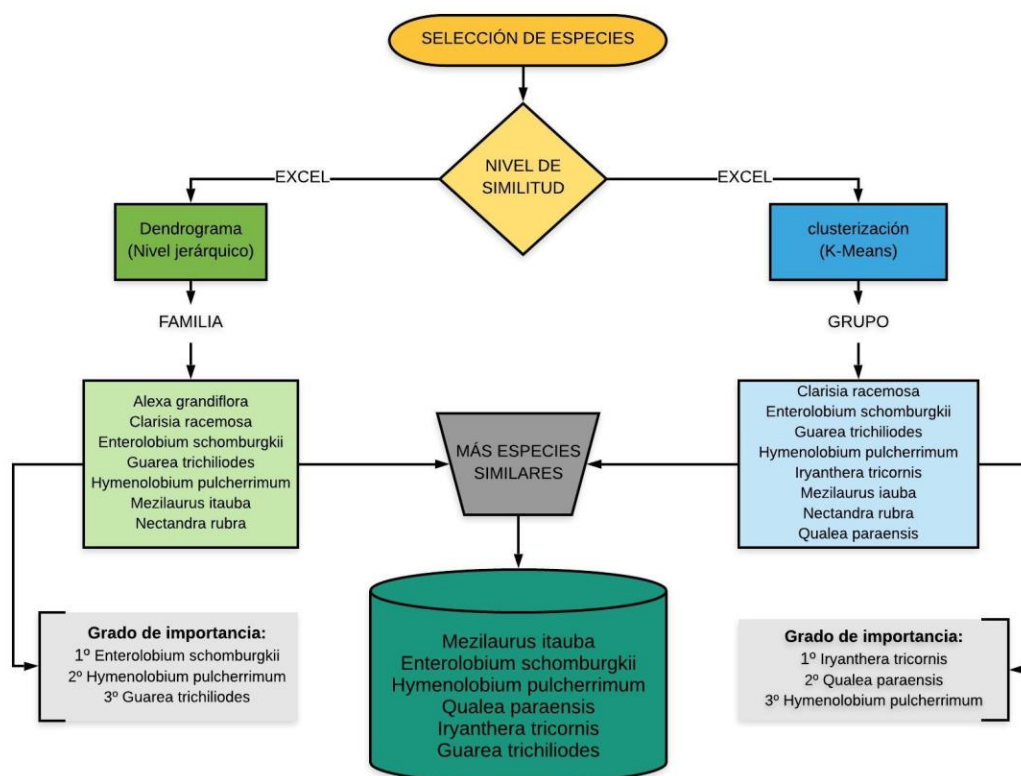
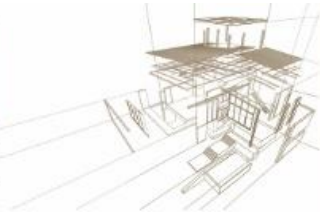


Figura 7: Proceso metodológico de la investigación

2.2. Dendrograma y Clusterización

En ambos métodos, se realizó un análisis de distancia euclidiana y los seis grupos generados en cada uno de los métodos de agrupación se definieron de antemano.



El dendrograma es la representación ramificada, presentada con una configuración equivalente a un árbol genealógico, donde los elementos que pertenecen al grupo comparten factores comunes entre ellos. Las especies se agruparon en seis familias de acuerdo con su nivel jerárquico de similitud, donde se tomaron en cuenta los datos de cada especie con respecto a la resistencia estructural y la resistencia natural.

En el método de agrupamiento, las especies se organizaron en seis grupos distintos, en los que las especies maderables equivalentes se unen a través de características similares de un estudio de medias, o k-medias, en relación con las fuerzas estructurales de cada uno. También se analizaron los comportamientos de las especies con respecto a su resistencia natural a hongos y termitas.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de dendrogramación, las especies se agruparon en 6 familias con varias ramas que detallan el nivel de similitud presente entre cada una. Notamos que cuanto más cerca estén del nivel jerárquico, mayores serán sus similitudes. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, podemos ver cómo se presentó el análisis y sus ciertas ramificaciones.

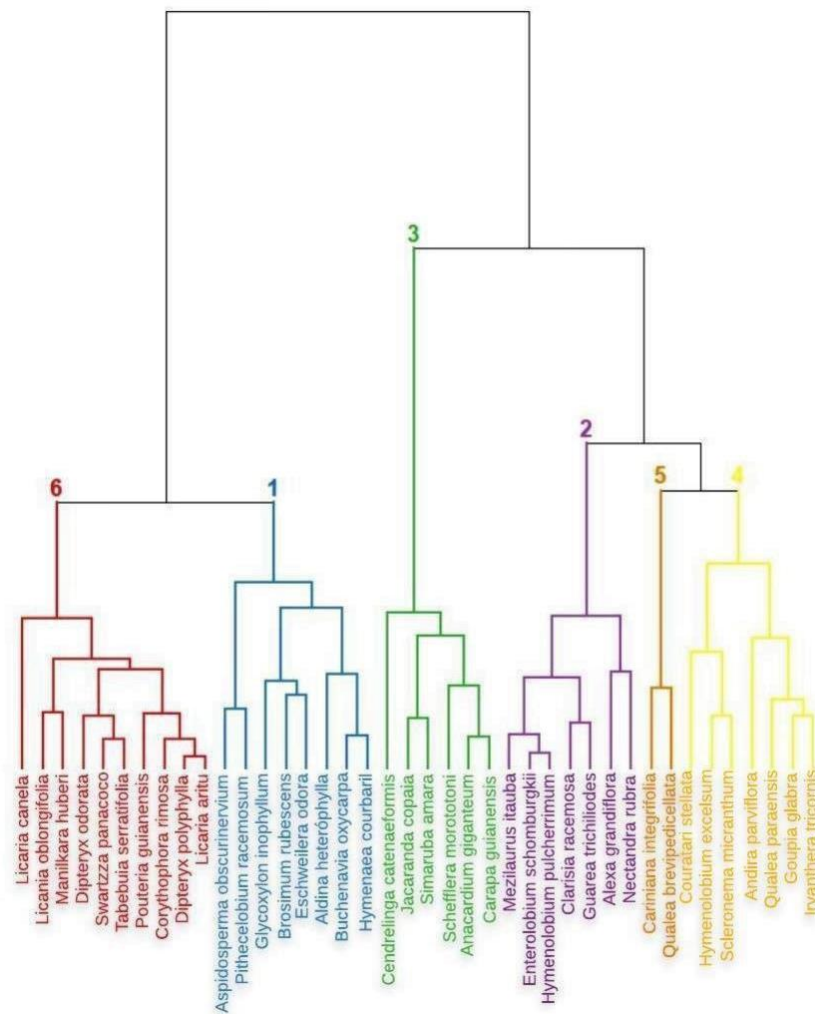
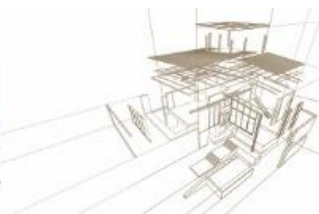


Figura 8: Agrupamiento Método Jerárquico

Observamos que en el Grupo 1 las especies se caracterizaron por su alta densidad básica. En cuanto a la resistencia estructural, tenemos que en este grupo el rango de módulo elástico es de 10.5 MPa a 15 MPa, el módulo de ruptura varía de 47.8 MPa a 80.1 MPa y las tensiones de ruptura con valores entre 12.9 MPa a 18 MPa. En cuanto a su resistencia natural a hongos y termitas, se encontró que las especies eran resistentes, moderadamente o muy resistentes.

Para las especies de madera agrupadas en las ramas que pertenecen al Grupo 3, notamos una variación en las densidades básicas en comparación con el Grupo 1. A diferencia del primer grupo, en estas ramas las especies tienen bajas densidades en todos los casos. Para las resistencias estructurales, tenemos en este grupo un módulo de elasticidad entre 7.1 MPa a 11.1 MPa, mientras que para los módulos de ruptura obtuvimos un rango de 28.2 MPa a 48.6 MPa y para la tensión de ruptura, el intervalo estuvo entre 5,1 MPa y 12,3 MPa. En los resultados obtenidos para las características de resistencia natural, se encontró que en el 75% de los casos las especies tienen poca o ninguna resistencia a hongos y termitas y el 25% es moderadamente resistente.



Para las especies maderables que pertenecen al Grupo 4, se observó que las especies encontradas en este grupo presentaban densidades básicas promedio. Con respecto a las resistencias estructurales, éstas presentaron en un rango de 11.2 MPa a 13.6 MPa para el módulo de elasticidad, 60.1 MPa a 73 MPa para el módulo de ruptura y un rango de 9.3 MPa a 14.3 MPa para las tensiones de ruptura. Al analizar el comportamiento de estas especies ante el ataque de hongos y termitas, en el 71.4% de los casos, las especies maderables mostraron cierta resistencia a estos agentes externos, y en el 28.6% las especies fueron poco o nada resistentes.

En el Grupo 5, todas las especies maderables presentaron densidades básicas promedio y en el 100% del grupo se informó que tienen poca o ninguna resistencia a los hongos y termitas. En cuanto a las otras variables del sistema, obtuvimos intervalos de 9.8 MPa a 11.4 MPa para el módulo de elasticidad, 43.6 MPa a 44.1 MPa para el módulo de ruptura y finalmente, 7.9 MPa a 10.8 MPa para la tensión de ruptura.

En el Grupo 6, obtuvimos en el 100% de los casos altas densidades básicas, siendo similares a los resultados encontrados en el Grupo 1; Sin embargo, al observar la resistencia natural de estas especies maderables, se encontró que en el 90% de los casos las especies son altamente resistentes a los hongos y termitas en el Grupo 6, mientras que para el Grupo 1, este valor cae al 37.5%.

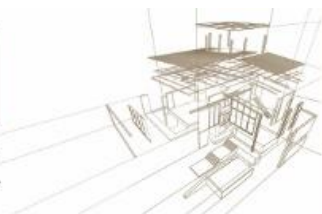
En las especies que se agruparon en las ramas del Grupo 2, consideradas las más importantes de este análisis, observamos que tienen factores comunes con *Mezilaurus itauba*, que fue la especie elegida como la especie maderera modelo de este estudio. En este grupo observamos que las especies más cercanas al árbol genealógico del Grupo 2 son: *Enterolobium schomburgkii* y *Hymenolobium pulcherrimum*. Además de que estas especies de madera tienen factores comunes con Itaúba, también tienen aplicación de datos bibliográficos acordes en la construcción de canoas en el Estado de Amazonas, corroborando así la validación de los resultados obtenidos. Las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, respectivamente, muestran el comportamiento de estas especies en la resistencia estructural y natural.

Tabela 1: Comportamiento de las especies propiedades Físico- mecánicas

Nombre Científico	Densidad Básica	Módulo de elasticidad	Módulo de ruptura	Tensión de ruptura
<i>Hymenolobium pulcherrimum</i>	Média	11,858	64,974	12,544
<i>Enterolobium schomburgkii</i>	Média	12,642	63,406	14,504
<i>Mezilaurus itauba</i>	Média	13,034	51,45	11,564

Tabela 2: Resistencia de las especies de madera a Factores de Biodegradación

Nombre Científico	Ataque de Termitas	Ataque de Hongos
-------------------	--------------------	------------------



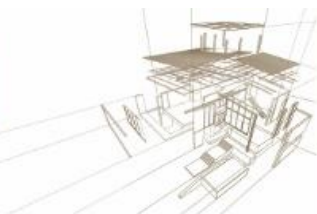
<i>Hymenolobium pulcherrimum</i>	Altamente resistente	Resistente
<i>Enterolobium schomburgkii</i>	Altamente resistente	Resistente
<i>Mezilaurus itauba</i>	Altamente resistente	Resistente

Las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestran que las especies tienen muchos factores en común, como la densidad básica y la resistencia al ataque de hongos y termitas. También fue observado que cuando se trata de su resistencia estructural, las tres especies presentaron valores con una pequeña variación.

En el segundo método utilizado en este análisis, se realizó un estudio de promedios entre las variables del sistema para detectar sus grados de similitud, con el fin de organizar los grupos o grupos con las especies de madera equivalentes entre sí. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra los resultados obtenidos a partir del método de agrupamiento, que muestra cómo se organizaron las especies.

Tabela 3: Grupos de especies utilizando el método de agrupamiento

GRUPO 01	GRUPO 02	GRUPO 03
<i>Aldina heterophylla</i>	<i>Alexa grandiflora</i>	<i>Andira parviflora</i>
<i>Aspidosperma obscurinervium</i>	<i>Anacardium giganteum</i>	<i>Couratari stellata</i>
<i>Brosimum rubescens</i>	<i>Carapa guianensis</i>	<i>Goupia glabra</i>
<i>Buchenavia oxycarpa</i>	<i>Cariniana integrifolia</i>	<i>Hymenolobium excelsum</i>
<i>Corythophora ramosa</i>	<i>Cedrelinga catenaeformis</i>	<i>Scleronema micranthum</i>
<i>Dipteryx odorata</i>		
<i>Dipteryx polyphylla</i>		
<i>Eschweilera odora</i>		
<i>Glycoxylon inophyllum</i>		
<i>Hymenaea courbaril</i>		
<i>Pithecelobium racemosum</i>		
GRUPO 04	GRUPO 05	GRUPO 06
<i>Clarisia racemosa</i>	<i>Jacaranda copaia</i>	<i>Licania oblongifolia</i>
<i>Enterolobium schomburgkii</i>	<i>Qualea brevipedicellata</i>	<i>Licaria aritu</i>
<i>Guarea trichiliodes</i>	<i>Schefflera morototoni</i>	<i>Licaria canela</i>
<i>Hymenolobium pulcherrimum</i>	<i>Simaruba amara</i>	<i>Manilkara huberi</i>
<i>Iryanthera tricornis</i>		<i>Pouteria guianensis</i>
<i>Mezilaurus itauba</i>		<i>Swartzza panacoco</i>



Nectandra rubra

Tabebuia serratifolia

Qualea paraensis

Los resultados obtenidos a partir de este método mostraron que el Grupo 04, que pertenece a la especie *Mezilaurus itauba*, se detectó nuevamente la presencia de las especies *Enterolobium schomburgkii* e *Hymenolobium pulcherrimum*, se encontraron en el estudio de dendogramas, lo que confirma una vez más la validez de los datos en cuanto al nivel de similitud. También se observó que para ambos análisis los grupos presentaron la misma especie dentro de los grupos, que incluyen: *Clarisia racemosa*, *Guarea trichiliodes*, *Guarea trichiliodes* y *Nectandra rubra*.

En el análisis de clusterización de datos se encontró que dentro del grupo, la especie que más se parecía a Itaúba era *Qualea paraensis*, una especie que no pertenecía al grupo formado en el análisis de dendrograma. Sin embargo, según la Organización Internacional de las Maderas Tropicales (OIMT), las aplicaciones de *Qualea paraensis* también se pueden encontrar en la construcción de embarcaciones de madera, específicamente en canoas y remos.

Según Lins (2011), la industria de la construcción naval emerge como uno de los mayores contribuyentes al desarrollo económico de la región, destacándose como uno de los mayores creadores de empleo. Los datos proporcionados por IBGE (2017) informan que el corte de la madera destinada a la construcción naval, la construcción civil, entre otros, generó R \$ 4,5 mil millones, un aumento del 16,6% en comparación con 2016. Puede afirmarse sobre la importancia de una visión sostenible con respecto a las técnicas de explotación de las especies maderables. Los dos análisis desarrollados en este estudio promovieron un grupo de alternativas con nuevas opciones de especies maderables que tienen características equivalentes a las encontradas en Itaúba, contribuyendo en gran medida como nuevos modelos de explotación sostenible.

4. CONCLUSIONES

Los análisis generados en este estudio se centraron en la generación de grupos de especies que podrían reemplazar la madera de Itaúba (*Mezilaurus itauba*), actualmente utilizada con gran frecuencia en la construcción de embarcaciones de madera en la región norte de Brasil.

Se observó que en los dos métodos utilizados, dendrograma y agrupamiento (Clusterización), las especies presentes en casi todos ellos eran las mismas para ambos grupos, especialmente *Enterolobium schomburgkii* y *Hymenolobium pulcherrimum*. La validación de los resultados obtenidos en ambos métodos se confirmó de acuerdo con la literatura actual.

El resultado final presentó que el grupo de 5 especies de madera con características estructurales y anatómicas equivalentes a las encontradas en Itaúba, que incluyen: Sucupira amarilla (*Enterolobium schomburgkii*), Angelim-Pedra (*Hymenolobium pulcherrimum*), Mandioqueira (*Qualea paraensis*), Ucuúba-punã (*Iryanthera tricornis*) y Gitó (*Guarea trichiliodes*).

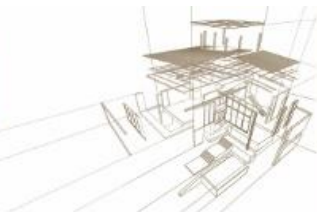


AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Estatal de Amazonas - UEA por su apoyo académico, a la Fundación para el Apoyo a la Investigación en el Estado de Amazonas - FAPEAM, por su apoyo financiero y al Laboratorio de Ingeniería de Artefactos de Madera INPA por otorgar la base de datos utilizada en esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araujo, V. C. de. (2011). *Silvicultura Tropical Amazônia*. Valer. 22ª edição, 260p.
- Paula, J. E. de. (1997). *Madeiras nativas: anatomia, dendrologia, dendrometria, produção e uso*. Fundação Mokiti Okada.
- Grus, J. (2018). *Data Science do zero: Primeiras regras com o Python*. Alta Books Editora.
- IBGE (2017). *Pevs 2017: produção da silvicultura e da extração vegetal chega a R\$ 19,1 bilhões e cresce 3,4% em relação a 2016*. Agência IBGE notícias.
- ITTO (2019). *Mandioqueira (Qualea paraensis)*. International Tropical Timber Organization.
- Lins, N. V. M. (2011). *Construção naval na Amazônia*. Manaus: BK editora.
- SEMAS (2009). *Espécies Ameaçadas*. Secretaria de meio ambiente e sustentabilidade



CLASIFICACIÓN VISUAL DE MADERA DE *PINUS ELLIOTTII* DE URUGUAY Y ESTIMACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD MEDIANTE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS

VISUAL GRADING OF URUGUAYAN *PINUS ELLIOTTII* AND STIFFNESS ESTIMATION BY NON DESTRUCTIVE TECHNIQUES

Quagliotti, Sebastián^{(1)*}; Bruzzone, Gastón⁽²⁾; Cháben, Álvaro⁽²⁾; Baño, Vanesa⁽³⁾; Moya, Laura⁽⁴⁾

⁽¹⁾Ing. Agr. Laboratorio Tecnológico del Uruguay-LATU y Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

⁽²⁾Estudiante. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

⁽³⁾Dr. Ing. Montes. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

⁽⁴⁾ PhD Arq. Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay. Montevideo, Uruguay

* Contacto: squaglio@latu.org.uy

Resumen

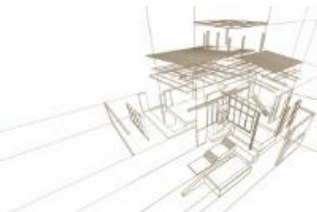
En los últimos años Uruguay comenzó a redactar el paquete normativo necesario para el desarrollo de la construcción con madera. En 2018 se aprobaron las normas de clasificación visual estructural para maderas cultivadas nacionales, en particular para madera aserrada de pinos. Debido a su reciente aprobación y con el fin de confrontar la eficiencia de su aplicación, este trabajo propone aplicar los criterios de clasificación visual establecidos en la norma UNIT 1261 para la estimación de las calidades visuales de la madera de pino; y verificar los valores de rigidez mediante técnicas no destructivas (NDT). Para ello se evaluó un lote comercial de 300 vigas de tamaño estructural (50 mm x 150 mm x 2850 mm) provenientes de árboles de *Pinus elliottii* de 27 años del Departamento de Rivera. Las vigas se clasificaron visualmente, y posteriormente se estimó su rigidez mediante Fakopp, flexión estática con pesas, y flexión estática en máquina universal de acuerdo a EN 408. Adicionalmente se determinó la densidad y el contenido de humedad. Los resultados indican que el 24 % de las vigas corresponden a la calidad visual EC1, con valores de rigidez similares a los de C14 de EN 338; 59 % a la EC0 con valores de rigidez inferiores ($E_0=5.288$ MPa) y 17 % son rechazadas. Los resultados de NDT permiten obtener ecuaciones lineales que posibilitan obtener el MOE estático, habiéndose observado una buena correlación entre el MOE dinámico y el estático.

Palabras-clave: Pinus elliottii uruguayo, clasificación visual, métodos no destructivos, módulo de elasticidad

Abstract

In the last years, Uruguay started to draft the standard package essential to improve the use of timber in building construction. In 2018, the grading rules for national cultivated species were approved, in particular for sawn pine timber. Due to its recent approval and in order to confront the efficiency of its application, this work proposes to apply the visual grading criteria established in UNIT 1261 to estimate the visual classes for pine timber; and to verify stiffness values by non-destructive techniques (NDT). A commercial sample comprised of 300 structural size beams (50 mm x 150 mm x 2850 mm) from 27-year-old *Pinus elliottii* trees from Rivera, was evaluated. The beams were visually graded, and their stiffness was estimated by Fakopp, static bending with weights, and static bending in universal machine according to EN 408. Additionally, density and moisture content were determined. Results indicate that 24% of the beams correspond to visual class EC1, with stiffness values similar to that of C14 of EN 338; 59% correspond to EC0 with lower stiffness values ($E_0 = 5,470$ MPa) and 17% are rejected. The NDT results allow to obtain linear equations for static modulus of elasticity prediction. Furthermore a good correlation between the dynamic MOE and static MOE was found.

Keywords: Uruguayan Pinus elliottii, visual grading, non-destructive techniques, modulus of elasticity



1. INTRODUCCIÓN

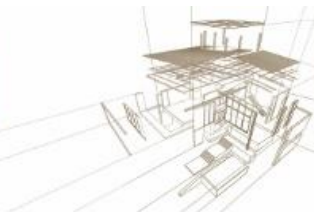
Uruguay cuenta con 1,2 millones de ha de bosques cultivados con especies de rápido crecimiento, de las cuales el 21% corresponde al género de *Pinus* (pino), y dentro de éste, a las especies de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* (MGAP 2018). Debido a la similitud de sus propiedades físicas, estas dos especies usualmente son plantadas y comercializadas en forma mezclada (Moya et al. 2015), ubicándose en el tercer lugar de predominancia entre las cultivadas en Uruguay. El 90% de las plantaciones de pino están situadas en los departamentos norteños de Rivera y Tacuarembó.

Se estima que existe una oferta anual promedio de 3 millones de m³ de madera de pino con destino a la transformación mecánica (Dieste 2012). Por otra parte, varios autores indican que las propiedades mecánicas y elásticas de la madera de pino permiten su empleo como material estructural (Baño et al. 2018, Moya et al. 2015, O'Neill et al. 2003, Pérez del Castillo 2000). Sin embargo, el uso estructural de madera de pino uruguayo es escaso, debido a la falta de madera con especificaciones técnicas conocidas, y a la inexistencia del paquete normativo que respalde técnicamente su uso. Dado que la determinación de las propiedades estructurales, fundamentalmente la resistencia, rigidez y densidad se realiza mediante ensayos destructivos que impiden el uso posterior de la pieza ensayada, ha sido necesario el desarrollo de métodos no destructivos para predecir la aptitud estructural de la madera. El más ampliamente utilizado a nivel mundial es el método de clasificación visual.

La clasificación visual para madera estructural fue empleada por primera vez en la década de 1920 (Yang et al. 2015). Consiste en comparar el tamaño de ciertas singularidades en relación a las dimensiones de la pieza evaluada, siguiendo los lineamientos de una norma de clasificación visual (Fernández-Golfín et al. 2003). Como resultado las piezas son segregadas en calidades visuales asociadas a grados estructurales ó clases resistentes con una familia de propiedades mecánicas y elásticas conocidas. La técnica de clasificación visual tiende a subestimar la calidad estructural de la pieza evaluada, y genera gran cantidad de rechazos de piezas con potencial uso estructural (Fernandez-Golfin et al. 1998, Acuña et al. 2007).

Para mejorar la eficiencia en la predicción de las propiedades mecánicas, la clasificación visual es complementada con otras técnicas no destructivas (NDT) cuyo fundamento radica en la relación entre el módulo de elasticidad estático usualmente determinado en ensayos de flexión y el módulo dinámico. A su vez, para piezas de madera de coníferas de tamaño estructural se han reportado buenas relaciones ($R^2=0,77$) entre módulo de elasticidad obtenido mediante NDT y módulo de elasticidad determinado en ensayos de flexión (Arriaga et al. 2005).

Los métodos NDT han sido revisados exhaustivamente para la madera (Brashaw et al. 2009, Vega 2013,.) y pueden concentrarse en cuatro grupos: i) acústicos, ii) mecánicos, iii) electromagnéticos y iv) nucleares (Vega 2013). Interesa destacar entre los acústicos, el método de onda de impacto, que consiste en medir el tiempo de propagación de una onda sónica (i.e., ondas con una frecuencia entre 20 Hz y 20 kHz) inducida por un impacto, en recorrer la distancia entre dos transductores. A partir del tiempo de



propagación de la onda y la densidad de la madera se obtiene el módulo de elasticidad dinámico (Ed).

Varios autores han reportado que las técnicas de propagación de ondas complementadas con información sobre algunos parámetros de clasificación visual permitieron predecir con mayor precisión la resistencia y rigidez de maderas de coníferas (Conde et al. 2007, Cagno et al. 2014). Por otra parte el proyecto publicado por VTT (Hanhijarvi and Ranta Mannus 2008) que involucró la caracterización de más de mil trozas de madera de *Picea abis* y mil de *Pinus sylvestris*, indicó mayores valores de coeficientes de determinación (R^2) entre resistencia y los parámetros de NDT para la segunda especie.

A partir de 2017 se establece un Comité técnico en el ámbito del Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT) donde se comienza la redacción de normas para madera estructural. En 2018 se aprueba la primera norma de clasificación visual por resistencia para madera aserrada de pinos (*Pinus elliottii* y *P. taeda*). Debido a su reciente aprobación y con el fin de confrontar la eficiencia de su aplicación, este trabajo propone aplicar los criterios de clasificación visual establecidos en la norma UNIT 1261 (2018) para la estimación de las calidades visuales de la madera de pino; y verificar los valores de rigidez mediante técnicas no destructivas.

2. METODOLOGÍA

El material estudiado consistió en 300 vigas de tamaño estructural de *Pinus elliottii* provenientes árboles de 27 años de una plantación situada en el Departamento de Rivera, en el NE de Uruguay. Luego del proceso de secado en horno convencional, las vigas fueron enviadas al Departamento de Materiales y Productos Forestales del LATU. Fueron cepilladas en las cuatro caras hasta sus dimensiones finales (50 mm x 150 mm x 2850 mm) y equilibradas a un contenido de humedad (CH) ambiente de aproximadamente 12%.

2.1. Clasificación visual

Todas las vigas fueron evaluadas visualmente de acuerdo a la norma UNIT 1261 (UNIT 1261 2018) para madera aserrada de *Pinus taeda* y *Pinus elliotti* cultivadas en Uruguay. La norma establece dos calidades visuales, EC1 y EC0, a partir de las singularidades descritas en la Tabla 1.

Tabla 1: Especificaciones para la clasificación visual de piezas de sección rectangular de pino (UNIT 1261)

Criterios de calidad	Calidad visual EC1	Calidad visual EC0
Diám nudos (d) sobre la cara (h)	$d \leq 1/4 h$	$d \leq 2/3 h$
Diám nudos (d) sobre el canto (b)	$d \leq 2/3 b$	$d \leq 3/4 b$
Presencia de médula	Permitida	
Dirección de las fibras	Desviación $\leq 1:8$	Desviación $\leq 1:6$
Ancho máx de anillo crecimiento	Sin limitación	



Rajaduras	$\leq 0,75 \text{ m ó } \leq (1/4)L^a$	
Grietas	$\leq 1,5 \text{ m ó } \leq (1/2)L$	
Fisuras de rayo, heladura o abatimiento	No permitidas	
Bolsas de resina y entrecasco	$\leq 1,5 \text{ h}$	
Madera de reacción: compresión	Sin limitación	
Alteraciones biológicas:	Permitido	
- Azulado	No permitido	
- Hongos de pudrición	No permitido	
- Galerías de insectos	Diámetro de los orificios < 2 mm	
Deformaciones:		
- Arqueadura	$\leq 8 \text{ mm}$	$\leq 16 \text{ mm}$
- Encorvadura	$\leq 8 \text{ mm}$	$\leq 16 \text{ mm}$
- Torcedura	$\leq 1 \text{ mm por } c/ 25 \text{ mm de } h$	$\leq 2 \text{ mm por } c/ 25 \text{ mm de } h$
- Acanaladura	-	-
Arista faltante	$\leq 1/4 \text{ h}$	$\leq 1/3 \text{ h}$
<p>^a En los extremos, su largo no debe ser mayor que 2 veces el ancho de la tabla; d es el diámetro del nudo; h, b y L son ancho, espesor y longitud de la pieza.</p>		

2.2. Ensayos dinámicos

Luego de clasificadas, las vigas EC1 y EC0 fueron ensayadas mediante NDT para determinar el módulo de elasticidad dinámico (E_d). Para cada viga, se registraron las dimensiones reales promedio (base, altura y luz), la masa con una balanza electrónica de 0,1 g de precisión (Mettler Toledo), y el CH con xilohigrómetro de resistencia eléctrica (Lignomat). La densidad aparente (ρ) de cada viga se calculó como el cociente entre la masa y su respectivo volumen.

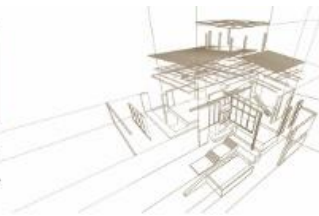
La determinación E_d se realizó por el método de onda de impacto utilizando el equipo Microsecond Timer, de Fakopp. Se midió la velocidad de propagación de onda sónica en recorrer la distancia entre dos transductores, cada uno ubicado en las testas de la viga. E_d se calculó de acuerdo a la ecuación (1):

$$E_d = \rho \times v^2 \quad (1)$$

donde:

- ρ es la densidad de la viga (kg/m^3),
- v es la velocidad de propagación (m/s)

2.3. Ensayos mecánicos



La determinación del módulo de elasticidad en flexión se realizó mediante ensayos mecánicos i) con pesas y ii) en máquina universal.

Ensayo flexión por pesas, sobre la viga simplemente apoyada, se aplicó carga en forma incremental utilizando discos metálicos de 5 kg cada uno, y se midió la deformación correspondiente a cada incremento de carga mediante un transductor (Fig. 1). Este procedimiento se realizó en el tramo elástico del diagrama carga-deformación. El módulo de elasticidad (E pesas) se calculó de acuerdo a la ecuación (2):

$$E_{\text{pesas}} = \frac{\Delta P * L^3}{4 * \Delta y * b * h^3} \quad (2)$$

donde:

- ΔP es la diferencia de carga en el intervalo elástico (N),
- Δy es la deformación en el intervalo elástico (mm),
- L es la distancia entre apoyos de la viga (mm),
- b y h son ancho y espesor de la viga, respectivamente (mm).

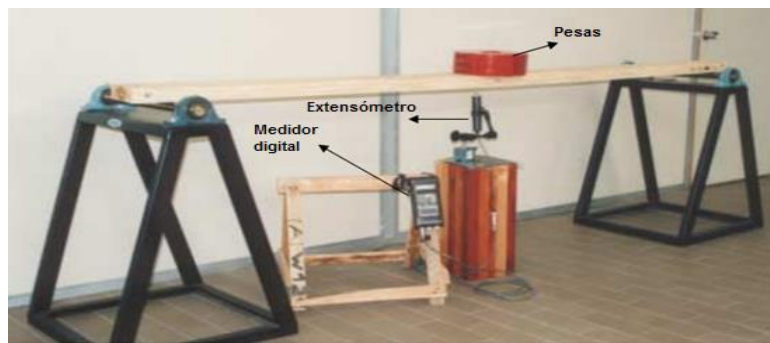


Figura 1: Dispositivo experimental para medir el módulo de elasticidad con pesas

Ensayo flexión en máquina universal. Todas las vigas fueron ensayadas a flexión estática en cuatro puntos de acuerdo a EN 408 (AENOR 2011), con la disposición de la viga simplemente apoyada y la aplicación de dos cargas en los extremos del tercio central. Se utilizó una máquina universal Minebea con una celda de carga de 250 kN y con capacidad para aplicar cargas a velocidad constante (ver Fig. 2). La deformación fue medida con dos extensómetros ubicados en el plano neutro en la mitad de la luz de la pieza. Para cada viga el módulo de elasticidad global en flexión ($E_{m,g}$) se calculó de acuerdo a (3):

$$E_{m,g} = \frac{3aL^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb h} \right)} \quad (3)$$

donde:

- a es la distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo (mm),
- L es la luz de ensayo (mm),
- b y h son base y altura (mm) respectivamente,
- G es el módulo de elasticidad transversal, calculado como $E_{m,g}/16$ (EN 384 2010),
- $F_2 - F_1$ es el incremento de carga en la línea recta de regresión entre el 10% y 40% de la carga máxima estimada (N),
- $w_2 - w_1$ es el incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$ (mm).



Vale señalar que los ensayos fueron no destructivos, *i.e.*, realizados hasta lograr una carga máxima del 40% de la carga de rotura estimada. La carga máxima fue estimada previamente, a partir de 10 vigas de cada muestra ensayadas hasta la rotura.



Figura 2: Dispositivo experimental para determinar el módulo de elasticidad en máquina universal

El módulo de elasticidad y la densidad se ajustaron al 12% de CH de acuerdo a EN 384 (AENOR 2011), luego se determinaron los valores característicos de ambas propiedades de acuerdo a EN 14358 (AENOR 2016) y EN 384 (AENOR 2016).

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Clasificación Visual

La Tabla 2 indica el resultado de la aplicación de la norma UNIT 1261. La causa principal de rechazo fue el tamaño de nudos, observados tanto en la cara como en el canto.

Tabla 2: Resultados de la aplicación de la norma de clasificación visual UNIT 1261

Calidad visual	Número de piezas	Porcentaje (%)
EC1	71	24
EC0	177	59
Rechazo	51	17
Total	299	100

Los resultados son similares a los reportados por Fernández-Golfín et al. (1998) que clasificaron piezas de tamaño estructural de tres especies de *Pinus* (*P. radiata*, *P. sylvestris*, *P. pinaster*), de acuerdo a UNE 56544 (AENOR 2011). El 29% de las tablas correspondieron a la clase ME1, 48% a ME2 y 23% fueron rechazadas. Se evidenció que tanto la presencia de médula como de madera juvenil no afectó significativamente la resistencia, pero produjo deformaciones excesivas que llevaron a excluir su presencia en la clase ME1. En la misma línea, Díez et al. (2000) que estudiaron piezas de tamaño estructural de *Pinus nigra* de Jaén, reportaron los siguientes resultados de la



clasificación visual: 22% fueron asignadas a la clase ME1, 47% a la clase ME2 y 31% rechazadas.

La Tabla 3 indica el resultado de la aplicación de la norma UNIT 1261 considerando además, la presencia de médula como criterio restrictivo para las dos calidades visuales. Se puede observar un cambio significativo en el porcentaje de piezas clasificadas en cada clase comparado con los respectivos porcentajes de la Tabla 2.

Tabla 3: Resultados de la aplicación de la norma de clasificación visual UNIT 1261 considerando a la médula como un criterio de calidad no admitido

Calidad visual	Número de piezas	Porcentaje (%)
EC1	24	8
EC0	50	17
Rechazo	225	75
Total	299	100

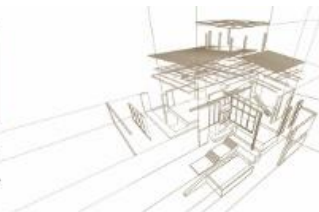
Estos nuevos resultados son similares a los publicados por Acuña et al. (2004) para vigas de *Pinus pinaster*, donde sólo el 3% de las piezas calificaron como ME1, el 20% ME2 y 77% fueron rechazadas. Vale señalar que si bien el número de piezas clasificadas considerando la ausencia de médula como criterio de aceptación en ambas clases se redujo claramente, en el análisis posterior (ítem 3.3) se estudia el efecto de restringir la presencia de médula en las propiedades mecánicas de las piezas clasificadas.

3.2 Ensayos mecánicos y densidad

La Tabla 4 presenta los resultados de las 248 piezas clasificadas EC1 o EC0 según UNIT 1261, los valores de Módulo de elasticidad obtenidos en ensayos mecánicos en máquina universal (E_{12} global) y por pesas (E_{pesas}), y los valores determinados en ensayos dinámicos (E_d Fakopp). La densidad (ρ_{12}) y el E_{12} global fueron corregidos a 12% de CH de acuerdo a EN 384.

Tabla 4: Módulos de elasticidad estáticos y dinámico, y densidad de piezas clasificadas de acuerdo a UNIT 1261.

	Densidad	Ensayos estáticos		Ensayo dinámico
	ρ_{12} (g/cm ³)	E_{12} global Maq. Universal (N/mm ²)	E_{pesas} (N/mm ²)	E_d Fakopp (N/mm ²)
Promedio	0,403	6027	6165	7401
Desv std	0,036	1600	1662	1833
CoV %	9	27	27	25
n	248	248	238	248



Los valores medios de la densidad están dentro del rango para las especies de pinos uruguayos, y el CoV menor 10% indica homogeneidad en población. Los resultados son consistentes con estudios similares realizados por el grupo de investigación del Departamento de Proyectos Forestales del LATU (Pérez del Castillo 2001, O'Neill et al. 2002, O'Neill y Tarigo 2008). En particular O'Neill et al. (2003) reportaron valores promedio de MOE de 6796 N/mm² para piezas de tamaño estructural de *Pinus elliottii* de 24 años de Río Negro. El bajo valor la rigidez encontrado en el presente estudio se puede explicar debido a que 174 vigas de las 243 clasificadas presentaron médula, y que puede ser asociada a la presencia de madera juvenil, que a su vez induce a una reducción de las propiedades mecánicas de las piezas estudiadas.

En la Tabla 4 se puede observar los valores obtenidos de Módulo de elasticidad utilizando métodos NDT en comparación con el determinado en Máquina universal. Ambos métodos sobrestiman dicho valor, siendo el valor de E_{pesas} en promedio un 2,3 % mayor y para $E_{\text{d fakopp}}$ un 22,8 en promedio mayor. Si bien ambos métodos sobrestiman el valor de Módulo de elasticidad determinado en máquina universal poseen una alta correlación con el mismo. Las Figuras 3 y 4 muestran las ecuaciones lineales y las correlaciones entre Módulo de elasticidad determinado por máquina universal y Fakopp ($r = 0,92$) y máquina universal flexión con pesas ($r = 0,95$).

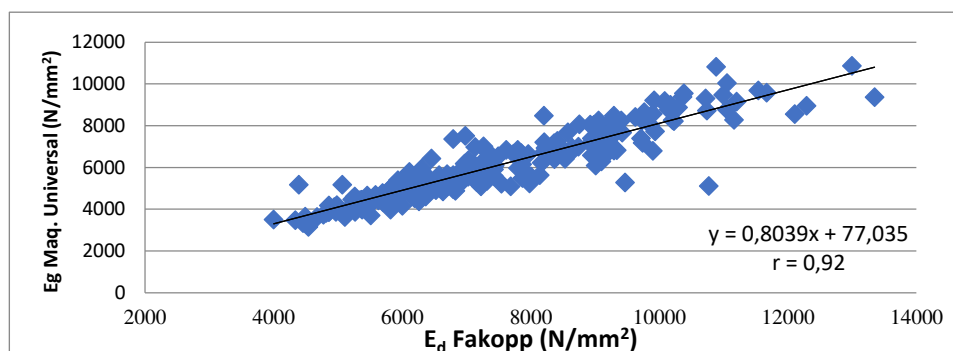


Figura 3: Relación entre E_g Máq. Universal y E_d Fakopp para la población de las vigas.

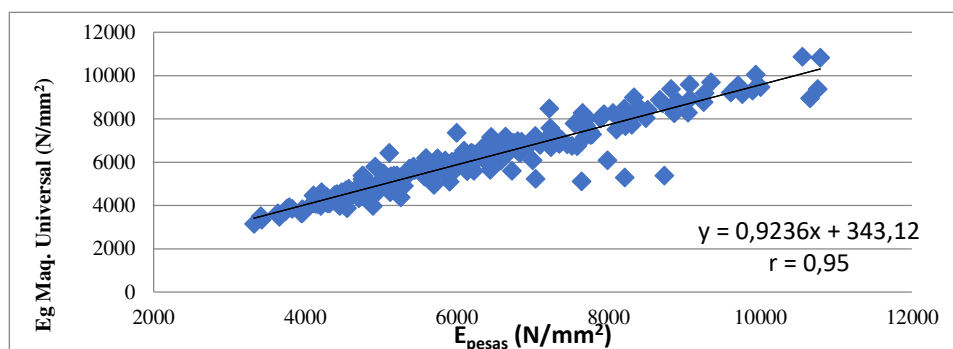
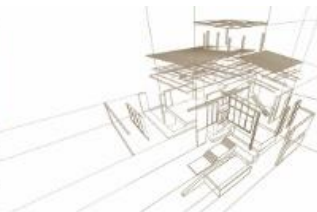


Figura 4: Relación entre E_g Máq. Universal y E_{pesas} para la población de las vigas

Ambos métodos tienen excelente correlación con los datos de la determinación en máquina universal por lo pueden utilizados como métodos para estimar el valor de E_g a



nivel de aserraderos o barracas, siendo además métodos de fácil ejecución y relativamente económicos.

3.3 Valores característicos considerando la influencia de médula como criterio de calidad

La Tabla 5 presenta los valores característicos de rigidez y densidad, calculados a partir de las ecuaciones de EN 14358 y EN 384, para piezas clasificadas según UNIT 1261, y UNIT 1261 considerando además la presencia de médula como criterio restrictivo.

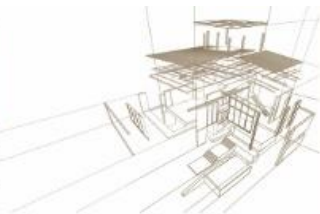
Tabla 5: Valores característicos calculados para las clases visuales establecidas en UNIT 1261 considerando o no a la médula como criterio de calidad.

Criterio calidad	Médula: se acepta sin restricción		Médula: NO se acepta	
	Clase EC1	Clase EC0	Clase EC1	Clase EC0
E _{medio} (N/mm ²)	6642	5780	8330	6492
E _{0mean} (N/mm ²)	6129	5288	7644	5881
ρ_{medio} (g/cm ³)	0,404	0,403	0,412	0,408
ρ_k (g/cm ³)	0,294	0,300	0,305	0,305
Número de vigas	71	177	24	50

Cuando la presencia de médula no es aceptada, los valores de E_o mean y característico aumentan tanto para la clase EC1 como para la EC0. El aumento más significativo se da para los valores de EC1 donde se aprecia un incremento de 25% en el valor del módulo de elasticidad. Si se comparan los valores característicos E_{0,mean} de la Tabla 5 con los establecidos en UNIT 1261 (7139 N/mm² y 5327 N/mm² para EC1 y para EC0, respectivamente) se observa que la aceptación de la médula sin restricción como criterio de calidad, puede conducir a una sobrestimación de los valores de rigidez, sugiriendo inconsistencias en las reglas de clasificación. Por el contrario, si la médula no es aceptada en ninguna de las dos clases, los valores de la rigidez encontrados en las piezas clasificadas en este trabajo son consistentes con los establecidos en la norma.

4. CONCLUSIONES

- En este trabajo se aplicó la norma de clasificación visual estructural UNIT 1261 para madera aserrada de pino. El 24 % de las piezas correspondieron a la calidad visual EC1, con valores de rigidez similares a los de C14 de EN 338; 59 % a la EC0 con valores de rigidez inferiores (E₀=5.470 MPa) y 17 % fueron rechazadas.
- En un análisis posterior, se incluyó a la médula como criterio restrictivo, esto es, piezas sin médula. Se observó un incremento en los valores característicos de



- rigidez para las piezas de la clase EC1 y EC0 exentas de médula comparados con los valores de las piezas clasificadas de acuerdo a UNIT 1261,
- c) Los valores de rigidez estimados por los métodos NDT de pesas y Fakopp mostraron altos niveles de correlación con los valores obtenidos en máquina universal, confirmando la viabilidad del empleo de los dos primeros para estimar la calidad de la madera en aserraderos.
 - d) Los resultados presentados en este trabajo corresponden a una única muestra de madera. Por tanto, para obtener resultados más concluyentes, se recomienda aumentar la base de datos realizando mayor cantidad de ensayos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al equipo técnico del Departamento de Materiales y Productos Forestales del Laboratorio Tecnológico del Uruguay, por la colaboración para la ejecución del presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña, L., Díez Barra, R. Casado, M., Llorente, A., Lázaro, M.T. Basterra, A., Rela, E., Cueto, G. (2007). Clasificación de la madera estructural de *P. pinaster* Ait mediante ultrasonidos. III Congreso Iberoamericano de Productos forestales, Buenos Aires, Argentina.
- Arriaga, F., Iñiguez, G., Esteban, M. (2005). Assessment of strength and stiffness properties using longitudinal stress wave on structural gross cross section timber of radiata pine (*Pinus radiata* D.Don), Symposium NDT 2005.
- Baño, V., Mazzei, C., Moya, L., Dieste, S. (2018). Diseño de puentes realizados con madera de procedencia local para el paso de vehículos pesados en el sector agrícola y forestal. Informe Técnico. Serie FPTA-INIA, Uruguay. ISSN: 1688-924X.
- Brashaw, B.K., Bucur, V., Divos, F., Goncalves, R., Lu, J., Meder, R., Pellerin, R.F., Potter, S., Ross, R.J., Wang, X., Yin, Y. (2009). Nondestructive testing and evaluation of wood: A worldwide research update. *Forest Prod. J.* 59(3): 7-14.
- Cagno, M; Cardoso, A.; O'Neill, H.; Moya, L. 2014. Relación entre módulos de elasticidad dinámico y estático, y entre resistencia a flexión para piezas de madera de pinos de tamaño estructural. XIV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Natal, Brasil, 9 pp.
- Conde, M; Fernández-Golfín; Hermoso E. (2007). Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual. *Materiales de Construcción* Vol. 57, 288, 49-59 octubre-diciembre 2007 ISSN: 0465-2746. Instituto de Ciencias de la Construcción. Madrid, España.
- Dieste, A. (2012). Programa de promoción de exportaciones de productos de madera. Informe 1, Dirección Nacional de Industrias, Ministerio de Industria, Energía y Minería, Uruguay. http://adimau.com.uy/articulos/07_programa_de_promocion_de_exportaciones_de_productos_de_madera_2012.pdf
- Diez, M.; Conde, M.; Fernández-Golfín, J.; Roskopf, S. 2000. Clasificación visual de madera estructural de pino laricio: comparación de resultados usando las normas UNE 56.544 y DIN 4074. *INIA. Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales.* 9(2): 375 - 380. España
- Fernández-Golfín, J.I., Díez Barra, M.R., Hermoso, E., Mier, R. (2003). Manual de clasificación de madera. AITIM, España. ISBN 84-87381-26-X.



Fernández-Golfín, J.I., Díez Barra, M.R., Gutiérrez, A. (1998). Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural, clasificada visualmente de acuerdo con la norma UNE 56.544. Mater. Construcc. 48(252): 45-59. España.

Hanhijärvi, A., and Ranta-Maunus, A. (2008). Development of strength grading of timber using combined measurement techniques: Report of the Combigrade-project - phase 2. (VTT Publications; No. 686). Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland.

MGAP (2018). Resultados de la cartografía forestal nacional 2018. Dirección General Forestal, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Uruguay. http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/informe_de_resultados_de_la_cartografia_2018.pdf

Moya, L.; Cardoso, A.; Cagno, M.; O'Neill, H. (2015) Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay, Maderas, Ciencia y Tecnología 17(3):597-612. doi:10.4067/S0718-221X2015005000053.

O'Neill, H.; Tarigo, F.; Trambauer, C. 2002. Propiedades mecánicas de *P. elliottii* Eng. del litoral del Uruguay. LATU/JICA, Montevideo, Uruguay. 43 p. (Informe N° 2).

O'Neill, H; Tarigo, F. 2003. Comportamiento en flexión de *E. grandis*, *P. taeda* y *P. elliottii* de madera de tamaño real y de pequeñas probetas sin defectos. LATU, Montevideo, Uruguay. 6 p. (Nota Técnica N° 2).

O'Neill, H; Tarigo, F. 2008. Propiedades mecánicas de *P. elliottii* Eng del Norte del Uruguay. LATU/JICA, Montevideo, Uruguay. 41 p. (Informe de Investigación N° 7).

Pérez Del Castillo, A; De Castro, R; Ohta, S. (2000a). Ensayos de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos, LATU, Montevideo, Uruguay, 23 p. (Informe de Investigación N° 1)

Pérez Del Castillo, A; De Castro, R; Ohta, S. (2000b). Índices de calidad de madera en *Pinus taeda* de Rivera para la optimización en el uso final. LATU, Montevideo, Uruguay. 22 p. (Informe de Investigación N° 2).

Pérez Del Castillo, A. 2001. Módulo de elasticidad y módulo de rotura en tablas de tamaño real de *Pinus elliottii* del sur de Uruguay. LATU/JICA, Montevideo, Uruguay. 26 p. (Informe de Investigación N° 7).

UNE - EN 408. AENOR (2011) Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Madrid, España.

UNE - EN 384. AENOR (2016) Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades y la densidad. Madrid, España.

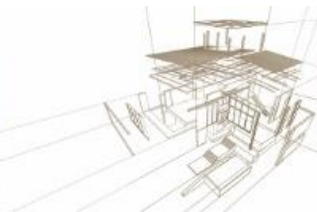
UNE - EN 14358. AENOR (2016) Estructuras de madera. Determinación y verificación de los valores característicos. Madrid, España.

UNE 56544. AENOR (2011). Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. Madrid, España.

UNIT 1261 (2018). Madera aserrada de uso estructural. Clasificación visual. Madera de pino taeda y pino elliotti (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*), Montevideo, Uruguay.

Vega, A. (2013). Caracterización estructural de madera de *castanea sativa* Mill. Clasificación visual y evaluación mediante métodos no destructivos. Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, E.P.S., Lugo. 247 p.

Yang, B.Z., Seale, R.D., Shmulsky, R., Dahlen, J., Wang, X. (2015). Comparison of nondestructive testing methods for evaluating no. 2 southern pine lumber: Part A, modulus of elasticity. Wood Fiber Sc. 47(4):375-384.



EVALUACIÓN DE MEDIDORES DE DESPLAZAMIENTO EN LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES ELÁSTICAS DE MADERA BRASILEÑA

EVALUATION OF METERS DISPLACEMENT IN THE DETERMINATION OF ELASTIC PROPERTIES OF BRAZILIAN WOOD

Costa Alves, Rejane^{1*}; Vladimiro Mantilla Carrasco, Edgar²

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Brazil;

²Universidade Federal de Minas Gerais, Brazil

*Contacto: rejanealves.ufes@gmail.com

Resumen

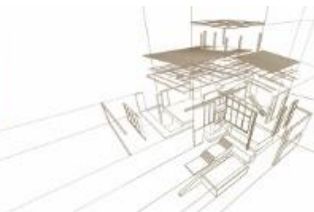
La madera es un material ortotrópico, y consta de tres módulos de elasticidad, tres módulos de transversal y seis coeficientes de Poisson. Las constantes elásticas se determinaron a partir de pruebas de compresión siguiendo los requisitos de NBR 7190/97, utilizando el medidor de tensión portátil. Los especímenes fueron preparados con la orientación de las fibras en seis direcciones: las tres principales, radial, tangencial y longitudinal; y los tres intermedios, longitudinal-radial, longitudinal-tangencial y radial-tangencial. Las especies utilizadas fueron: *Dinizia excelsa*, *Apuleia leiocarpa* y *Peltogyne decolor*. Los resultados permitieron concluir que la prueba de compresión con el medidor de desplazamiento portátil pudo determinar los valores de los módulos elásticos longitudinales (E), los módulos elásticos transversales (G) y los coeficientes de Poisson. Que la base utilizada para fabricar el medidor portátil se puede ampliar mediante estudios adicionales.

Palabras-clave: Ensayos no destructivos, madera, propiedades elásticas, caracterización mecánica.

Abstract

The wood is an orthotropic material, and consists of three modules of elasticity, three modules of transversal and six coefficients of Poisson. The elastic constants were determined from compression tests following the requirements of NBR 7190/97, using the portable strain gauge. The specimens were prepared with the orientation of the fibers in six directions: the three main ones, radial, tangential and longitudinal; and the three intermediates, longitudinal-radial, longitudinal-tangential and radial-tangential. The species used were: *Dinizia excelsa*, *Apuleia leiocarpa*, and *Peltogyne discolor*. The results allowed to conclude that the compression test using the portable displacement meter was able to determine the values of the longitudinal elastic moduli (E), the transversal elastic moduli (G) and the Poisson coefficients. That the foundation used to manufacture the portable meter can be expanded by further studies.

Keywords: Non-destructive tests, wood, elastic properties, mechanical characterization.



1. INTRODUCCIÓN

El análisis de rendimiento de cualquier componente estructural requiere el conocimiento de las propiedades elásticas de su material constituyente. En el caso de la madera, como para todos los materiales ortotrópicos, no es una tarea simple determinar las verdaderas relaciones tensión-deformación, incluidas las tensiones de tracción [MORAIS, 2000]. Muchos criterios de resistencia que existen presentan restricciones en materiales heterogéneos y anisotrópicos, con propiedades de elasticidad direccional y resistencia, como la madera [NICOLAS y MASCIA, 2009]. Por lo tanto, para caracterizar el comportamiento mecánico de la madera es necesario conocer sus relaciones de tensión-deformación en el referencial LRT (longitudinal, radial, tangencial), a través de pruebas mecánicas utilizando extensómetros [MORAIS, 2000].

Las primeras pruebas para analizar la relación entre la carga y el esfuerzo, o la deformación en la madera, fueron realizadas por Galileo en 1638 y Hooke en 1678 [BALLARIN y NOGUEIRA, 2003]. Sliker (1972) ya describió en su trabajo que la determinación de los valores del coeficiente de Poisson de los bosques ya estaba siendo estudiada por Doyle et al. en 1945

Mascia y Nicolas (2013) determinaron el coeficiente de Poisson de la especie de madera tropical *Goupia glabra*, mediante una prueba de compresión utilizando galgas extensométricas eléctricas. Los autores compararon este ensayo con un modelo teórico rectilíneo elástico, y las diferencias entre los valores medios teóricos y experimentales estuvieron en el rango de 2-15%, excepto para un ángulo de 75 ° para el plano LT y para el ángulo de 90 °. ° para ambos planos.

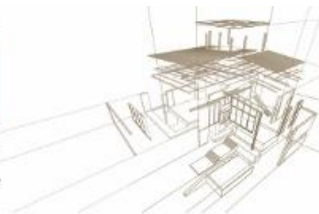
Mascia (1991) determinó los valores del coeficiente de Poisson para cuatro especies forestales, entre ellas Guapuruvu (*Schizolobium parahyba*), Ipê (*Tabebuia* sp), Angico (*Piptadenia excelso*) y Pinus (*Pinus Caribaea* var. *Bahamensis*).

Bolza y Kloot (1963) afirman que las propiedades elásticas se describen mediante tres constantes: el módulo elástico longitudinal (E), el módulo elástico transversal (G) y la relación de Poisson (ν). Como la madera es un material ortotrópico, las propiedades de elasticidad varían según la dirección de las fibras en relación con la dirección de aplicación de la fuerza. La norma brasileña, NBR 7190 (1997), no proporciona ninguna especificación con respecto a los valores del coeficiente de Poisson para la madera y solo presenta la relación $G = E / 20$.

Para este tipo de investigación, la mayoría de las veces, se utilizan galgas extensométricas pegadas a las PC para determinar las propiedades elásticas de la madera. Sin embargo, su uso genera un alto costo y mucho tiempo, por lo que el objetivo de este trabajo es desarrollar un medidor de desplazamiento portátil para estimar las propiedades elásticas de la madera.

2. METODOLOGÍA

Las pruebas se realizaron en el Centro de Investigación Avanzada en Madera y Nuevos Materiales (CPAM), Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG). Las maderas probadas fueron angelim rojo (*Dinizia excelsa*), con seis muestras, una para cada una de las seis direcciones analizadas. Los CP utilizados para las pruebas también se utilizaron



para determinar el contenido de humedad, la densidad aparente y la matriz constante elástica completa mediante pruebas de compresión. Los procedimientos de prueba para la determinación de las características mecánicas siguieron los requisitos de NBR 7190 (1997), así como los estrictos estándares de requisitos y procedimientos del sistema de calidad implementados en los laboratorios del Centro de Investigación de Madera y Materiales Nuevos (CPAM).

Para la determinación de las constantes elásticas por prueba de compresión, se utilizaron medidores de desplazamiento portátiles (MD). En la Figura 1 es posible observar los MD instalados en una PC que fue probada para compresión. En el frente se detalla la fabricación y operación del MD.



Figura 1: esquema de carga de CP de compresión.

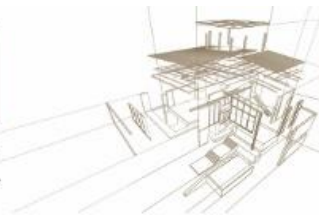
Con la composición de algunos medidores de desplazamiento (MD), se determinaron las deformaciones en varias direcciones, así como la distorsión de corte. La siguiente es una descripción de los esquemas de grupo MD utilizados, así como la formulación para determinar las deformaciones.

La deformación en la dirección x es:

$$\varepsilon_x = \frac{\delta x}{x}, \quad (1)$$

Con las ecuaciones (2), se pueden determinar ε_x , ε_y e γ_{xy} . Si es necesario determinar las deformaciones en otras direcciones a partir de las deformaciones en las direcciones x e y, la transformación de tracción de los componentes de deformación viene dada por:

$$\begin{vmatrix} \varepsilon'_x \\ \varepsilon'_y \\ \gamma'_{xy} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos^2\varphi & \text{sen}\varphi \cos\varphi & \text{sen}^2\varphi \\ \text{sen}^2\varphi & -\text{sen}\varphi \cos\varphi & \cos^2\varphi \\ -\cos\varphi \text{sen}\varphi & (\cos^2\varphi - \text{sen}^2\varphi) & 2\text{sen}\varphi \cos\varphi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{vmatrix} \quad (12)$$



Teniendo en cuenta los ángulos de inclinación con respecto al eje X son: $\varphi_1 = 0^\circ$, $\varphi_2 = \theta$ e $\varphi_3 = 90^\circ$.

Resolviendo para ε_x , ε_y e γ_{xy} , incluso tener:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_1 \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_3 \\ \gamma_{xy} &= \frac{2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)\cos 2\theta}{\text{sen} 2\theta} \quad \text{ou} \quad \gamma_{xy} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cos^2 \theta - \varepsilon_3 \text{sen}^2 \theta}{\text{sen} \theta \cos \theta} \end{aligned} \quad (3)$$

Considerando que solo se aplica el voltaje σ_y , es decir, los otros voltajes son iguales a cero, sustituyendo estas tensiones en la ecuación ($\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl}$), tenemos:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_1 = -\frac{\nu_{yx}}{E_y} \sigma_y \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_3 = \frac{\sigma_y}{E_y} \\ \gamma_{xy} &= 0 \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_1 \cos^2 \theta + \varepsilon_3 \text{sen}^2 \theta \end{aligned} \quad (4)$$

Assim:

$$E_y = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_3} \quad (5)$$

$$\frac{E_y}{\nu_{yx}} = -\frac{\sigma_y}{\varepsilon_1} \quad (6)$$

on las transformaciones de tensión de los componentes de tensión y deformación tenemos:

$$\begin{aligned} \gamma_\theta &= 2(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \text{sen} \theta \cos \theta + \gamma_{xy} (\cos^2 \theta - \text{sen}^2 \theta) \\ \tau_\theta &= \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \text{sen}^2 \theta) + (\sigma_y = \sigma_x) \text{sen} \theta \cos \theta \end{aligned}$$

E com

$$G_\theta = \frac{\tau_\theta}{\gamma_\theta}$$

tem-se:

$$G_\theta = \frac{\sigma_y}{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)} \quad (7)$$

Usando las transformaciones de tensión de las constantes de tensión, deformación y elasticidad, dadas por Lekhnitskii (1991), es posible obtener la constante de G_{xy} .

Mirando las ecuaciones 5, 6 y 7, se concluye que solo se requieren dos MD. La Figura 2 muestra la ubicación de los MD. Se utilizan seis MD, dos en la dirección de la fuerza aplicada (una en cada cara opuesta) y cuatro perpendiculares a la fuerza aplicada, con una en cada cara.

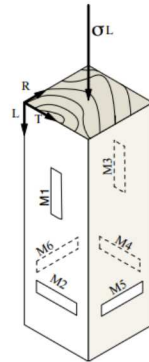


Figura 2: Posición de los seis medidores de desplazamiento.

Ahora, aplicando los esfuerzos en las direcciones radial (R), CP-II y tangencial (T), CP-III por separado, y siguiendo un razonamiento análogo, se establecen las otras constantes elásticas. Además, utilizando las ecuaciones presentadas por Lekhnitskii (1991), obtenemos los módulos de deformación transversal, Ecuación 8 (Método 2):

$$\frac{1}{G'_{LR}} = 4 \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_R} + \frac{\nu_{LR}}{E_L} - \frac{1}{G_{LR}} \right) \text{sen}^2\theta \text{cos}^2\theta + \frac{1}{G_{LR}} \quad (8)$$

$$\frac{1}{G'_{RT}} = \frac{\text{cos}^2\theta}{G_{RT}} + \frac{\text{sen}^2\theta}{G_{LT}}$$

$$\frac{1}{G'_{LT}} = \frac{\text{sen}^2\theta}{G_{RT}} + \frac{\text{cos}^2\theta}{G_{LT}}$$

Los módulos de deformación transversal también se pueden determinar a través de los PLC orientados al plano: LT, PLC tipo IV (PLC-IV); LR, CP Tipo V (CP-V) y RT, CP Tipo VI (CP-VI). Con estos CP resulta la $E_{\alpha\alpha}$ que corresponde a la E en cada plano. Usando las ecuaciones determinadas por Mascia (1991), obtenemos todos los módulos de deformación transversal, Ecuación 9.

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{1}{E_{\alpha}(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} - \frac{\text{cos}^4\alpha}{E_T(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} + \frac{\text{sen}^4\alpha}{E_L(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} + \frac{2\nu_{LT}}{E_L},$$

$$\frac{1}{G_{LR}} = \frac{1}{E_{\alpha}(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} - \frac{\text{cos}^4\alpha}{E_R(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} + \frac{\text{sen}^4\alpha}{E_L(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} + \frac{2\nu_{LR}}{E_L},$$

(9)

$$\frac{1}{G_{TR}} = \frac{1}{E_{\alpha}(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} - \frac{\text{cos}^4\alpha}{E_R(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} + \frac{\text{sen}^4\alpha}{E_T(\text{sen}^2\alpha \text{cos}^2\alpha)} + \frac{2\nu_{TR}}{E_T},$$



3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de la pendiente de la línea de tensión y la deformación longitudinal (Fig. 3 (A)), se determinó el valor del módulo de elasticidad longitudinal a las fibras; 10400MPa para madera roja angelim. Comparando este valor con el valor promedio (15027MPa), se puede concluir que, aunque un poco más bajo, el medidor de desplazamiento portátil pudo capturar eficientemente la deformación longitudinal en la PC.

La figura 3 (B) muestra el valor de G_{LT} , determinado a partir de la pendiente de la línea entre la tensión y la relación propuesta por Carrasco (1989). El valor encontrado fue de 850 MPa. Autores como Vázquez et al. (2015) encontraron valores de 822 MPa para madera de castaño. Gonçalves y col. (2011) encontraron valores de: 1489 MPa para madera de garapa; 892 MPa para cupiuba y 1172 MPa para eucalipto salado. Los diferentes valores están justificados por la heterogeneidad de los bosques.

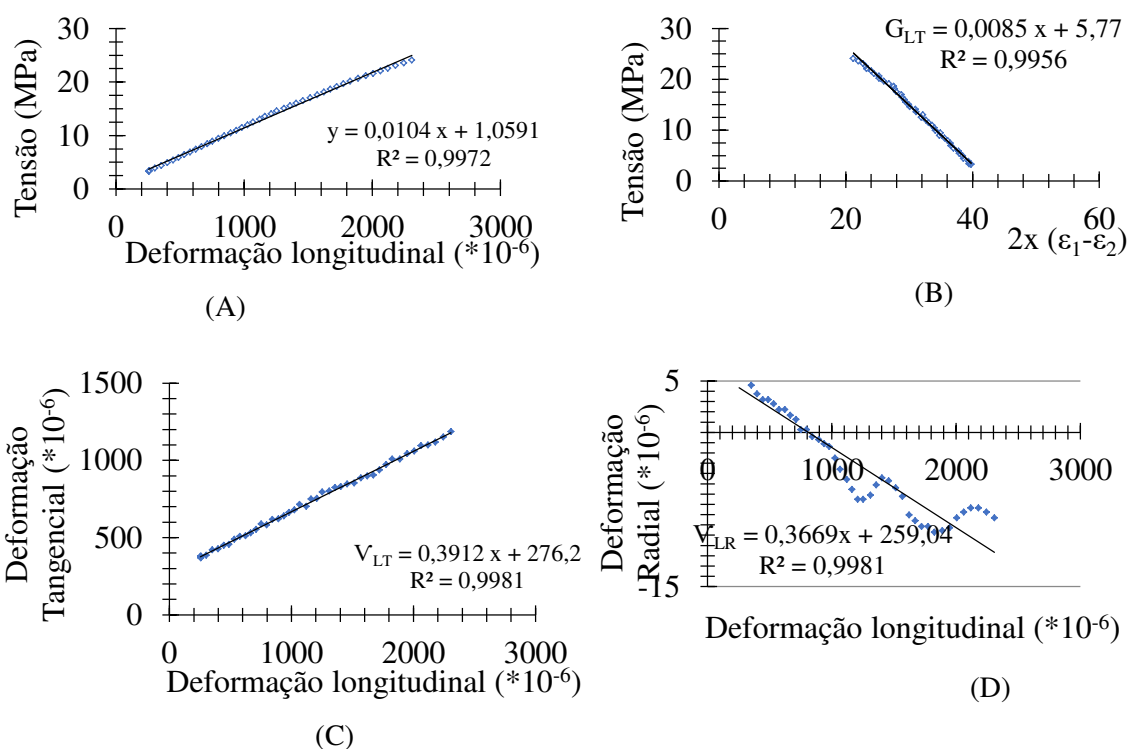


Figura 3: Ejemplo de los resultados de la prueba de compresión de madera angelim roja usando el medidor portátil. (A) Módulo de elasticidad longitudinal. (B) Módulo transversal de elasticidad. (C) Razón de Poisson longitudinal tangencial. (D) Razón radial de Poisson longitudinal.

La Figura 4 muestra la relación entre los dos métodos, el convencional y el propuesto mediante el uso del medidor de desplazamiento portátil; esto en las tres direcciones principales y para tres especies: garapa (G); púrpura (R) y rojo angelim (AV). En base a la regresión, es posible afirmar que existe una relación entre los métodos de $R^2 = 93\%$, dejando en claro que este método puede estimar con precisión el valor del módulo estático para las tres direcciones propuestas.

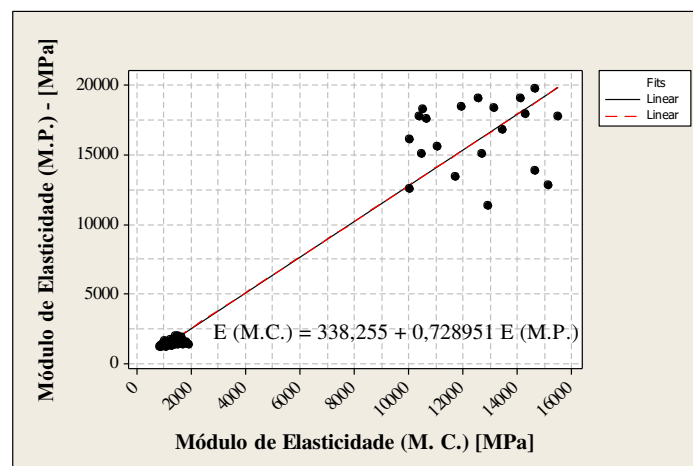
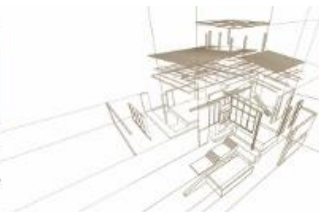


Figura 4: Relación entre el método convencional (M.C) y el método propuesto (M.P) para estimar el módulo elástico.

4. CONCLUSIONES

A partir del desarrollo del medidor de desplazamiento portátil, fue posible caracterizar las constantes elásticas de las maderas brasileñas utilizando la prueba de compresión. Por lo tanto, se puede concluir que es un método no destructivo que genera ahorro de tiempo, apoyo financiero y, sobre todo, una innovación en el área.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Fundación de Apoyo a la Investigación e Innovación Espírito Santo (FAPES) y el Consejo Nacional para el Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) y la Coordinación para el Mejoramiento del Personal de Educación Superior (CAPES).

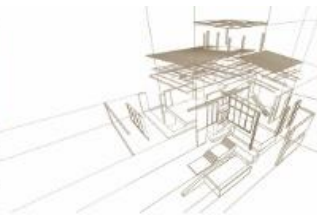
REFERENCIAS

ASOCIACIÓN BRASILEÑA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7190: Diseño de estructuras de madera. Río de Janeiro, 1997.

Ballarin, A. W .; Nogueira, M. Caracterización elástica de madera de eucalipto citriodora. CERNE (UFL), Lavras, v. 09, nº 1, pág. 69-83, 2003.

Bolza, E .; Kloot, N. M. Las propiedades mecánicas de 174 maderas australianas. Div. Para. Prod. CSIRO Melbourne Tech. Papel no 25. 1963.

Bucur, V. Acústica de madera. 2. ed. Nueva York: CRC Press, 2006. v. 1.399p.



Carrasco, E. V. M. Resistencia, elasticidad y distribución de tensiones en las vigas rectas de madera laminada encolada. 1989. 120 f. Tesis (Doctorado en Ingeniería Estructural) - Escuela de Ingeniería de São Carlos, São Carlos, 1989.

Gonçalves, R; Trinca, A. J .; Cerri, D. G. Comparación de constantes elásticas de madera determinadas por propagación de ondas ultrasónicas y prueba de compresión estática. Wood and Fiber Science, v. 43, p. 64-75, 2011.

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA DEL ESTADO DE SÃO PAULO - Fichas técnicas de IPT de maderas brasileñas. 2da ed. Sao Paulo: IPT, 1989a. 418p.

Lekhnitskii, J. Teoría de la elasticidad de un cuerpo anisotrópico, Moscú, Mir Publishers, 1981.

Lg Acero. Acero al carbono medio y alto - F - 436-1045 acero / temp. 38/45 hrc. 2015. Disponible en: <http://lgsteel.com.br/arruela-lisa-em-aco-medio-alto-carbono-lg-436-aco.htm>. Acceso el 6/2/2015.

Mascia, N. T. Con respecto a la anisotropía de la madera (Consideraciones sobre la anisotropía en la madera). Tesis doctoral, Escuela de Ingeniería de São Carlos - USP, Brasil (en portugués); 1991

Mascia, N.T .; Nicolas, E. A .. La determinación de Poisson son proporciones en relación con el ángulo de fibra de una especie de madera tropical. Construcción y materiales de construcción, v. 41, p. 691-696, 2013.

Morais, J. J. Comportamiento mecánico no lineal de la madera. ICETA / UTAD. Universidad de Trás os Montes y Alto Douro.2000.

Nicolás, E. A .; Mascia, N. T .; Todeschini, R. Pruebas uniaxiales y biaxiales para la evaluación del criterio de resistencia (Tsai-Wu) de materiales anisotrópicos para madera. Revista Minerva, v. 6, p. 107-116, 2009.

Sliker, A. Medición de las relaciones de Poisson en madera. Mecánica Experimental 12 (5), 1972: 239-42.

Vázquez, C.; Gonçalves, R .; Bertoldo, C.; Baño, V .; Ver A; Crespo, J.; Guaita, M. Determinación de las propiedades mecánicas de Castanea sativa Mill. utilizando propagación de ondas ultrasónicas y comparación con compresión estática y métodos de flexión. Wood Sci Technol, 2015.

ESPECIFICACIONES PARA MADERA ESTRUCTURAL EN PROGRAMAS DE VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL EN URUGUAY

SPECIFICATIONS FOR STRUCTURAL WOOD IN HOUSING PROGRAMS OF SOCIAL INTEREST IN URUGUAY

Pérez Gomar, Carolina^{(1)*}

⁽¹⁾Mag. Arq. Ministerio de Vivienda Ordenamiento territorial y medio ambiente, Uruguay

*contacto:caroperezgomar@gmail.com

Resumen

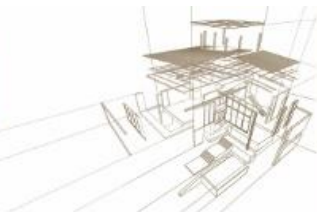
En Uruguay no existe en el mercado madera aserrada y madera laminada encolada (MLE) de producción nacional con certificación estructural, la que se comercializa con certificación estructural es de procedencia extranjera. Existen tableros de contrachapado con certificación fabricados en el país. Desde el año 2017 se está trabajando en el comité para madera estructural de UNIT. En ese marco fueron aprobadas normas de clasificación visual estructural para madera aserrada de pino y eucaliptus, y está en curso la norma de fabricación de madera laminada encolada estructural. No obstante esto, no existe aplicación de una certificación estructural de la madera conforme estas normas. Es de interés del gobierno incentivar el uso de la madera en la construcción, apoyando el desarrollo del mercado local e impulsando la demanda. El Ministerio de Vivienda (MVOTMA), para promover y financiar la vivienda social que cumpla con estándares de seguridad estructural generó un documento de especificaciones que prescribe las condiciones mínimas y criterios de aceptación para productos de madera estructural (aserrada, MLE, y tableros) para garantizar una calidad uniforme y adecuada de productos a ser utilizados en la construcción. Las exigencias mínimas contemplan la existencia de madera de calidad estructural certificada. Para los productos nacionales sin certificación estructural, define una metodología basada en una declaración de productos estructurales por parte del proveedor -aserraderos, productores, fabricantes-, que permite la validación de productos ante el MVOTMA. A su vez aporta elementos técnicos para la mejora de la calidad de los productos en el mercado y su internacionalización.

Palabras-clave: normas, certificación, especificaciones, declaración.

Abstract

In Uruguay there is no national production including structural certification of sawn timber and glued laminated timber, the ones we find marketed with structural certification are of foreign origin. There are certified plywood boards manufactured in our country. Since 2017, UNIT's committee for structural wood has been working on building standards. Within this framework, standards of structural visual classification for pine and eucalyptus sawn timber have been approved, and the approval or definition of standard for the manufacture of structural glued laminated timber is in progress. Notwithstanding this, there is no application of a structural certification of wood according to these standards. Nevertheless, there is no application of wood structural certification according to these standards. It is in the interest of the government to encourage the use of wood in construction, supporting the local market development and promoting demand. The Ministry of Housing (MVOTMA), to promote and finance social housing that complies with structural safety standards, has generated a specifications document that prescribes the minimum conditions and acceptance criteria for structural wood products (sawnwood, MLE, and boards) in order to guarantee construction products with a uniform and adequate quality. The minimum requirements include the existence of certified structural quality wood. For national products without structural certification, it defines a methodology based on a declaration of structural products by the supplier - sawmills, producers, manufacturers - that allows the validation of products before the MVOTMA. At the same time, it provides technical elements to improve the quality of the products in the market and its internationalization.

Keywords: standards, certification, specifications, declaration



1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay, en el marco de una estrategia nacional de desarrollo, donde se identifica al sector forestal maderero como uno de los estratégicos para el desarrollo productivo nacional, el gobierno tiene como uno de sus objetivos incentivar el uso de la madera para la construcción con foco en la transformación mecánica de la madera, que se orientan a generar y mejorar capacidades locales, pero también a impulsar la demanda de la construcción en madera, entre otros aspectos de la cadena productiva.

Una de las principales restricciones para el desarrollo del mercado para productos de madera de ingeniería es la falta de sistemas de estandarización y certificación estructural de la madera, así como políticas que promuevan el uso de madera como material de construcción residencial.

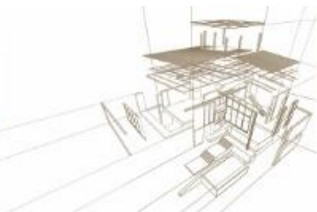
Dentro de la oferta de productos de madera existentes en el mercado, no existe madera aserrada y madera laminada encolada (MLE) de producción nacional con certificación estructural, la que se comercializa con certificación estructural es de procedencia extranjera. Existen tableros de contrachapado con certificación fabricados en el país.

Con el objetivo de fomentar el uso de la madera en la construcción, se entiende necesario impulsar la oferta de productos de madera estructural. En este sentido el Ministerio de Vivienda (MVOTMA) impulsa el uso de la madera como elemento estructural para viviendas de interés social, desde la producción concreta de proyectos con madera, como a través de redacción de normativa y documentos de especificaciones que garanticen la calidad de la madera para usos estructurales en edificaciones.

Desde el año 2017 se está trabajando en el comité para madera estructural de UNIT, en donde fueron aprobadas normas de clasificación visual estructural para madera aserrada de pino y eucalipto, y está en curso la norma de fabricación de madera laminada encolada estructural. No obstante esto, no existe aplicación de una certificación estructural de la madera conforme estas normas.

En este contexto, el MVOTMA, con el objetivo de promover y financiar vivienda social con estructura de madera que cumpla con estándares de seguridad estructural conforme a normas, generó y aprobó el documento “Especificaciones para madera estructural” (Pérez Gomar y Erro, 2019) que prescribe las condiciones mínimas y criterios de aceptación para productos de madera estructural (aserrada, MLE, y tableros) para garantizar una calidad uniforme y adecuada de productos a ser utilizados en la construcción.

Las exigencias mínimas contemplan la existencia de madera de calidad estructural certificada. Para los productos nacionales sin certificación estructural, define una metodología basada en una declaración de productos estructurales por parte del proveedor -aserraderos, productores, fabricantes-, que permite la validación de productos ante el MVOTMA. A su vez aporta elementos técnicos para la mejora de la calidad de los productos en el mercado y su internacionalización.



2. METODOLOGÍA

CONDICIONES DE ACEPTACIÓN DE MADERA ESTRUCTURAL

La metodología aplicada para establecer las condiciones mínimas de aceptación de madera con fines estructurales a los efectos de las especificaciones para proyectos MVOTMA se define según tres de los principales productos de madera aplicados a la construcción: Madera aserrada, madera laminada encolada (MLE) y tableros estructurales.

2.1. Madera aserrada

Se establecen las normas de clasificación visual estructural, como referencia de calidad para la madera aserrada estructural de pinos y de eucalipto (UNIT 1261:2018 y UNIT 1262:2018), en conformidad con los parámetros de clasificación visual y los valores característicos de propiedades mecánicas allí establecidos, que serán los mínimos aceptados para maderas de producción nacional.

La calidad estructural que se admitirá para la madera aserrada estructural será la determinada por las calidades visuales EC0 y EC1, para pinos ellioti y taeda, y la EF1, para eucalipto, según normas (UNIT 1261:2018 y UNIT 1262:2018).

La calidad estructural de la madera aserrada será garantizada por la certificación realizada por organismo reconocido y se exigirá cualquiera sea la especie y procedencia, o podrá ser validada mediante declaración, para casos particulares.

En particular, la madera aserrada nacional de *Pinus ellioti*, *Pinus taeda* y *Eucalyptus grandis*, sin certificación de calidad estructural, podrá ser validada mediante una Declaración de calidad estructural del productor.

Se admite la Declaración de calidad estructural del productor para definir la calidad visual de las piezas que avala y asegurar que todas las piezas comprendidas están clasificadas visualmente conforme a las normas (UNIT 1261:2018 y UNIT 1262:2018), según especie. En conformidad con dichas normas se admite identificar el grado estructural para las piezas, cuyos valores de propiedades mecánicas hayan sido validados mediante ensayos.

La Declaración de calidad del productor, a tales efectos, consistirá en un Formulario y un Informe de ensayos con asignación de clases resistentes. Las piezas avaladas por la Declaración de calidad del productor deben estar identificadas a través de un marcado sobre cada pieza.

Siendo válidos estos documentos para las piezas que quedan avaladas, con marcado correspondiente, éstas podrán ser aceptadas para su utilización estructural.

2.2. Madera laminada encolada (MLE)

La madera laminada encolada deberá producirse en conformidad con requisitos de fabricación particulares con caracterización de las propiedades mecánicas para su aceptación como madera con fines estructurales.

La calidad estructural de la madera laminada encolada (MLE) será garantizada por la certificación realizada por organismo reconocido y se exigirá cualquiera sea la especie y procedencia, o podrá ser validada mediante declaración, para casos particulares.

La Certificación identifica la calidad estructural en todas las piezas, mediante un sello que refiere a un cuerpo normativo, e informa entre otras características del producto, sus propiedades mecánicas.

En particular, la madera laminada encolada de fabricación nacional sin certificación de calidad estructural podrá ser validada mediante una Declaración de calidad estructural del productor, según las condiciones que se establecen en los siguientes apartados. Esto incluye la fabricación con las especies de producción nacional de *Pinus elliotti*, *Pinus taeda* y *Eucalyptus grandis*, sin certificación de calidad estructural.

Se admite la Declaración de calidad del productor para definir la calidad estructural de las piezas que avala que deberán estar fabricadas según la norma europea (EN 14080:2013). En conformidad con dicha norma se admite identificar la clase resistente para las piezas, cuyos valores de propiedades mecánicas hayan sido validados mediante ensayos.

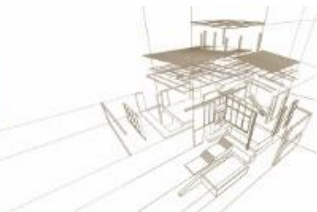
Asimismo, para la fabricación en estas condiciones se exige una calidad estructural de la madera aserrada de fabricación, que en los casos de madera nacional queda determinada por las calidades visuales EC0 y EC1, para pinos elliotti y taeda, y la EF1, para eucalipto, según normas (UNIT 1261:2018 y UNIT 1262:2018).

La Declaración de calidad del productor para Madera laminada encolada a tales efectos, consistirá en un Formulario, un Informe de Control de Calidad del Proceso de Fabricación y un Informe de Ensayos con asignación de clases resistentes. Las piezas avaladas por la Declaración de calidad del productor deben estar identificadas a través de un marcado sobre cada pieza.

Siendo válidos estos documentos para las piezas que quedan avaladas, con marcado correspondiente, éstas podrán ser aceptadas para su utilización estructural.

2.3. Tableros estructurales de madera

Los tableros estructurales de madera contrachapada u OSB deberán tener sello de certificación de calidad estructural, que identifica sus propiedades mecánicas, conforme a normas de propiedades estructurales para la madera.



4. RESULTADOS

El gobierno de Uruguay a través de una Hoja de Ruta Forestal (Transforma Uruguay, 2019), ha generado una serie de proyectos tendientes a apoyar a la oferta y a la demanda de productos de madera estructural, de modo de incentivar el uso de la madera en la construcción con especificaciones técnicas que garanticen una calidad estructural.

Estos proyectos incluyen la difusión de normativa, apoyo a las empresas productoras por medio de la capacitación del personal e incentivos para la re-conversión productiva para producir elementos estructurales de madera conforme especificaciones técnicas, apoyo para la generación de códigos de construcción con madera, entre otros.

Por otra parte, MEVIR como un actor de demanda de productos de MLE para uso en la construcción de viviendas de interés social, ha significado un aliado estratégico en la implementación de las exigencias establecidas en el documento de Especificaciones de madera estructural (Pérez Gomar, Erro, 2019) para la reconversión del proceso productivo de las empresas productoras de madera laminada encolada con el fin de obtener este producto de calidad estructural que no formaba parte de su cadena productiva.

5. CONCLUSIONES

Se está creando un marco normativo sobre productos de madera estructural, clasificación, especificaciones, requisitos de fabricación, norma de cálculo.

Se está implementando la normativa existente para uso de madera estructural como requisito en pliegos de condiciones del Estado.

Se está impulsando la oferta con proyectos destinados a incentivar el uso de la madera como componente estructural en edificaciones.

Se está fomentando el uso adecuado de los productos de madera capacitando tanto a los actores que ofrecen los productos al mercado (aserraderos, fábricas, barracas), como a los usuarios (arquitectos, ingenieros, técnicos).

Se está generando la reconversión de la producción de las empresas de madera laminada encolada para generar un producto de calidad estructural.

Se está trabajando a nivel nacional en sinergia conjunta entre oferta y demanda de productos de madera estructural involucrando a los organismos estatales, la academia, los laboratorios, las empresas productoras, los profesionales, con el fin de impulsar el uso de madera de calidad estructural en la construcción. Todo esto tendiente a una futura certificación de productos estructurales en madera de producción nacional, para ser volcada tanto en el mercado interno como para su exportación.



AGRADECIMIENTOS

Al Subsecretario de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, el Arq. Jorge Rucks y al Director Nacional de Vivienda, Arq. Salvador Schelotto, por la oportunidad de representar al MVOTMA en las actividades relacionadas al uso de madera estructural a nivel nacional.

A la Arq. Isabel Erro por compartir la redacción del documento “Especificaciones de Madera Estructural”, al Arq. Willem Kok por ser el impulsor de la iniciativa y al Arq. Mauricio Pereira por el apoyo para culminar este proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EN 14080 (2013). Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos.

Pérez Gomar, Carolina y Erro, Isabel. (2018). Especificaciones para Madera Estructural. Programas de vivienda. MVOTMA. RM 1094/2019, Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente.

Transforma Uruguay, Sistema Nacional de Transformación Productiva y Competitividad. (2019). Hoja de Ruta Forestal-Madera.

UNIT 1261 (2018). Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de pino taeda y pino ellioti.

UNIT 1262 (2018). Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de eucalipto.

UNIT 1263 (2018). Madera aserrada de uso estructural - Método para la determinación de dimensiones y tolerancias.



RESISTENCIA EN FLEXIÓN DEL PINO PONDEROSA DE LA PATAGONIA NORTE, ARGENTINA

RESISTANCE IN FLEXION OF THE PONDEROSA PINE OF THE NORTH PATAGONIA, ARGENTINA

Alfredo A. Guillaumet^{1*}, María C. Filippetti², Roberto D. Manavella³, Lía C. Meyer⁴, Gonzalo Caballé⁵, Alejandro Martínez Meier⁵

¹Profesor Titular. GIDEC UTN FRVT, Venado Tuerto. UNNOBA, Junín. Argentina

²Profesor Adjunto. GIDEC UTN FRVT, Venado Tuerto. UNNOBA, Junín. Argentina

³Profesor Titular. GIDEC UTN FRVT, Venado Tuerto. Argentina

⁴Ayudante de Trabajos Prácticos. GIDEC UTN FRVT, Venado Tuerto. Argentina

⁵Dr. Ing. Forestal. INTA Bariloche. Argentina

* Contacto: Alfredo Guillaumet: aguillaumet@frvt.utn.edu.ar

Resumen

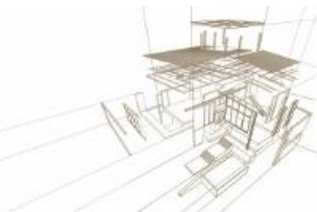
En la zona andina de las Provincias de Neuquén, Chubut y Río Negro existen más de 100.000 ha implantadas de coníferas, la gran mayoría con pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Dougl x Laws). No existe a la fecha una norma de clasificación estructural de esta combinación especie / procedencia. Resulta de interés el estudio de su comportamiento estructural para su inclusión en los suplementos del reglamento INTI-CIRSOC (2016). En este trabajo se presentan los resultados de los ensayos realizados sobre 6 muestras de distinta escuadría de dimensiones estructurales (273 probetas). Se utilizó madera de pino ponderosa aserrada de árboles de 25-32 años provenientes de un primer raleo comercial. Los ensayos se realizaron de acuerdo a las prescripciones de la norma UNE EN 408 (2011). Se evaluaron ocho perfiles de límites para una clasificación visual resistente. En todas ellas se obtuvo un bajo rendimiento en la calidad superior motivado por la presencia de una nudosidad importante, consecuencia de la falta de trabajo silvicultural en las plantaciones. Los valores de resistencia a la flexión alcanzados fueron 18,9 N/mm² y 9,1 N/mm², con módulos de elasticidad de 6.345 N/mm² y 4.637 N/mm², para los grados superior e inferior respectivamente. La densidad media obtenida fue de 389 kg/m³. Resulta una madera de baja resistencia y muy bajo módulo de elasticidad.

Palabras-clave: Pino ponderosa, Clasificación visual, propiedades mecánicas madera.

Abstract

In the Andean region of the Provinces of Neuquén, Chubut and Río Negro there are more than 100,000 ha implanted with conifers, the vast majority with the species ponderosa pine (*Pinus ponderosa* Dougl x Laws). To date, there is no standard of structural classification for this combination species/provenance. It is interesting to study its structural behavior for its inclusion in the supplements of the INTI-CIRSOC (2016) regulation. This work presents the results of the tests carried out on 6 samples of different structural dimensions (273 specimens). It was used ponderosa pine sawed timber of 25-32-year-old trees from a first commercial thinning. The tests were carried out according to the requirements of the UNE EN 408 (2011) standard. Eight boundary profiles were evaluated for a resistant visual classification. In all of them, a low yield in superior quality was obtained, motivated by the presence of an important knot, consequence of the lack of forest work in the plantations. The values of flexural strength reached were 18.9 N/mm² and 9.1 N/mm², with modulus of elasticity of 6,345 N/m² and 4,637 N/mm², for the upper and lower grades respectively. The average density obtained was 389 kg/m³. It is a wood of low resistance and very low modulus of elasticity.

Keywords: Ponderosa pine, Visual classification, mechanical properties wood.



1. INTRODUCCIÓN

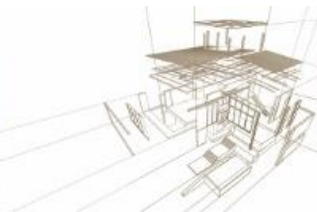
Argentina es un país con muy poca tradición en el empleo de la madera en la construcción, se ha privilegiado el uso de mampostería y estructuras de hormigón o acero. La baja utilización de este material se limitó históricamente a especies provenientes de bosques nativos. Recién en este siglo se iniciaron los estudios de las propiedades estructurales de las maderas provenientes de bosques implantados. Los mismos condujeron a la confección de una serie de normas IRAM que establecen pautas para la clasificación visual resistente y valores característicos de las propiedades mecánicas de distintas combinaciones de especie / procedencia. La primera fue la IRAM 9670 (2002) para madera aserrada de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* y le siguieron en el año 2006 las normas IRAM 9662/1/2/3 para tablas de *Araucaria angustifolia* de Misiones, *P. taeda* y *P. elliottii* de Misiones y Corrientes, y *Eucalyptus grandis* de la Mesopotamia. Estas normas fueron modificadas en el año 2015, año en el que se sumó la norma IRAM 9662/4 para tablas de *Populus deltoides* del delta del río Paraná.

La aprobación del “Reglamento Argentino de Estructuras de Madera”, INTI-CIRSOC 601 (2016), y sus suplementos con los valores de diseño de referencia para las diferentes especies y lugares de procedencia, puso en evidencia la falta de información sobre el comportamiento estructural de muchas especies de rápido crecimiento en Argentina. A las especies que estaban contempladas en las normas IRAM mencionadas en el párrafo anterior solo se le pudo sumar en los suplementos del reglamento las propiedades de vigas de *Araucaria angustifolia* y *Eucalyptus grandis*.

El pino ponderosa es actualmente la especie forestal más plantada en la región andinopatagónica, concentrándose en la precordillera de las provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut. Su crecimiento es vigoroso en ausencia de pestes o enfermedades (Gonda, 2001). Los árboles maduros poseen albura de color amarillento pálido y duramen rojizo claro, diseño floreado en el corte tangencial y veteado en corte radial. La transición entre madera juvenil y madura ocurre a los 20 años de edad (Zingoni et al. 2007, Letourneau et al. 2014). En la actualidad, la mitad del área forestada en la región (44.000 ha) tiene entre 20 y 30 años (Logercio y Deccechis 2006) momento del primer raleo comercial. En consecuencia, la mayor parte de la madera presente en la región proviene de estos raleos y presenta gran proporción de madera juvenil y, en general, numerosos nudos provocados por la ausencia de podas realizadas en tiempo y forma.

Los principales productos de pino ponderosa encontrados en el mercado hoy son: postes impregnados para alambrado, postes para construcción y revestimiento de cabañas, tablas y tacos para pallets y fabricación de bins, tablas y tirantes para encofrado y machimbres. Otro producto que se fabrica con esta especie es la madera clear, fundamentalmente para la construcción de vigas laminadas, en etapa incipiente como también la construcción de viviendas utilizando ladrillos de madera. La falta de reportes de ensayos de piezas de dimensiones estructurales con una propuesta de clasificación visual resistente marca la necesidad de estudiar esta combinación de especie / procedencia con el fin de evaluar su posible incorporación a los suplementos del reglamento INTI- CIRSOC (2016) y generar las bases para ampliar el uso de esta madera en productos con mayor valor agregado

La madera es un material natural que presenta grandes variaciones de su calidad en función de la especie, tratamiento silvicultural y condiciones ambientales. Las



propiedades no solo varían de un árbol a otro, sino también dentro del árbol en función de la altura y la distancia a la médula. Las singularidades como la presencia de médula, dimensión de los nudos y anillos de crecimiento, inclinación de las fibras, entre otras, afectan las propiedades estructurales. Todo ello conduce a grandes variaciones en las propiedades resistentes y al definir la resistencia característica como el percentil 5% inferior, toda la muestra se encuentra condicionada por los elementos más débiles, desaprovechando las mejores propiedades del 95% de la población restante. La posibilidad de dividir la muestra en muestras más pequeñas, con menor dispersión y propiedades más homogéneas de acuerdo a sus defectos, permite alcanzar en cada una de ellas valores característicos más altos, siendo esta la base de la clasificación por resistencia (Glos 1995).

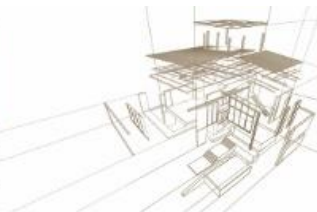
En este trabajo se presentan los resultados del ensayo a flexión de 273 elementos estructurales de 5 escuadrías distintas, ejecutados con madera aserrada de pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Dougl x Laws) provenientes de plantaciones de 25-32 años de edad ubicadas en la zona andina de la Patagonia norte. Se analizan distintos perfiles para una clasificación visual resistente con el objetivo de proponer un método de clasificación con las propiedades de resistencia, rigidez y densidad correspondientes a cada calidad y comparar su prestación con la del pino resinoso de la Mesopotamia Argentina.

2. MATERIALES Y METODOS

La madera de pino ponderosa fue obtenida de trozas de primer raleo comercial provenientes de tres sitios: el predio La Lucha, el predio de la familia Martin y del barrio cerrado Dos Valles (26, 25 y 32 años de edad respectivamente), todos sitios de la cuenca Arroyo del Medio, próxima a la ciudad de San Carlos de Bariloche. El diámetro promedio mayor de las trozas fue 27,4 cm y el menor de 19,9 cm. Los largos variaron entre 2,35 m y 4,40 m. El volumen promedio de las trozas fue de 0,14 m³ y el rendimiento del aserrío alcanzó el 50,3 %. Las trozas fueron aserradas, secadas y cepilladas en Bariloche, posteriormente fueron enviadas, envueltas en polietileno, a Venado Tuerto. En el Laboratorio de la Facultad Regional Venado Tuerto, de la Universidad Tecnológica Nacional, se confeccionaron 5 muestras con las dimensiones que se indican en la Tabla 1. Teniendo en cuenta la edad de los árboles se puede considerar que las piezas poseen una alta proporción de madera juvenil.

Tabla 1: Dimensiones y cantidad de los cuerpos de prueba

Muestra	Dimensiones nominales			Cantidad
	Base	Altura	Largo	
	mm	mm	mm	n
1	50	50	1000	56
2	50	75	1500	58
3	50	100	2000	53
4	50	125	2500	57
5	50	150	3000	49



En cada una de las piezas se relevaron las siguientes singularidades: presencia de médula, nudosidad, dimensiones de los anillos de crecimiento, inclinación de las fibras, fisuras, deformaciones previas al ensayo y signos de ataque biológico. El relevamiento se realizó de acuerdo a las prescripciones de la norma IRAM 9662-3 (2015). La nudosidad K se determina a través la relación entre la dimensión del nudo mayor o agrupamiento de nudos, medida entre líneas paralelas al eje de la pieza y tangentes al mismo con la dimensión transversal de la cara donde se manifiesta (método alternativo UNE EN 1310 1997). Para los agrupamientos de nudos se considera la proyección superpuesta una sola vez. Se considera nudos agrupados cuando la distancia entre el centro de ellos es menor de 150 mm o menor que la altura de la pieza en el plano de flexión.

Los ensayos se realizaron de acuerdo a los lineamientos de la norma UNE EN 408 (2012). Para la determinación del módulo de elasticidad global se consideró al módulo de elasticidad transversal “G” igual a infinito. El procedimiento es similar al determinado en la norma IRAM 9663 (2013). La determinación de los valores característicos y los ajustes a las condiciones de referencia se realizó de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013). Los ensayos se efectuaron ubicando siempre los cuerpos de prueba con los mayores defectos en la zona traccionada, desatendiendo el criterio de las normas IRAM 9663 (2013) y UNE EN 384 (2010) que establece una selección al azar para este caso. La disposición elegida en esta investigación permite estudiar con mayor profundidad la influencia de los defectos sobre las propiedades mecánicas. Para la resistencia a flexión se determinó el percentil 7,5% en lugar del 5%, de esta manera es posible corregir los efectos negativos que origina la ubicación de los defectos siempre en la zona traccionada (Glos & Tratzmiller, 1996; Glos & Lederer, 2000).

Al finalizar el ensayo de cada probeta se determinó el contenido de humedad y la densidad aparente. Se efectuó sobre un trozo de sección completa y libre de nudos extraído de una zona cercana a la rotura. Se respetaron los procedimientos descriptos en las normas IRAM 9663 (2013), ISO 3131 (1975) e ISO 3130 (1975).

3. RESULTADOS

3.1 Resultados de los ensayos

En la Tabla 2 se presentan los valores resistencia a flexión (MOR), módulo de elasticidad (MOE) y densidad. Los valores se muestran por separado para cada una de las muestras. Para el MOR se determinó el valor medio y el del percentil 7,5%, para el MOE el valor medio y para la densidad aparente el valor medio y el del percentil 5%, en todos los casos se presenta el coeficiente de variación (COV).

No se encontraron en las probetas signos de ataque biológico ni deformaciones previas a los ensayos.

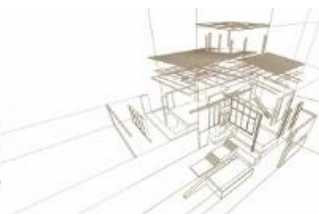


Tabla 2: Propiedades mecánicas y densidad para cada muestra

Muestra	MOR			MOE		Densidad			Cantidad n
	$f_{m,m}$ N/mm ²	$f_{m,0.075}$ N/mm ²	COV %	$E_{m,g,m}$ N/mm ²	COV %	ρ_m Kg/m ³	$\rho_{0.05}$ Kg/m ³	COV %	
1	18,6	9,7	38	4109	37	389	332	13	56
2	20,7	11,6	46	5188	39	381	341	8	58
3	18,7	9,1	44	5068	27	390	331	9	53
4	17,6	8,4	38	4979	29	392	340	10	57
5	16,4	8,5	44	4360	41	394	339	7	49
Total	18,5	9,1	43	4751	35	389	337	10	273

$f_{m,m}$: valor medio de la resistencia a la flexión. $f_{m,0.075}$: percentil 0,075% de la resistencia a la flexión. $E_{m,g,m}$: valor medio del módulo de elasticidad global. $\rho_{0.05}$: percentil 0,05% de la densidad. ρ_m : valor medio de la densidad. COV: coeficiente de variación. N: número. La resistencia a la flexión está ajustada a la altura de 150 mm (UNE EN 384 2010). El Módulo de elasticidad y la densidad están ajustados a un contenido de humedad del 12% (UNE EN 384 2011).

El valor medio del MOR para cada una de las muestras varían entre 16,4 N/mm² y 20,7 N/mm², con valores de COV superiores al 38%. El MOE presenta valores entre 4109 N/mm² y 5188 N/mm², con valores de COV un poco inferiores a los del MOR, pero superiores al 27%. Los valores medios de MOR y MOE son sensiblemente inferiores a los publicados por Fank (2018) para el pino resinoso de Misiones que reportó para el MOR valores medios entre 25,9 N/mm² y 38,1 N/mm², mientras que para el MOE los valores fueron entre 8713 N/mm² y 9264 N/mm². La densidad presentó un COV menor, inferior al 13%, y valores medios entre 381 kg/m³ y 392 kg/m³, inferior en un 25% a los reportados para el pino resinoso por Fank (2018).

Para probetas pequeñas libres de defectos provenientes de cuatro plantaciones de la provincia de Río Negro Spavento *et al.* (2017) reportó valores de MOR, sin corrección a la altura de referencia de 150 mm, entre 31,1 y 64,2 N/mm²; con un MOE entre 2447 y 3805 N/mm² y una densidad entre 360 y 460 kg/m³.

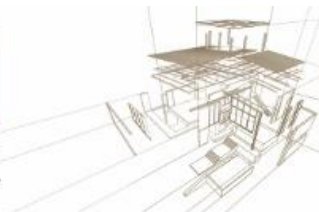
3.2 Análisis de las singularidades

A los efectos de evaluar los parámetros para proponer un método de clasificación visual resistente se analizan las principales singularidades y su relación con las propiedades mecánicas y la densidad.

En la Tabla 3 se presenta la nudosidad acumulada para todas las muestras dividida en seis segmentos. Se puede apreciar que solo el 17% de las piezas presentaron nudosidad inferior a K=1/3 y que un 35% presenta nudosidad superior a K=2/3. La nudosidad promedio resultó de K=0,57, superior a la reportada por Fank (2018) para las piezas de pino resinoso de Misiones donde obtuvo K=0,46.

Tabla 3: Nudosidad acumulada

		Nudosidad K					
		1/6	1/3	1/2	2/3	5/6	1
Nudosidad	n	11	47	107	178	228	273
acumulada	%	4%	17%	39%	65%	83%	100%



La Tabla 4 presenta las correlaciones entre las propiedades mecánicas y la densidad con las principales singularidades. Para la nudosidad se puede apreciar una correlación negativa significativa con el MOR (-0,40) y el MOE (-0,30), mientras que con la densidad la misma resulta no significativa. La inclinación de las fibras presenta correlaciones no significativas con las tres propiedades. La dimensión del anillo de crecimiento muestra correlaciones negativas significativas con el MOR (-0,42) y el MOE (-0,60), mientras que resulta muy débil con la densidad. La resistencia presenta correlaciones similares con la nudosidad y la dimensión del anillo de crecimiento, mientras que el módulo de elasticidad presenta una mayor correlación con la dimensión de anillo de crecimiento que con la nudosidad.

Tabla 4: Correlaciones de las singularidades con las propiedades mecánicas y la densidad

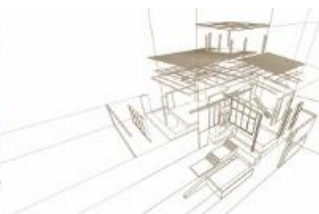
Singularidad	MOR	MOE	Densidad	n
Nudosidad (K)	-0,40	-0,30	-0,09	273
Inclinación de las fibras (IF)	-0,06	-0,02	-0,07	273
Anillo mayor (AnM)	-0,42	-0,60	-0,14	273

Para el pino resinoso de Misiones Fank (2018) reportó una correlación de la resistencia con la nudosidad de -0,46, es decir ligeramente superior a la alcanzada en esta especie. La correlación reportada por la misma autora entre la dimensión del anillo de crecimiento mayor y la resistencia fue de -0,34, y con el módulo de elasticidad de -0,48, estos valores son menores a los obtenidos para el pino ponderosa. En ambos pinos se observó una mayor correlación del anillo de crecimiento con el módulo de elasticidad.

3.3 Clasificación visual

Sobre la base de los análisis del punto anterior se analizan ocho perfiles de clasificación visual resistente. Se utilizan como límites de clasificación la presencia de médula, la nudosidad y la dimensión del anillo de crecimiento mayor. No se considera la inclinación de las fibras por su correlación no significativa con las propiedades mecánicas. Para el MOR se presenta el valor medio y el del percentil 7,5% (ya se explicaron las razones en el punto 2), para el MOE el valor medio y para la densidad aparente el valor medio y el del percentil 5%.

En la Tabla 5 se observan los valores de resistencia, rigidez y densidad para los ocho perfiles de clasificación estudiados. El perfil 1 es de referencia e incluye los valores del conjunto de las muestras. El perfil 2 muestra la separación entre las piezas que contenían médula y las que no, se puede apreciar que las piezas sin médula presentan un valor medio de resistencia a la flexión un 19% superior a las que si la contenían. Para el pino resinoso Fank (2018) reportó diferencias del 23% en la resistencia de las piezas que no contenían médula de las que si la contenían. El perfil 3 corresponde a los criterios para asignar clases resistentes en la norma IRAM 9662/3 (2015) para tablas de *Pinus taeda* y *elliottii* de la Mesopotamia Argentina. Se destaca el bajo rendimiento en la calidad superior (10%). En los perfiles 4 y 5 se modifican los límites de nudosidad.



En el perfil 4 se admite una nudosidad menor y se produce una fuerte baja del rendimiento en la calidad superior que pasa al 4%, con menos de un 3% de aumento en el percentil 7,5% de la resistencia. En el perfil 5 se aumenta la nudosidad admisible lo que lleva al rendimiento en la calidad superior al 18% pero con una disminución del 34% en la resistencia. En los perfiles 6 a 8 se admite una mayor dimensión de los anillos de crecimiento. En el perfil 6 se admite la misma nudosidad que el perfil 3 y se alcanza una resistencia similar a la de ese perfil en ambas calidades con un incremento del rendimiento en la calidad superior que llega al 13%. En el perfil 7 se admite la misma nudosidad que el perfil 4 con un rendimiento en la calidad superior del 6%. En el perfil 8 se admite médula en todas las calidades, una nudosidad similar a la del perfil 3 y una mayor dimensión de anillo de crecimiento. Se observa una resistencia similar a la de los perfiles 3 y 6 con un rendimiento que sube al 15% en la calidad superior, con una disminución del 7% en el módulo de elasticidad respecto del perfil 3 y valores similares en la densidad.

Tabla 5: Perfiles de resistencia, rigidez y densidad

Perfiles	f_m	$f_{m,075}$	$E_{m,g}$	ρ_m	ρ_{05}	Cantidad	
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	kg/m ³	n	%
1 Todos	18,5	9,1	4751	389	337	273	(100)
2	SM	19,7	9,2	5098	388	335	172 (63)
	AM	16,5	8,6	4160	391	339	101 (37)
3	S SM; K<1/3; AnM<10	30,1	18,5	6770	384	349	26 (10)
	I AM; K<2/3; AnM<15	18,0	9,6	4698	390	337	146 (53)
	D Descarte	16,1	7,8	4308	390	337	101 (37)
4	S SM; K<1/4; AnM<10	30,8	19,6	6927	385	325	11 (4)
	I AM; K<1/2; AnM<15	20,5	9,9	5101	386	341	94 (34)
	D Descarte	16,5	8,5	4413	391	336	168 (62)
5	S SM; K<1/2; AnM<10	25,1	12,3	6203	386	331	49 (18)
	I AM; K<3/4; AnM<15	17,5	9,6	4493	387	336	155 (57)
	D Descarte	16,0	7,5	4300	396	339	69 (25)
6	S SM; K<1/3; AnM<12	29,0	18,9	6431	380	325	35 (13)
	I AM; K<2/3; AnM<16	17,6	9,6	4634	392	337	138 (50)
	D Descarte	16,0	7,5	4312	389	336	100 (37)
7	S SM; K<1/4; AnM<12	28,8	19,4	6620	380	325	15 (6)
	I AM; K<1/2; AnM<16	20,5	9,4	5058	388	345	91 (33)
	D Descarte	16,5	8,5	4416	390	336	167 (61)
8	S AM; K<1/3; AnM<12	28,8	18,9	6321	382	341	41 (15)
	I AM; K<2/3; AnM<16	17,1	9,6	4596	392	337	132 (48)
	D Descarte	16,0	7,8	4312	386	336	100 (37)

$f_{m,m}$: valor medio de la resistencia a la flexión. $f_{m,075}$: percentil 0,075% de la resistencia a la flexión. $E_{m,g,m}$: valor medio del módulo de elasticidad global. ρ_{05} : percentil 0,05% de la densidad. ρ_m : valor medio de la densidad. n: número. S: calidad superior. I: calidad Inferior. D: descarte. SM: sin médula. AM: admite médula, K: nudosidad. AnM: dimensión del anillo de crecimiento mayor. La resistencia a la flexión está ajustada a la altura de 150 mm (IRAM 9664 2013). El Módulo de elasticidad y la densidad están ajustados a un contenido de humedad del 12% (IRAM 9664 2013).

El perfil 8 es el que se presenta como el más conveniente desde el punto de vista técnico y económico. Se debe considerar que para obtener el valor característico se debe aplicar



el ajuste por tamaño de muestra (K_s) que establece la norma IRAM 9664 (2013), para la calidad superior se determina un $K_s=0,77$ y para la calidad inferior $K_s=0,85$, de lo que resultan los siguientes valores de resistencia característica $f_{m,k}=14,4 \text{ N/mm}^2$ y $f_{m,k}=8 \text{ N/mm}^2$ para las calidades superior e inferior respectivamente.

Para vigas de *Pinus taeda / elliotti*, clasificadas de acuerdo a la norma IRAM 9670 (2002), Fank (2018) reportó valores característicos para la resistencia de $20,8 \text{ N/mm}^2$ y $11,5 \text{ N/mm}^2$ para los grados 1 y 2 respectivamente, con un MOE de 10883 N/mm^2 y 9532 N/mm^2 para cada grado y una densidad (percentil 5%) de 458 kg/m^3 y 418 kg/m^3 , con rendimientos del 17% en el grado 1 y del 38% en el grado 2. La norma IRAM 9670 (2002) propone para la resistencia a flexión los valores de $23,9 \text{ N/mm}^2$ y $11,9 \text{ N/mm}^2$ para los grados 1 y 2 respectivamente, con valores para el módulo de elasticidad de 9000 N/mm^2 y 7500 N/mm^2 .

En la Figura 1 se ilustra la comparación de la resistencia y la rigidez obtenidas en este trabajo para el pino ponderosa con el pino resinoso de la Mesopotamia Argentina según la norma IRAM 9670 (2002) y Fank (2018). Se puede apreciar que la resistencia es significativamente inferior a la que propone la norma IRAM para el pino resinoso, un 40% y un 37% para las calidades superior e inferior respectivamente. Para el módulo de elasticidad se aprecian también importantes diferencias, 30% y 39% para ambas calidades respectivamente. Las diferencias son aún mayores respecto de los valores de módulo de elasticidad reportados por Fank (2018).

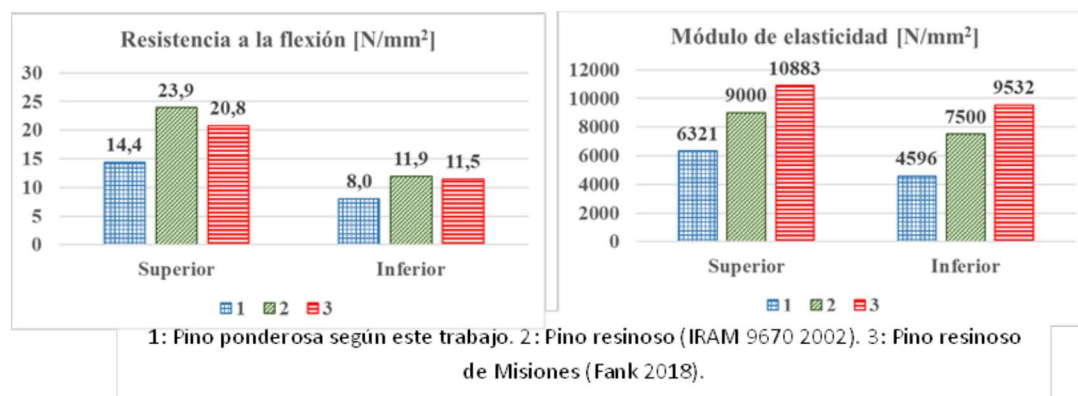


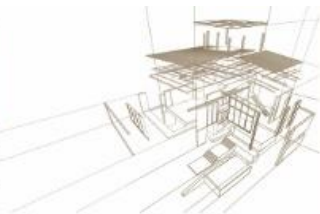
Figura 1: Propiedades mecánicas del pino ponderosa y el pino resinoso

La densidad prácticamente no varía con la calidad (Tabla 5, perfil 8) y su valor característico para cada clase (341 kg/m^3 y 337 kg/m^3) resultan inferiores a los determinados por Fank (2018) para el pino resinoso en un 22% y un 19% para las calidades superior e inferior respectivamente.

El rendimiento obtenido en el perfil 8 de la Tabla 5 para la calidad superior (15%) es ligeramente inferior al obtenido por Fank (2018) para el pino resinoso (17%) clasificado de acuerdo a la norma IRAM 9670 (2002) y el obtenido en la calidad inferior (48%) es superior al obtenido para el pino resinoso (38%).

4. CONCLUSIONES

La clasificación visual que presentó el mejor rendimiento técnico económico para el pino ponderosa admite médula en ambas calidades. Para la calidad superior acepta



nudosidad menor de 1/3 con anillo de crecimiento menor de 12 mm y para la calidad inferior una nudosidad menor de 2/3 y anillo de crecimiento menor de 16 mm.

Para el perfil de clasificación elegido, los valores característicos de resistencia a flexión son de 14,4 N/mm² y 8,0 N/mm² en las calidades superior e inferior respectivamente, con un valor medio de módulo de elasticidad global de 6321 N/mm² y 4596 N/mm². Para la densidad se obtuvieron valores de 341 kg/m³ y 377 kg/m³ para cada una de las calidades.

La baja proporción de piezas en la calidad superior está motivada por la alta nudosidad encontrada (valor medio de K= 0,46) que se puede atribuir a un deficiente trabajo de poda. Esta particularidad de la madera disponible sugiere trabajar en el desarrollo de productos laminados encolados que mejoren el rendimiento a través del saneamiento de los nudos. Surge también la necesidad de mejorar los trabajos de poda en árboles jóvenes para lograr en el futuro más madera de mejor calidad.

Las propiedades de resistencia, rigidez y densidad determinadas para la madera el pino ponderosa de la Patagonia norte de la Argentina, proveniente de primer raleo comercial, resultan marcadamente inferiores al pino resinoso de la Mesopotamia Argentina.

AGRADECIMIENTOS

A los becarios alumnos y graduados del grupo GIDEC de la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional por su responsable colaboración en los ensayos.

A la Comisión Forestal y Maderera Bariloche.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Fank, P (2018). Caracterización físico-mecánica del pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*) cultivado en el nordeste argentino para uso estructural. Tesis doctoral.

Glos, P. (1995). Strength grading. Basis of design, material properties, structural components and joints. Timber Engineering STEP 1, pp: A6/1-A6/8. Centrum Hout, The Netherlands.

Glos P. & Lederer B. (2000) Sortierung von Buchen- und Eichenschnittholz nach der Tragfähigkeit und Bestimmung der zugehörigen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte. Bericht Nr. 98508, Institut für Holzforschung, München.

Glos P. & Tratzmiller M. (1996) Höherwertige Starkholznutzung durch verbesserte Einschnitt- und Sortierverfahren. Abschlußbericht 94506 an LWF, München.

INTI CIRSOC (2016a). Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones. Buenos Aires, Argentina, disponible en <https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/601/CIRSOC601-completo.pdf>.

IRAM 9662-1 (2015). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 1: Tablas de pino Paraná (*Araucaria angustifolia*). Buenos Aires.



IRAM 9662-2 (2015). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2005). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 2: Tablas de Eucalyptus grandis. Buenos Aires.

IRAM 9662-3 (2015). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 3: Tablas de Pino taeda - elliotti. Buenos Aires.

IRAM 9662-4 (2015). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 4 – Tablas de álamo ‘australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’ (Populus deltoides). Buenos Aires.

IRAM 9670 (2002). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Madera estructural. Clasificación en grados de resistencia para la madera aserrada de pinos resinosos (Pino elliotti y Pino taeda) del noroeste argentino mediante una evaluación visual. Buenos Aires.

IRAM 9663(2013). Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.

IRAM 9664 (2013). Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.

ISO 3130 (1975). International Organization for Standardization. Wood – Determination of moisture content for physical and mechanical tests.

ISO 3131 (1975). International Organization for Standardization. Wood – Determination of density for physical and mechanical tests.

Letourneau, F.J., Medina, A.A., Andía, I.R., Andenmatten, E., De Agostini, N., Mantilaro, N., 2014. Caracterización xilo-tecnológica de la madera de una plantación adulta de Pinus ponderosa de la patagonia argentina. RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias, vol. 40, núm. 2, pp. 196-201. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina.

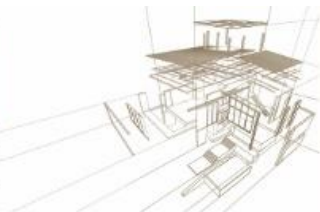
Loguercio, G. A. and Dececchis, F., 2006. Forestaciones en la Patagonia Andina: potencial y desarrollo alcanzado. Patagonia Forestal. Año XII N° 1. pp. 4-6 y N° 2. pag. 4-8. ISSN 1514-2280.

Spavento, E.; Acciaresi, G.; Refort, M.; Keil, G.; Sañudo, G. (2017) Propiedades físico-mecánicas de la madera juvenil de pino ponderosa proveniente de cuatro sitios de la provincia de Neuquén. Proceso, producto y gestión de la madera de pino ponderosa. INTA EDICIONES. https://www.researchgate.net/publication/323167526_Producto_proceso_y_gestion_de_la_madera_de_pino_ponderosa

UNE EN 408 (2011). Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

UNE EN 1310 (1997). Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de singularidades. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madrid.

Zingoni, M.I., Andía, I.; Mele, U., 2007. Longitud de traqueidas y madera juvenil en el fuste de un árbol de pino ponderosa de 50 años. III Congreso Iberoamericano de Productos Forestales IBEROMADERA 2007. 3 al 5 de julio, Buenos Aires, Argentina.



COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ELASTO-RESISTENTE EN MADERAS DE SALICÁCEAS DE ARGENTINA

COMPARING ELASTORESISTIVITY BEHAVIOUR ON SALICACEAE TIMBER FROM ARGENTINA

María M. Refort ^{(1)*}, Eleana M. Spavento ⁽¹⁾, Gabriel D. Keil ⁽¹⁾, Carla, Taraborelli ⁽¹⁾, Luis Acuña Rello ⁽²⁾, Manuel M. De Hagen ⁽³⁾.

⁽¹⁾ Laboratorio de Investigaciones en Madera. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Argentina.

⁽²⁾ Laboratorio de maderas. Universidad de Valladolid. Palencia, España.

⁽³⁾ Profesional independiente. La Plata, Argentina.

* Contacto: María Mercedes Refort: mmrefort@gmail.com

Resumen

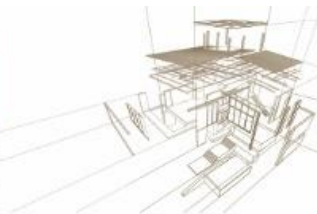
El incremento en el uso de la madera como elemento estructural está relacionado, principalmente, a los beneficios socio-económicos y ambientales que presenta en comparación con otros materiales constructivos tradicionalmente empleados. Su uso requiere del conocimiento del comportamiento físico-mecánico, expresado fundamentalmente como valores característicos de elasto-resistencia en flexión estática y densidad. Entre las maderas cultivadas de interés maderero en Argentina, las salicáceas (*Salix* spp. y *Populus* spp.) constituyen el tercer grupo de importancia, con una superficie forestada de aproximadamente 100.000 ha, representada fundamentalmente, en la región del Delta del Paraná y de los valles de Río Negro. Sin embargo, el conocimiento tecnológico de estas maderas, en ocasiones, es escaso. El objetivo del trabajo fue evaluar y comparar los valores elasto-resistentes de *Salix babylonica* x *Salix alba* "Ragonese 131/27" y *Populus x euramericana* "I-214" procedente de la región del Delta y de Río Negro, respectivamente. Se emplearon viguetas macizas semi-estructurales de 0,40 x 0,60 x 1,20 metros. Se trabajó con metodología de ensayo no destructiva-destructiva para la caracterización físico-mecánica, previa evaluación visual del material. En base a los resultados obtenidos, las maderas resultaron livianas y con valores elasto-resistentes en flexión estática estadísticamente diferentes (superiores en *Salix*), debiendo considerarse una clasificación por calidad estructural para definir el correcto uso del material en servicio.

Palabras-clave: Flexión estática, *Populus* spp.; *Salix* spp.

Abstract

Wood as a structural material has been on increment based on the socio-economic and environmental benefits that it has comparing with ordinary constructive materials. Their use requires the knowledge of physic-mechanic behaviour, expressed mainly as stiffness and strenght values on static bending and density. In Argentina the Salicaceae (*Salix* spp. y *Populus* spp.) are the third forests crop group in logging market, with a 100.000 ha, mostly located in Delta del Paraná and the valleys of Rio Negro. Spite of being one of the most important forests crops, the technology knowledge of them is limited. The aims of this study was evaluated and compare stiffness and strenght values of *Salix babylonica* x *Salix alba* "Ragonese 131/27" and *Populus x euramericana* "I-214" from Delta del Paraná and Rio Negro, respectively. Solid semi-structural joists of 0.40 x 0.60 x 1.20 meters were tested by destructive and non-destructive methods for physic-mechanic characterization. Previously the material was visual evaluated. The results showed that both timbers were a light material with significant differences in stiffness and strenght values to static bending (higher in willow), as a result ought to consider a visual selection by structural quality that allows the accurate use of service material.

Keywords: Static bending, *Populus* spp.; *Salix* spp.



1. INTRODUCCIÓN

El incremento en el uso de la madera como elemento estructural está relacionado, principalmente, a los beneficios socio-económicos y ambientales que presenta en comparación con otros materiales constructivos tradicionalmente empleados. Entre ellos pueden mencionarse el bajo gasto energético para su fabricación, transporte y puesta en obra como así también su buena relación resistencia/peso (Queipo et al. 2010).

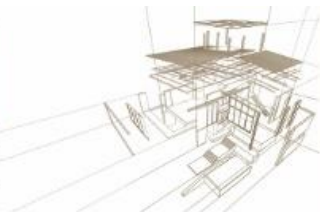
Sin embargo, los modernos conceptos de diseño estructural, basados en los estados límite de resistencia y de servicio, requieren del conocimiento de las propiedades físico-mecánicas del material, expresadas fundamentalmente como valores característicos de elasto-resistencia en flexión estática y densidad. La densidad es uno de los parámetros más importantes para la evaluación de las cualidades de las maderas, por ser de fácil determinación y estar relacionada a las demás características del material, siendo el punto de partida en el estudio de la madera para sus diversos usos. La flexión estática ha sido considerada la principal propiedad mecánica para la evaluación de madera con fines estructurales, ya que en ella se integran propiedades como la compresión, la tracción y el cizalle (Piter 2003; Ramírez et al. 2001; Sánchez Gómez and Roa 2015).

La determinación de dichas propiedades se puede realizar mediante diferentes metodologías de ensayos. Dentro de ellas, las no destructivas, más ampliamente utilizadas se basan en la evaluación visual del lote de madera. Esta consiste en la inspección visual registrando y evaluando las singularidades que aparecen. La presencia y magnitud de dichas irregularidades definirán las calidades visuales. Asimismo, existen otras metodologías no destructivas que permiten la determinación de parámetros predictores de las propiedades físico-mecánicas tales como la velocidad de propagación de ultrasonidos (Iñiguez González 2007). Por otra parte, las metodologías de ensayos destructivos permiten la determinación de los valores reales elasto-resistentes del material y su posterior clasificación mecánica o por resistencia, con el fin de dividir y homogeneizar una población de madera en clases, o grupos, de distinta calidad, sobre la base de un análisis individual de cada pieza estructural (Fernández-Golfín Seco 2003).

En este contexto, a nivel nacional se han desarrollado diferentes normativas y reglamentaciones para el adecuado uso estructural de maderas de bosques cultivados, siendo el *Pinus* sp y el *Eucalyptus* las especies más difundidas en cuanto a áreas cultivadas y volumen de madera aserrada. Mientras que las salicáceas (*Salix* spp. y *Populus* spp.) constituyen el tercer grupo de importancia luego de ellas, con una superficie forestada de aproximadamente 100.000 ha, representada fundamentalmente, en la región del Delta del Paraná y de los valles de Río Negro (Borodowski 2017).

Dentro de los cultivares más representativos entre los álamos se encuentran los clones de *Populus deltoides* y *Populus x euroamericana*; con relación a los sauces se destacan el *Salix babylonica* var. *sacramenta*, *Salix babylonica x Salix alba* entre otros (MAGyP Ca. 2015) aunque en ambos casos, el conocimiento tecnológico de estas maderas, en ocasiones, es escaso.

De acuerdo con esto, el objetivo de este trabajo fue evaluar y comparar los valores elasto-resistentes de *Salix babylonica x Salix alba* “Ragonese 131/27” y *Populus x euramericana* “I-214” procedente de la región del Delta y de Río Negro, respectivamente.



2. METODOLOGÍA

2.1. Material de ensayo

Se trabajó con madera de *Salix babylonica* x *Salix alba* "Ragonese 131/27" (clon S.131/27) proveniente de un ensayo de mejoramiento genético del INTA Delta de 16 años de edad y con madera de *Populus x euramericana* I-214 (clon P.I-214) procedente de plantaciones comerciales del valle medio de Río Negro de 15 años de edad, Argentina. Ambos materiales fueron recepcionados en forma de vigas y acondicionados en el Laboratorio de Investigaciones en Madera (LIMAD), UNLP, hasta alcanzar la humedad de equilibrio higroscópico (15-17% en la ciudad de La Plata) constatada mediante xilohigrómetro digital (Hydromette HT 85, de la marca GANN). Posteriormente, el material fue reprocesado atendiendo a las especificaciones de la norma EN 408:2010+A1:2012 en cuanto a la proporción de las dimensiones de las piezas (longitud de la pieza al menos 19 veces la altura de la sección). De este modo, se obtuvieron 40 piezas de madera maciza de S.131/27 y 80 piezas de P.I-214 de 0,40 x 0,60 x 1,20 metros para ser caracterizadas mediante metodología de ensayo no destructiva-destructiva.

2.2. Ensayos no destructivos

2.2.1. Evaluación visual

En esta etapa se utilizó el método de clasificación visual empleando la norma IRAM 9662-4 (2015) atendiendo a las dos clases de resistencia para fines estructurales: Clase 1 (C-1) y Clase 2 (C-2) más una clase de Rechazo (R).

2.2.2. Evaluación sónica

Para esta etapa se trabajó con el equipo Microsecond Timer (Fakopp) mediante el cual se determina la velocidad de propagación de una onda ultrasónica a través de la longitud de la pieza a analizar. La onda es generada mediante un golpe de martillo en un palpador emisor y es captada en el otro extremo de la pieza mediante un palpador receptor. De este modo, se determina el tiempo (μs) que tarda la onda ultrasónica en dicha distancia. A partir de este tiempo de paso se determina la velocidad de la onda y posteriormente, el módulo de elasticidad dinámico (MOE_d), a partir de la Fórmula 1.

$$\text{MOE}_d = (V)^2 \times \delta, \quad (1)$$

dónde:

- MOE_d : Módulo Dinámico, en MPa.
- V: velocidad de paso de la onda, en m/seg.
- δ : Densidad de la pieza de madera, en Kg/m^3 .

El ensayo fue realizado con las piezas bi-apoyadas; fueron colocadas sobre dos soportes (sin fijación), separados de cada extremo a 0,22 L (siendo L=longitud de la viga), Figura 1, previa determinación del peso y dimensiones para la obtención de la densidad.

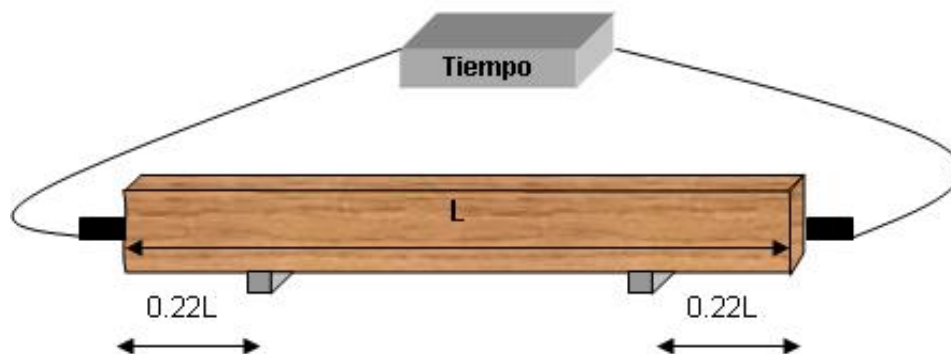
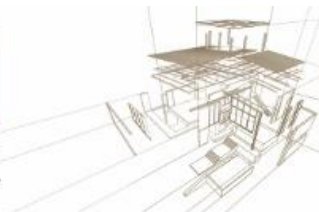


Figura 1: Esquema de ensayo de ultrasonidos en vigas bi-apoyadas.

2.3. Ensayo destructivo

Se realizó el ensayo de flexión estática acorde a la norma EN 408:2011+A1:2012; el mismo fue llevado a cabo en máquina Universal de ensayo ALFRED J. AMSLER & Co, Schaffouse - Suisse 7928 de 5000 Kg. A través de este ensayo se determinó el módulo de elasticidad estático (MOE), Fórmula 2 y el módulo de rotura (MOR), Fórmula 3. Finalizado el ensayo, en la zona cercana a la rotura de las piezas, se extrajeron probetas de las mismas escuadrías y de 100 mm de longitud para determinar su densidad en probetas libres de defecto. Se determinaron los valores característicos en cada caso: media para el MOE y 5to percentil para el MOR y la densidad.

$$MOE = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(\frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} \right)}, \quad (2)$$

dónde:

- MOE: módulo de elasticidad, en MPa.
- a: distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo, en mm.
- l: luz, en mm.
- b: anchura o menor dimensión de la sección transversal, en mm.
- h: altura o mayor dimensión de la sección transversal, en mm.
- F2 - F1: incremento de carga sobre la línea de regresión, con un coeficiente de correlación de 0,99 o superior, en kN.
- w2 - w1: incremento de la deformación correspondiente a F2 - F1, en mm.

$$MOR = \frac{3Fa}{bh^2}, \quad (3)$$

dónde:

- MOR: resistencia a la flexión, módulo de rotura, en MPa.
- F: carga, en kN.
- a, b y h: definidos en la fórmula (2).

En la Figura 2 se muestra un esquema del dispositivo y las condiciones de ensayo.

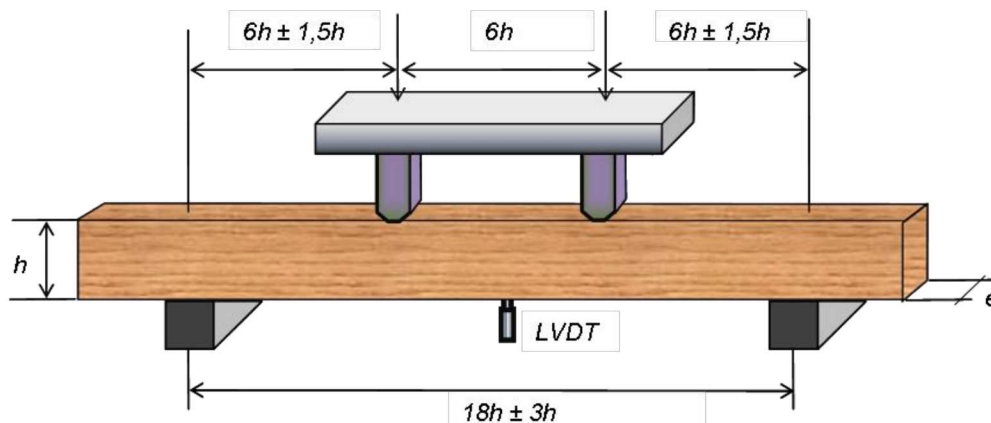


Figura 2: Esquema del dispositivo y condiciones de ensayo (EN 408:2011+A1:2012).

2.4. Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos fueron llevados a cabo con Software Statgraphics Centurion XV.II; se realizaron análisis descriptivos de cada variable, se comprobaron los supuestos estadísticos y, ante el incumplimiento de estos, se trabajó con análisis comparativo no paramétrico.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Análisis descriptivo

3.1.1. Evaluación visual

En base a la evaluación clasificatoria de la madera de S.131/27, se desprende que el 7,5% de dicho material resultó C-1 y el 12,5% C-2. El resto del material (80%) se constituyó como madera de rechazo para fines estructurales. El motivo de dichos rechazos estuvo constituido en mayor medida, por presencia de galerías de insectos, seguido por la presencia de nudos.

En relación a la madera P.I-214, un 45 % del material analizado se correspondió con C-1, 10% con C-2 y el resto (45%) fue rechazado para fines estructurales. Las causas del rechazo estuvieron dadas en primer término por nudos (de cara y/o canto), seguido por presencia de galerías de insectos.

3.1.2. Evaluación físico-mecánica (no destructiva-destructiva)

En la Tabla 1 se muestran los valores descriptivos, por clon, de las variables evaluadas.

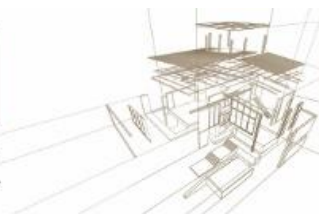


Tabla 1: Variables físico-mecánicas: análisis descriptivo.

Clon	CH (%)*	Dn (Kg/m ³)*	MOE _d (MPa)*	MOE (MPa)*	MOR (MPa)*
S.131/27	10,90 (8,05)	451,59 (5,15)	10185,4 (12,30)	13351,2 (19,14)	20,60 (27,46)
P.I-214	13,35 (8,18)	403,44 (7,21)	9307,55 (9,64)	7214,66 (17,73)	21,98 (19,52)

*Los coeficientes de variación se indican entre paréntesis; CH: contenido de humedad (valor medio); Dn: densidad aparente normal (5to percentil); Vel: velocidad de ultrasonidos (valor medio); MOE_d: módulo de elasticidad dinámico (valor medio); MOE: Módulo de elasticidad (valor medio); MOR: módulo de rotura (5to percentil); Dn, Vel, MOE_d y MOE expresados al 12% de CH.

La madera de ambos clones resultó liviana en cuanto a los valores de densidad aparente (Coronel, 1994); valores similares de densidad fueron hallados por Filippetti *et al.* (2017) para dos clones de *Populus deltoides* (“Australiano 129/60”: 431 Kg/m³; “Stoneville 67”: 401 Kg/m³).

Los valores de MOE_d, resultaron predictores aceptables del MOE (R² ajust. 78%-70%, para S.131/27 y P.I-214, respectivamente), pero no para el MOR (R² ajust. <20%).

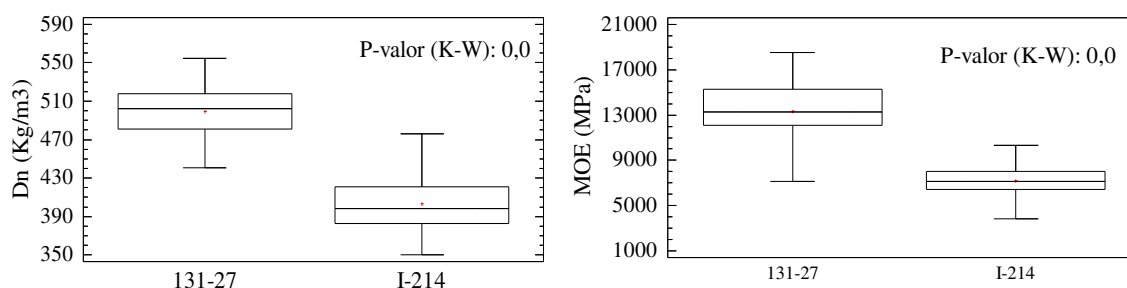
El MOE para S.131/27 fue superior al límite de clase de resistencia indicado en la C-1 de la norma IRAM 9662-4 (2015), mientras que el de P.I-214 no alcanzó los valores de MOE establecidos en la C-2 de la misma norma, resultando un material poco rígido, consecuentemente con lo indicado por Castro (2006). Valores intermedios a los descriptos fueron hallados por Filippetti *et al.* (2017) para *P. deltoides* “Australiano 129/60”: 10897 MPa y para “Stoneville 67”: 10929 MPa

En ambos casos, los valores de MOR se corresponderían con una C-2 de la norma antes mencionada; valores superiores de MOR fueron hallados para *P. deltoides* “Australiano 129/60”: 28,7 MPa y para “Stoneville 67”: 25,6 MPa (Filippetti *et al.*, 2017).

3.2. Análisis comparativos

3.2.1. Evaluación general

En la Figura 3 se presenta un análisis general, considerando las comparaciones entre clones para cada variable.



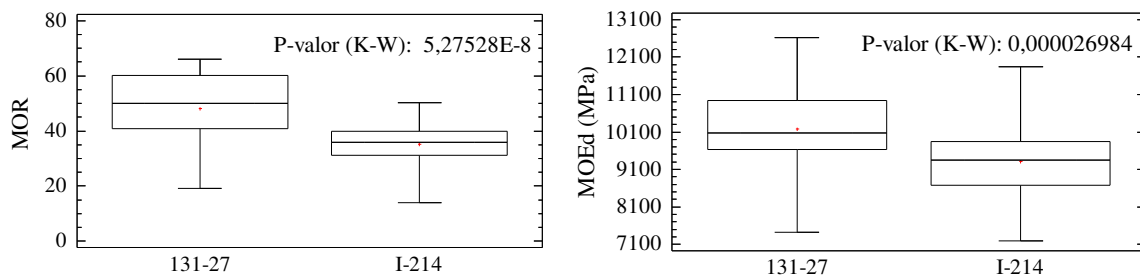
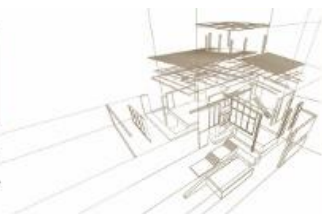


Figura 3: Comparaciones entre clones: D_n ; MOE , MOR y MOE_d (izquierda- derecha; arriba-abajo).

La madera de S.131/27 fue significativamente superior para todas las variables físico-mecánicas analizadas.

3.2.2. Evaluación por clases resistentes-clon.

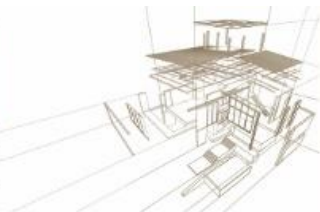
En la Tabla 2 se muestran los resultados comparativos no paramétricos considerando los valores elasto-resistentes por clases para cada clon.

Tabla 2: Variables físico-mecánicas: análisis comparativos por clases.

Clon	Parámetros elasto-resistente	Parámetros estadísticos*		Clases resistentes*	
		Estadístico K-W	P-Valor	Clase	Mediana
S.131/27	D_n (Kg/m^3)	1,13913	0,565772	C-1	514,618 a
				C-2	500,966 a
				R	499,671 a
P.I-214		4,67248	0,0966907	C-1	393,481 a
				C-2	427,368 a
				R	398,542 a
S.131/27	MOE (MPa)	1,58169	0,453461	C-1	15333,0 a
				C-2	12806,8 a
				R	13261,5 a
P.I-214		7,99537	0,0183581	C-1	7211,88 a
				C-2	8052,39 a
				R	6628,46 b
S.131/27	MOR (MPa)	1,67035	0,433798	C-1	59,196 a
				C-2	44,465 a
				R	48,3795 a
P.I-214		9,50761	0,00861882	C-1	36,6425 a
				C-2	42,1735 b
				R	34,572 ac

*Estadístico K-W: Kruskal-Wallis; letras diferentes denotan diferencias significativas P-valor<0,05.

En términos generales, la clase de rechazo para fines estructurales presentó los menores valores físico-mecánicos (expresados en mediana, Tabla 2), aunque en la mayoría de los casos, sin diferencias significativas entre las clases; sólo para el caso del MOE de P.I-214 la clase R, fue estadísticamente inferior a C-1 y C-2 y para el MOR del mismo clon la diferencia estuvo dada entre la C-2 y las otras clases. Asimismo, el valor clasificatorio más restrictivo para S.131/27 fue el MOR, mientras que, en concordancia con Spavento (2015), para el P.I-214 fue el MOE.



Un mayor número de repeticiones permitirá realizar un análisis más exhaustivo sobre esta clasificación, destacando además la importancia de realizar una caracterización de esta madera a escala real a fin de llegar a conclusiones más seguras para su uso estructural.

La escasa influencia significativa de las singularidades en las clases resistentes podría corresponderse con la falta de especificidad normativa para estos clones-dimensiones analizados; resultados similares fueron hallados por Spavento *et al.* (2019); Spavento (2015), analizando la influencia de las dimensiones y calidades, a través de normativas europeas, en los valores elasto-resistentes de madera aserrada de *Populus x euramericana* I-214 de procedencia española y argentina.

4. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos, ambas maderas resultaron livianas en cuanto a los valores de densidad aparente normal y con valores elasto-resistentes estadísticamente diferentes (superiores en *Salix*), debiendo considerarse una clasificación por calidad en material de tamaño estructural para definir su uso más apropiado en servicio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al personal técnico del Laboratorio de Ensayos de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, por la colaboración en la realización de los ensayos mecánicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Borodowski, E.D. (2017). Situación actual del cultivo y uso de las Salicáceas en Argentina. Disertación. V Congreso Internacional de Salicáceas. Talca, Chile.
- Castro, G. (2006). Usos actuales y posibilidades futuras de la madera de álamo. Jornadas de Salicáceas. Buenos Aires, Argentina, Septiembre.
- Coronel, E. (1994). Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. 1º Parte. Fundamentos de las propiedades físicas de la madera. Santiago del Estero, Argentina.
- Fernández-Golfín Seco J. I. Rafael Díez Barra, M. Hermoso Prieto E and Mier Pérez, R. (2003). Madera estructural: estrategias para su clasificación. Boletín de Información Técnica N°223. Madrid, España.
- Filippetti, M.C. Guillaumet, A.A. Tortoriello, M. Alí Mossre, C. (2017). Potencial uso estructural de la madera *Populus deltoides* cultivado en el noroeste de la provincia de buenos aires. Congreso CLEM+CIMAD. Junín, Argentina, Mayo.
- IRAM 9662-4. (2015). Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Argentina.

Iñiguez González, G. (2007). Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Madrid, España.

Ministerios de Agricultura, Ganadería y pesca. Presidencia de la Nación (MAGyP). Argentina: plantaciones forestales y producción sostenible. (Ca. 2015) Documento Técnico. Buenos Aires, Argentina.

Piter, J.C. (2003). Clasificación por resistencia de la madera aserrada como material estructural. Desarrollo de un método para el *Eucalyptus grandis* de Argentina. Concepción del Uruguay, Argentina.

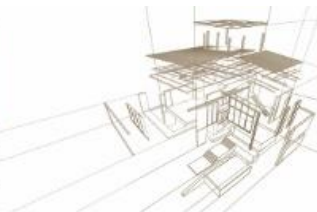
Queipo de Llano Moya, J. González Rodrigo, B. Llinare Cervera and Villagra Fernández, V. (2010). Guía de Construir con Madera. Madrid, España.

Ramírez V, M. Valenzuela H, L. and Díaz S, C. (2001). Propiedades mecánicas en flexión de la madera de *Pinus radiata*, creciendo en un sistema silvopastoral: I: elasticidad y resistencia. Maderas. Ciencia y tecnología. 3(1-2), 35-43. Disponible: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2001000100004> Concepción, Chile.

Sánchez Gómez, D. and Roa, S.E. (2015). Correlación entre la densidad y la flexión estática para *Eucalyptus globulus* Labill. procedente de la sabana Cundiboyacense. Bogotá, Colombia.

Spavento, E. (2015). Caracterización y mejora tecnológica de *Populus x euramericana* I-214, austral y boreal, con fines estructurales. Palencia, España.

Spavento, E. Casado Sanz, M. Acuña Rello, L. Basterra Otero, L.A. (2019). Influencia de las dimensiones y calidades en la resistencia a flexión estática en madera aserrada de *Populus* sp. Congreso LIGNOMAD 19, Santiago de Compostela, España, Julio.



ESTADO DEL ARTE DE LA CLASIFICACIÓN MECÁNICA CON EQUIPOS HOMOLOGADOS PARA SU USO SEGÚN EN 14081

STATE OF THE ART OF THE MACHINE GRADE USING HOMOLOGATED EQUIPMENT FOR USE ACCORDING TO EN 14081

Baño, Vanesa ^{(1)*}; Villanueva, José Luis ⁽²⁾; Lafuente, Edgar ⁽²⁾

⁽¹⁾ Dr. Ing. CESEFOR. Soria, España / Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

⁽²⁾ Ing Montes. CESEFOR. Soria, España

* Contacto: vanesa.bano@cesefor.com

Resumen

La normativa europea (EN) de madera estructural permite su clasificación según métodos visuales o métodos mecánicos. La clasificación visual establece las calidades de una especie, o combinación de especies, en función en su procedencia, con normas propias de cada país. Estas calidades se relacionan con sus correspondientes clases resistentes en la norma europea EN 1912. El equivalente a esta norma en la clasificación mecánica era, hasta el año 2016, la EN 14081-4, que establecía las clases resistentes para las distintas especies y procedencias en función de los parámetros “IP” medidos con diferentes equipos no destructivos homologados. Actualmente dicha norma está anulada por la EN 14081-1 (2016) y la homologación de cada equipo comercial no destructivo depende de los Informes de Clasificación Aprobados (AGR) que realiza el comité europeo de normalización CEN/TC 124. Dado que ya no existe una norma que relacione las clases resistentes con las técnicas de clasificación para las diferentes especies y procedencias, el presente trabajo presenta el estado del arte en la clasificación mecánica de acuerdo con la normativa europea, haciendo referencia a los diferentes equipos no destructivos, homologados para su uso según la norma EN 14081. Asimismo, se identifican algunas de las especies y procedencias clasificadas según las máquinas de clasificación homologadas.

Palabras-clave: *clasificación mecánica estructural, NDT, homologación, EN 14081*

Abstract

European standards (EN) propose two methods for grading structural timber: visual and machine grading. Visual grading establishes grades of one or several species depending on the provenance and using standards which are specific to each country. Mechanical properties of the visual grades are related to those of the strength classes according to EN 1912. Its corresponding standard for machine grading was, up to 2016, EN 14081-4. The strength classes were assigned to the species depending on the identification parameters (IP), measured using different homologated non-destructive equipment. Currently, this standard is derogated by EN 14081-1 (2016) and the homologation of the commercial equipment depends on the Approved Grading (AGR) emitted by the European Committee of Standardization CEN/TC124. Since there is not a standard which related the strength classes with the grading machines for different species and provenances, present work presents the state of the art in grading machine according to European standards and identify the homologated non-destructive equipment. In addition, some of the species and provenances graded according to the homologated machine are identified.

Keywords: *structural machine grade, NDT, homologation, EN 14081*



1. INTRODUCCIÓN

La normativa europea (EN) de madera estructural permite su clasificación según métodos visuales o mediante clasificación por máquina (AENOR, 2016a). La clasificación visual establece las calidades de una especie, o combinación de especies, en función en su procedencia a partir de normas propias de cada país. Las calidades visuales se asignan a sus correspondientes clases resistentes en la norma EN 1912 (AENOR, 2012b), cuyos valores característicos de sus propiedades físico-mecánicas se presentan en la norma EN 338 (AENOR, 2016b). A partir de estos resultados se elabora un informe que debe ser evaluado por el Cuerpo Técnico 124 del Comité Europeo de Normalización (CEN/TC124), y documentarse como Informes de Clasificación Aprobados (AGR). El objeto de los AGR es el de aportar la documentación necesaria para la certificación por un organismo certificado de control de la producción en fábrica (CPU) de un fabricante y poder obtener así el marcado CE, obligatorio en Europa para la comercialización y uso de madera estructural.

El equivalente a esta norma en la clasificación por máquina de la resistencia era, hasta el año 2016, la EN 14081-4 (CEN, 2009), que establecía las clases resistentes para las distintas especies y procedencias clasificadas mediante el sistema de máquina controlada. Actualmente dicha norma está anulada por la EN 14081-1 (2016) y la homologación de cada equipo comercial no destructivo depende de los Informes de Clasificación Aprobados (AGR) que realiza el comité europeo de normalización CEN/TC 124.

La clasificación mecánica puede realizarse conforme al sistema de “control de la producción” o de “máquina controlada”. En el sistema de “máquina controlada” la máquina de clasificación usa los ajustes publicados en la norma EN 14081-4 (CEN, 2009). Al igual que en la clasificación visual, es necesario realizar ensayos de rotura de las vigas para identificar los ajustes correctos para una especie o una procedencia definida. Así, el clasificador usa el equipo tal y como viene ajustado de fábrica y no puede modificar ningún ajuste. Para este tipo de operación es crucial que todas las máquinas de clasificación del mismo tipo operen con los mismos límites definidos. En el sistema de control de la producción, la salida del proceso de clasificación se verifica de manera continua. Es decir, diferentes máquinas del mismo tipo pueden dar diferentes resultados porque cada una es verificada de forma independiente y cada instalación tiene sus propios ajustes (Bacher, 2008).

El primero es más apropiado para máquinas ubicadas en aserraderos con un número limitado de tamaños, especies y calidades, controlando el sistema a partir del ensayo de probetas extraídas de la producción diaria. El método de “máquina controlada” se desarrolló posteriormente porque, debido a la gran variedad de tamaños, especies y calidades existentes a nivel internacional, no era posible realizar ensayos de control sobre las piezas extraídas de la producción. Este sistema depende de que las máquinas de clasificación estén ajustadas y controladas y desarrollando investigación para definir parámetros que sean constantes para todas las máquinas de un mismo tipo. El ajuste de las máquinas según este segundo sistema de clasificación se realiza de acuerdo con la norma EN 14081-2 (AENOR, 2015) y el CEN/TC124 evalúa las máquinas de clasificación y los ajustes aplicados.

Además, para ambos sistemas, el fabricante debe declarar la conformidad de la madera estructural clasificada por máquina según su resistencia mediante la determinación de las propiedades físico-mecánicas de la madera basada en ensayos iniciales de tipo (AENOR, 2015) y de control de la producción en fábrica (AENOR, 2012a).

Dado que ya no existe una norma que relacione las clases resistentes con las técnicas y las máquinas de clasificación para las diferentes especies y procedencias, el presente trabajo presenta un breve estado del arte en la clasificación mecánica de acuerdo con la normativa europea, presentando un listado de las máquinas de clasificación homologadas actualmente en el



mercado europeo para su uso según la norma EN 14081. Asimismo, se identifican algunas de las especies y procedencias clasificadas según estas máquinas homologadas.

2. METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN

Los siguientes apartados describen de manera muy resumida las distintas fases del proceso de caracterización de clasificación mecánica mediante el sistema de “máquina controlada”, resumido de forma gráfica en la Figura 1.

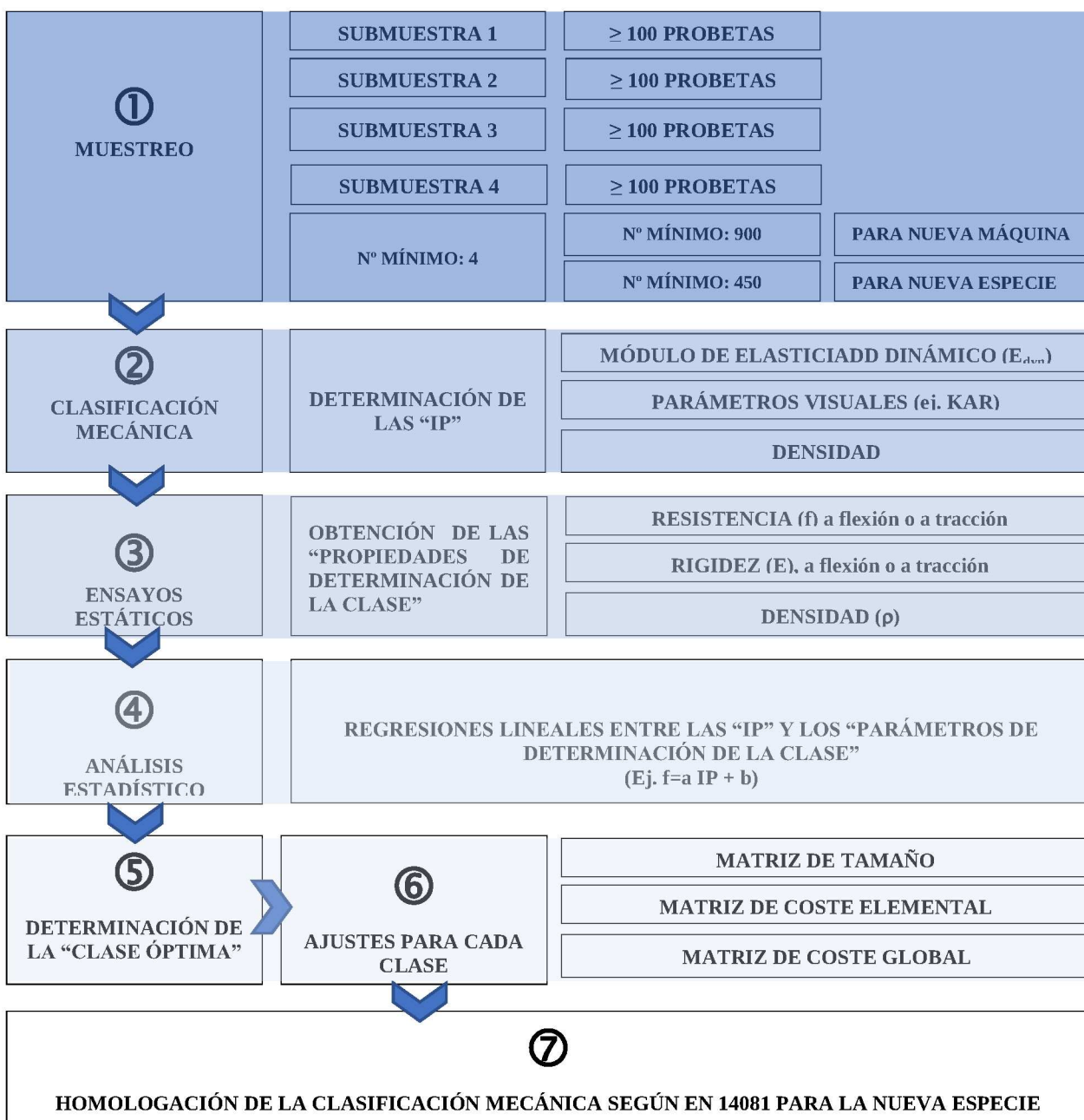
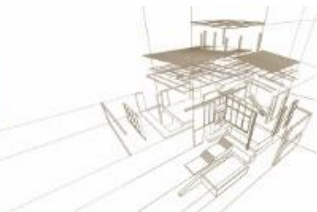


Figura 1: Esquema de las fases del proceso de clasificación mecánica



2.1. Muestreo

Con el fin de realizar los ajustes de un nuevo tipo de máquina y/o una nueva especie, combinación de especies o procedencias, la muestra debe estar formada por un mínimo de 4 submuestras y cada submuestra debe contener un mínimo de 100 piezas ensayadas. El número mínimo de piezas totales o probetas de ensayo en una muestra debe ser 900 cuando se quiere homologar una nueva máquina o 450 cuando se quieren calcular los ajustes correspondientes a nuevas especies en una máquina ya homologada para otras.

2.2. Clasificación mecánica y determinación de las “IP”

Dado que hay gran variedad de máquinas, técnicas y especies, el sistema de “máquina controlada” identifica los parámetros medidos con el nombre de “propiedad indicadora” (IP, del inglés *Indicator Properties*), que dependerá de la técnica que emplee cada máquina. La IP se corresponde con una propiedad o combinación de propiedades físico-mecánicas obtenidas en una máquina específica de clasificación. Las IP habitualmente medidas son el módulo de elasticidad dinámico, la densidad y el coeficiente de nudosidad (KAR), (Ranta-Maunus, Denzler, & Stapel, 2011). Se admite que las máquinas no midan la densidad. Si la densidad no es la propiedad que determina la clase, debe calcularse según las ecuaciones de la EN 384 (AENOR, 2016c). Dado que las máquinas de clasificación miden las IP de manera diferente (a veces usando un algoritmo conocido solo para la configuración del fabricante de la máquina) también la configuración es exclusiva de cada máquina. Así, la madera no se puede clasificar correctamente con la configuración de otra región, incluso si la especie es la misma (Ridley-Ellis, Stapel, & Baño, 2016).

2.3. Ensayos estáticos y “propiedades de determinación de la clase”

Una vez determinados los IP con las máquinas de clasificación, deben ensayarse estáticamente las probetas de la muestra con el fin de determinar los valores de resistencia, rigidez y densidad, de acuerdo con la norma EN 408 (AENOR, 2011). Habitualmente se determinan los valores de resistencia y módulo de elasticidad a flexión, aunque la tendencia es a obtener también los de tracción paralela a la fibra. Los valores característicos se calculan según la norma EN 384 (AENOR, 2016c) o la EN 14081 (AENOR, 2012a), según se trate de madera aserrada o laminada encolada, respectivamente.

2.4. Relación entre las “IP” y las “propiedades de determinación de la clase”

Las IP medidas con las máquinas de clasificación se relacionan mediante regresiones lineales con las propiedades de determinación de la clase. Se buscan todas las combinaciones posibles de regresiones lineales que relacionen los parámetros medidos con las máquinas de clasificación (E_{dyn} y/o KAR y/o densidad, normalmente) con las propiedades de determinación de la clase (resistencia a flexión o a tracción, módulo de elasticidad a flexión o tracción y densidad).

2.5. Determinación de la clase óptima y ajuste para cada clase

Las piezas se clasifican inicialmente según las “propiedades de determinación de la clase” en la mayor calidad posible, buscando la “calidad óptima”, y con un número mínimo de 20 piezas en cada clase asignada. La norma EN 14081-2 (AENOR, 2015) propone un procedimiento de asignación de la calidad óptima. A continuación, se clasifican las piezas según la “IP”, con el fin de determinar las “clases asignadas”, que debe contener también un número mínimo de 20 piezas por clase asignada. Con la muestra completa se elabora una “matriz de tamaño”, que indica el número de piezas en cada una de las clases óptimas y asignadas.



Es necesario demostrar que la máquina de clasificación es capaz de asignar correctamente una pieza a su clase resistente en base a las tres propiedades fundamentales (resistencia, rigidez y densidad). Por este motivo, la asignación de demasiadas piezas a un grado equivocado se evita calculando la “matriz de coste global” (Rouger, 1997). Esta se calcula mediante operaciones matemáticas entre cada celda de la matriz de tamaño y los valores propuestos por la norma en las celdas de la “matriz de coste elemental”, que aporta los coeficientes de ponderación que no fueron clasificadas correctamente permitiendo determinar si la clasificación es aceptable.

Así, la matriz de coste global relaciona la clase óptima con la asignada mediante la determinación de las IP. Para asegurarse que ninguna de las probetas clasificadas en la clase superior fue incorrectamente clasificada mediante las máquinas de clasificación los valores correspondientes a cada celda deben ser mayores que 0,2. Se debe hacer igualmente un análisis de las potenciales piezas incorrectamente clasificadas en la clase inferior.

2.6. Requisitos de control visual complementarios

Es necesario realizar un control visual de inspección para asegurarse que la resistencia no se ve reducida por “defectos” que no pueden ser automáticamente identificados por la máquina de clasificación (Ridley-Ellis, Stapel, & Baño, 2016).

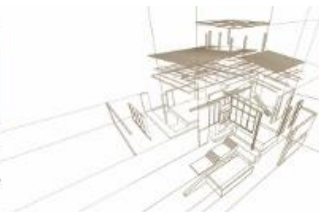
Cada pieza de madera clasificada mecánicamente debe estar conforme con unos requisitos de control de calidad visual complementarios. La norma EN 14081-1 (AENOR, 2016a) establece diferentes límites para la presencia de estas singularidades visuales en función de si se trata de madera de clases resistentes bajas (C18, D18, T11 e inferiores) o altas (superiores a las anteriores). Los límites admitidos para estas singularidades se presentan en de dicha norma, considerando madera de rechazo todas las piezas que tengan singularidades que superen esos límites.

2.7. Marcado

La madera estructural clasificada mecánicamente por su resistencia debe marcarse individualmente en cada una de las piezas, incluyendo la siguiente información: 1) identificación del fabricante; 2) símbolo “M” por tratarse de madera clasificada mecánicamente; 3) símbolo “DG” para madera clasificada en seco; 4) número de código que identifica el producto en la documentación de acompañamiento definida en la norma EN 14081-1 (AENOR, 2016a); y 5) valores de módulo de elasticidad medio, resistencias a flexión, tracción, compresión, esfuerzo cortante y densidad, o asignación de clase resistente.



Figura 2: Ejemplo de marcado de una clase resistente “C30” de la empresa INNODURA, Francia (www.innodura.fr)



3. MÁQUINAS DE CLASIFICACIÓN MECÁNICA POR RESISTENCIA HOMOLOGADAS SEGÚN EN 14081

Los fabricantes de máquinas de clasificación deben aportar información sobre el tipo de funcionamiento, el software usado para la clasificación y las condiciones ambientales de trabajo y los métodos de calibración, entre otras. Con respecto a la madera, deben especificar para qué especies está calibrada y homologada la máquina, con qué contenidos de humedad, qué asignación de clases resistentes para cada especie, así como la velocidad de clasificación y los límites de deformación de la madera (en las que realizan ensayos de flexión estática). Es decir, cada máquina se homologa para una determinada especie y procedencia (o grupo de especies) y para unas determinadas clases resistentes.

Según la técnica empleada, las máquinas de clasificación podrían agruparse en los siguientes grandes grupos: ensayos de flexión estática; rayos X; acústica por resonancia; acústica por ultrasonido; y escáner óptico, más sus combinaciones entre ellos.

La Tabla 1 recoge las máquinas de clasificación estática homologadas, así como las especies y procedencias identificadas en la norma EN 14081-4 (CEN, 2009), actualmente en derogada.

Tabla 1: Máquinas homologadas para clasificación mecánica según técnicas de flexión estática

TÉC.	M.	MÁQUINA	FABRICANTE	Especies y procedencias	Ref.
Flexión estática	Módulo de elasticidad a flexión	COOK-BOLINDER	Techmach Ltd., UK	<i>Picea abies</i> (UK, IRLANDA, ESTONIA, FINLANDIA, LATVIA, NORUEGA, RUSIA, SUECIA Y POLONIA); <i>Picea sitchensis</i> (UK, IRLANDA); <i>Pinus nigra</i> (UK, IRLANDA); <i>Pinus sylvestris</i> (UK, IRLANDA, FINLANDIA, NORUEGA, SUECIA, LETONIA, ESPAÑA); <i>Pinus radiata</i> (CHILE); <i>Pinus sylvestris</i> (FINLANDIA, NORUEGA, SUECIA, LETONIA); <i>Pinus nigra</i> (ESPAÑA)	(CEN, 2009)
		COMPUTERMATIC MICROMATIC	Process Control Ltd., UK www.mpcuk.co.uk	<i>Picea abies</i> (UK, IRLANDA, FINLANDIA, NORUEGA, SUECIA, ESTONIA, LETONIA, RUSIA Y POLONIA); <i>Picea sitchensis</i> (UK, IRLANDA, NORUEGA); <i>Pinus nigra</i> (UK, IRLANDA); <i>Pinus sylvestris</i> (UK, IRLANDA, FINLANDIA, NORUEGA, SUECIA, LETONIA); <i>Pinus radiata</i> (CHILE)	
		RAUTE TIMGRADER MACHINE	VTT, Finlandia	<i>Picea abies</i> (FINLANDIA, NORUEGA, SUECIA, ESTONIA, LETONIA, RUSIA Y POLONIA)	
		CRP	JRTINC www.jrtinc.com	ESPECIES EUROPEAS (sin definir)	

donde, TÉC. Es la técnica de medición utilizada, M. la propiedad que estima la máquina y Ref. la referencia bibliográfica



El listado de máquinas homologadas para clasificación mecánica según el resto de las técnicas fue obtenido del informe redactado por Ridley-Ellis (Ridley-Ellis, 2017). Las especies y países de procedencia clasificados según las diferentes máquinas que se listan en las Tablas 2, 3, 4, 5, 6 y 7 no pretende ser un listado exhaustivo de las especies y procedencias clasificadas por máquinas homologadas, sino simplemente mostrar una idea de sobre qué especies y con qué máquinas se ha trabajado en clasificación mecánica en los últimos años. La mayoría de las máquinas están diseñadas para la clasificación de la madera en la línea de producción, aunque hay algunas que disponen de equipos portátiles o manuales.

Tabla 2: Máquinas homologadas para clasificación mecánica según técnica de flexión acústica por resonancia longitudinal, sin densidad

TÉC.	M.	MÁQUINA	FABRICANTE	Especies y procedencias	Ref.
Acústica por resonancia longitudinal, sin densidad	Módulo de elasticidad dinámico	DYNAGRADE	DYNALYSE, Suecia www.dynalyse.com	<i>Picea abies</i> (FINLANDIA, NORUEGA, SUECIA, ESTONIA, LETONIA, RUSIA Y POLONIA); <i>Pinus sylvestris</i> (FINLANDIA, NORUEGA, SUECIA, LETONIA); <i>Picea sitchensis</i> (NORUEGA)	(CEN, 2009)
		VISCAN*	MICROTEC, Italia www.microtec.eu	<i>Picea abies</i> (ALEMANIA, AUSTRIA, REPÚBLICA CHECA, FINLANDIA, NORUEGA, SUECIA, ESTONIA, LETONIA, RUSIA Y POLONIA); <i>Abies alba</i> (ALEMANIA, AUSTRIA Y REPÚBLICA CHECA)	(CEN, 2009)
		MTG 920, 922, 926	BROOKHUIS, Holanda www.brookhuis.com	<i>Picea abies</i> y <i>Abies alba</i> (SUIZA, FRANCIA, POLONIA, RUMANÍA SUECIA, ESLOVENIA, ESLOVAQUIA, UCRANIA, ESTONIA); <i>Pinus sylvestris</i> (FINLANDIA, FRANCIA, POLONIA, RUSIA, SUECIA); <i>Pseudotsuga menziesii</i> (FRANCIA)	(Ranta-Maunus et al., 2011) (Auvergne_Promobois, 2012)
		Escan FWM/FW	WEINIG, Alemania www.weinig.com/en/solid-wood/scanner-systems/escan/escan.html	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (FRANCIA); <i>Picea excelsa</i> (FRANCIA)	(Roblot & Bléron, 2010)
		ROSEGRADE	ROSÉNS www.rosenia.se	<i>Picea abies</i> y <i>Abies alba</i> (SUIZA, FRANCIA, POLONIA, RUMANÍA SUECIA, ESLOVENIA, ESLOVAQUIA, UCRANIA) <i>Pinus sylvestris</i> (FINLANDIA, FRANCIA, POLONIA, RUSIA, SUECIA)	(Ranta-Maunus et al., 2011)
		STIG	ILKON www.ilkon.si	Slovenian spruce (ESLOVENIA)	

donde, TÉC. Es la técnica de medición utilizada, M. la propiedad que estima la máquina y Ref. la referencia bibliográfica



Los equipos mostrados en la Tabla 2 miden únicamente valores de frecuencia longitudinal de vibración. A partir de este valor se calcula el módulo de elasticidad dinámico, asumiendo un valor de densidad constante para cada especie y se definen las propiedades indicadoras obtenidas con cada máquina. A modo de ejemplo, Ranta-Maunus et al. (2011) definieron una única propiedad indicadora que relaciona la medida tomada con el equipo ROSEGRADE (Roséns) con la resistencia a flexión, mientras que definieron tres propiedades indicadoras en el equipo MTG (Brookhuis) para relacionar los parámetros medidos con las tres propiedades de determinación de la clase (resistencia, rigidez y densidad).

Tabla 3: Máquinas homologadas para clasificación mecánica según técnica de flexión acústica por resonancia longitudinal, con densidad

TÉC	M.	MÁQUINA	FABRICANTE	Especies y procedencias	Ref.
Acústica por resonancia longitudinal, con densidad	Módulo de elasticidad y densidad	MTG 960, 962, 966	BROOKHUIS, Holanda www.brookhuis.com	<i>Picea abies</i> (ALEMANIA, ITALIA, ESLOVENIA, AUSTRIA, FINLANDIA, NORUEGA, SUECIA, RUSIA, SUIZA, POLONIA, UCRANIA, RUMANÍA, ESLOVAQUIA, ESLOVENIA, FRANCIA, ESTONIA); <i>Pinus sylvestris</i> y <i>Picea abies</i> (SUIZA, SLOVENIA, POLONIA, UCRANIA, FINLANDIA, RUSIA, SUECIA, RUMANÍA, ESLOVAQUIA, FRANCIA); <i>Sitka spruce</i> y <i>Pseudotsuga menziesii</i> (FRANCIA); en proceso de evaluación: <i>Pinus radiata</i> , <i>Larix kaemferi</i> (ESPAÑA)	(CEN, 2009) (Auvergne_Promobois, 2012) (CESEFOR, 2019)
		ESCAN FWM/FW	WEINIG, Alemania www.weinig.com	<i>Picea abies</i> y <i>Abies alba</i> (SUIZA, FRANCIA, POLONIA, RUMANÍA, SUECIA, ESLOVENIA, ESLOVAQUIA, UCRANIA, ESTONIA); <i>Pinus sylvestris</i> (FINLANDIA, FRANCIA, POLONIA, RUSIA, SUECIA); <i>Sitka spruce</i> , <i>Pseudotsuga menziesii</i> (FRANCIA)	(Ranta-Maunus et al., 2011) (Auvergne_Promobois, 2012)
		*XYLOCLASS T	XYLOMECA, Francia www.xylomeca.fr	<i>Abies alba</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Sitka spruce</i> , <i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Pinus pinaster</i> (FRANCIA)	(Auvergne_Promobois, 2012)
		VISCAN PLUS, VISCAN COMPACT, VISCAN portable con balanza	MICROTEC, Italia www.microtec.eu	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (ALEMANIA); <i>Abies alba</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Sitka spruce</i> , <i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Pinus pinaster</i> (FRANCIA)	(Rais, Pretzsch, & Van De Kuilen, 2014) (Auvergne_Promobois, 2012)
		E-CONTROL, AC	INNODURA, Francia www.innodura.fr	<i>Abies alba</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Pseudotsuga menziesii</i> (FRANCIA)	www.xylomeca.fr
		ROSEGRADE PLUS	ROSÉNS www.rosenia.se	<i>Picea abies</i> y <i>Abies alba</i> (SUIZA, FRANCIA, POLONIA, RUMANÍA, SUECIA, ESLOVENIA, ESLOVAQUIA, UCRANIA); <i>Pinus sylvestris</i> (FINLANDIA, FRANCIA, POLONIA, RUSIA, SUECIA)	(Ranta-Maunus et al., 2011)

donde, TÉC. Es la técnica de medición utilizada, M. la propiedad que estima la máquina y Ref. la referencia bibliográfica

* Ya no se fabrica ni se comercializa



Tabla 4: Máquinas homologadas para clasificación mecánica según otras técnicas acústicas

TÉC.	M.	MÁQUINA	FABRICANTE	Especies y procedencias	Ref.
Frecuencia de onda transversal o de flexión	Módulo de elasticidad dinámico	NOESYS	SARL Esteves, Francia	<i>Picea abies</i> , <i>Abies alba</i> , <i>Pseudotsuga menziesii</i> (FRANCIA)	(Auvergne_Pro_mobois, 2012)
		*XYLOCLASS F	XYLOMECA, Francia www.xylomeca.fr		
Velocidad de onda de ultrasonido		TRIOMATIC	CBS-CBT, Francia www.cbs-cbt.com	<i>Picea abies</i> y <i>Abies alba</i> (SUIZA, FRANCIA, POLONIA, RUMANÍA, SUECIA, ESLOVENIA, ESLOVAQUIA, UCRANIA, ESTONIA); <i>Pinus sylvestris</i> (FINLANDIA, FRANCIA, POLONIA, RUSIA, SUECIA); <i>Pseudotsuga menziesii</i> (FRANCIA)	(Ranta-Maunus et al., 2011) (Jean-Luc & Yann, 2007) (Auvergne_Promobois, 2012)

donde, TÉC. Es la técnica de medición utilizada, M. la propiedad que estima la máquina y Ref. la referencia bibliográfica
* Ya no se fabrica ni se comercializa

Tabla 5: Máquinas homologadas para clasificación mecánica según la técnica de Rayos X

TÉC.	M.	MÁQUINA	FABRICANTE	Especies y procedencias	Ref.
Rayos X	Densidad, tamaño y posición de los nudos	EURO-GRECOMAT 702	MICROTEC, Italia www.microtec.eu		
		GOLDENEYE 702	MICROTEC, Italia www.microtec.eu	<i>Abies alba</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Sitka spruce</i> , <i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Pinus pinaster</i> (FRANCIA)	(Auvergne_Pro_mobois, 2012)
		LUXSCAN optistrength X	WEINIG, Alemania www.weinig.com		

donde, TÉC. Es la técnica de medición utilizada, M. la propiedad que estima la máquina y Ref. la referencia bibliográfica

Tabla 6: Máquinas homologadas para clasificación mecánica mediante escáner óptico

TÉC.	M.	MÁQUINA	FABRICANTE	Especies y procedencias	Ref.
Escáner óptico	Nudos, desvío de fibra y otras características visuales	RS Board Scanner Q	REMASAWCO, Suecia www.remasawco.se		
		BOARDMASTER	FINSCAN, Finlandia www.finscan.fi	*más de 20 especies de más de 20 países	www.finscan.fi

donde, TÉC. Es la técnica de medición utilizada, M. la propiedad que estima la máquina y Ref. la referencia bibliográfica
* No todas las especies ni procedencias están clasificadas desde el punto de vista estructural. El equipo está presente, además de en la mayoría de los países de Europa, en EEUU, Canadá, Chile y Uruguay. No se encuentra presente en España ni en Portugal

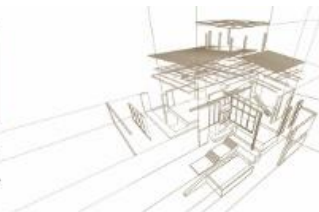


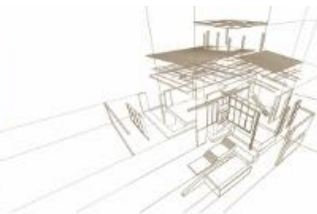
Tabla 7: Máquinas homologadas para clasificación mecánica según técnicas combinadas

TÉCNICA	MED.	MÁQUINA	FABRICANTE	Especies y procedencias	Ref.
Rayos X + flexión estática	Densidad, tamaño y posición de los nudos y módulo de elasticidad estático	EUROGRECOMAT 704	MICROTEC, Italia www.microtec.eu		
Rayos X + acústica por resonancia longitudinal	Densidad, tamaño y posición de los nudos y módulo de elasticidad dinámico	EURO GRECOMAT 706	MICROTEC, Italia www.microtec.eu	<i>Picea abies</i> y <i>Abies alba</i> (SUIZA, FRANCIA, POLONIA, RUMANÍA SUECIA, ESLOVENIA, ESLOVAQUIA, UCRANIA); <i>Pinus sylvestris</i> (FINLANDIA, FRANCIA, POLONIA, RUSIA, SUECIA); <i>Sitka spruce</i> , <i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Pinus pinaster</i> (FRANCIA)	(Ranta-Maunus et al., 2011) (Auvergne_Promobois, 2012)
		GOLDEN EYE 706 (con VISCAN)			
		LUXSCAN optistrength XE			
Escáner óptico+ acústica por resonancia longitudinal	Densidad, tamaño y posición de los nudos y módulo de elasticidad dinámico	PRECIGRADER	DYNALYSE, Suecia www.dynalyse.com	<i>Abies alba</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Sitka spruce</i> , <i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Pinus pinaster</i> (FRANCIA)	(Auvergne_Promobois, 2012)
		GRADEMASTER	WEINIG, Alemania www.weinig.com		
Acústica por frecuencia longitudinal + medición de traqueidas	Densidad, desvío de fibra y módulo de elasticidad dinámico	WOODEYE	WOODEYE, Suecia www.woodeye.com		

donde, TÉC. Es la técnica de medición utilizada, M. la propiedad que estima la máquina y Ref. la referencia bibliográfica

4. CONCLUSIONES

Se identificaron un total de 31 máquinas de clasificación mecánica homologadas según EN 14081 y se listó una serie de especies y procedencias para las cuales dichas máquinas han hecho sus ajustes y pueden comercializar con marcado CE.



AGRADECIMIENTOS

Proyecto financiado por ICE-Junta de Castilla y León en la convocatoria “Proyectos de I+D aplicada realizados por Centros Tecnológicos”

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AENOR. (2011). UNE EN 408: 2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.

AENOR. (2012a). UNE EN 14081-3:2012. Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 3: Clasificación mecánica. Requisitos complementarios para el control de la producción en fábrica.

AENOR. (2012b). UNE EN 1912. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.

AENOR. (2015). EN 14081-2:2010+A1:2015. Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 2: Clasificación mecánica. Requisitos complementarios para el ensayo inicial de tipo.

AENOR. (2016a). EN 14081-1:2016. Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. Parte 1: Requisitos generales.

AENOR. (2016b). EN 338. Madera estructural. Clases resistentes.

AENOR. (2016c). UNE EN 384. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.

Auvergne_Promobois. (2012). *État de lieux des machines homologuées par le classement mécanique des bois de structure*. France.

Bacher, M. (2008). Comparison of different machine strength grading principles (pp. 29–30).

CEN. (2009). EN 14081-4. Timber structures. Strength grades structural timber with rectangular cross section. Part 4. Machine grading. Grading machine settings for machine controlled systems.

CESEFOR. (2019). *Caracterización mecánica de las especies Pinus radiata y Larix kaemferi*
F., R. (1997). A new statistical method for establishment of machine settings. In *International Council for Research and Innovation in Building Construction*. Vancouver Canada.

Jean-Luc, S., & Yann, B. (2007). Timber grading machine using multivariate parameters based on ultrasonic and density measurement. *Presentado En COST E*, 53(October), 167–173.

Rais, A., Pretzsch, H., & Van De Kuilen, J. W. G. (2014). Roundwood pre-grading with longitudinal acoustic waves for production of structural boards. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(1). <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0757-5>

Ranta-Maunus, A., Denzler, J. K., & Stapel, P. (2011). *Strength of European timber. Part 2. Properties of spruce and pine tested in Gradewood project*.

Ridley-Ellis, D. (2017). *Grading machine and their speeds*. Edimburgh.

Ridley-Ellis, D., Stapel, P., & Bañero, V. (2016). Strength grading of sawn timber in Europe: an explanation for engineers and researchers. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3). <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1034-1>

Roblot, G., & Bléron, L. (2010). Automatic computation of the knot area ratio for machine strength grading of Douglas-fir and Spruce timber, (December). <https://doi.org/10.3166/EJECE.14.1317-1332>



ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO (FLEXIÓN) EN VIGAS DE MADERA REUTILIZADA UNIDAS CON PINO RADIATA

STUDY OF THE MECHANICAL BEHAVIOUR (FLEXION) IN REUSED BEAMS BONDED WITH RADIATA PINE (PINUS RADIATA) FOR STRUCTURAL USE

Guzmán, Andrés (1) *; Lozano, Jorge (2)

(1) Magister en Construcción Arquitecto. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

(2) Magister en Construcción Arquitecto. Facultad de Artes, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia
Instituto de Investigaciones Tecnológicas, Grupo de Investigación Madera y Guadua. Bogotá, Colombia

* Contacto: anfguzmango@unal.edu.co

Resumen

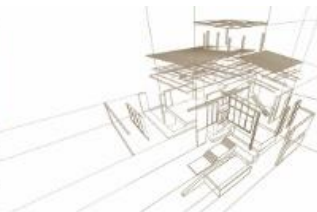
Esta investigación abordó la reutilización de diferentes tipos de madera de salvamento, que podemos encontrar en las edificaciones que se demuelen o que son desmontadas para hacer parte fundamental de nuevos elementos estructurales (Vigas). Estos elementos están unidos con Pino Radiata (*Pinus Radiata*) y ensamblados utilizando el adhesivo Melanina Urea Formaldehído (MUF - 1242) del sistema de laminado pegado estructural (MLPE), donde por medio del ensayo normalizado a flexión (ASTM D198 – NTC 5279), se realizaron las pruebas en prototipos de 3 metros de longitud, comprobando el comportamiento estructural de los ensambles IPE propuestos. Además, durante estos ensayos se probaron los requisitos de máxima deformación admisible de la norma sismo resistente colombiana (NSR-10), detectando que entre menos piezas en el alma se utilicen es mayor la resistencia del sistema. Se evidenció también una falla frágil al finalizar los ensayos debido a la ruptura de las fibras del patín inferior de Pino Radiata, por el esfuerzo de tracción inducido por la carga, similar a elementos de madera de una sola pieza. Adicionalmente se obtuvieron valores MOE_g y MOE_a que están dentro del nivel ES1 de la tabla de maderas estructurales de la NSR-10, avalando el posible uso de estos elementos en sistemas constructivos, lo que amplía las opciones para construir edificaciones de bajo costo y contribuye a continuar el ciclo de vida de estos materiales reutilizados, para que hagan parte importante en la cadena de valor de la industria, el medio ambiente y la sociedad.

Palabras-clave: adhesivo, vigas, estructura, madera, pino, reutilización, deconstrucción.

Abstract

This research addressed the reuse of different types of salvage wood, which we can find in buildings that are demolished or that are dismantled to become a fundamental part of new structural elements (Beams). These elements are joined with Pine Radiate (*Pinus Radiata*) and assembled using the Melanin Urea Formaldehyde adhesive (MUF - 1242) of the structural glulam system (GLULAM), where by means of the standardized bending test (ASTM D198 – NTC 5279), it is conducted tests on prototypes of 3 meters in length, checking the structural behavior of the proposed IPE assemblies. In addition, during these tests the requirements of maximum permissible deformation of the Colombian Resistant Earthquake Standard (NSR-10) were tested, detecting that the fewer parts in the web are used, the resistance of the system is more. A fragile failure was also evident at the end of the tests due to the rupture of the lower flange fibers of Pine Radiate, due to the tensile effort induced by the load, similar to wooden elements in one piece. In addition, MOE_g and MOE_a values were obtained that are within the ES1 level of the NSR-10 structural timber table, endorsing the possible use of these elements in construction systems, which expands the options for building low-cost buildings and helps to continue the life cycle of these reused materials, so that they are an important part of the value chain of industry, the environment and society.

Keywords: adhesive, beams, structure, wood, pine, reuse, deconstruction.



1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día las respuestas al déficit de vivienda, al cambio climático y a la inestabilidad del sector de la construcción en Colombia, nos obliga a buscar nuevos elementos estructurales de bajo costo que estén alineados en dar respuesta de manera eficiente a cada una de esas problemáticas, buscando en el ciclo de vida de las edificaciones y de los materiales que las componen, cuáles elementos pueden ser reutilizados, unidos y puestos nuevamente en uso que sean económicos, estéticos y técnicamente viables.

Por esto, durante el desmonte y cambio de la cubierta del edificio 238 (Posgrados de ciencias económicas) de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, se planteó la idea de reciclar estas vigas de madera que han estado protegidas de las diferentes condiciones medio ambientales, ser reutilizadas y unidas con elementos nuevos de Pino Radiata (*Pinus Radiata*), ensamblados por medio del adhesivo Melamina Urea Formaldehído (MUF), el cual es ampliamente utilizado en los sistemas de Madera Laminada de Pegada Estructural (MLPE), buscando prototipos de 3 metros de longitud que sean evaluados mediante el ensayo normalizado a flexión (ASTM D198 – NTC 5279), comprobando su correcto armado, encolado y luego obtener los valores de resistencia que permita avalar su uso según la NSR-10 y además ser comparadas con respecto a las resistencias que posee el Pino Radiata.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron 3 materias primas en la elaboración de las vigas: láminas, elementos de unión y bloques de pino radiata (*Pinus radiata*) importado de Chile, maderas de salvamento de diferentes especies y el adhesivo Melamina Urea Formaldehido (MUF-1242) con su respectivo catalizador, HARDENER 2542. Adicionalmente fue necesario realizar procesos de Maquinado para obtener las piezas antes mencionadas y así poder generar los insumos para los 6 tipos de ensambles evaluados mediante el ensayo normalizado a flexión (ASTM D198 – NTC 5279).

2.1. Acopio del Material

La selección de las láminas, elementos de unión y bloques de pino radiata, se realizó evaluando criterios de rendimiento, disponibilidad comercial y variedad, por consiguiente, se decidió trabajar con tablas cepilladas de 35mm de espesor, 190mm de ancho, 3962mm de longitud (Referencia comercial, 1½”x8”x3962mm) para obtener los elementos de unión y los bloques; adicionalmente se trabajó con tablas cepilladas de 19mm de espesor, 230mm de ancho, 3200mm de longitud (Referencia Comercial, 1” x 10” x 3200mm) para obtener las láminas de pino de 10mm de espesor, 70mm de ancho y 3000mm de longitud para elaborar las vigas.

En caso de las maderas de salvamento, se utilizaron las tablas de 45mm de espesor, 200mm de ancho, 3000mm y 4000mm de longitud, que se recibieron del cambio de la cubierta del edificio 238 (Posgrados de ciencias económicas) de la Universidad Nacional de Colombia, con las cuales se obtuvieron los elementos para el alma de las vigas de 35mm de espesor, 160mm de ancho y de varias longitudes (200mm, 650mm, 867mm, 1300mm, 2600mm) según el ensamble propuesto.



2.1.1. Caracterización Visual y Macroscópica del Material

Para el desarrollo de la investigación es necesario caracterizar los elementos reciclados ya que se desconoce el origen del material, las condiciones a las cuales estuvo expuesto y las diferentes afectaciones de coleópteros. Por esto fue necesario realizar un formato basado en la tabla G.1.3-1 (Tolerancia de la madera aserrada de uso estructural) del título G Estructuras de madera y estructuras de guadua (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica 2010), y en las consideraciones que están contempladas en la NTC 2500 (Uso de la madera en la construcción) (ICONTEC 1997), los cuales nos indican cómo realizar la clasificación visual de las maderas que pueden ser utilizadas estructuralmente y determinar por medio de la misma las que no cumplen los parámetros mínimos. Asimismo, se recopilieron pequeñas muestras de cada uno de los elementos para obtener mayor información sobre las propiedades físicas y mecánicas de las posibles especies y para ello se utilizó el microscopio donde se hallaron especies como Cuangaré, Platanote, Laurel, Sangretoro, Eucalipto, Comino, Amarillo y Perillo (Junta del Acuerdo de Cartagena 1982). Toda la información recopilada se consignó en un formato diseñado para la caracterización macroscópica de los elementos a utilizar.

The image shows two forms from the 'ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO FLEXIÓN EN VIGAS DE MADERA REUTILIZADA UNIDAS CON PINO RADIATA (PINUS RADIATA) PARA USO ESTRUCTURAL'. The left form is for visual characterization, including fields for author, date, and classification, and a table for recording defects like 'ALABOS', 'MARRONES', and 'MADREAS'. The right form is for macroscopic characterization, including fields for species, origin, and a table for recording 'CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS' with corresponding photographs.

Figura 1: Formato Caracterización Visual y Formato Caracterización macroscópica

2.2. Determinación de los Tipos de Ensamblajes y Dimensiones de las Vigas

Para determinar los tipos de ensamble de los diferentes prototipos, se inició con 2 elementos de 2.600 mm y se fue dividiendo en rangos de $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$ y $\frac{1}{4}$ de la longitud total hasta conseguir la subdivisión mínima que permitiera generar ensambles fáciles de realizar y ejecutar 2 ensayos por cada uno, para 12 ensayos en total. En los 400 mm faltantes, la solución fue incorporar piezas de Pino Radiata con dimensiones de los elementos del alma con el fin de completar los 3 metros del elemento para cumplir con lo que dicta el ensayo normalizado a flexión ASTM D-146.





NOMENCLATURA	# PIEZAS EN EL ALMA	ESQUEMA GRÁFICO
S1A - S1B	1 Pieza	
S2A - S2B	2 Piezas	
S3A - S3B	3 Piezas	
S4A - S4B	4 Piezas	
S5A - S5B	3 Piezas	
S6A - S6B	3 Piezas	

Figura 2: Tipos de ensambles y despiece gráfico



2.3. Maquinado de las Piezas

Para la fabricación de las piezas de madera reciclada que se ubican en el alma de las vigas IPE, el proceso se inició con la extracción manual de los clavos, puntillas, accesorios metálicos y demás elementos que estaban embebidos en las piezas, luego se retiraron las diferentes afectaciones de agentes medio ambientales que se detectaron en la caracterización visual de los elementos, a continuación se aplanaron 2 caras de las piezas con la planeadora eléctrica, se procedió a pasar la cara faltante por el cepillo eléctrico hasta alcanzar los 35mm de espesor y para finalizar se procedió a retirar, por medio de la sierra de banco plano, la cara faltante para terminar de definir las 4 caras de la pieza y así tener los insumos para continuar con el ensamble de las vigas; este procedimiento se realiza para dejar los 160mm de ancho que se requieren para el alma del elemento.

Para la Fabricación de los patines de Pino Radiata en las vigas IPE, el proceso se inició con el corte con la sierra de banco plano de las láminas de Pino Radiata (*Pinus Radiata*) de dimensiones 19mm de espesor y 70mm de ancho, en acto seguido se sometieron a un cepillado por ambas caras para obtener elementos de 10mm de espesor, 70mm de ancho, con el fin de dejar el material dimensionado para aplicación del adhesivo, asegurando un buen encolado. Se continuó con la fabricación de los bloques, utilizando la sierra de banco plano, luego se pasaron por la planeadora, por el cepillo eléctrico y se finalizó con el corte de los elementos de 35mm de espesor, 160mm de alto y 200 mm de longitud con la sierra Tronzadora. Finalmente, para la elaboración de los elementos de unión, se utilizó la sierra Tronzadora para dimensionar las tablas en piezas de 19mm de espesor, 160mm de ancho y 50mm de longitud que se anclaron con grapas industriales al alma de los prototipos.

2.4. Ensamble de las Vigas

Para realizar el ensamble de las vigas según el tipo de disposición de las piezas del elemento, se inició por la nomenclatura de las partes según diversas condiciones; el tipo de madera, el tipo de ensamble y los puntos en las vigas donde se va a ejercer la carga. Se procedió a la ubicación definitiva de las piezas y fueron ancladas utilizando piezas de pino radiata y el uso de grapas metálicas industriales, dichos elementos solo se utilizaron para el ensamble de la viga y no están diseñados para transferir cargas, esto es realizado por ambas caras de la viga buscando una rigidez óptima para el traslado durante el proceso de encolado. Este proceso se realizó manualmente para garantizar la aplicación uniforme a lo largo del elemento, utilizando la proporción 100:15 partes por peso de las sustancias MUF y HARDENER según la ficha técnica y es la misma que se tuvo como referencia en un trabajo de investigación acerca de laminados de teca (Barreto 2013). Finalmente se inició el proceso de Prensado que para estos elementos se realizó con presión continua de 2.5kg/cm² por 10 horas (Quevedo 2000; Aenor 2005), que al finalizar fue necesario dejar durante 6 días las vigas en el curado del adhesivo para evitar reducir la resistencia de la línea de cola con cualquier afectación externa.



Figura 3: Producto terminado (Viga S3A)

2.5. Determinación del Modelo de Ensayo

Para realizar el estudio pertinente del comportamiento a flexión de estas vigas de sección y materiales compuestos se decidió realizar el ensayo ASTM D198 equivalente a la NTC 5279 para conocer y analizar los resultados en cuanto a la resistencia, MOE, MOR, $cortante_{max}$, $cortante_{lp}$, $momento_{max}$, $momento_{lp}$, inercia, ductilidad y el esfuerzo de la fibra en el límite proporcional (tracción y compresión).

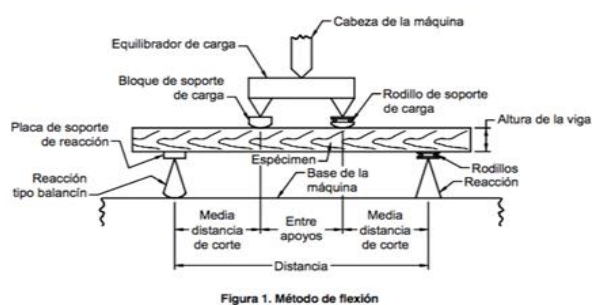


Figura 4: Esquema y Montaje Modelo de Ensayo ASTM D198-NTC 5279 (ICONTEC 2004)

Antes de iniciar los ensayos, cada una de las vigas debió ser sometida a la toma del contenido de humedad de cada pieza que conforma el elemento, la marcación de los lugares donde se apoyará la viga y de los tercios donde se efectuarán la aplicación de las cargas y el correcto montaje según el diagrama de la NTC 5279 (ICONTEC 2004), se determinó que la luz entre los apoyos corresponde a 2820 mm dejando libre 90 mm en cada extremo.

3. RESULTADOS

Los ensayos fueron realizados hasta el punto de ruptura del elemento, se evidenció que la falla es frágil y fue iniciada por el desplazamiento de los bloques como parte de la reacción natural del elemento, causando que el patín inferior recibiera además del esfuerzo a tracción de las fibras, el cortante transversal que fisuró el elemento de unión y continuó hasta romper las fibras del patín superior donde en algunos elementos se evidenció un desprendimiento del material por la línea de cola sin afectar los elementos internos de madera reciclable.

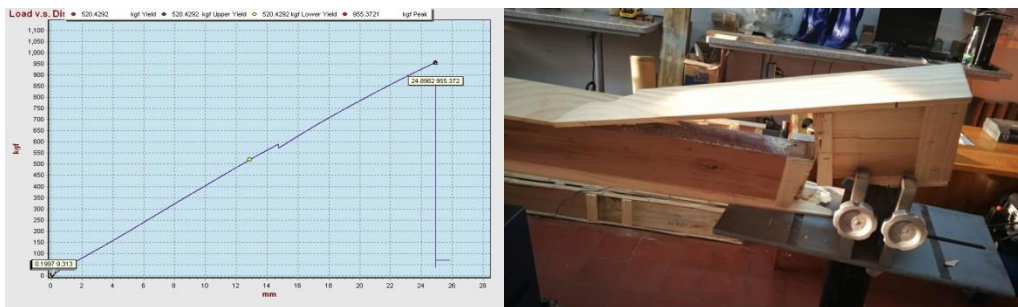


Figura 5: Gráfica del ensayo y evidencia fotográfica de la falla frágil

Como resultado de los ensayos se obtuvo información gráfica y numérica necesaria para hallar los distintos valores de cortante, momento, deflexión e inercia de la sección transformada, todos ellos son la base fundamental para hallar los valores de esfuerzo de la fibra en el límite proporcional, módulo de ruptura y módulo elástico con el fin de poder comparar los resultados con los valores de diseño asumidos por parte de la NSR-10 para el Pino Radiata.

Algo importante que se realizó en el desarrollo de la investigación fue la modelación de los diferentes ensambles en SAP2000, debido a que las piezas son de especies recicladas y en ocasiones no se encuentran caracterizadas ni forman un elemento homogéneo, se realizó un modelo de elementos finitos en donde se calculó el MOE del alma de la viga, partiendo de la carga en el límite proporcional e iterando el MOE hasta encontrar los 8mm de deformación.

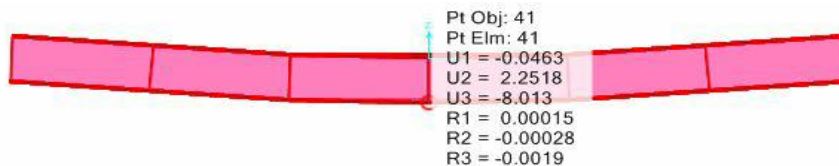
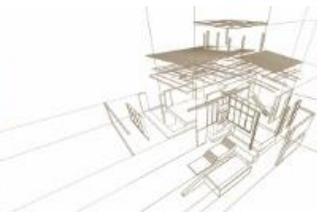


Figura 6: Cálculo de la deflexión y MOE por medio de elementos finitos

Con estos valores se realizó el cálculo del coeficiente n para afectar el ancho de las piezas de madera reciclada y así hallar la inercia de cada pieza interna, las cuales se sumaron para establecer el valor definitivo de la inercia de cada elemento ensayado, adicionalmente se calcularon los valores en las piezas de Pino Radiata.

Tabla 1: Fórmulas de Inercia utilizadas para madera reciclada y pino radiata

Tipo de Pieza	Fórmula	donde:
I (Pino Radiata)	$I_{ST} = \frac{b_{PR} * h_{PR}^3}{12} + 3A_1 * 2a^2$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ b_{PR}= Ancho pieza de pino ▪ h_{PR}= Alto pieza de pino ▪ A= Área de la pieza ▪ a= centro geométrico al eje neutro ▪ b_A= Ancho pieza del alma ▪ h_A= Alto pieza del alma
I (Madera Reciclada)	$I_{ST} = \frac{b_A * h_A^3}{12}$	



3.1. Cálculo del Esfuerzo de la Fibra en el Límite Proporcional (Compresión y Tensión)

Para determinar el valor característico del esfuerzo de la fibra en el límite proporcional se utilizó la ecuación:

$$S_f = \frac{m_{lp} * c}{\sum I_{ST}} \quad (1)$$

donde:

- m_{lp} = Momento en el límite proporcional,
- c = Distancia del eje neutro a la fibra más alejada,
- $\sum I_{ST}$ = Inercia de la viga.

Al realizar cada uno de los cálculos podemos denotar que tenemos un promedio de 28.52 MPa, donde la desviación estándar es baja debido a que los valores no tienen una alta dispersión, se encuentra que el valor mínimo aceptable y el máximo aceptable son 16.59 MPa y 40.45 MPa respectivamente. Y al contrastar estos valores con los del resultado encontramos que no hay ningún dato atípico y concluimos que el coeficiente de variación esté en 20.61%, lo que nos lleva a determinar que el valor característico tanto para tensión como para compresión es 16.27 MPa.

3.2. Cálculo del Módulo de Ruptura (Compresión y Tensión)

Para determinar el valor característico del módulo de ruptura se utilizó la ecuación:

$$S_R = \frac{m * c}{\sum I_{ST}} \quad (2)$$

donde:

- m = Momento en la carga máxima,
- c = Distancia del eje neutro a la fibra más alejada,
- $\sum I_{ST}$ = Inercia de la viga.

Se evidenció que en algunos casos el esfuerzo de la fibra en el límite proporcional es el mismo que el módulo de ruptura del elemento ya que al tener una falla frágil, el comportamiento del esfuerzo Vs. deformación es lineal y no cambia su estado; en algunos prototipos se presentó inicialmente un desprendimiento de la línea de cola generando un desplazamiento de las piezas internas permitiendo una deformación mayor, un corto estado inelástico y por ende una resistencia mayor hasta su falla. Se evidenció que el esfuerzo último promedio es 29.59 MPa, el valor mínimo aceptable y el máximo aceptable son 18.59 MPa y 40.58 MPa respectivamente, y al contrastar estos valores con los del resultado encontramos que el coeficiente de variación está en 18.31%, permitiendo deducir que el valor característico de estas vigas es 18.68 MPa, mayor que el esfuerzo de la fibra en el límite proporcional.

3.3. Cálculo del Módulo Elástico

Como fin último de esta investigación es calcular el Módulo Elástico del elemento para poder así saber en qué grupo de madera estructural selecta puede llegar a entrar y si sus valores están por encima del valor de diseño asumido; para esto utilizamos la ecuación del método analítico:



$$MOE_A = \frac{P a}{24 I \Delta} * 3L^2 - 2a^2 \quad (3)$$

donde:

- P= Carga en el límite proporcional,
- a= Distancia entre el apoyo y el tercio de la viga,
- Δ= Deformación en el límite proporcional,
- L= Luz entre apoyos.

Encontramos que el esfuerzo ultimo promedio que es 27,256.87 MPa, el valor mínimo aceptable y el máximo aceptable son 22,841.34 y 31,672.40 respectivamente y al contrastar estos valores con los del resultado encontramos que el coeficiente de variación está en 7.98% para concluir que el valor característico de los elementos, según el método analítico es 22,704.81 MPa, reflejando que la resistencia de estos elementos compuestos están sobre los valores de diseño asumidos para las maderas estructurales selectas ES1, el cual es 18,000 MPa (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica 2010)

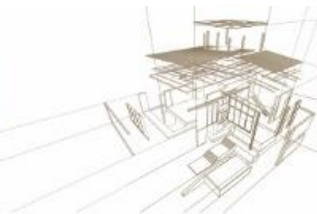
3.4. Comparación de Resultados Frente al Pino Radiata (*Pinus Radiata*)

Para realizar la comparación entre los resultados obtenidos se tomaron los que se obtuvieron en el esfuerzo de la fibra en el límite proporcional (Sf_t) y en el módulo de elasticidad analítico (MOE_A)

Tabla 2: Comparación entre los datos obtenidos y los del pino radiata

Investigación Actual			Pino Radiata		
Ensayo	Formula	Resultado	Ensayo	Formula	Resultado
Sf_t (Tensión)	$Sf = \frac{m_{lp} * c}{\sum I_{ST}}$	16.27 MPa	Sf_t (Tensión)	$Sf = \frac{m_{lp} * c}{\sum I_{ST}}$	13.20 MPa
Sf_C (Compresión)	$Sf = \frac{m_{lp} * c}{\sum I_{ST}}$	16.27 MPa	Sf_C (Compresión)	$Sf = \frac{m_{lp} * c}{\sum I_{ST}}$	7.9 MPa
SR_T (Tensión)	$S_R = \frac{m * c}{\sum I_{ST}}$	18.68 MPa	SR_T (Tensión)	$S_R = \frac{m * c}{\sum I_{ST}}$	7.5 MPa
SR_C (Compresión)	$S_R = \frac{m * c}{\sum I_{ST}}$	18.68 MPa	SR_C (Compresión)	$S_R = \frac{m * c}{\sum I_{ST}}$	7.5 MPa
MOE_A	$\frac{P a}{24 I \Delta} * 3L^2 - 2a^2$	22704 MPa	MOE_A	$\frac{P a}{24 I \Delta} * 3L^2 - 2a^2$	11000 MPa

En esta tabla podemos apreciar que el valor característico del esfuerzo máximo de la fibra en el límite proporcional a tensión (Sf_T) y a compresión (Sf_C) de nuestro elemento compuesto es 16.27 MPa y según la NSR-10, el valor característico del pino radiata para Sf_T está en 13.20 MPa y para Sf_C es de 7.9 MPa, asimismo se observa que los valores característicos del módulo de ruptura a tensión (SR_T) y a compresión (SR_C) del



elemento compuesto es de 18.68 MPa, y según la NSR-10, el valor característico del Pino Radiata es de 7.5 MPa, esto indica que la resistencia es mayor en el elemento compuesto principalmente debido a que las piezas están unidas por medio del adhesivo, en donde la línea de cola nos proporciona más resistencia durante la prueba a flexión. Adicionalmente se evidenció que el valor característico MOE_A es 22.704 MPa y según la NSR-10 el valor característico del Pino Radiata está en 11.000 MPa, con este sistema propuesto se aumenta el MOE de los elementos, por lo tanto, tienen mayor rigidez y bajo la misma condición de esfuerzos se deforma menos.

4. CONCLUSIONES

Al realizar la comparación de los datos promedio del MOE_A de las vigas ensayadas, se evidenció una variación de 3000 MPa aproximadamente, lo cual nos permite observar que los valores de diseño asumidos a pesar de la reducción del valor característico en el método analítico, continúan dentro de los valores de diseño asumidos de las maderas estructurales selectas ES1. Por esto confirmamos que utilizando una madera del grupo de madera selecta ES6 en un sistema compuesto como el propuesto para esta investigación, se puede obtener una mejora sustancial en la resistencia del material.

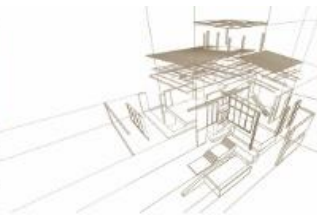
Al término de los experimentos se observó que entre menos piezas sean utilizadas en el alma, mayor es la resistencia del elemento, por esto el ensamble más adecuado se obtiene con solo 2 uniones (S1A y S1B), debido a que los datos analizados tienen menor dispersión y más fiables entre los prototipos, y la configuración menos adecuada se obtiene con cinco uniones (S4A y S4B), por la alta dispersión entre los datos obtenidos en los ensayos entre los prototipos y sus bajas resistencias.

La falla principal de los elementos fue la ruptura de las fibras del patín inferior de Pino Radiata, debido al esfuerzo de tracción inducido por la carga y por la resistencia del adhesivo. Las fallas fueron frágiles y fueron focalizadas tanto en el centro de la luz, como en los tercios inferiores de la viga y en todos los casos se indujo un cortante transversal que afectó a los elementos de unión.

En algunos casos se presentó un desprendimiento por la línea de cola en donde el adhesivo no fue aplicado uniformemente. Es necesario mejorar el control de calidad para el maquinado y el encolado, ya que esto reduce la resistencia del elemento compuesto. Adicionalmente se ve afectada por que las piezas internas de las vigas al ser independientes se desplazan por la carga ejercida que induce un esfuerzo de corte en la línea de cola y en las láminas de Pino Radiata.

Se evidenció que ninguna de las piezas internas realizadas con maderas recicladas, sufrieron algún daño físico o químico en cada uno de los ensambles propuestos, lo cual nos permitirá reutilizar estas maderas para que hagan parte de otros elementos estructurales después de un proceso de maquinado para retirar el adhesivo, las grapas metálicas y las láminas de Pino Radiata.

Se puede concluir de manera general que estos elementos pueden ser utilizados en edificaciones con sistemas estructurales en madera, donde el proceso industrial para su fabricación no necesita de máquinas de última tecnología y la versatilidad con la que pueden ser producidas, permiten que sean realizadas de forma eficiente por cualquier



persona con conocimientos básicos de estructuras, con el fin de responder en caso de eventos catastróficos o resolver las necesidades básicas de vivienda para cualquier persona.

AGRADECIMIENTOS

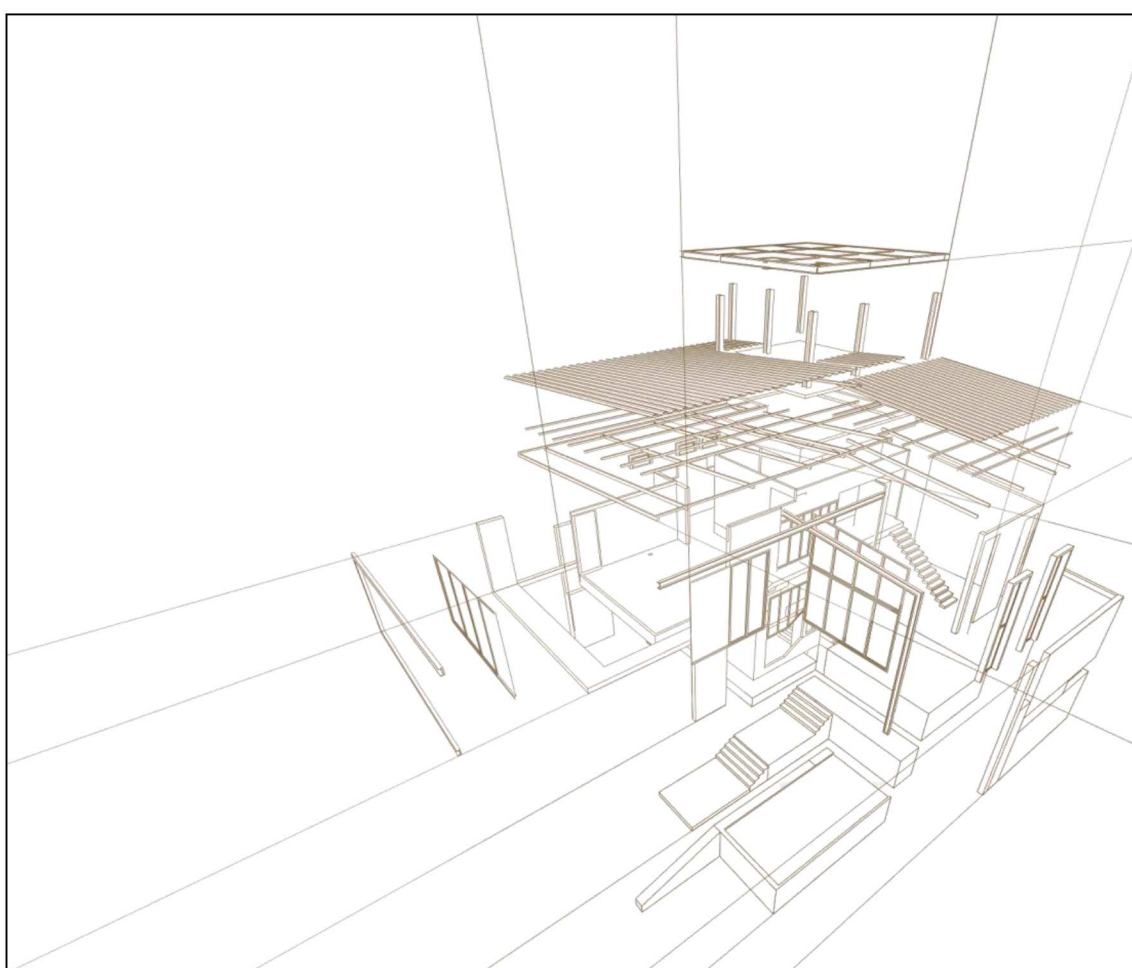
El autor expresa su total agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia, al Grupo de Investigación Madera y Guadua (GIMG) por permitir utilizar las instalaciones necesarias y sus aportes profesionales para el desarrollo de esta investigación, así como a los organizadores de este evento tan importante para el sector en América Latina.

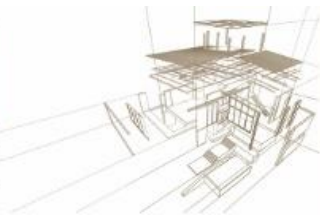
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aenor. (2005). Adhesivos para madera de uso estructural. UNE-EN 302-4.
- Asociación Colombiana De Ingeniería Sísmica (2010). Norma colombiana de diseño y construcción sismo-resistente, NSR-10. Bogotá, AIS.
- Barreto Castañeda, J. (2013). Estudio de propiedades físico mecánicas (corte y flexión) de la especie de madera tropical teca (*tectona grandis*) en el sistema de laminado pegado estructura. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- ICONTEC. (1997). NTC 2500 Ingeniería civil y arquitectura uso de la madera en la construcción. Bogotá.
- ICONTEC. (2004). NTC 5279 Método de ensayos estáticos para maderas en tamaños estructurales, 48. Bogotá.
- Hermoso, E., Carballo, J., & Fernandez-Golfin, J. I. (2007). Structural characterization of *Pinus Radiata* D. Don timber from Pais Vasco (Spain) according to standard modifications. *Maderas: Ciencia Y Tecnología*, v.9 n.3, p. 223–232.
- Junta del Acuerdo de Cartagena. (1982). Manual de diseño para maderas del Grupo andino. Lima.
- Quevedo, V. (2000). Adherencia y adhesivos para madera. Seminario Materiales de nueva generación y materiales eficientes.



IV. Estructuras de madera





DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÓDULO DE CORTE EN SU PLANO Y LA TENSIÓN DE CORTE DE ROTURA DE PANELES DE CLT

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF SHEAR MODULUS AND THE RUPTURE SHEAR STRESS IN CLT PANELS

Romero, Pablo ⁽¹⁾; Rossi, Alonso ⁽¹⁾; Saavedra, Erik ⁽²⁾; González, Paulina ^{(3)*}; Pérez, Eduardo ⁽⁴⁾; Burgos, Camila ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Ing. Civil. Universidad de Santiago de Chile. Santiago, Chile.

⁽²⁾ Profesor Asociado. Universidad de Santiago de Chile. Santiago, Chile.

⁽³⁾ Profesora Asociada. Universidad de Santiago de Chile. Santiago, Chile.

⁽⁴⁾ Profesor Adjunto. Universidad de Santiago de Chile. Santiago, Chile.

⁽⁵⁾ Profesora Asistente. Universidad de Santiago de Chile. Santiago, Chile.

* Contacto: paulina.gonzalez@usach.cl

Resumen

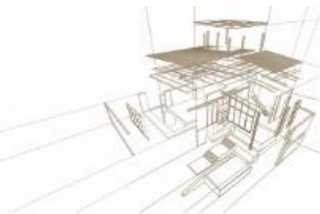
En este trabajo se presentan los resultados de ensayos realizados en elementos estructurales de madera contralaminada (CLT) con el objetivo de determinar el módulo de corte en su plano y la tensión de corte de rotura de paneles de CLT tipo muro. Se consideran tres tamaños de probetas de CLT de pino radiata de tres capas para incluir tres valores del cociente entre la altura y la longitud del panel (h/b : 1/1, 7/6, 3/2). Los ensayos se efectúan empleando las disposiciones de la norma chilena NCh802 EOf. 71 y los resultados se utilizan para obtener la curva que relaciona la tensión de corte en la sección transversal del panel con la desangulación en el plano del panel. La pendiente de esta curva, en el rango elástico de deformación de la probeta, corresponde al módulo de corte del elemento de CLT. Con estos resultados, se propone una función de tipo exponencial decreciente para representar la dependencia del módulo de corte con la razón de aspecto (h/b) del panel de CLT. Por otra parte, con la carga que produce la falla del panel se determina la tensión de corte de rotura, la cual es independiente de la razón de aspecto y tiene un valor de 4,0 Mpa.

Palabras-clave: módulo de corte, madera contralaminada, ensayos en muros de CLT.

Abstract

In this work results of tests done in cross laminated timber (CLT) structural elements are shown, with the objective to determine shear modulus in its plane and the rupture stress in type wall CLT panels. Three sizes test samples of radiata pine CLT of three layers are considered to include three values of quotient between panel's height and length (h/b : 1/1, 6/7, 2/3). Tests are done using regulations of Chilean code NCh802 EOf. 71 and results are used to get the curve which relates shear stress with the shear strain in the panel's plane. The slope of this curve, in the elastic rank of deformation of the test sample, corresponds to the shear modulus of CLT element. With these results, a decreasing, exponential function is proposed to represent dependence of shear modulus with the aspect reason (h/b) of the CLT panel. On the other hand, force which produces panel's failure is used to determine the shear stress of breaking, which is independent of the aspect reason and has a value of 4,0 MPa.

Keywords: shear modulus, cross laminated timber, experimental tests in CLT panel.



1. INTRODUCCIÓN

El empleo de madera contralaminada (CLT o XLAM) ha adquirido gran relevancia a nivel mundial en los últimos veinte años, particularmente en edificios de mediana altura, dado que este sistema constructivo posee grandes ventajas respecto de sistemas tradicionales en los aspectos referidos fundamentalmente a sostenibilidad, costos, confortabilidad, durabilidad, rapidez de ejecución, resistencia mecánica, comportamiento sísmico, entre otras cualidades (Brandner et al 2016; González et al 2014 y 2019). Considerando que Chile posee abundante recurso forestal (CONAF 2018) y un déficit habitacional del orden de 700 mil viviendas (CChC 2019), se hace necesaria la introducción del CLT como alternativa de construcción sustentable para edificaciones de mediana altura. Para ello, se requiere caracterizar los elementos estructurales de CLT elaborados con madera proveniente de recursos forestales chilenos con el fin de generar los antecedentes y estándares técnicos necesarios para facilitar el uso de este sistema constructivo en la comunidad profesional.

2. ENSAYOS ANTE SOLICITACIÓN DE CORTE

2.1. Preparación de probetas

Los ensayos de corte en el plano se realizan en probetas de paneles tipo muro de CLT de tres capas empleando la norma chilena NCh 802 (INN 1971). Se consideran probetas de tres tamaños que definen tres valores de la razón de aspecto del panel, la cual corresponde a la proporción entre la altura (h) del elemento y su ancho (b). Este parámetro tiene una alta influencia en el comportamiento al esfuerzo de corte de paneles tipo muro de CLT (Popovski 2016; FPIInnovations 2011).

Las nueve probetas que se someten a ensayo, tres para cada razón de aspecto considerada en el estudio, se obtienen a partir de paneles de madera contralaminada de tres capas, los cuales han sido fabricados en el Laboratorio LIMUS según el procedimiento que se describe en detalle en trabajos previos (González et al 2014 y 2019). En la Figura 1 se ha incluido la secuencia del proceso de preparación de las probetas y en la Tabla 1 se muestran las dimensiones, las razones de aspecto y la cantidad de repeticiones para cada configuración de probeta.

2.2. Montaje y procedimiento de ensayo

El montaje típico del ensayo de corte en el plano de las probetas de paneles tipo muro se muestra en la Figura 2. El protocolo de ensayo de la norma NCh802 (INN 1971) establece que se debe aplicar una carga lateral, progresivamente creciente, en el nivel superior del espécimen. Con el objeto de restringir el desplazamiento vertical se utiliza una viga de acero sobre la probeta, como se aprecia en la Figura 2, sistema que resulta ser más adecuado que el empleo de tensores de acero que propone la normativa para estos fines. En esta Figura 2 se muestra un detalle de la ubicación del dispositivo empleado para registrar la deformación instantánea horizontal en el nivel superior del espécimen, asociada a los distintos niveles de carga, con la finalidad de obtener la curva carga-deformación del panel. También se ubica un dispositivo en el nivel basal de la probeta con el objeto de medir eventuales levantamientos y efectuar las correcciones necesarias para obtener la deformación debida al esfuerzo de corte puro del espécimen. El montaje del ensayo contempla elementos para impedir el desplazamiento horizontal de la probeta y que, al mismo tiempo, permitan el giro en el extremo inferior opuesto al punto de aplicación de la carga.

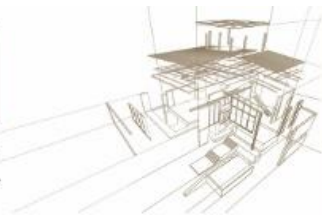


Figura 1: Secuencia del proceso de preparación de probetas. (a) corte de panel de CLT con motosierra, (b) corte de panel de CLT con sierra de mesa, (c) cepillado de cara lateral en canteadora, (d) probeta para ensayo. (Salas y Aravena 2017, Romero y Rossi 2016).

Tabla 1: Configuración de probetas y cantidad de repeticiones de ensayos. (Romero y Rossi 2016)

Serie	Altura (m)	Ancho (m)	Razón de aspecto	Nº repeticiones
P60x60	0,6	0,6	1:1	3
P60x70	0,7	0,6	7:6	3
P60x90	0,9	0,6	3:2	3

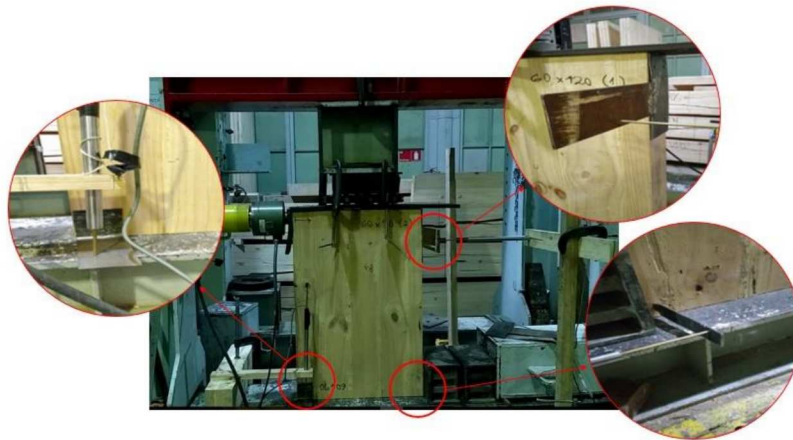


Figura 2: Montaje típico de probeta de CLT tipo muro para ensayo de corte en el plano.
(Romero y Rossi 2016)

3. RESULTADOS DE ENSAYOS

En la Figura 3 se muestra la curva tensión de corte-deformación angular típica de las probetas ensayadas, a partir de la cual se determina el módulo de corte respectivo que corresponde a la pendiente de la tangente en la zona elástica de la curva. El límite superior de la zona elástica de la curva o punto de fluencia de cada espécimen se determina aplicando el procedimiento descrito en la norma DIN EN 12512 (2006). La zona inicial de la curva, en la cual se producen deformaciones significativas con bajos niveles de carga, se asocia al movimiento inicial entre las piezas que conforman el montaje del ensayo por reducción de los pequeños espacios libres que existen entre ellas, por lo tanto esta zona de la curva no se incluye en el procedimiento utilizado para determinar el módulo de corte de cada probeta.

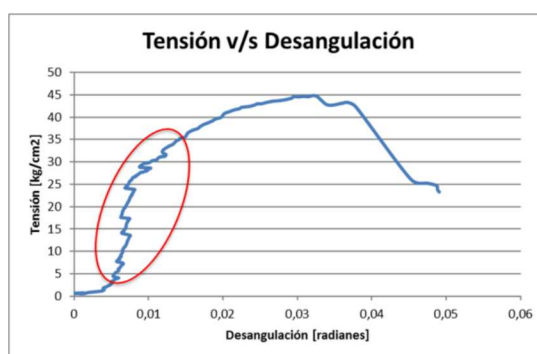


Figura 3: Curva tipo de tensión de corte – deformación angular de probetas.
(Romero y Rossi 2016)

La Figura 4 corresponde a un gráfico que muestra en forma esquemática el procedimiento que prescribe la norma DIN, ya mencionada, para determinar el punto de fluencia (P_y) de la curva carga-deformación.

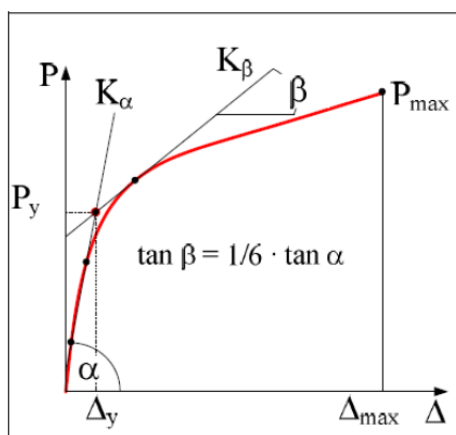


Figura 4: Punto de fluencia según norma DIN EN 12512 (2006)
Muñoz et al (2008)

La Tabla 2 contiene los valores promedio de los módulos de corte de las tres configuraciones de probetas ensayadas y los estadígrafos correspondientes.

Tabla 2: Módulo de corte de probetas de CLT tipo muro. (Romero y Rossi 2016)

Estadígrafos	Razón de aspecto		
	1:1	7:6	3:2
Promedio (MPa)	598,9	380,7	248,8
Desviación Estándar (MPa)	67,9	124,5	46,3
Coefficiente de variación (%)	11,3	32,7	18,6

Los resultados de la Tabla 2 se muestran en el gráfico de la Figura 5, donde también se muestra una curva de ajuste con su respectiva expresión matemática, la cual también se presenta en la ecuación (1). Esta ecuación permite relacionar el módulo de corte con la razón de aspecto (h/b) de paneles tipo muro de CLT de tres capas, elaborados con madera de pino radiata chileno.

En atención a que la ecuación (1) entrega valores consistentes con las relaciones clásicas de la mecánica de sólidos, se estima que es posible extrapolar la validez de esta relación a todo el rango práctico de valores de la razón de aspecto de paneles de CLT de tres capas.

$$G\left(\frac{h}{b}\right) = 570 \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^{-2,12} \quad (1)$$

donde:

- G es el módulo de corte (MPa).
- h es la altura del panel.

- b es la longitud de la base del panel.

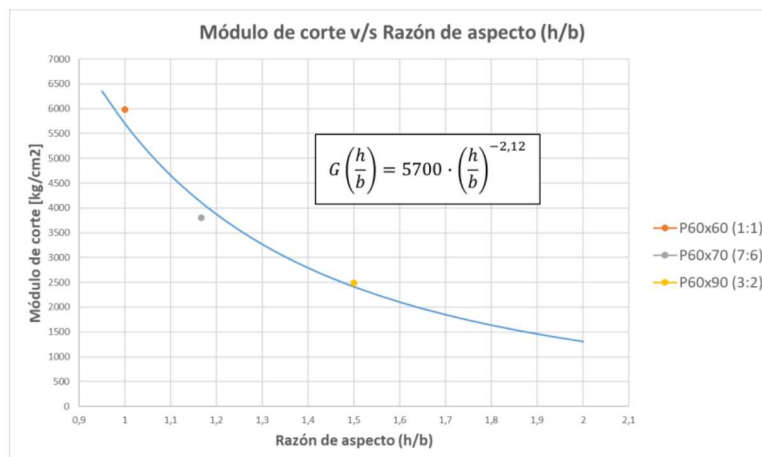


Figura 5: Módulo de corte en función de la razón de aspecto. (Romero y Rossi 2016)

La Tabla 3 contiene las tensiones de corte de rotura de las probetas; se incluyen los valores promedio y los estadígrafos respectivos. En el cálculo de estas tensiones se emplea el valor del área total de la sección transversal de cada espécimen.

Tabla 3 Tensión de corte de rotura de probetas de CLT tipo muro. (Romero y Rossi 2016)

Estadígrafos	Razón de aspecto		
	1:1	7:6	3:2
Promedio (MPa)	4,6	4,1	4,3
Desviación Estándar (MPa)	0,1	0,5	0,2
Coefficiente de variación (%)	2,0	13,1	3,5

En los resultados de la Tabla 3 se observa que la tensión de corte de rotura de las probetas de CLT no presenta variaciones importantes para los distintos valores de la razón de aspecto.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han realizado ensayos experimentales en probetas de paneles de madera contralaminada, tipo muro, para determinar el módulo de corte y la tensión de corte de rotura en su plano de estos elementos estructurales. Los resultados de los ensayos permiten deducir que el módulo de corte en su propio plano, de paneles de CLT tipo muro, depende en forma exponencial decreciente del cociente entre la altura del panel (h) y la longitud de la base del mismo (b), cociente que se ha denominado razón de aspecto del panel. Además, se obtiene como conclusión que la tensión de corte de rotura de estos elementos no presenta variaciones



importantes para los distintos valores de la razón de aspecto considerados en el estudio, de tal manera que se propone un valor de 4,0 MPa para este parámetro, con un nivel de confianza del 95% según el test de Student.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado con el apoyo financiero de Innova CORFO a través del proyecto *15BPE-47270 Ingeniería sismorresistente para diseño estructural de edificios de mediana altura en madera contralaminada de pino radiata crecido en Chile*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G. and Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*.

CChC (Cámara Chilena de la Construcción) (2019). www.cchc.cl/inicio/comunicaciones/opinion. (fecha publicación 28/04/19). (acceso 08.08.2019)

CONAF (Corporación Nacional Forestal) (2018). www.conaf.cl. www.sit.conaf.cl. (acceso 05.06.2019).

DIN EN12512 (2006). Timber structures-Test methods-Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners.

FPInnovations (2011). CLT Handbook. Canadian Edition. Quebec. Canadá.

González, P., Saavedra, E., Pérez, E., Burgos, C., Piña, F. y Wagner, M. (2014). Sistema constructivo en madera contralaminada para edificios, ISBN: 978-956-303-267-3. Universidad de Santiago de Chile, www.conmaderasach.cl.

González, P., Burgos, C., Pérez, E., Valdivieso, D., Saavedra, E., Yáñez, S. y Wagner, M. (2019). Sistema constructivo en madera contralaminada para edificios. Volumen 2, ISBN: 978-956-303-395-3. Universidad de Santiago de Chile, www.conmaderasach.cl.

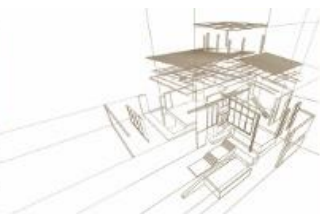
Instituto Nacional de Normalización (1971). Arquitectura y construcción - paneles prefabricados - ensayo de carga horizontal. NCh802.EOf71. Santiago. Chile.

Muñoz, W., Mohammad, M., Salenikovich, A. and Quenneville, P. (2008). Determination of yield point and ductility of timber assemblies. *Proceedings of World Conference on Timber Engineering, WCTE 2008, Miyazaki, Japan*.

Popovski, M. (2016). Conversación personal.

Romero, P. y Rossi, A. (2016). Determinación del módulo de corte y la tensión de rotura de paneles de CLT, fabricados de pino radiata chileno, al ser sometidos a cargas en el plano. Memoria de título de Ingeniero Civil en Obras Civiles. Universidad de Santiago de Chile.

Salas, C. y Aravena, F. (2017). Determinación experimental de la compresión paralela en columnas cortas de CLT. Memoria de título de Constructor Civil. Universidad de Santiago de Chile.



PROYECTO DE REPARACIÓN TORRE DE ENFRIAMIENTO DE MADERA ASERRADA. DESAFÍOS ESTRUCTURALES CONSIDERANDO LOS CRITERIOS DE LA NORMA SÍSMICA NCH2369 PARA ESTRUCTURAS INDUSTRIALES EN CHILE

REPAIR PROJECT OF TIMBER COOLING TOWER. STRUCTURAL CHALLENGES CONSIDERING THE CRITERIA OF THE SEISMIC STANDARD NCH2369 FOR INDUSTRIAL STRUCTURES IN CHILE.

González, Ignacio ⁽¹⁾ *

⁽¹⁾ Ingeniero Civil Estructural. IGR Structural Engineering. Santiago, Chile

* Contacto: ignacio@igr-se.cl

Resumen

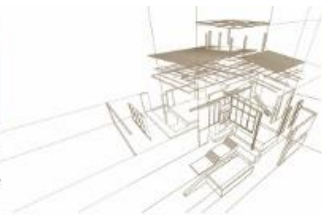
Este trabajo describe los distintos aspectos y desafíos considerados en el diseño sísmico de la torre de enfriamiento de madera aserrada para una planta de fundición en la región de Antofagasta en Chile. El proyecto consideró la inspección, diseño y reparación de la torre existente con madera aserrada nacional e internacional, considerando los criterios de la norma sísmica industrial NCh2369. Para el diseño de los elementos de madera aserrada se utilizó el software C+T, primer software creado en Chile y Latinoamérica capaz de diseñar en base a la norma NCh1198.

Palabras-clave: Torre de enfriamiento de madera, diseño sísmico de estructuras.

Abstract

This paper describes the different aspects and challenges considered in the seismic design of the sawn timber cooling tower for a smelting plant in the Antofagasta region in Chile. The project considered the inspection, design and repair of the existing tower with national and international sawn timber, considering the criteria of the seismic industrial structures standard NCh2369. For the design of the elements of sawn timber, the C + T software was used, the first software created in Chile and Latin America capable of designing based on the NCh1198 standard.

Keywords: Timber cooling tower, Seismic design industrial structures.



1. INTRODUCCIÓN

El proyecto consta de una torre de enfriamiento de madera aserrada que data del año 2002, la que originalmente se construyó con madera aserrada de pino oregon de procedencia de EEUU, douglas fir.

Debido a las condiciones de operación de la torre con altas temperaturas, químicos y humedad, la estructura se fue deteriorando hasta alcanzar niveles críticos para un buen comportamiento estructural.

De acuerdo a las condiciones antes descritas, nuestra oficina tomo el desafío de devolver la capacidad resistente de la estructura cumpliendo con la normativa sísmica para estructuras industriales NCh2369.Of2003 [1] y la norma de diseño para estructuras de madera NCh1198.Of2014 [2].

El diseño de los elementos estructurales de las especies de madera aserrada utilizados durante el proyecto de ingeniería, se realizo con el software de diseño C+T de Eligemadera.

2. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

La estructura de la torre de enfriamiento está formada estructuralmente por un conjunto de marcos arriostrados de madera aserrada en ambas direcciones de análisis. En el nivel superior de la estructura se ubican los equipos mecánicos y de ventilación.

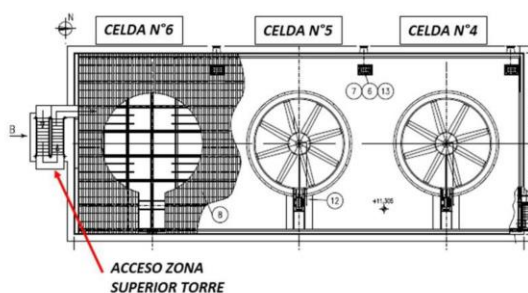


Figura 1: Planta de la torre de enfriamiento



Figura 2 : Torre de enfriamiento

La estructura de la torre debe ser capaz de resistir el peso de los equipos que soporta y a su vez debe mantener el proceso de operación ante eventos sísmicos.

3. DAÑOS ESTRUCTURALES ANTES DE LA REPARACIÓN

Se realizó una visita de inspección donde se tomaron notas del estado actual de la estructura. La información obtenida sirvió como input de información relevante para el desarrollo de la ingeniería, como son, materialidad, dimensiones, ubicación y estado de conservación.

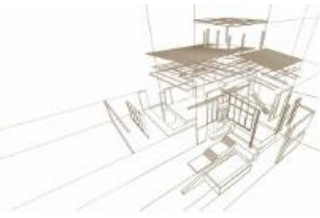


Figura 3: Degradación en elementos perimetrales

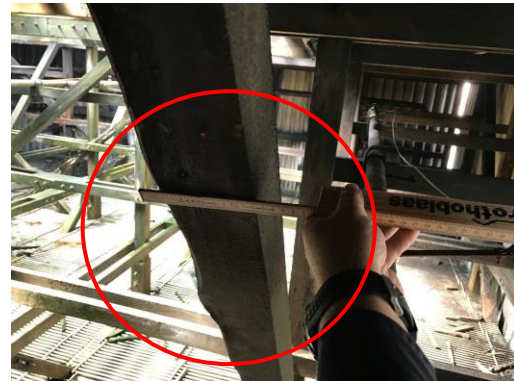


Figura 4: Pérdida de sección de arriostramientos



Figura 5: Pérdida de sección en vigas de soporte de equipos



Figura 6: Corrosión y debilitamiento de uniones



Figura 7: Pérdida de sección en columnas perimetrales



Figura 8: Daño crítico en columnas, vigas y puntales



4. CRITERIOS PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL

4.1. Propiedades de los materiales

Es importante en todo tipo de proyecto de madera estructural definir claramente las especies con las cuales se trabajarán, en este caso se utilizaron las siguientes:

- Madera aserrada columnas: Pino Oregón, grado estructural N°1 al 30% de contenido de humedad según NCh1198. Impregnación con sales de CCA para riesgo R5.
- Madera aserrada vigas y arriostramientos: Pino radiata, grado estructural C24 al 30% de contenido de humedad según NCh1198. Impregnación con sales de CCA para riesgo R5.

4.2. Cargas de diseño

Cargas permanentes utilizadas para el diseño estructural, corresponden a lo señalado en la NCh1537.Of2009[3] y los criterios de diseño indicados por el cliente para este tipo de estructuras.

- Carga muerta niveles inferiores (vigas 50x160) : 50 kg/m²
- Carga muerta nivel superior (Cargas de equipos y otros) : 50 kg/m²
- Carga de uso de piso nivel superior (zona de equipos[4]) : 200 kg/m²

4.3. Determinación de espectro de diseño

Tabla 1: Parámetros espectro de diseño NCh2369 Of. 2003

Factor de importancia	I	1,00
Tipo de suelo		IV
Zona sísmica		3
Razón de amortiguamiento	ξ	0,03
Factor de modificación de respuesta	R	3
Coefficiente sísmico máximo	C_{max}	0,34

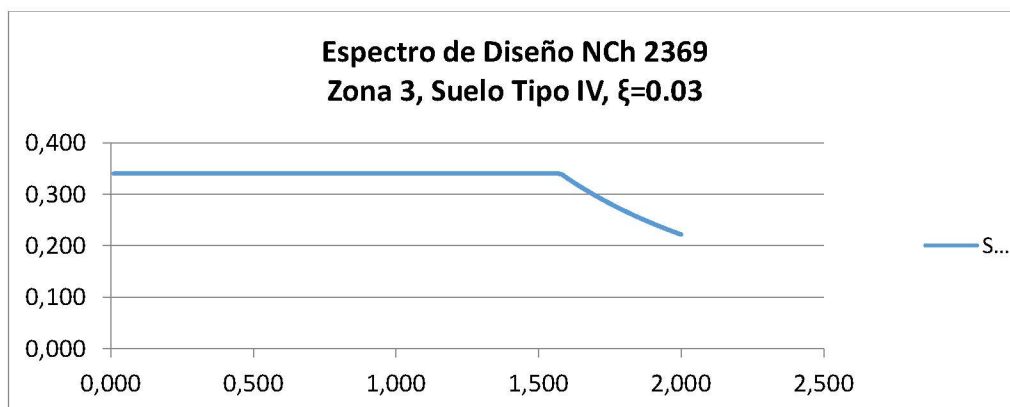


Figura 9: Espectro de diseño según NCh2369 de acuerdo con los antecedentes del proyecto

4.4. Antecedentes generales del análisis sísmico

CATEGORÍA DEL EDIFICIO:	C2
ZONA SÍSMICA:	3
TIPO DE SUELO:	IV
RAZÓN DE AMORTIGUAMIENTO:	$\xi = 0.03$
FACTOR DE MODIFICACIÓN DE LA RESPUESTA	$R = 3$
COEFICIENTE DE IMPORTANCIA:	$I = 1.00$
ACELERACIÓN EFECTIVA MÁXIMA:	$A_0 = 0.40 \text{ g}$
	$T^* = 1.35 \text{ (s)}$
	$n = 1.8$
PESO DEL EDIFICIO:	$P = 134.9883 \text{ (T)}$
PERIODO FUNDAMENTAL DIRECCIÓN X:	$T^*_x = 0.172144 \text{ (s)}$
PORCENTAJE DE MASA ASOCIADA	$M_x = 81.6013 \text{ (\%)}$
PERIODO FUNDAMENTAL DIRECCIÓN Y:	$T^*_y = 0.183748 \text{ (s)}$
PORCENTAJE DE MASA ASOCIADA	$M_y = 85.3738 \text{ (\%)}$
COEFICIENTE SÍSMICO EN DIRECCIÓN X:	$C_x = 18.323$
COEFICIENTE SÍSMICO EN DIRECCIÓN Y:	$C_y = 16.293$
COEFICIENTE SÍSMICO MÍNIMO:	$C_{min} = 0.100$
COEFICIENTE SÍSMICO MÁXIMO:	$C_{max} = 0.340$
COEFICIENTE SÍSMICO EN DIRECCIÓN X:	$C_x = 0.340$
COEFICIENTE SÍSMICO EN DIRECCIÓN Y:	$C_y = 0.340$
CORTE BASAL EN DIRECCIÓN X:	$Q_{ox} = 45.896 \text{ (T)}$
CORTE BASAL EN DIRECCIÓN Y:	$Q_{oy} = 45.896 \text{ (T)}$

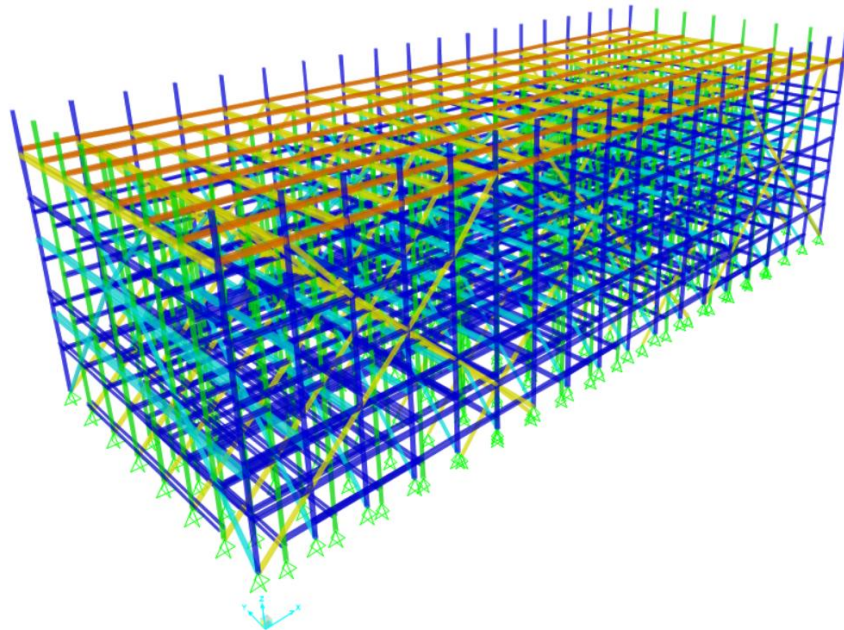
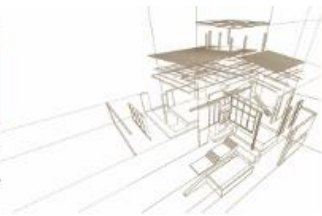


Figura 10: Modelo estructural tridimensional de la torre

El factor de reducción de la respuesta utilizado en el proyecto, $R=3$, es menor al indicado normativamente por la norma sísmica industrial, $R=4$. Si bien las piezas y las uniones en la parte central de la torre estaban en buen estado de conservación, se adoptó este criterio que es un tanto conservador debido a que no se obtuvieron mayores antecedentes de las uniones en la parte central de la torre.

El proyecto de reparación contempló modificar el perímetro de la estructura, que es dónde se observó el daño crítico (Fig.11 y Fig.12).

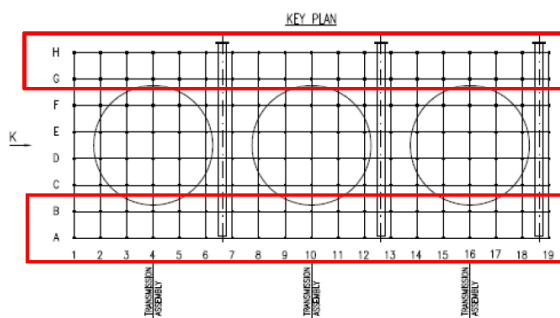


Figura 11: Ejes longitudinales a reemplazar

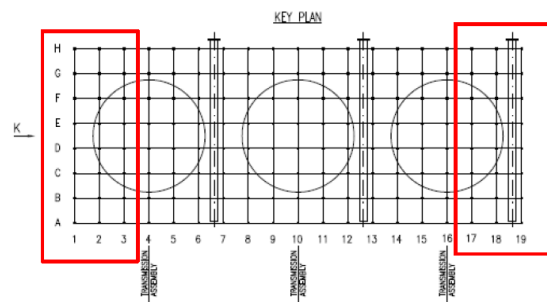
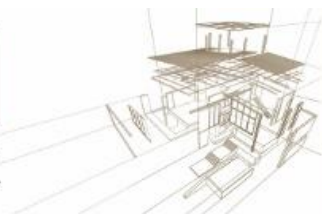


Figura 12: Ejes transversales a reemplazar

4.5. Uniones

Un punto clave para el correcto desempeño de la estructura ante solicitaciones sísmicas, son las uniones. Las uniones de las estructuras de madera deben cumplir con los requisitos normativos de acuerdo a NCh1198.Of2014. Además, deben tener un comportamiento dúctil y una resistencia de falla inferior a los elementos de madera conectados.



5. RESULTADOS FINALES DEL PROYECTO

5.1. Diseño estructural

Para el diseño de elementos estructurales con las especies de madera utilizados en el proyecto (Pino Oregón de EEUU y Pino Radiata nacional), fueron diseñados con el software C+T, software de creación nacional y el primero en su tipo en Latinoamérica. Con la utilización del software se obtuvieron las verificaciones de los elementos y uniones de manera rápida y sencilla, lo cual facilitó el trabajo de ingeniería en los tiempos de ejecución del proyecto.

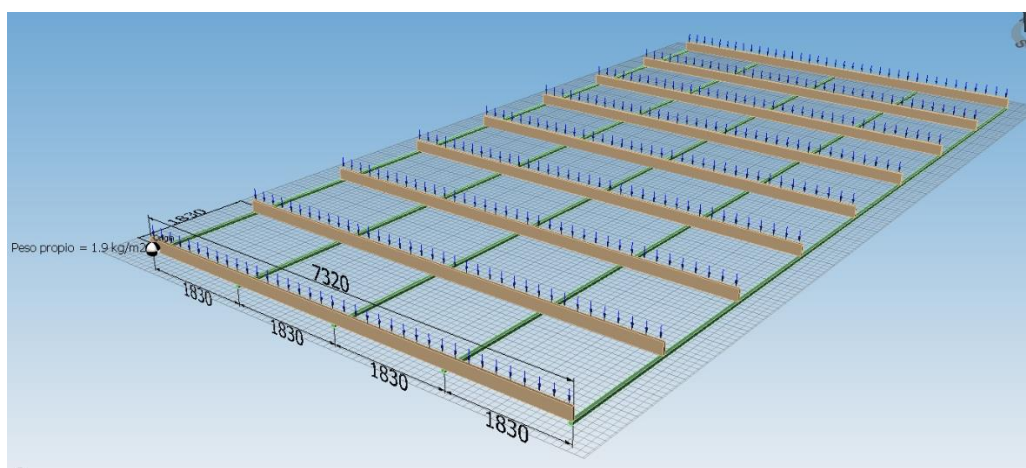


Figura 13: Interfaz diseño de vigas

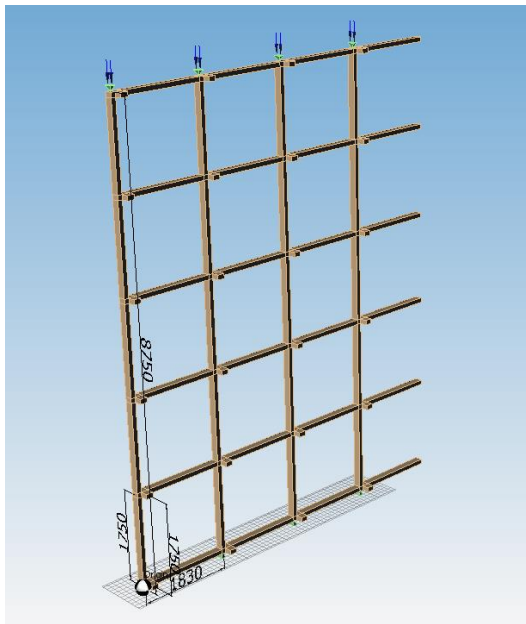
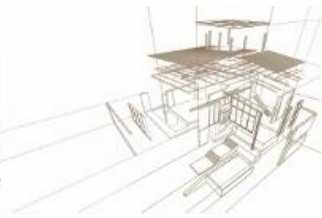


Figura 14: Interfaz diseño de columnas

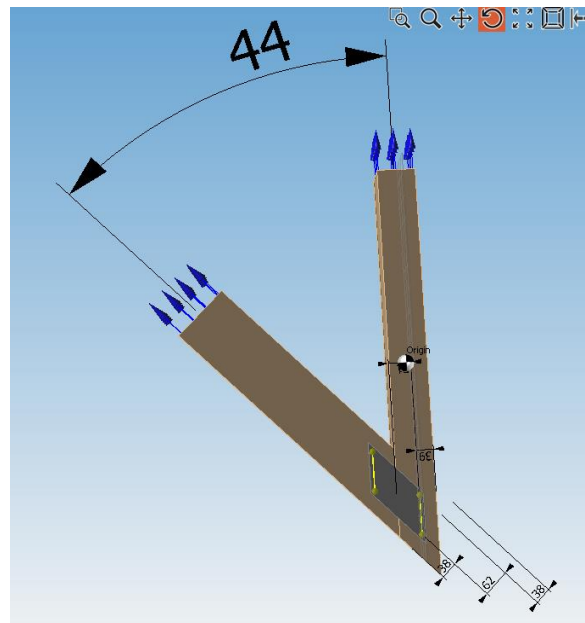


Figura 15: Interfaz diseño de uniones

5.2. Desafíos en la ejecución del proyecto

Otro de los desafíos para lograr la correcta reparación de la torre de enfriamiento, fue ejecutar todos los refuerzos y cambios de piezas en el tiempo estipulado por el cliente. En este caso se contaron con 3 semanas de trabajo para la ejecución de las obras, tiempo en el cual se realizó una parada de planta general.

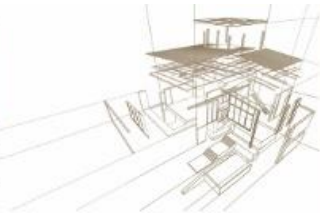
Como los tiempos fueron críticos para la ejecución de la obra, se optó por prefabricar la estructura de madera para lograr dar con los tiempos indicados. Para este propósito fue necesario adoptar una nueva herramienta de ingeniería, por lo que se utilizó el programa Cadwork, que es un referente en Europa para el desarrollo de soluciones 3D CAD/CAM. Con esta herramienta se logró dar continuidad a las fases del proyecto, desde el diseño hasta la producción en obra.



CLEM

2019

18 al 20 de noviembre
Hotel Cottage
Montevideo - Uruguay



4º CONGRESO
LATINOAMERICANO
DE ESTRUCTURAS
DE MADERAS

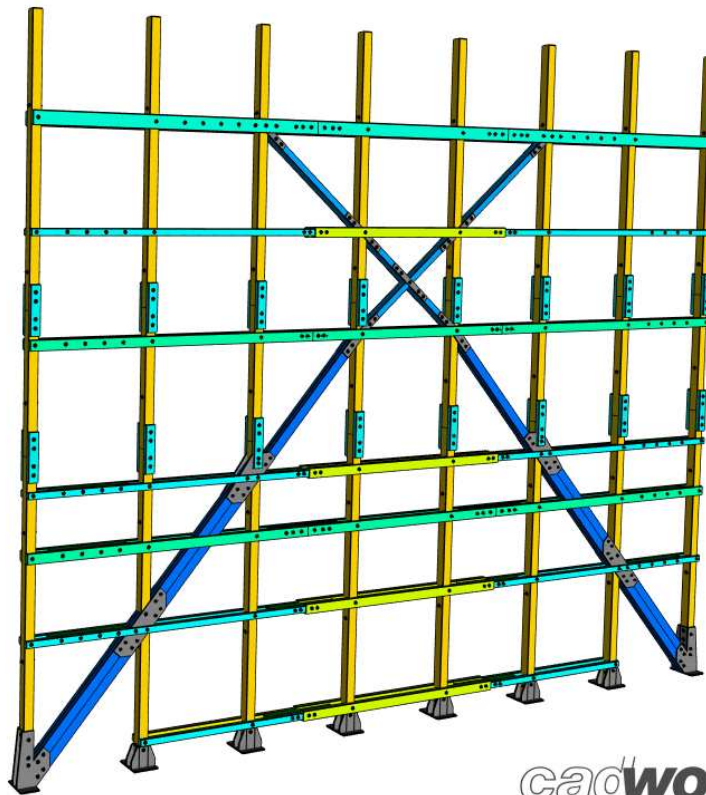


Figura 16: Vista 3D eje transversal en Cadwork

Como se muestra en la figura (Fig.16), se pueden obtener detalladamente todas las piezas de madera, placas de acero, pernos y conectores que se requieren en cada eje de la estructura de manera precisa, lo cual impactó de forma positiva en los tiempos de ejecución del proyecto.

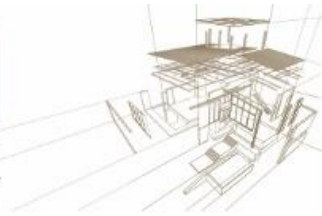


Figura 17: Restitución columnas perimetrales

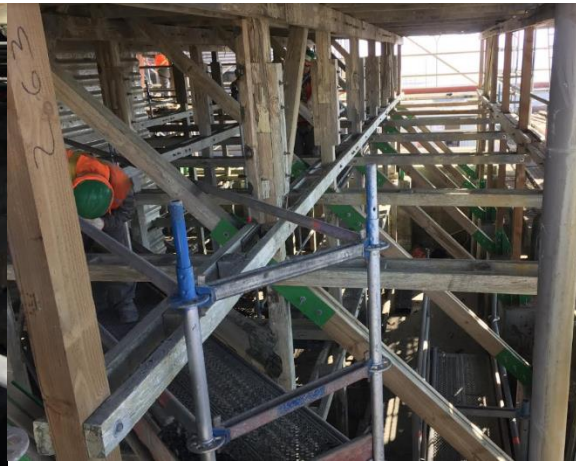


Figura 18: Restitución arriostramientos

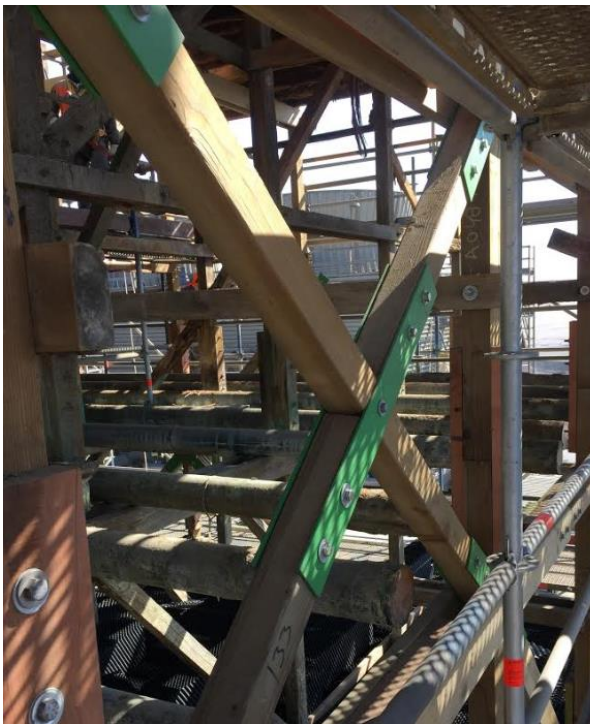
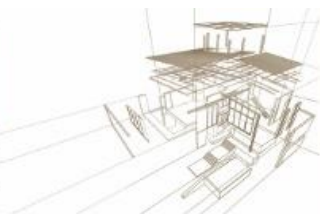


Figura 19: Reparación de uniones en arriostramientos



Figura 20: Reparación de placas base

Finalmente, la ejecución de los trabajos durante el tiempo que duró la parada de planta se efectuó de acuerdo a las indicaciones del proyecto de ingeniería.



6. CONCLUSIONES

- La estructura de la torre presentaba daños que limitaban su capacidad resistente ante eventos sísmicos. En general y de acuerdo a la inspección realizada, la estructura presentaba daños estructurales graves que ponían en peligro su capacidad resistente ante tales eventos.
- El proyecto de ingeniería para la torre de enfriamiento tuvo que adaptar el requerimiento del funcionamiento general a las exigencias normativas vigentes. En ese contexto, se utilizaron herramientas de ingeniería aptas para lograr el propósito antes mencionado, que en este caso fueron para el diseño de los elementos estructurales el software C+T. Y para la prefabricación de las piezas de madera, placas de acero, pernos y conectores se utilizó el software Cadwork.
- El diseño sísmico de la torre de enfriamiento se realizó considerando un factor de modificación de la respuesta $R=3$, debido a que parte de la estructura central existente no se reparó. Si bien la inspección visual de las piezas de madera y uniones realizadas en esa parte de la torre estaba en buen estado de conservación, se adoptó un criterio conservador por no contar con mayor información. Por lo tanto, se reforzó el perímetro de acuerdo a las exigencias de diseño.
- Se pudo lograr el objetivo inicial de devolver la capacidad resistente de la torre de enfriamiento y cumplir con las exigencias normativas de acuerdo a NCh2369 y NCh1198 utilizando herramientas de diseño y fabricación de última generación.

AGRADECIMENTOS

Empresa Eligemadera por su apoyo en la inspección y el software C+T.

Empresa Tecnica Hansa por su apoyo en construcción del proyecto.

Harry Celedón por su apoyo en la inspección técnica durante la construcción.

Markus Alexander Ziegler por su apoyo con el software Cadwork y los planos de fabricación.

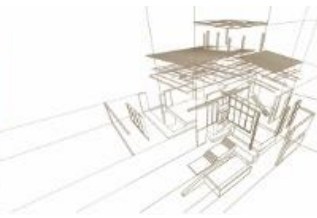
REFERENCIAS

INN Chile. NCh2369.Of2003 Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales.

INN Chile. NCh1198.Of2014 Madera - Construcciones en madera - Cálculo.

INN Chile. NCh1537.Of2009 Diseño estructural - Cargas permanentes y cargas de uso

SPX Cooling technologies, Inc. Cooling towers fundamentals. Jhon C. Hensley, editor.



MÉTODO SIMPLIFICADO PARA MODELACIÓN DE EDIFICIOS EN MEDIA ALTURA TIPO MARCO-PLATAFORMA DE MADERA UTILIZANDO UN PROGRAMA COMPUTACIONAL DE ELEMENTOS FINITOS

SIMPLIFIED METHOD TO MODELING TIMBER MID-RISE BUILDINGS PLATFORM FRAME SYSTEM USING A FINITE ELEMENTS PROGRAM

González, Ignacio ⁽¹⁾*; Vargas, Jorge ⁽²⁾

⁽¹⁾ Ingeniero Civil Estructural. IGR Structural Engineering. Santiago, Chile

⁽²⁾ Ingeniero Civil Estructural. Santiago, Chile

* Contacto: ignacio@igr-se.cl

Resumen

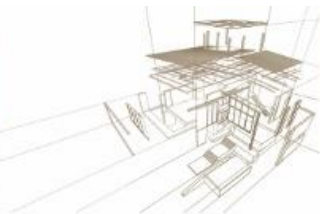
El presente estudio consiste en la elaboración de una metodología simplificada de modelación computacional para el diseño sísmico de edificios en media altura compuestos de muros de corte de madera utilizando el sistema marco-plataforma, aplicando factores de modificación de las rigideces que actúan en el plano del muro de corte. Para ello, se considera un análisis lineal que cumple con las formulaciones presentadas por Euler-Bernoulli y la teoría de vigas de Timoshenko. La aplicación de estos coeficientes de modificación de rigidez a los distintos muros estructurales de corte modelados, permiten disminuir considerablemente los tiempos de proceso computacional al optar por un modelo lineal; en contraste con el modelo no-lineal e iterativo. Posteriormente, a partir de los resultados obtenidos del proceso de formulación y modelación, se crearon tablas de coeficientes de modificación de rigideces para distintas configuraciones de muros de corte respecto al sistema de muro marco-plataforma de madera.

Palabras-clave: Edificios de madera, Muros de corte, sistema marco-plataforma de madera

Abstract

The present study consists of the elaboration of a simplified methodology of computational modeling for the seismic design of middle rise buildings composed of timber shear walls using the platform-frame system, applying factors of modification of the rigidities that act in the plane of the shear walls. To do this, it is considered a linear analysis that complies with the formulations presented by Euler-Bernoulli and Timoshenko's beam theory. The application of these coefficients of modification of rigidity to the different structural shear walls modeled, allow to reduce considerably the computational process times when opting for a linear model; in contrast to the non-linear and iterative model. Subsequently, from the results obtained from the formulation and modeling process, tables of coefficients of modification of rigidities were created for different configurations of shear walls with respect to the timber platform-frame system.

Keywords: Timber buildings, Shear walls, Platform frame system



1. INTRODUCCIÓN

El sistema marco-plataforma de madera está dentro de los sistemas constructivos más utilizados en los países productores de madera, como Canadá y Estados Unidos. Dentro de los atributos de este sistema se encuentran la prefabricación, velocidad de construcción, eficiencia energética y en general su versatilidad ayuda a potenciar soluciones sustentables con el medio ambiente.

Uno de los problemas que deben enfrentar los ingenieros que desarrollan sus proyectos con este sistema constructivo, es saber aplicar correctamente todas las variables que se involucran en un muro de corte tales como; la cantidad de pies derecho, espaciamento de clavos, sistema de anclaje, placas de OSB, etc. Adaptar todas las variables antes mencionadas en un modelo estructural de elementos finitos resulta complejo ya que se deben realizar modelos no-lineales, lo que involucra un mayor gasto de recursos para desarrollar este tipo de proyectos.

Esta investigación apunta a facilitar el desarrollo de proyectos con el sistema marco-plataforma, para ello se presenta una metodología que se adapta a las prácticas más utilizadas de las oficinas de ingeniería para el diseño sísmico en media altura y que a su vez sea confiable para la verificación de las exigencias normativas de la NCh433 [1].

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Encontrar una metodología simplificada para facilitar la modelación computacional de paneles de madera aserrada del tipo sistema marco-plataforma, aplicado principalmente a muros de corte segmentados y muros perforados donde se considere de manera intrínseca las propiedades de los distintos elementos que componen el sistema estructural.

2.2. Objetivos Específicos

- Analizar y comprender las hipótesis de verificación y diseño de la norma americana de muros estructurales de corte [2], utilizando el sistema marco-plataforma.
- Proponer una metodología simplificada como análisis racional de ingeniería para la aplicación de un modelo estructural utilizando el programa de elementos finitos ETABS para muros de corte del sistema marco-plataforma.
- Desarrollar ábacos con coeficientes de modificación de rigidez de un elemento finito tipo área para generar un modelo representativo de la estructura.

3. MODELACIÓN SIMPLIFICADA UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS TIPO ÁREA

3.1. Metodología de cálculo utilizada

Para realizar una modelación simplificada, se plantea la utilización de coeficientes de modificación para la rigidez en los elementos tipo área (membrana). Estos coeficientes vienen especificados en cada programa computacional y afectan básicamente a la rigidez en el plano y fuera de este.

La metodología más simple para realizar un modelo simplificado se obtiene de igualar la rigidez lateral total de un muro de entramado ligero entregado por la SDPWS [2]

$$\frac{1}{K_{SDPWS}} = \frac{2h^3}{3EAL^2} + \frac{h}{G_a L} + \frac{h^2}{K_{HD}LL'} \quad (1)$$

Donde:

K_{HD} : Rigidez del anclaje.

L' : Distancia entre el anclaje traccionado y el centroide de los pies derechos de borde.

Con la rigidez lateral total de un muro en voladizo

$$\frac{1}{K} = \frac{h^3}{3EI} + \frac{\alpha h}{GA} \quad (2)$$

Donde α es el factor de forma de Timoschenko.

Así mismo, se utiliza la rigidez vertical del sistema para obtener una rigidez representativa, obviando el peso proporcionado por el muro tipo Shell.

La rigidez axial de la SDPWS se representa por

$$K_{AXIAL_SDPWS} = \frac{E'A'}{h} \quad (3)$$

Donde:

A' : Área proporcionada por la totalidad de los pies derechos.

E' : Módulo de elasticidad de los pies derechos.

Y la rigidez axial de un elemento tipo barra se define como

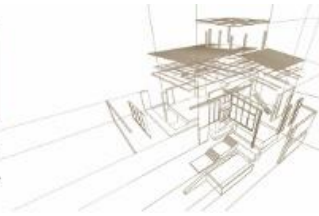
$$K_{AXIAL} = \frac{EA}{h} \quad (4)$$

Dónde:

A : Área de la sección transversal del elemento área.

E : Módulo de elasticidad del modelo computacional.

Luego la obtención de los coeficientes de modificación se realiza igualando las distintas rigideces del muro de corte, es decir, igualando la rigidez vertical y horizontal del sistema



SDPWS con la rigidez total de un muro en voladizo. Para ello, se definen tres coeficientes a obtener:

λ : Coeficiente de modificación que se aplica a la rigidez en dirección x e y del elemento tipo área que en el programa computacional se aplica en f11 y f22.

Ψ : Coeficiente de modificación que se aplica a la rigidez por cortante del elemento tipo área que en el programa computacional se aplica en f12.

ρ : Coeficiente de modificación que se aplica a la masa y peso del elemento tipo área.

Para la obtención del coeficiente de rigidez λ , se igualan las rigideces producto de la carga axial, incorporando el factor λ en la ecuación que representa la rigidez axial de un elemento tipo barra

$$K_V = \frac{E'A'}{h} = \lambda \frac{EA}{h} \quad (5)$$

λ representa la razón entre el producto del módulo de elasticidad con el área de los pies derechos del muro de entramado ligero, y el producto del módulo de elasticidad por el área transversal del elemento tipo área. Este es el coeficiente más simple de obtener, ya que sólo basta con igualar la deflexión axial de ambos sistemas.

Para la obtención del coeficiente de rigidez Ψ , se iguala la rigidez lateral del sistema SDPWS con la rigidez total para una barra en voladizo. Los factores de modificación λ y Ψ actúan en la rigidez por flexión y corte, respectivamente.

$$\frac{1}{K_{SDPWS}} = \frac{h^3}{\lambda 3EI} + \frac{\alpha h}{\Psi GA} \quad (1)$$

Considerando que el módulo de corte se puede escribir respecto al módulo de elasticidad y el factor de Timoshenko igualarlo a uno, la ecuación anterior se puede escribir como sigue

$$\frac{1}{K_{SDPWS}} = \frac{h^3}{\lambda 3EI} + \frac{2h(1+\nu)}{\Psi EA} \quad (2)$$

Luego, al desarrollar la ecuación anterior, se denomina K_{SDPWS} como K_H y se despeja el coeficiente Ψ , obteniéndose la siguiente ecuación

$$\Psi = \frac{6hIK_H\lambda(1+\nu)}{A(3EI\lambda - h^3K_H)} \quad (3)$$

Reemplazando λ la ecuación se escribe como sigue

$$\Psi = \frac{6hIK_H \frac{K_v h}{EA} (1+\nu)}{A \left(3EI \frac{K_v h}{EA} - h^3 K_H \right)} \quad (4)$$

Se puede simplificar la ecuación anterior tanto en términos del módulo de elasticidad, como en términos del módulo de corte considerando lo siguiente

$$\eta = \frac{K_v}{K_H} \quad (5)$$

$$A = Lb \quad (6)$$

$$\xi = \frac{L}{h} \quad (7)$$

$$\psi = \frac{\xi}{b(\eta\xi^2 - 4)} \frac{2K_V(1 + \nu)}{E} \quad (8)$$

Resulta

$$\psi = \frac{\xi}{b(\eta\xi^2 - 4)} \frac{K_V}{G} \quad (9)$$

Donde:

K_V : Rigidez axial del muro marco-plataforma.

K_H : Rigidez lateral total del muro marco-plataforma.

E : Módulo de elasticidad del elemento tipo área modelado.

G : Módulo de corte del elemento tipo área modelado.

Finalmente como la sección transversal es una sección que posee vacíos entre pies derechos, es necesario realizar un ajuste entre el peso del muro y el peso de la sección de modelación. El factor ρ de peso y masa sísmica se obtiene de la razón entre el peso del muro de entramado ligero y el peso del muro modelado mediante elementos finitos

$$\rho = \frac{A_{TPD}Y_{PR} + nA_{osb}Y_{osb}}{AY_{PR}} \quad (10)$$

Donde:

A_{TD} : Área total de los pies derechos en el muro.

Y_{PR} : Peso específico pino radiata considerado.

n : Número de placas de OSB.

A_{osb} : Área de placas de OSB.

Y_{osb} : Peso específico placas OSB.

Este método permite generar una base de datos con distintos coeficientes de rigidez de distintas configuraciones de muros de entramado ligero para luego ser aplicado fácilmente en el software de elementos finitos.

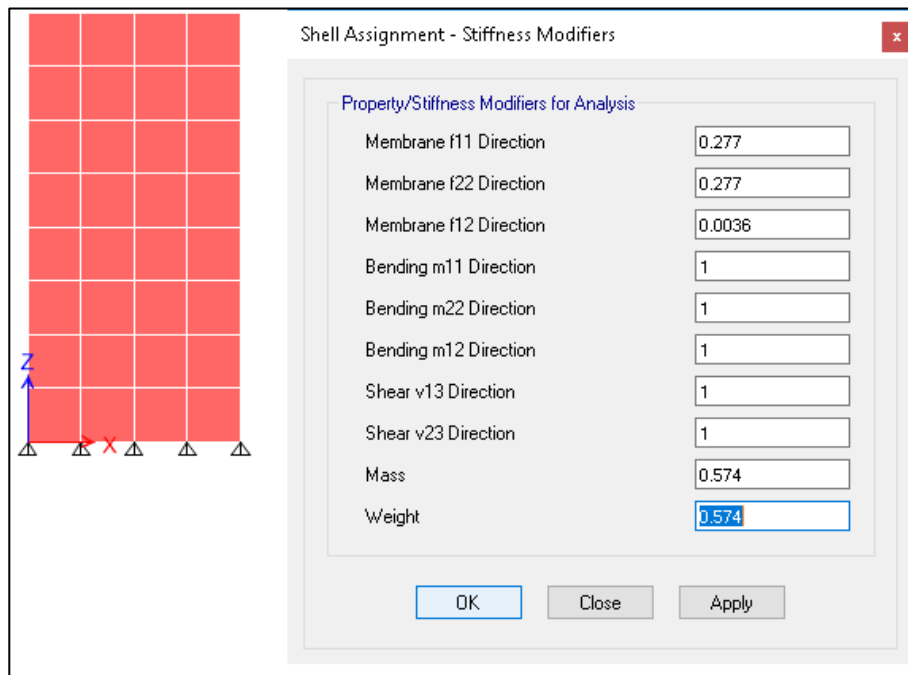
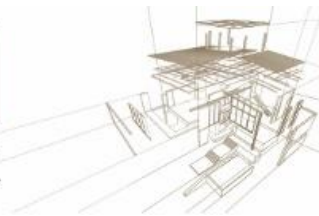


Figura 1: Ejemplo de aplicación del método de los coeficientes a un modelo de elementos finitos con el software Etabs

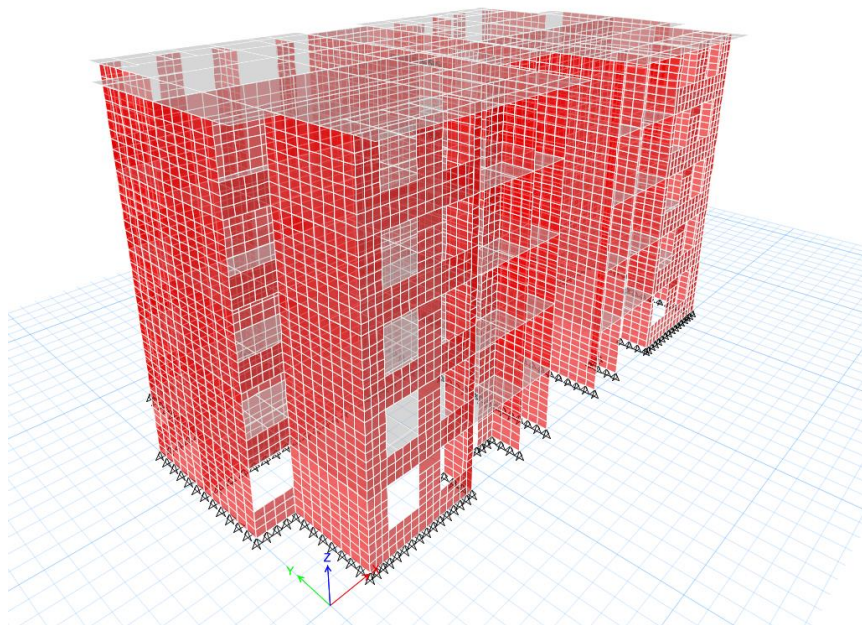
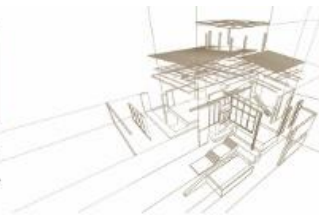


Figura 2: Modelo de edificio en media altura con elementos finitos utilizando software Etabs



4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se concluye que, si la razón entre la altura y la longitud del muro aumenta, la rigidez a flexión controla el diseño en base a condiciones de servicio. Por otro lado, si dicha razón decrece, la rigidez por cortante es fundamental para controlar los límites de deformaciones indicadas en la norma de diseño sísmico NCh433.

De igual manera, se pudo observar que la magnitud de la rigidez de los elementos finitos disminuye a medida que se aumenta el mallado del elemento modelado. Para representar la rigidez teórica indicada por el código SDPWS, se deben aplicar factores de corrección a los coeficientes de modificación de las propiedades brutas del elemento área, siendo este factor de 1.04 aproximadamente, y aplicado a la rigidez lateral por cortante.

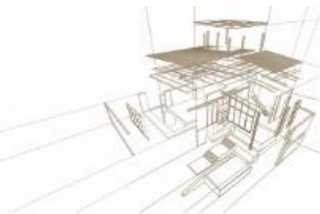
Asimismo, del estudio realizado se puede apreciar que sólo es necesario modificar las propiedades del elemento modelado aplicando sólo tres factores de modificación de las rigideces a un elemento del tipo membrana; estas afectan básicamente a la rigidez axial, la rigidez a cortante y al peso asociado a cada uno de los elementos modelados.

Este trabajo significa un aporte para la modelación computacional, ya que reduce significativamente el proceso de diseño y verificación de muros de corte. Esto se logra debido a que no se incursiona en modelos no lineales, modificaciones complejas de cada elemento, cálculos de propiedades de los elementos e iteraciones de verificación de cada uno de los elementos que componen el sistema marco-plataforma.

El procedimiento descrito en este estudio permitirá a los profesionales de las oficinas de ingeniería estructural desarrollar de manera práctica proyectos con el sistema marco-plataforma de madera. Esto marca un hito en el desarrollo de este tipo de proyectos, debido a que es una herramienta que facilitará el análisis y desarrollo de las edificaciones con este sistema constructivo.

REFERENCIAS

- NCh433. (1996 mod 2009). Instituto Nacional de Normalización. Diseño Sísmico de Edificios.
- American Wood Council. (2015). Special Design Provisions for Wind and Seismic. SDPWS.
- Cárcamo, S. I. (Julio de 2017). Modelo de muros marco plataforma para un programa de elementos finitos mediante elementos área. Universidad Tecnica Federico Santa Maria, Obras Civiles, Valparaiso.
- Lebedev, L. P., & Cloud, M. J. (2009). Introduction to Mathematical Elasticity. New Jersey, United States: World Scientific.



DISEÑO DE MUROS DE CORTE PARA EL SISTEMA PLATAFORMA EN MADERA ASERRADA. PROPUESTA PARA MODIFICACIÓN NORMA CHILENA NCH1198

SHEAR WALLS DESIGN FOR TIMBER PLATFORM FRAME SYSTEM (LIGHT FRAME). MODIFICATION PROPOSAL FOR CHILEAN STANDARD NCH1198

González, Ignacio ⁽¹⁾*; Korceck, Jorge ⁽²⁾

⁽¹⁾ Ingeniero Civil Estructural. IGR Structural Engineering. Santiago, Chile

⁽²⁾ Ingeniero Civil. Santiago, Chile

* Contacto: ignacio@igr-se.cl

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollar una metodología de diseño y a la vez proponer un capítulo en la norma NCh1198 para diseñar muros de corte en madera aserrada para el sistema plataforma. En Chile no existe en la actualidad una metodología que exponga sobre el diseño de muros de corte en madera aserrada para el sistema plataforma. Para lograr este objetivo se utilizó como referencia la norma americana SDPWS (Special Design Provisions for Wind & Seismic) edición 2015, la cual expone las verificaciones y condiciones de diseño que deben cumplir estos muros para el caso sísmico y el caso de solicitaciones de viento. Todas las verificaciones y requerimientos constructivos están adaptados para ser aplicados en Chile.

Palabras-clave: Diseño de Muros de corte, Sistema plataforma madera aserrada.

Abstract

The objective of this paper is to develop a design methodology and at the same time to propose a chapter in the NCh1198 standard to platform frame system walls design. In Chile, there is currently no methodology that exposes the design of shear timber walls for the platform system. To achieve this objective, the American standard SDPWS (Special Design Provisions for Wind & Seismic) 2015 edition was used as a reference, which exposes the verifications and design conditions that these walls must meet for the seismic case and the case of wind solicitations. All verifications and construction requirements are adapted to be applied in Chile.

Keywords: Shear walls design, Platform frame system.



1. INTRODUCCIÓN

Actualmente en Chile existe una brecha normativa que permita abordar el diseño de estructuras de madera con el sistema marco plataforma de una manera global. Si bien contamos con una normativa vigente, la NCh1198, ésta solo abarca el diseño de los elementos de forma aislada (columnas, vigas, uniones, etc.). Este trabajo pretende acortar la brecha que existe actualmente al incorporar la metodología para el diseño de muros de corte para el sistema plataforma de acuerdo a la norma americana (SDPWS 2015), para luego ser incorporada en la actualización de la norma NCh1198.

2. ESTRUCTURACIÓN GENERAL DE UN MURO DE CORTE

Un muro de corte está constituido a través por un entramado de pies derechos, soleras de amarre (una superior y otra inferior), placa arriostrante, que puede ser por una o por ambas caras, un patrón de clavado perimetral y un sistema de anclaje.

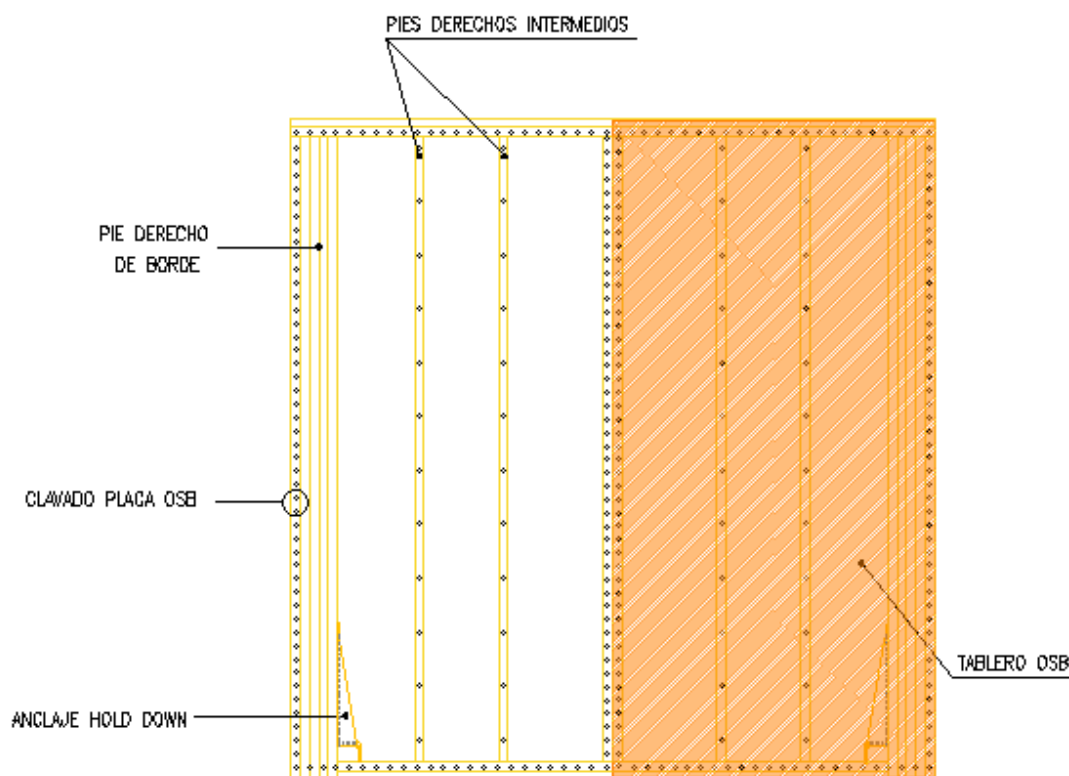
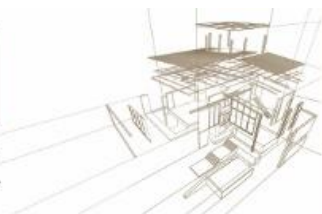


Figura 9: Estructuración de un muro de corte. Fuente: CIM UC.

Todos los elementos en conjunto entregan al sistema una rigidez lateral y vertical lo suficientemente rígidas para estructurar un edificio en media altura. En su desempeño estructural cada pieza cumple un rol importante y requiere de sus propias verificaciones, que



podrán ser calculadas a partir de las fuerzas que lleguen al muro como un elemento monolítico. (Cárcamo, 2017).

3. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

El código de diseño para el sistema marco-plataforma elaborado por la American Wood Council, específicamente el Special Design Provisions for Wind & Seismic (SDPWS, 2015), establece los requerimientos mínimos necesarios para llevar a cabo el cálculo y la verificación de muros de corte formulados en base a marcos de madera con placas laterales.

La metodología entregada considera para el cálculo de muros de corte: la deflexión debido a la flexión y la deflexión por corte, la deformación de los conectores, la elongación de los anclajes y cualquier otra fuente de deflexión (American Wood Council, 2015).

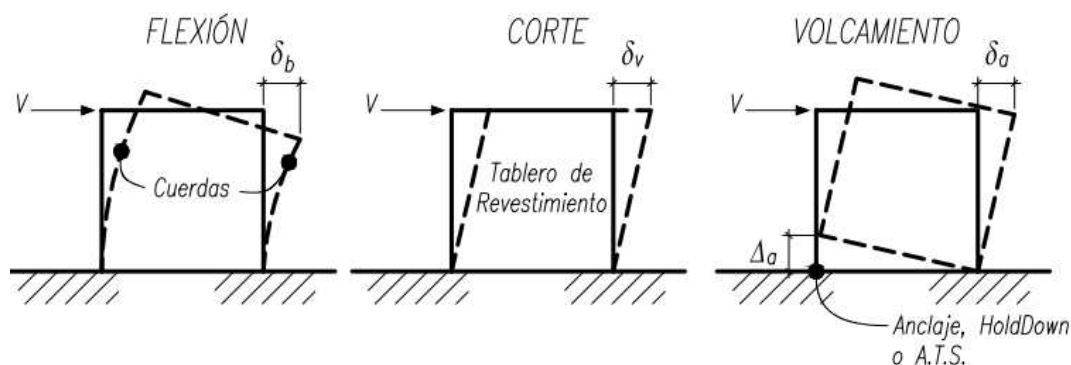


Figura 10 : Comportamiento estructural de un muro de corte. Fuente: CIM UC

Como método simplificado para muros en un plano, el código de diseño desarrollado por la American Wood Council (2015) propone que la deformación total del muro de corte se calcule como sigue:

$$\delta = \left(\frac{2}{3} * \frac{vh^3}{EAb} \right)_{Flexión} + \left(\frac{vh}{G_a} \right)_{Corte} + \left(\frac{h\Delta_a}{b} \right)_{Volcamiento} \quad (1)$$

Donde:

b : es la longitud del muro de corte, cm.

Δ_a : elongación vertical de sistema de anclajes del muro, cm.

E : Módulo de elasticidad de los pies derechos de borde, kgf/cm².

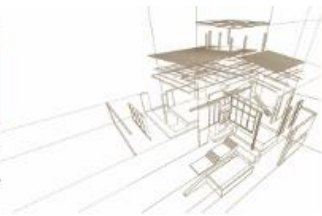
A : Área transversal de los pies derechos de borde, cm².

G_a : Módulo de corte aparente que depende de la distribución de fijaciones y la deformación por corte de las placas laterales, kgf/cm.

h : Altura del muro de corte, cm.

v : Corte inducido por unidad de longitud, kgf/cm.

δ : Máxima deflexión del muro de corte determinada a partir de un análisis elástico, cm.



4. TIPOS DE MUROS

En la norma americana existe tres tipos de metodologías para el diseño de muros de corte, cada una de estas posee sus ventajas y limitaciones. La elección de cada una de ellas depende de las condiciones de diseño.

- **Muros segmentados:** corresponden a paños de muros de altura entre pisos sin aberturas (ver Figura 11), y tienen las siguientes consideraciones o limitaciones:
 - Las secciones de muro que se encuentran por encima o por debajo de las aberturas no se consideran.
 - En los extremos de cada segmento de muro con altura total, se requieren elementos de anclaje o sujeción.
 - Se debe disponer de conectores de transferencia de esfuerzos de cortes a lo largo de toda la línea del muro.

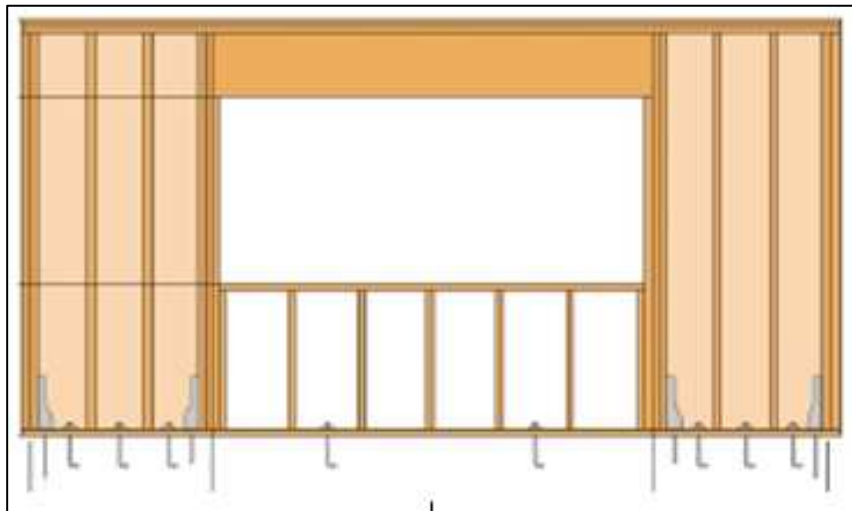


Figura 11: Muro de corte de madera segmentado. Fuente: (WoodWorks - Wood Product Council, 2016)

- **Muros perforados:** son muros con aberturas que no están diseñados para transferir esfuerzos de los segmentos adyacentes (ver Figura 12), y tienen las siguientes consideraciones o limitaciones:
 - Las secciones de muro que se encuentran por encima o por debajo de las aberturas no se consideran.
 - En los extremos de cada segmento de muro con altura total, se requieren elementos de anclaje o sujeción.
 - Se debe disponer de conectores de transferencia de esfuerzos de cortes a lo largo de toda la línea del muro.

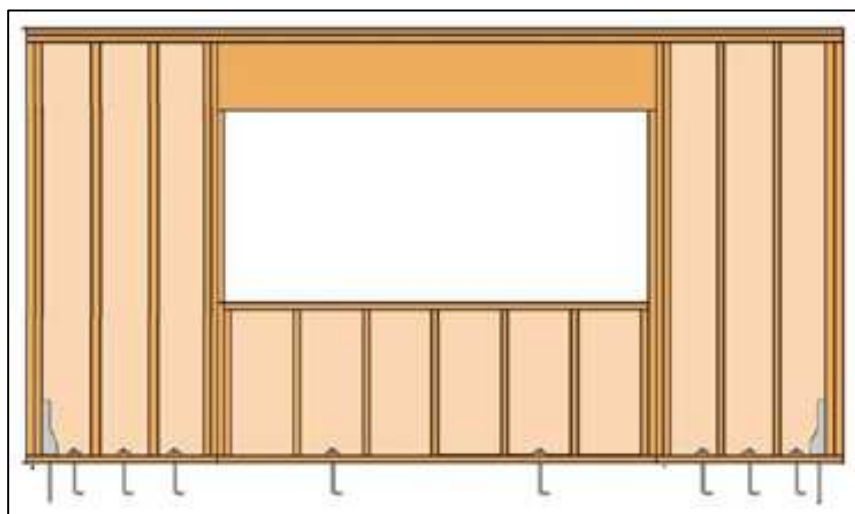
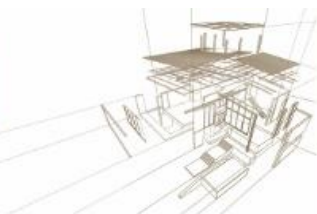


Figura 12: Muro de corte de madera perforado. Fuente: (WoodWorks - Wood Product Council, 2016)

- **Muros de acople:** son muros con aberturas que están diseñados para transferir esfuerzos de los segmentos adyacentes (ver Figura 13), y tienen las siguientes consideraciones o limitaciones
 - Deben ser segmentos de muros en toda la altura del piso a cada extremo de los muros.
 - Se deben utilizar placas metálicas para transferir el esfuerzo de tracción producido por la transferencia de cargas.
 - Se debe disponer de conectores para transferencia de esfuerzos de corte a lo largo de toda la línea del muro.

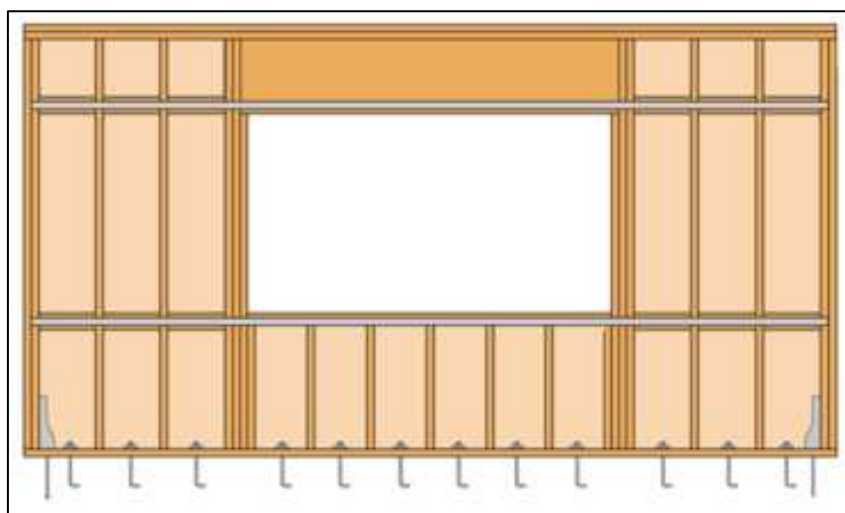
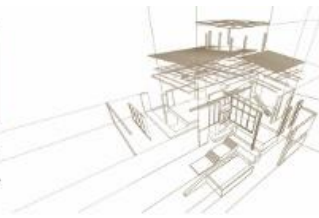


Figura 13: Muro de corte de madera acoplado por vigas y placas metálicas Fuente: (WoodWorks - Wood Product Council, 2016)

Los valores del corten nominal unitario (para los casos sísmicos y de viento) y del módulo de corte se obtienen de la tabla 4.3A de la norma SDPWS.



En ella se señalan valores de diseño para un muro arriostrado con paneles estructurales. Adicionalmente se detallan valores nominales para muros que, además de contar con el panel estructural, emplean para el sistema de arriostramiento yeso cartón. Para efectos de este trabajo solo se considerarán muros arriostrados mediante paneles estructurales de madera tipo Sheathing, tipos de clavos 6d y 8d (que son los comúnmente utilizados en Chile), y los valores están en las unidades del sistema internacional de medidas para que pueda hacerse uso a nivel nacional.

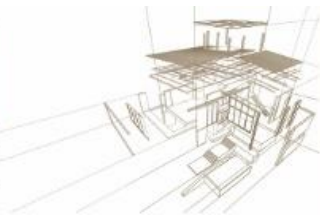
Tabla 2: Obtención valores de corte nominal unitario. Fuente: Elaboración propia.

Material de revestimiento	Espesor nominal de la placa arriostrante [mm]	Penetración mínima del sujetador en el elemento de encuadre o bloqueo [mm]	Tipo y tamaño de clavo	Caso sísmico				Caso Viento				
				Espacio entre los sujetadores del borde del				Espacio entre los sujetadores del borde del				
				150	100	75	50	150	100	75	50	
Paneles estructurales de madera - Tipo Sheathing	7,9	31,8	6d	Vs [N/mm]	Vs [N/mm]	Vs [N/mm]	Vs [N/mm]	Vw [N/mm]	Vw [N/mm]	Vw [N/mm]	Vw [N/mm]	Vw [N/mm]
	9,5			5,25	7,88	10,22	13,13	7,37	11,02	14,30	18,39	
Tipo Sheathing	9,5	35,0	8d	5,84	8,76	11,38	14,88	8,17	12,26	15,91	20,87	26,12
	11,1			6,42	9,34	11,97	15,47	8,97	13,06	16,78	21,67	
	11,9			7,00	10,22	13,13	17,07	9,78	14,30	18,39	23,93	29,93
				7,59	11,09	14,30	18,68	10,65	15,54	19,99	26,12	32,12



Tabla 3: Valores del módulo de corte. Fuente: Elaboración propia

Material de revestimiento	Espesor mínimo nominal de la placa arriostrante [mm]	Penetración mínima del sujetador en el elemento de encuadre o bloqueo [mm]	Tipo y tamaño de clavo	Módulo de corte											
				Espacio entre los sujetadores del borde del panel [mm]											
				150			100			75			50		
				OSB [N/mm]		Ga [N/mm]	OSB [N/mm]		Ga [N/mm]	OSB [N/mm]		Ga [N/mm]	OSB [N/mm]		Ga [N/mm]
Paneles estructurales de madera - Tipo	7,9	31,8	6d	OSB	PLY	OSB	PLY	OSB	PLY	OSB	PLY	OSB	PLY		
	9,5			2.277	1.864	3.152	2.101	4.203	2.452	6.479	3.152	5.604	2.977	3.502	
Sheathing	9,5	35,0	8d	OSB	PLY	OSB	PLY	OSB	PLY	OSB	PLY	OSB	PLY		
	11,1			2.277	1.489	2.627	1.926	3.502	2.277	7.880	3.677	6.830	2.977	3.502	
	11,9			OSB	PLY	OSB	PLY	OSB	PLY	OSB	PLY	OSB	PLY		
				2.277	1.751	3.327	2.277	4.378	2.627	4.903	2.977	7.355	6.830		



Como se puede observar en las tablas anteriores, los valores dependen del tipo de clavo a utilizar, el espaciamiento hacia la zona perimetral y el espesor de la placa arriostrante. Con relación al módulo de corte, se debe considerar el material de la placa arriostrante.

El cálculo de la deformación depende de los factores correctivos que se deben aplicar a los valores obtenidos de las tablas anteriormente descritas, por el cual incide de manera directa en este resultado, la metodología de diseño elegida.

5. RELACIONES DE ASPECTO Y FACTOR DE AJUSTE A LA CAPACIDAD DEL MURO DE CORTE

La medida y forma de los muros de corte estarán limitadas a las relaciones de aspecto. Como en Chile solo se trabaja con paneles estructurales de madera bloqueados, la relación de aspecto máxima permitida para los muros de corte no debe exceder la relación 3,5:1.

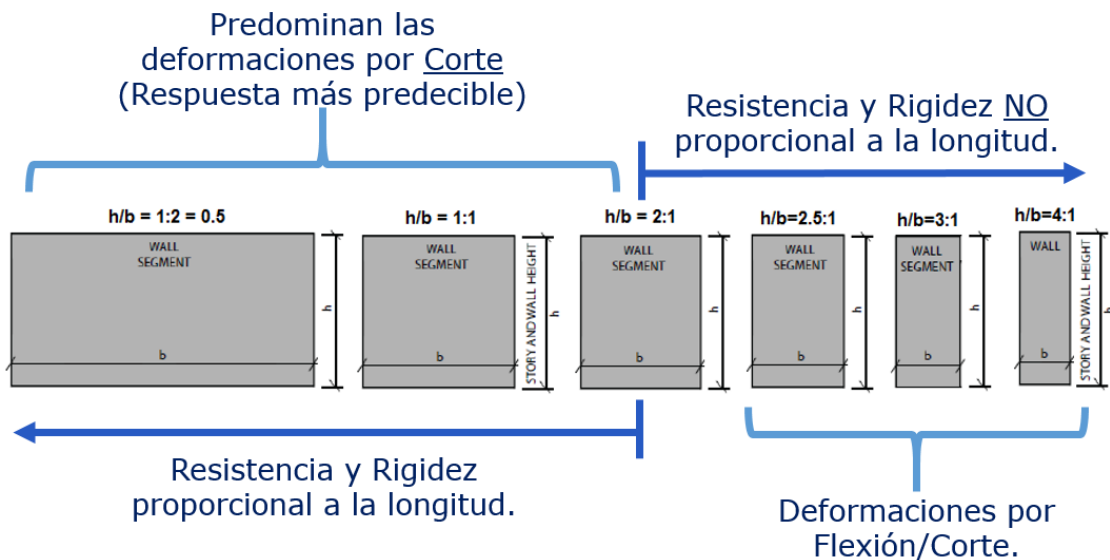


Figura 14: Relaciones de forma o aspecto h/b

5.1. Factores correctivos

Para aquellos muros de corte de madera con relaciones de aspecto mayores que 2:1, la capacidad de corte unitaria nominal deberá ser multiplicada mediante unos de los dos métodos siguientes:

5.1.1. Cálculo de deformación equivalente

Para aquellos muros de corte con panel estructural que posean una relación de aspecto mayores que 2:1, la capacidad de corte nominal unitaria se debe multiplicar por un factor de ajuste por fuerza.

$$WSP = 1,25 - 0,125h/b_s \quad (2)$$

5.1.2. Cálculo de deformación equivalente

En forma paralela, la capacidad de corte nominal unitaria de los muros de corte con panel estructural que posean una relación de aspecto mayor a 2:1, se puede multiplicar por un factor de ajuste por rigidez.

$$2b_s/h \quad (3)$$

En este caso, en la distribución de esfuerzos de corte hacia los segmentos de altura total individuales se permitirá tomar un proporcional a las capacidades de corte de los segmentos de altura total individuales usados en el diseño.

Los muros corregidos mediante este factor no deben ser corregidos por el parámetro de deformación equivalente.

5.2. Cálculo de esfuerzos de tracción y compresión

5.2.1. Para muros de corte segmentados

Los esfuerzos de tracción y compresión que debe soportar el sistema de sujeción del muro se calcula de la siguiente forma:

$$T = C = \frac{vh}{L'} \quad (4)$$

Donde:

C= Esfuerzo de compresión.

h= Altura del muro.

T= Esfuerzo de tracción.

v= Corte de diseño.

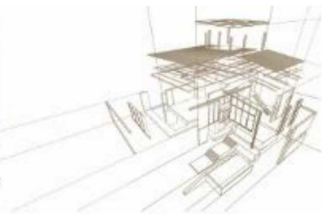
L'=distancia de anclajes

5.2.2. Para muros de corte perforados

Cada extremo del muro de corte perforado deberán ser diseñados para soportar los esfuerzos de compresión como de tensión. Estos esfuerzos se calculan mediante la expresión:

$$T = C = \frac{vh}{C_o \sum L_i} \quad (5)$$

Donde:



C_o = Factor de ajuste a la capacidad del muro de corte.

v = Corte de diseño unitario.

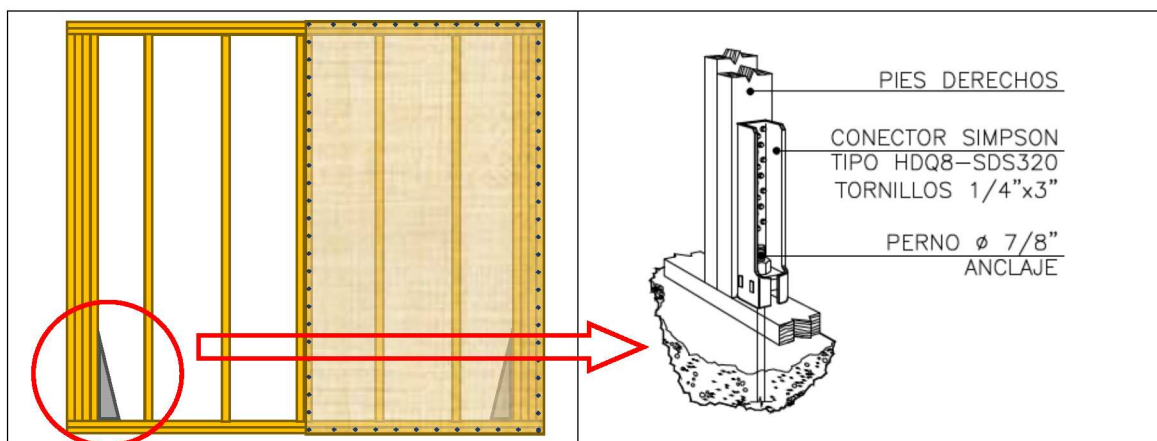
$\sum L_i$ = Sumatoria de las longitudes individuales de cada panel, descontando los largos de las ventanas y puertas.

Las longitudes con una relación de aspecto mayores que 2:1 solo se deben ajustar mediante el método de factor de ajuste.

5.3. Anclajes

Los esfuerzos de tracción y compresión que se generan en los muros de corte deben ser correctamente anclados tanto a la estructura del muro como a las fundaciones. Esto con el fin de validar el cálculo teórico de las deformaciones laterales que se indican en este documento.

Actualmente en el mercado se pueden encontrar diferentes proveedores con este tipo de soluciones de ingeniería, quienes entregan a través de catálogos la capacidad de los anclajes y sus respectivas rigideces, facilitando el diseño de los muros con el sistema plataforma.



6. CONCLUSIONES

La investigación desarrollada en este trabajo ayuda a generar una guía para el diseño de muros de corte para el sistema marco plataforma, acortando la brecha de diseño que existe actualmente para este sistema constructivo en Chile.

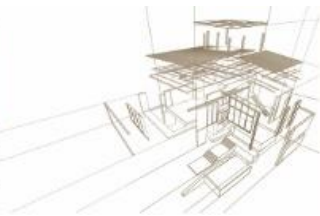
La metodología planteada en este trabajo se adapta a los requerimientos de los distintos materiales utilizados en el mercado Chileno, tales como como clavos, placas de OSB, madera aserrada, tipos de anclajes, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SDPWS (2015), Special Design Provisions for Wind & Seismic, American Wood Council.

NCh1198 Of.2014 Madera – Construcciones en madera – Cálculo. Instituto Nacional de Normalización, INN. Santiago, Chile.

Bryan D Wert, MS, PE, SECB (2016), Diseño de muros de corte según la norma SDPWS. Simpson Strong-Tie.



INFLUÊNCIA DO EFEITO DE CORDA NA RESISTÊNCIA DE PARAFUSOS NA DIREÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS DA MADEIRA

INFLUENCE OF THE ROPE EFFECT ON THE LOAD-CARRYING CAPACITY OF BOLTS LOADED PARALLEL TO THE GRAIN

Dias, Antonio Alves ⁽¹⁾ *; Trevisan, João Vitor Kochinski ⁽²⁾; Johanns, Felipe Penazzo ⁽³⁾

² Prof. Associado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos-SP, Brasil

² Eng. Civil (graduação). Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo. São Carlos-SP, Brasil

¹ Eng. Civil (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo. São Carlos-SP, Brasil

1 Contacto: dias@sc.usp.br

Resumo

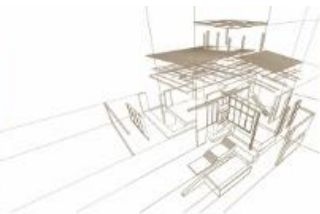
A revisão da norma brasileira “ABNT: NBR7190-Projeto de Estruturas de Madeira” se encontra em fase final, e foram feitas alterações significativas nos critérios de dimensionamento de ligações que, na nova versão, são baseados nos critérios do EUROCODE-5, que possibilitam considerar a influência do efeito de corda, em elementos de ligação metálicos do tipo pino carregados lateralmente. No caso de parafusos passantes, a consideração desse efeito possibilita aumentar em até 25% a parcela de resistência calculada pela teoria de Johansen para os modos de ruptura que envolvam a flexão do pino. Para avaliar a influência do efeito de corda para esse tipo de elemento, foi desenvolvido trabalho experimental que utilizou duas espécies de madeira: Roxinho (*Peltogyne spp*) de alta densidade, e Marupá (*Simarouba amara* Aubl.) de baixa densidade. Os parafusos foram confeccionados a partir de barras de aço SAE 1020, com diâmetros iguais a 10 mm e 16 mm. Os testes foram feitos em corpos de prova com 4 parafusos em corte duplo, as espessuras das peças de madeira foram 50 mm, para a peça central, e 25 mm, para as peças laterais, e o carregamento foi aplicado na direção paralela às fibras da madeira. Para cada espécie de madeira/diâmetro do parafuso foram feitos 12 ensaios, sendo metade sem o uso de porcas e arruelas. Os resultados obtidos indicaram que a contribuição do efeito de corda deve ser considerada na avaliação da resistência de parafusos passantes com porcas e arruelas.

Palavras-chave: parafusos, efeito de corda, resistência de parafusos.

Abstract

The revision of the Brazilian standard "ABNT: NBR7190-Projeto de estruturas de madeira" is in the final phase, and significant changes have been made in the design criteria of connections, which in the new version are based on the EUROCODE-5 criteria which allow consider the influence of the rope effect in the lateral load-carrying capacity of metal dowel-type fasteners. In the case of bolts, the contribution to the load-carrying capacity due to the rope effect can increase up to 25% the part calculated by Johansen's theory for the failures modes related to the bolt bending. In order to evaluate the influence of the rope effect for bolts, experimental work was carried out using two species of wood: Roxinho (*Peltogyne spp*) of high density, and Marupá (*Simarouba amara* Aubl.) of low density. The bolts were made from SAE 1020 steel bars, with diameters equal to 10 mm and 16 mm. The tests were done on specimens with four bolts in double shear, the thicknesses of the wood pieces were 50 mm for the centerpiece and 25 mm for the sidepieces, and the loading was applied in the direction parallel to the grain of wood. For each species of wood/bolt diameter, 12 tests were done, half of which were without the use of nuts and washers. The results indicated that the contribution of the rope effect should be considered in the evaluation of the load-carrying capacity of of bolts with nuts and washers..

Keywords: bolts, rope effects, load-carrying capacity of bolts.



1. INTRODUÇÃO

Atualmente em fase de conclusão, o projeto de revisão da ABNT NBR 7190:1997 baseou seus critérios de dimensionamento de ligações por parafusos passantes no Eurocode 5:2004.

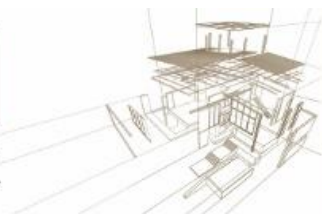
O modelo de cálculo utilizado pela norma europeia para estimar a capacidade de carga da ligação de parafusos passantes é fundamentado na teoria desenvolvida inicialmente por Johansen (1949), definindo quatro possíveis modos de ruptura associados à situação de corte duplo. Assim, a capacidade de carga da ligação por plano de corte ($F_{v,Rk}$) pode ser obtida por meio da Equação 1, em que os casos (a) e (b) representam o esgotamento da capacidade resistente da ligação ocasionado pelo embutimento do parafuso nas peças de madeira, e os casos (c) e (d) são associados à flexão do parafuso metálico.

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d & \text{(a)} \\ 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d & \text{(b)} \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(c)} \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(d)} \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

- $f_{h,1,k}$: resistência ao embutimento das peças externas;
- $f_{h,2,k}$: resistência ao embutimento da peça interna;
- t_1 : espessura das peças externas;
- t_2 : espessura da peça interna;
- d : diâmetro do parafuso passante;
- β : parâmetro adimensional dado pela razão entre as resistências ao embutimento das peças de madeira interna e externas;
- $M_{y,Rk}$: momento resistente do parafuso passante.

Nos casos (c) e (d), o primeiro termo da equação representa a capacidade de carga da ligação estimada pela teoria de Johansen (1949), com acréscimos de 5% e 15% relativos ao atrito gerado após a rotação do parafuso, Porteous e Kermani (2007). O segundo termo, por sua vez, representa um efeito de segunda ordem denominado efeito de corda, e a resistência ao arrancamento do pino metálico ($F_{ax,Rk}$) pode ser obtida por meio da Equação 2. Destaca-se, ainda, que o Eurocode 5:2004 estabelece limites para a representatividade do efeito de corda sobre a capacidade de carga da ligação que, no caso de parafusos passantes, não deve ser superior a 25% do valor obtido na primeira parcela.



$$F_{ax,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{u,k} \cdot A_p \\ 3 \cdot f_{c,90,k} \cdot A_c \end{array} \right. \quad (2)$$

Onde:

- $f_{u,k}$: resistência à tração última do parafuso;
- $f_{c,90,k}$: resistência à compressão da madeira na direção perpendicular às fibras;
- A_p : área da seção transversal do parafuso;
- A_c : área de contato entre a arruela e a peça de madeira.

Tendo em vista que tal processo de cálculo foi adotado pelo projeto de revisão da ABNT NBR 7190:1997, estudos direcionados a avaliar sua aplicabilidade no âmbito das espécies de madeiras brasileiras tornam-se necessários, uma vez que as espécies de madeiras empregadas na Europa possuem resistência e densidade inferiores às brasileiras.

No que diz respeito ao efeito de corda, Silva Jr. e Góes (2016) ensaiaram protótipos de ligações entre peças de madeira realizadas por meio de parafusos passantes com 12 mm de diâmetro. Os corpos de prova foram confeccionados a partir das espécies Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e Caixeta (*Tabebuia cassinoides*), e os resultados do experimento são apresentados na Tabela 1. É possível observar que o processo de cálculo proposto pelo Eurocode 5:2004 com a consideração do efeito de corda foi o que melhor estimou a capacidade de carga da ligação, apresentando, porém, maior divergência entre os resultados teórico e experimental no caso da espécie Caixeta, de menor densidade.

Tabela 1: Capacidades de carga teórica e experimental da ligação.

Espécie	Densidade $\rho_{12\%}$	Eurocode 5 (sem efeito de corda)	Eurocode 5 (com efeito de corda)	Resultado experimental
Garapeira	740,0 kg/m ³ CV=1,4%	124,1 kN	153,5 kN	177,8 kN CV = 5,2%
Caixeta	410,0 kg/m ³ CV=2,6%	63,2 kN	78,2 kN	108,5 kN CV = 2,7%

Fonte: Silva Junior e Góes (2016)

Com base no exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a contribuição da parcela de resistência advinda do efeito de corda para duas espécies de madeiras com densidade e resistência muito diferentes, Roxinho (*Peltogyne* spp) e Marupá (*Simarouba amara* Aubl.), sendo a primeira uma espécie de alta densidade, e a segunda de baixa densidade, ambas folhosas e provenientes da região amazônica.



2. METODOLOGIA

Foram utilizadas três peças de madeira da espécie Roxinho e 6 peças de madeira da espécie Marupá, numeradas de 1 a 6 em cada espécie. Cada peça de madeira foi caracterizada quanto à resistência na compressão paralela às fibras, densidade e ao teor, de acordo com os procedimentos do Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, utilizando três corpos de prova para cada peça e tipo de ensaio.

Também foi determinada a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras, utilizando três corpos de prova para cada peça. Esses testes foram realizados de acordo com as prescrições da EN 383:2007, para ambos os diâmetros de parafuso utilizados, isto é, 10 mm e 16 mm. As dimensões dos corpos de prova são compatíveis com as exigências dessa norma, e a espessura nominal foi tomada igual a 2d. Na Figura 1 está mostrado um ensaio de embutimento, para a espécie Roxinho. O deslocamento relativo foi obtido com relógio comparador com resolução de centésimo de milímetro.

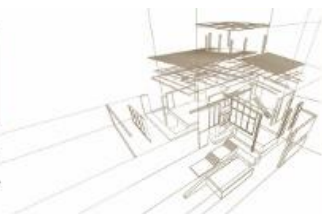
Os parafusos utilizados nos ensaios de embutimento e para a confecção dos protótipos das ligações foram obtidos a partir de barras de aço SAE 1020, com diâmetros (d) iguais a 10 mm e 16 mm. A resistência última da barra de aço (f_u), determinada em ensaio de tração foi 564 MPa. Os diâmetros externo e interno das arruelas utilizados foram iguais a 25 mm e 10,5 mm (para d=10mm), e 38 mm e 17 mm (para d=16 mm).



Figura 1: Ensaio de embutimento na direção paralela às fibras

Foram montados e testados 48 protótipos de ligações, todos com forças aplicadas na direção paralela às fibras. De cada peça de madeira foram feitos 4 protótipos com as seguintes denominações e características:

- d=10 mm-SEM: quatro parafusos (d=10 mm); sem porcas e arruelas;



- d=10 mm-COM: quatro parafusos (d=10 mm); com porcas e arruelas;
- d=16 mm-COM: quatro parafusos (d=16 mm); com porcas e arruelas.

Um protótipo de ligação confeccionado a partir da espécie de madeira Roxinho e parafusos com 16 mm de diâmetro com porcas e arruelas, pode ser observado na Figura 2.



Figura 2: Exemplo de protótipo da ligação.

Em cada protótipo, a peça de madeira central possuía dimensões nominais iguais a 50 x 120 x 250 mm, e as duas peças laterais 25 x 120 x 250 mm. Foram utilizados os mesmos espaçamentos para os dois diâmetros de parafusos, que obedeceram aos espaçamentos mínimos da norma ABNT: NBR 7190/97, como mostrado na Figura 3.

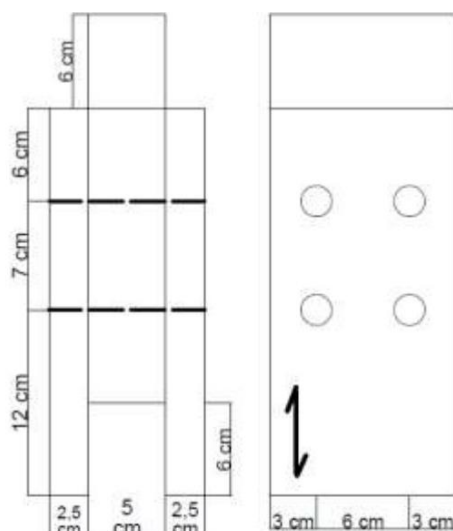
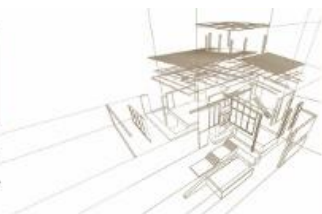


Figura 3: Espaçamentos entre parafusos e as bordas das peças.

Na Figura 4 está mostrado o aparato utilizado em dois testes de protótipo. Os testes foram realizados de acordo com a proposta da ABNT PN 02:126.10-001-4: Método de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores



mecânicos em estruturas de madeira, que é baseado na norma ISO 6891/1983: Timber structures-Joints made with mechanical fasteners-General principles for the determination of strength and deformation characteristics. O deslocamento relativo entre as peças de madeira central e laterais foi medido na linha referente ao centro da ligação, utilizando dois relógios comparadores com resolução de 1 centésimo de milímetro, em duas faces opostas.



Figura 4: Ensaio de protótipos da ligação

5. RESULTADOS E ANÁLISE

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados obtidos para os valores de umidade e densidade aparente (para umidade igual a 12%), para cada peça de madeira utilizada.

Tabela 2: Valores de umidade e densidade.

Peça	Roxinho		Marupá	
	U (%)	ρ_{12} (kg/m ³)	U (%)	ρ_{12} (kg/m ³)
1	11,1	850	12,0	400
2	13,6	910	12,5	430
3	12,1	910	11,7	440
4	12,1	870	11,9	430
5	12,2	930	11,7	400
6	11,9	940	11,5	400



Na Tabela 3 estão apresentados os valores médios obtidos para a resistência na compressão paralela às fibras (f_{c0}) e os coeficientes de variação (CV), para cada peça.

Tabela 3: Resistência na compressão paralela às fibras (f_{c0})

Peça	Roxinho		Marupá	
	f_{c0} (MPa)	CV (%)	f_{c0} (MPa)	CV (%)
1	86,5	1,8	29,2	2,2
2	100,1	1,0	30,3	0,4
3	82,1	2,5	36,1	9,6
4	81,7	2,2	35,8	2,8
5	79,6	2,6	37,2	1,1
6	105,1	0,1	35,4	1,4

Na Tabela 4 estão apresentados os valores médios da resistência ao embutimento na direção paralela às fibras (f_h) e os coeficientes de variação, para cada peça.

Tabela 4: Resultados experimentais da resistência ao embutimento (f_h)

Peça	Roxinho				Marupá			
	d = 10 mm		d = 16 mm		d = 10 mm		d = 16 mm	
	f_h (MPa)	CV (%)	f_h (MPa)	CV (%)	f_h (MPa)	CV (%)	f_h (MPa)	CV (%)
1	86,4	5,4	83,1	2,4	33,3	7,2	24,1	5,2
2	115,7	1,6	95,8	9,5	35,4	2,8	26,6	2,7
3	103,6	1,3	96,4	3,2	39,2	0,6	33,8	2,3
4	87,4	1,8	80,7	2,2	38,1	0,5	29,0	3,7
5	90,1	3,0	80,8	7,1	30,3	4,3	31,1	3,4
6	112,2	1,9	100,5	0,4	29,2	3,4	28,3	3,6

Na Tabela 5 estão mostrados os valores obtidos para a força última (F_{ult}) aplicada nos ensaios dos protótipos de ligações, e a média e coeficiente de variação em cada grupo.

Tabela 5: Valores da Força Última (F_{ult}) das ligações (experimental)

Peça	F_{ult} (kN)							
	Roxinho				Marupá			
	d = 10 mm		d = 16 mm		d = 10 mm		d = 16 mm	
	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM
1	86,0	152,0	160,0	208,0	43,5	74,5	76,5	90,5
2	113,5	150,0	201,5	235,5	44,5	75,0	84,5	92,0
3	105,0	141,0	185,0	239,5	52,0	83,5	111,0	115,0
4	74,5	103,0	150,0	199,0	52,5	72,5	89,0	93,5



5	85,0	133,5	165,0	202,0	51,0	80,0	80,0	104,5
6	109,0	140,0	195,0	247,5	51,0	79,5	70,5	80,5
Média	95,5	136,6	176,1	221,9	49,1	77,5	85,3	96,0
CV	15%	12%	11%	9%	7%	5%	15%	11%

Na Tabela 6 estão apresentados os ganhos de resistência proporcionado pelo uso de porcas e arruelas, em relação ao caso em que não há essa providência, obtidos experimentalmente. São apresentados os ganhos observados em cada peça de madeira, e o valor médio.

Tabela 6: Ganho de resistência devido ao uso de porcas e arruela (experimental)

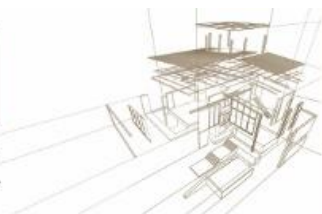
Peça	Roxinho		Marupá	
	d = 10 mm	d = 16 mm	d = 10 mm	d = 16 mm
1	77%	30%	71%	18%
2	32%	17%	69%	9%
3	34%	29%	61%	4%
4	38%	33%	38%	5%
5	57%	22%	57%	31%
6	28%	27%	56%	14%
Média	43%	26%	58%	13%

Na Tabela 7 estão apresentados os valores teóricos para a força última (F_{ult}) da ligação, definidos a partir dos resultados de resistência obtidos pela Equação 1. Para a obtenção desses valores teóricos de resistência foram utilizadas as espessuras e as resistências ao embutimento obtidos para cada peça (Tabela 4), e a resistência última do aço dos parafusos ($f_u = 564$ MPa) determinada em ensaio de tração.

Comparando os resultados das Tabelas 5 e 7, verifica-se que os critérios teóricos foram apropriados para estimar os valores experimentais, sendo que estes foram superiores na maioria dos casos. Em apenas 3 casos o valor experimental foi menor do que 95% do valor obtido teoricamente.

Tabela 7: Valores da Força Última (F_{ult}) das ligações (teórico)

Peça	F_{ult} (kN)							
	Roxinho				Marupá			
	d = 10 mm		d = 16 mm		d = 10 mm		d = 16 mm	
	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM
1	82,0	102,3	159,1	199,0	42,83	53,2	78,9	77,9
2	104,3	130,1	175,0	219,8	44,4	55,4	83,0	86,5



3	91,5	117,0	173,8	217,1	46,9	58,6	94,2	108,7
4	82,8	103,4	156,4	194,6	46,04	57,7	86,7	93,8
5	85,4	106,5	157,5	196,4	40,0	50,0	90,0	101,0
6	102,8	129,1	183,1	228,3	39,1	48,8	85,6	91,7

Na Tabela 8 estão apresentados os ganhos de resistência proporcionado pelo uso de porcas e arruelas, em relação ao caso em que não há essa providência, obtidos de forma teórica (Tabela 7). Analisando os dados da Tabela 8, pode-se concluir que, pelos critérios da norma, em quase todos os casos o modo de falha predominante foi por flexão do pino, com exceção de 1 caso (Marupá, 16 mm, peça 1), pois apenas nesse tipo de falha o efeito de corda pode proporcionar ganho de resistência, no caso do uso de porcas e arruelas. Entretanto, é importante destacar que esse ganho é limitado a 25% do valor da primeira parcela das Equações 1(c) e 1(d).

Tabela 8: Ganho de resistência devido ao uso de porcas e arruela (teórico)

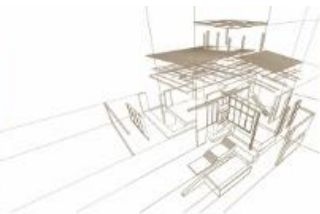
Peça	Roxinho		Marupá	
	d = 10 mm	d = 16 mm	d = 10 mm	d = 16 mm
1	25%	25%	24%	-
2	25%	25%	25%	4%
3	25%	25%	25%	15%
4	25%	24%	25%	8%
5	25%	25%	25%	12%
6	25%	25%	25%	7%

Os resultados experimentais apontaram essa característica (Tabela 6). Nos casos da espécie Roxinho (diâmetros 10 e 16 mm) e Marupá (diâmetro 10 mm), apenas dois resultados de ganho foram inferiores a 25%. No caso da espécie Marupá (diâmetro 16 mm), situação em que ocorreram falhas mais próximas do embutimento da madeira (grande diâmetro do parafuso e menor densidade da madeira), apenas em dois casos (peças 3 e 4) o ganho experimental foi inferior ao ganho esperado teoricamente.

4. CONCLUSÃO

Os ensaios experimentais para determinação da resistência em ligações de estruturas de madeiras proporcionaram a avaliação do efeito de confinamento dos pinos. Em todos os ensaios de protótipos com porcas e arruelas a resistência apresentada foi maior em relação aos protótipos sem porcas e arruelas.

Os critérios de dimensionamento normativos foram apropriados para estimar os valores experimentais na maioria dos casos. Em apenas 3 casos o valor experimental foi menor do que 95% do valor obtido teoricamente.



A limitação de aumento pelo efeito de corda em 25 % do valor da primeira parcela das equações referentes aos modos de falha por flexão do pino mostrou ser conservadora para os testes, obtendo-se ganhos experimentais superiores.

Tendo em vista os resultados obtidos no trabalho, pode-se concluir que o efeito de corda deve ser considerado na resistência de ligações com parafusos com porcas e arruelas, e que o critério normativo a ser estabelecido na ABNT: NBR7190 é apropriado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pela concessão de bolsas e apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto e participação no evento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro.

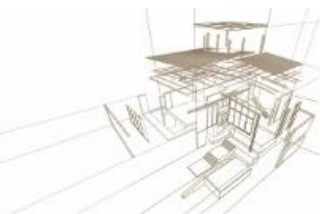
Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). PNBR ISO 6891- 02:126.10-001-4 Método de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos em estruturas de madeira. São Carlos.

European Committee for Standardization (2004). Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: general rules and rules for buildings. Brussels: CEN.

Johansen, K.W. (1949). Theory of timber connections. International Association for Bridge and Structural Engineering, v.9.

Porteous, J.; Kermani, A. (2007). Structural Timber Design to Eurocode 5. Malden: Blackwell Publishing.

Silva Jr., J.; Góes, J.L.N. (2016). Avaliação experimental da resistência de ligações em madeira com parafusos passantes em corte duplo. Anais do XV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Curitiba, março.



GRIDSHELL CONFECCIONADO COM MADEIRA DE EUCALYPTUS GRIDSHELL COMBINED WITH EUCALYPTUS WOOD

Anderson D. da Fé ^{(1)*}, Julio C. Molina ⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Guaratinguetá, Brasil

⁽²⁾ Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. UNESP. Guaratinguetá, Brasil

* Contacto: Anderson D. da Fé: anderson.diego_07@hotmail.com

Resumen

As *Gridshells* são estruturas leves em forma de casca, que oferecem a possibilidade de alcançar grandes vãos livres, além de apresentar uma ampla variedade de formas arquitetônicas. No entanto, no Brasil, não são encontrados registros de construção de estrutura *Gridshell*, seja permanente ou demonstrativa, além de que informações bibliográficas sobre este tipo de estrutura são bastante escassas, principalmente sobre seu comportamento estrutural. Neste trabalho, são apresentados os principais tópicos teóricos, seu contexto histórico, os detalhes de projeto, assim como evidenciado o acompanhamento da execução de uma estrutura *Gridshell*, construída em madeira em escala real, com dimensões totais de 10 m x 10 m, na UNESP campus de Itapeva/SP. Na construção da estrutura utilizou-se uma configuração de malha quadrangular plana, formada por ripas duplas de madeira de Lyptus (Classe D40), unidas ortogonalmente entre si por parafusos com diâmetro de 6,35 mm. A malha plana foi deformada até a obtenção da forma curva desejada e, posteriormente, travada por contraventamentos diagonais e fixada verticalmente nos elementos de fundação executados propriamente para receber a estrutura. Após a execução do projeto, foi realizado uma simulação numérica para conhecimento dos esforços atuantes na estrutura. O desenvolvimento prático da estrutura permitiu avaliar e reconsiderar as variáveis relacionadas ao controle da forma da estrutura durante as fases de montagem e à otimização das estratégias executivas. Além disso, enriquece a literatura nacional sobre o tema, reforçando e ampliando o leque de aplicações da madeira em estruturas.

Palabras-clave: Gridshell; estruturas de madeira; Eucalyptus; simulação numérica.

Abstract

Gridshells are light shell-shaped structures that offer the possibility of reaching large free spans, as well as presenting a wide variety of architectural forms. However, in Brazil, no records of the construction of this type of structure, either permanent or demonstrative, are found, and bibliographical information on this type of structure is scarce, especially on its structural behavior. In this work, the main theoretical topics, their historical context, the details of design are presented, as well as the monitoring of the execution of a gridshell structure, constructed in wood in real scale, with total dimensions of 10 mx 10 m, in the UNESP campus of Itapeva / SP. In the construction of the structure a square quadrangular mesh configuration was used, formed by double slats of Lyptus wood (Class D40), orthogonally joined together by screws with a diameter of 6.35 mm. The flat mesh was deformed until obtaining the desired curved shape and, subsequently, braked by diagonal bracings and fixed vertically in the foundation elements executed properly to receive the structure. After the execution of the project, a numerical simulation was carried out to know the structural forces. The practical development of the structure allowed to evaluate and reconsider the variables related to the control of the structure shape during the assembly phases and to the optimization of the executive strategies. In addition, it will enrich the national literature on the subject, reinforcing and expanding the range of wood applications in structures.

Keywords: Gridshell; wood structures; Eucalyptus; numerical simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Desde os primórdios de sua existência, o homem se encontra em constante evolução na busca de satisfazer as necessidades de abrigo, priorizando, num primeiro momento, a proteção contra fatores da natureza - como chuva, vento e frio – e dada as evoluções das técnicas construtivas, possibilitando atentar para outros aspectos, como conforto, criando uma identidade cultural significativa, consolidando as características de um determinado povo, região, crença e época. Boa parte das evoluções dos sistemas construtivos é resultado não somente de conceitos empíricos, mas principalmente da capacidade intelectual do homem em desenvolver o conhecimento científico e conciliá-lo com as necessidades, podendo aperfeiçoar e harmonizar aspectos estéticos arquitetônicos (CARVALHO, 2015).

Na antiguidade, o emprego de abóbodas e cúpulas gerou um marco da engenharia e arquitetura, fazendo com que, apesar de utilizar materiais sólidos de peso considerável, se alcançasse vãos maiores conciliados com estruturas mais leves, além de fazer com que colunas pudessem ser mais esbeltas e paredes mais delgadas (MASSARA, 2002). Com o desenvolvimento de novas técnicas e tecnologias, sistemas construtivos mais leves e eficientes foram descobertos, fazendo com que as estruturas tivessem desempenho eficaz aliado à necessidade de menores quantias de matéria prima.

Em coerência com às evoluções e desenvolvimentos tecnológicos, as técnicas construtivas inovadoras prezam pela conformidade com a essência da engenharia, buscando otimizar a máxima eficiência com o mínimo de recursos possíveis. Neste contexto, podemos destacar as *Gridshells* como uma técnica bastante útil e arrojada, com comportamento estrutural análogo ao das abóbodas e cúpulas (CAFFARELLO, 2016).

De acordo com Bouhaya, apesar das *Gridshells* não serem um sistema construtivo muito empregado e de grande conhecimento da população em geral, sua origem ocorreu ainda no século XIX, em 1897 (2010 apud CARVALHO, 2015). A primeira estrutura do tipo *Gridshell* com dimensões consideráveis que utiliza a madeira como matéria prima foi construída em 1975, na cidade de *Mannheim*, na Alemanha, para a *Bundesgartenschau* – uma feira de exposição hortícola – por Frei Otto e Edmund Happold (PAOLI, 2007 ; CARVALHO, 2015).

Figura 1: Imagem da primeira Gridshell durante sua execucao em 1897

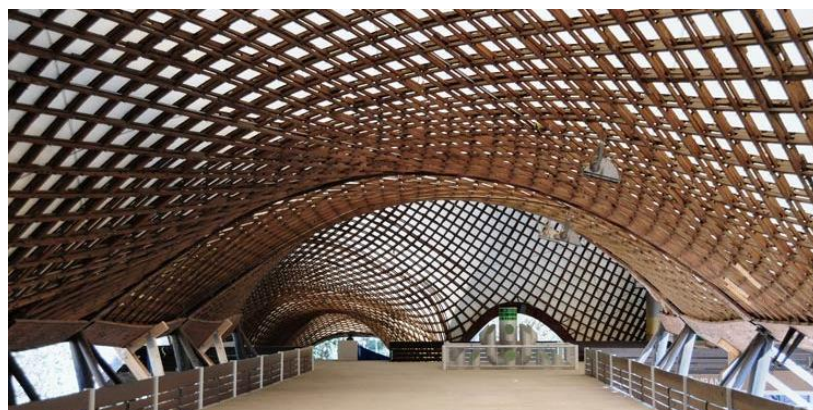
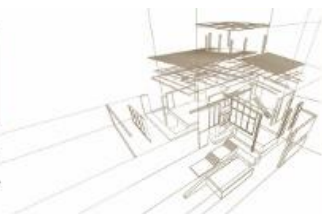


Figura 2: Vista interna da Mannheim Multihalle Gridshell, Alemanha (Fonte: FASP+EPP)

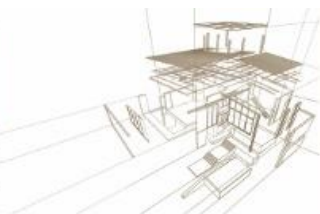
O sistema *Gridshell* cativa também pela grande variabilidade de materiais que podem ser utilizados, além da madeira, o aço, o alumínio, plástico e compósitos, por exemplo (CAFFARELLO, 2016). De acordo com Caffarello (2016), apesar de ser um material utilizado desde a antiguidade, a madeira se mostra bastante versátil, tendo a capacidade de se “reinventar”, “adequando-se” com o desenvolvimento de novas técnicas e sistemas construtivos, principalmente no sistema *Gridshell*, em que se aproveita diversas características próprias da madeira.

Conforme relatos de Kuijvenhoven (2009 apud CAFFARELLO, 2016), a vantagem do uso da madeira é pela redução dos impactos sobre os recursos naturais e tempo de construção, facilidade em se conseguir a adequação das formas complexas graças à possibilidade da grade poder ser deformada por dobragem.

Ferreira e Calil Junior (2002) afirmam que podem ser ponderadas outras vantagens no emprego da madeira em estruturas de *Gridshell*, como:

- Industrialização do processo de fabricação de construções;
- Sustentabilidade;
- Variabilidade do comprimento das peças de acordo com a necessidade relatada em projeto, possibilitando o uso de madeiras de reflorestamento;
- Possibilidade de grandes vãos sem a necessidade de apoios verticais entre os apoios de sua extremidade;
- Padronização e controle dos elementos constituintes da construção;
- Leveza do material;
- Alta resistência;
- Contrariando a crença popular, grandes elementos de madeira, tem boa resistência ao fogo.

Podemos ampliar ainda mais o leque de vantagens da *Gridshell* quando consideramos que devido à capacidade de armazenar carbono, a flora tem respeitável importância no controle climático, dado que o dióxido de carbono – CO₂ – da atmosfera é absorvido



pelas árvores, sendo liberado o oxigênio para a atmosfera e armazenado o carbono durante seu crescimento em suas folhas, raízes e lenho, apenas o liberando para atmosfera quando apodrecem na natureza (GREEN, 2012 apud KUNZ, SILVA, SILVA 2016). Desta forma, a madeira também se apresenta como uma opção eficiente na procura da redução dos impactos nas mudanças físico-climáticas que a construção civil pode causar, visto que o ciclo de armazenamento de carbono pode ser recomeçado quando se faz o reflorestamento da área em que a madeira fora extraída (N.W, 2012 apud KUNZ, SILVA, SILVA 2016).

Apesar de ser um sistema originado ainda no século XX, além das mais diversas vantagens apresentadas, a aplicação das *Gridshells* ainda é pouco frequente e desconhecida até mesmo por profissionais da área, sendo a quantia construída relativamente baixa (CAFFARELLO, 2016).

Durante muitas décadas no Brasil os exemplos de construção em madeira geraram uma visão negativa da madeira como material estrutural pela utilização incorreta do material. Nesse sentido, há a necessidade imediata de maior divulgação das possibilidades de construção em madeira através de exemplos de estruturas demonstrativas diferentes das convencionais como pontes, telhados entre outras. A madeira quando bem utilizada é bastante competitiva com os outros materiais utilizados como alternativas de construção, como o aço e o concreto.

Apesar das estruturas do tipo *Gridshell* não serem comumente encontradas no Brasil, alguns países da Europa, como Alemanha e Itália, possuem uma maior utilização da técnica. É muito comum nos países com tradição em madeiras a utilização de madeiras de pinus na construção de estruturas deste tipo. No entanto, as espécies de pinus encontradas no Brasil apresentam muitos defeitos próprios e por se tratar de uma estrutura em forma de cúpula existe um grande risco de ruptura da madeira nas regiões com presença de nós por exemplo.

A utilização de madeiras de Eucalyptus na construção da estrutura de *Gridshell* busca diminuir os defeitos na estrutura e principalmente aumentar a sua resistência e eficiência durante sua construção. Pretende-se também melhorar a distribuição das tensões nas regiões das ligações metálicas que são os pontos mais críticos das estruturas de madeira.

Através da construção da estrutura do tipo *Gridshell*, montada no Campus da UNESP de Itapeva, foi possível estudar o comportamento da madeira de Eucalyptus do ponto de vista físico e mecânico assim como verificar os principais problemas e dificuldades na construção da estrutura.

Este trabalho tem por objetivo projetar o sistema estrutural *Gridshell*, estudar os materiais (aço e madeira de Eucalyptus) utilizados na sua confecção, e acompanhar as etapas de produção do sistema como um todo, desde a fundação até a cobertura completa.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre as *Gridshells* para um maior embasamento teórico, sendo fundamentada pela literatura nacional e internacional sobre



o assunto. Posteriormente, utilizou-se do embasamento teórico para a construção de uma estrutura de *Gridshell*.

Gridshell é um sistema construtivo composto por uma estrutura com seu formato em curvatura, como uma casca, consistindo em uma malha elástica, tendo por base a deformação de uma grelha plana de ripas contínuas relativamente longas e de pouca espessura (FIGURA 3), sendo estabelecida a estrutura flexionando as ripas e deformando a grelha para a obtenção da superfície curva desejada (FIGURA 4) apertando os nós para que a estrutura consiga rigidez diagonal (FERREIRA, 2002).

A grelha (ou malha) pode ser composta por elementos curtos conectados por nós de conexão ou realizando a flexão de barras (ou ripas) contínuas que se interceptam formando losangos, fazendo a flexão ou içamento até se atingir a formação desejada e posteriormente a fixação dos nós (TOUSSAINT, 2012 apud KUNZ, SILVA, SILVA 2016).

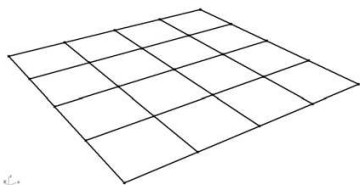


Figura 3: Representação da grelha plana
Fonte: Toussaint, 2007

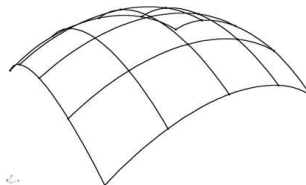


Figura 4: Representação da grelha curvada
Fonte: Toussaint, 2007

A grelha plana de ripas pode ser com camadas simples ou duplas, que são fixadas em suas interseções por nós com encaixe pela parte externa (FIGURA 5) ou com parafusos internos (FIGURA 6), que são apertados posteriormente para consolidação da estrutura (CARVALHO, 2015).

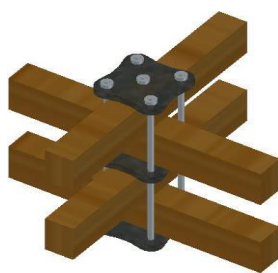


Figura 5: Ligação com encaixe na parte externa. Fonte: Carvalho, 2015

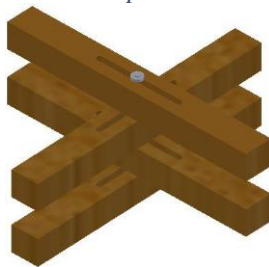
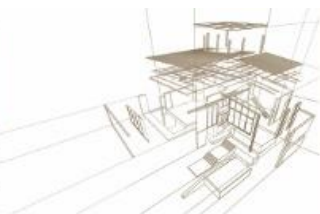


Figura 6: Ligação com parafusos internos
Fonte: Carvalho, 2015



Conforme relatos de Kunz e Prauchner (2015), a malha contínua faz com que as cargas sejam distribuídas pela extensão da *Gridshell* sendo transferidas para as bordas externas, consolidando um sistema rígido.

3. RESULTADOS

3.1. Projeto

A planta baixa da estrutura foi obtida através da utilização do *software* AutoCAD® AUTODESK. Na Figura 7 tem-se o desenho da estrutura de *Gridshell* e na Figura 8, a estrutura do *Gridshell* com os contraventamentos a serem considerados para manter a estrutura em forma de cúpula somente com quatro apoios laterais e sem a utilização de apoios intermediários no meio do vão:

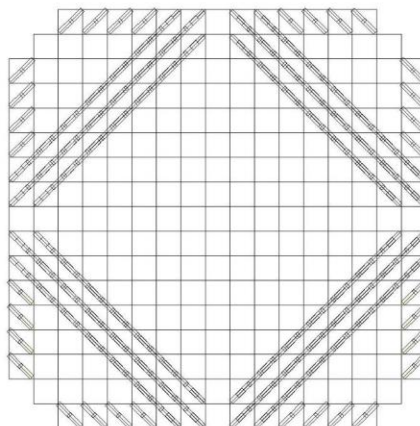
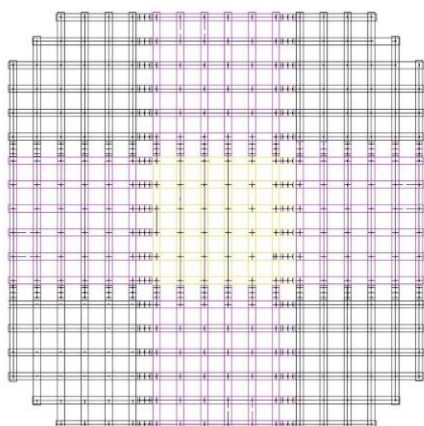
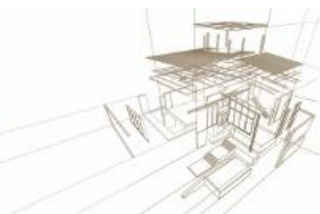


Figura 7: Componentes da estrutura de *Gridshell* total de 9 módulos de madeira Figura 8: Contraventamentos do *Gridshell*

3.2. Confeção das peças

As peças do *Gridshell* foram compostas de madeiras Eucalyptus disponíveis na região de Itapeva (Eucalyptus Grandis). Mesmo o Eucalyptus sendo uma madeira de alta densidade foi efetuado o tratamento preservativo das laminas de madeira em autoclave com CCA (solução de Cobre, Cromo e Arsênio) no laboratório de preservação da madeira na UNESP Campus de Itapeva. Neste caso, foi verificada a permeabilidade do tratamento na madeira utilizada. A intenção do tratamento é garantir que as partes da estrutura compostas por alburno sejam preenchidas com a solução preservativa. A madeira quando tratada tem uma duração de até 40 anos contra apenas 5 anos da madeira sem tratamento.

Foram confeccionados um total de 9 módulos quadrados com lâminas de madeira. Cada módulo possui dimensões planas de aproximadamente 3 metros de comprimento e largura. Os módulos foram confeccionados no Laboratório de Propriedades Mecânicas da UNESP/Itapeva conforme projeto e, posteriormente, foi feita a identificação de todas



as peças de madeira, componentes da estrutura de *Gridshell*, além de ser estimado o número total de parafusos com proteção contra corrosão utilizados na composição da estrutura de cobertura para aquisição.

3.3. Caracterização física e mecânica

A partir da madeira de Eucaliptus escolhida para construção do sistema foram retiradas amostras para o ensaio de caracterização física e mecânica da madeira como também das ligações parafusadas que compõem a estrutura de *Gridshell*.

Todos os ensaios mecânicos foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC disponível no Laboratório de Propriedades Mecânicas da UNESP de Itapeva.

Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização: tração, flexão, compressão, cisalhamento e embutimento dos parafusos na madeira. Os procedimentos de ensaios seguiram as recomendações da norma brasileira de madeiras ABNT NBR 7190:1997, e foram consideradas um total de 12 amostras de corpos de prova para cada caso de ensaio. Os procedimentos considerados em cada ensaio estão disponíveis no anexo B da norma ABNT NBR 7190:1997.

O peso da estrutura foi obtido a partir das dimensões dos elementos de madeira e também com base na densidade aparente da madeira a 12% conforme ABNT NBR 7190:1997. Foi verificada também a relação do peso real das ligações parafusadas com o peso da estrutura de madeira, tendo-se em vista que a norma de madeiras admite o peso das ligações como sendo 3% do peso próprio total da estrutura de madeira. O peso real da estrutura e ligações foi conferido através da pesagem por uma balança de precisão disponível no laboratório, sendo cada módulo pesado individualmente.

3.4. Montagem da estrutura

As peças de madeira preparadas para a estrutura foram dispostas conforme projeto para a composição da grelha plana e fixadas com parafusos protegidos contra a corrosão.

Foi confeccionado um tanque de água com revestimento impermeável para umedecer inicialmente a madeira a ser utilizada para facilitar a montagem da estrutura, evitando que as peças se quebrem durante o processo de curvamento para formação dos arcos laterais e cúpula como um todo.

Para fazer o içamento da estrutura e montagem foi usado em caminhão muck, elevando-se o centro da grelha e simultaneamente tracionando-se as diagonais da estrutura com cordas ligadas em X a uma chapa metálica central posicionada abaixo da estrutura. A Figura 9 mostra os detalhes de como foi feito o tracionamento das diagonais para levantamento do centro do Grid para geração do formato em cúpula.

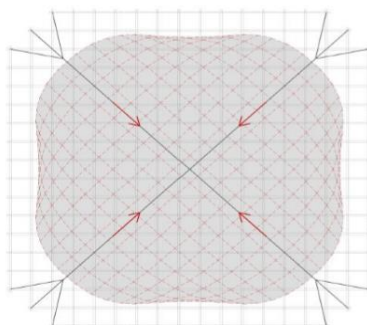
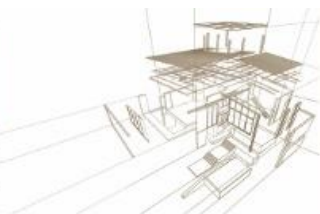


Figura 15: Tração das diagonais para levantamento do centro do Gridshell. (Dángelo 2011)

Durante o levantamento da grelha, a estrutura ficou permanentemente sendo umedecida com o uso de aspersores colocados em seu topo. O umedecimento das peças visa torná-las mais flexíveis e evitar a ruptura durante a flexão das mesmas. As regiões da madeira com tendência de ruptura, principalmente nas regiões dos arcos laterais, foram reforçadas com cobrejuntas de madeira.

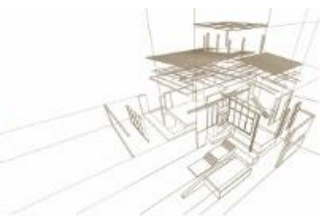
O tensionamento da estrutura foi realizado aos poucos, de forma constante até que se atingisse a altura de aproximadamente 2,20m no centro – pé direito – e 1,50m nos quatro arcos laterais. A forma desejada a ser confeccionada para a estrutura de *Gridshell* em questão é apresentada na Figura 10.



Figura 10: Forma da estrutura construída

Posteriormente, a estrutura foi exposta ao ar livre para secar, e foi feito todo o acompanhamento de perda de umidade e diminuição das dimensões das lâminas de madeira. Consequentemente foi realizado o reaperto constante dos parafusos até que a estrutura estivesse completamente seca, pronta para receber a pintura final e ter as variações das dimensões com a perda de umidade cessadas. A perda de umidade da estrutura provoca o afrouxamento dos parafusos até que a estrutura seja impermeabilizada. A pintura do sistema foi realizada com a utilização de *stein* na cor *gold Montana Química*. O processo de pintura em questão garante a impermeabilização da estrutura aumentando a sua vida útil e melhorando seu aspecto estético e visual.

Após a instalação da estrutura de *Gridshell*, foi realizado um sistema de fundação em madeira com postes de Eucalyptus tratado para dar suporte e maior consolidação da estrutura. Cada poste foi fixado na profundidade de 1,00m e a altura do solo até o apoio do *Gridshell* foi de 0,90m aproximadamente. Foram também confeccionados apoios em aço galvanizado a fogo para sustentação da estrutura sobre os postes de Eucalyptus (Figura 11). Os apoios metálicos confeccionados têm a função de impedir as translações



horizontais e verticais dos nós de apoio do *Gridshell*, sendo dimensionados em função do peso próprio estimado para a estrutura toda, ou seja, 500 kg/12 apoios. Ao redor dos postes, foi feito um acabamento utilizando floreiras, tendo, função estética para esconder os postes de *Eucalyptus*. As madeiras das floreiras também foram tratadas e pintadas com *stein* (Figura 12).



Figura 11: Detalhes dos postes roliços de Eucalyptus



Figura 12: Gridshell instalado

4. CONCLUSÃO

As ações simultâneas na estrutura do Gridshell de torção, flexão e cisalhamento bidimensional, não apresentam um método analítico de cálculo específico, sendo necessário utilizar os critérios de combinações existentes propostos no documento normativo Eurocode 5 (2008).

A deflexão deve se aproximar da deflexão de equilíbrio natural, para não ocorrer uma dissimetria geométrica da malha curvada após a remoção dos suportes para sua acomodação, desviando a estrutura para a sua posição de equilíbrio. A mudança de geometria de forma indesejada, ocasiona a ruptura das ripas que compõem a estrutura, dessa maneira, é imprescindível o uso de contraventamentos diagonais para garantir a rigidez da estrutura.

O umedecimento da madeira resulta na obtenção da forma da curva, podendo substituir esse método pelo uso de madeiras verdes, facilitando a curvatura da malha durante a montagem da estrutura e diminuindo os riscos de ruptura. A curvatura da malha plana é impulsionada pela combinação de tensionamentos horizontais nas bases de apoio



associados ao içamento vertical da parte central da estrutura, reduzindo o uso de força horizontal.

Ademais, o volume da madeira impacta significativamente a relação entre o comportamento do modelo reduzido e a estrutura real, ainda que obtenham efeitos similares. Nesse sentido, ao ponderar o tamanho do vão denota-se o uso eficiente da madeira, contribuindo para um menor consumo de material.

AGRADECIMENTOS

UNESP Campus de Itapeva por ceder equipamentos e espaço físico para o desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). NBR 7190: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro.

AtelierTen@ (2007). <http://www.atelierten.com/2011/projects/the-savill-building/#>. "The Savill Building, Windsor, UK."

AUTODESK INC., "Autodesk AutoCAD," 2017. [Online]. Available: <http://www.autodesk.com/products/autocad/overview>.

Barroso, J.M.; Fernandes, J.G.; Branco, J.M. (2016). A utilização de ferramentas digitais como suporte à idealização, análise e construção de malhas estruturais de madeira. Congresso Português de Building Information Modelling, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Behance@. <https://www.behance.net/gallery/6950327/Smithsonian-Portrait-Gallery-courtyard>.

Bouhaya, L. (2010). Optimisation structurelle des *Gridshells*. 147 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ecole Doctorale Science Ingénierie Et Environnement, Université Paris-est, Paris.

Carvalho, D.F.P.A. (2015). *Gridshells* em madeira: morfologia, aplicabilidade, comportamento estrutural e projeto. Dissertação – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

Caffarello, F.M. (2016). Análise estrutural de cobertura em *Gridshell* de madeira. Dissertação – Departamento de estruturas (DES), Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismos (FEC), Campinas, Brasil.

D'Angelo, P. (2011). La tecnologia delle Gridshell. Sperimentazione di un sistema di copertura "automontante". 2011. 175 f. Tese (Doutorado) -Università degli studi di Napoli Federico II, Facoltà di Architettura, Dottorato in Tecnologia dell'Architettura.

FASP+EPP. Fast + Epp to Retrofit the World's Largest Self-supporting Timber Grid Shell. Disponível em: <http://www.fastepp.com/index.php/en/news/news/302-fast-epp-offices-now-oqm-certified-14>. Acesso em: 28 de abril, 2017.

Ferreira, N.S.S.; Calil Junior, C. (2002). Estruturas lamelares de madeira para coberturas. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, n.18, p. 109-138.

Kuijvenhoven, M. (2009). A *design* method for timber grid shells, Delft.

Kuiken, J.; Mentegazzi, E. (2014). Behind *gridshells*: morphogenetic and parametric *design* strategies. Amsterdam: Bna Research Fund., . 112 p.



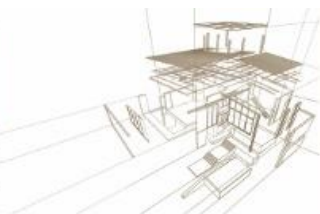
Kunz, M.; Prauchner, M.B. (2015). Uso do sistema estrutural *Gridshell* na criação de formas complexas em estruturas de madeira. Revista de Arquitetura Imed, Porto Alegre, v. 1, n. 4, p.19-25, jan. 2015. Semestral.

Kunz, M.; Silva, C.C.A.; Silva, J.L. (2016). Estruturas em madeira: uso do sistema *Gridshell* para cobertura de picadeiro para centro de terapias alternativas. Seminário Internacional de Construções Sustentáveis Imed, Porto Alegre, out. 2016.

Massara, B. (2002). A Arquitetura Gótica. Artigo Online. Disponível em http://www.territorios.org/teoria/H_C_gotica.html. Acessado em: 17/04/2017.

Peloux, L.D.U. et al. (2015). The Ephemeral Cathedral of Créteil: a 350 m2 lightweight *gridshell* structure made of 2 kilometers of GFRP tubes. Cigos 2015: Innovation in Construction. Cachan, France.

Toussaint, M.H. (2007). A design tool for timber gridshells: The development of a grid generation tool. Mestre. Dissertação, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences.



CAVILHAS DE MADEIRA REFORÇADAS COM FIBRA DE CARBONO E MATRIZ EPÓXI

REINFORCEMENT OF WOODEN DOWELS WITH CARBON FIBER REINFORCED POLYMER

Silva, Gabriel ^{(1)*}; Sena, Caroline ⁽¹⁾; Santos, Filipe ⁽¹⁾; Cunha, Rita ⁽²⁾; César, Sandro Fábio ⁽³⁾

⁽¹⁾ Mestrando(a). Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador, Brasil

⁽²⁾ Profª. Dra. Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia. Salvador, Brasil

⁽³⁾ Prof. Dr. Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador, Brasil

* Contato: gbrdourado@gmail.com

Resumo

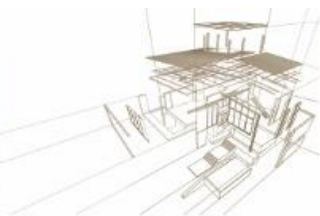
Os pontos críticos das estruturas de madeira são as suas ligações, pois o seu comportamento mecânico pode condicionar o desempenho global das estruturas. Os materiais comumente empregados em uma ligação de madeira são: o aço, os derivados de madeira e, naturalmente, a madeira maciça. Entretanto, os conectores metálicos estão sujeitos ao fenômeno da corrosão. A corrosão dos conectores metálicos compromete a durabilidade da ligação, influenciando na segurança da estrutura e no desempenho sustentável da construção. Neste cenário, as cavilhas de madeira surgem como uma possível alternativa ao emprego dos conectores metálicos em ligações de elementos estruturais de madeira. Este trabalho tem como o objetivo analisar o reforço de cavilhas de madeira com polímero reforçado com fibra de carbono (*Carbon Fiber Reinforced Polymer* – CFRP), utilizando cavilhas confeccionadas com madeira de Maçaranduba (*Manilkara sp.*), através do ensaio de flexão estática. Para isso, foram realizados ensaios experimentais de resistência mecânica das cavilhas reforçadas e não reforçadas. Como resultado, encontrou-se um desempenho superior na resistência mecânica das cavilhas reforçadas com fibras de carbono.

Palavras-chave: Ligações. Cavilhas. Cavilhas de Madeira. Estruturas de madeira.

Abstract

The critical points of timber structures are their connections, since their behavior can condition the overall performance of the structures. The materials constituting a connection in the wood are: steel, wood derivatives and, of course, wood. However, metal connectors are subject to the phenomenon of corrosion. Corrosion of metal connectors compromises bonding durability, influencing structure and resistance to construction. In this context, wood dowels appear as an alternative task to the use of metal connectors in connections of wood elements. This work aims to propose the reinforcement of wood dowels with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) using pegs made from Maçaranduba wood (*Manilkara sp.*). Physical and mechanical characterization of the studied wood were carried out, contributing to a greater and better use of the wood as the structural element. Experimental tests of mechanical strength of the bolts and reinforcements was also produced. As a result, superior performance was found in the mechanical strength of reinforced dowels by the proposed technique.

Keywords: Connections. Dowel-type connections. Timber structures.



1. INTRODUÇÃO

Os pinos e parafusos metálicos utilizados nas ligações entre elementos estruturais de madeira estão sujeitos a oxidação. Nas regiões litorâneas do Brasil, onde a exposição dos elementos de ligação aos sais provenientes do mar e a umidade é maior, o processo de corrosão é acelerado.

A corrosão dos conectores metálicos compromete a durabilidade da ligação, influenciando na segurança da estrutura e no desempenho sustentável da construção. A Figura 16 apresenta a degradação dos parafusos metálicos e surgimento de fissura paralela às fibras no eixo de furação dos conectores em uma ligação estrutural de madeira de edificação próxima a costa brasileira.



a) Degradação de conectores metálicos e formação de fissura em ligação estrutural de madeira.

b) Manchas na madeira por corrosão.

Figura 16: Degradação de conectores metálicos e formação de patologias na madeira.

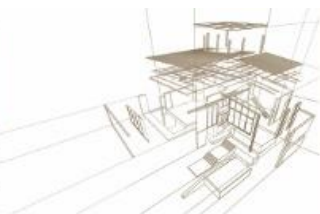
Fonte: a) o autor; b) (SHUPE et al., 2008).

A degradação dos conectores metálicos pela corrosão é um problema de real importância, com implicações que podem colocar em risco a estabilidade global da estrutura. A necessidade de adotar um material mais resistente a ação das intempéries exige a procura por materiais mais eficientes que possam cumprir o papel de suportar as solicitações provenientes das ligações entre os elementos estruturais e também atender ao desempenho exigido pelas normas técnicas vigentes.

A utilização de cavilhas em ligações de madeira tem aparecido como uma boa alternativa para conexões devido as vantagens ambientais associadas ao uso da madeira como matéria-prima em substituição ao aço e a aplicação em estruturas localizadas em ambientes agressivos, sofrendo o ataque constante da corrosão, comprometendo a vida útil da estrutura e fazendo com que se aumente o trabalho de manutenção das estruturas (Gomes, 1997; Calil Júnior et al., 2003; Palma, 2014).

Tendo em vista a maior resistência e rigidez dos conectores metálicos quando comparado aos de madeira, justifica-se a utilização do reforço das cavilhas e elementos estruturais de madeira com resinas, fibras de vidro, fibra de carbono ou outras fibras e produtos que transformem a cavilha em um compósito com uma maior rigidez e resistência mecânica.

De acordo com Santos (2013), os compósitos de fibras de carbono constituem atualmente uma opção atraente para o reforço de estruturas de madeira. Sobretudo devido ao bom desempenho documentado nos estudos de reforço estrutural, elevada relação resistência/peso dos materiais, resistência à corrosão, facilidade e rapidez de aplicação.



O reforço dos elementos estruturais de madeira poderá contribuir na estabilidade dimensional e na diminuição do processo de degradação, resultando em um melhor comportamento estrutural da ligação e desempenho global da estrutura. Dentre os trabalhos que foram conduzidos utilizando cavilhas de madeira como conectores em ligações de estruturas de madeira, destaca-se a pesquisa realizada por Gomes (1997). O trabalho apresentou uma técnica inovativa de reforço nas cavilhas de madeira utilizando a impregnação dos conectores de madeira com resina estirênica.

Através dos resultados obtidos após a realização dos ensaios, pode-se notar eficiência do processo de impregnação das cavilhas com melhorias na estabilidade dimensional com relação a umidade, diminuição da variabilidade das características de resistência e elasticidade, e aumento significativo no limite de proporcionalidade na compressão normal como na compressão paralela, tanto de peças isoladas como na ligação.

Ao final do seu trabalho, Gomes (1997) trouxe recomendações a respeito do processo de impregnação e pontuou que as espécies de altas densidades não se comportam muito bem para esse tipo de trabalho de impregnação, devido a sua baixa permeabilidade. O pesquisador considerou importante que se continue a realizar pesquisas nesse assunto utilizando outras espécies de madeira e outros produtos que promovam o reforço as cavilhas de madeira.

Neste contexto, este trabalho tem como o objetivo propor o reforço de cavilhas de madeira com polímero reforçado com fibra de carbono (*Carbon Fiber Reinforced Polymer – CFRP*), utilizando cavilhas confeccionadas com madeira dicotiledônea.

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais

2.1.1. Madeira

Neste estudo utilizou-se a madeira de árvores do gênero *Manilkara*, comercialmente conhecida como Maçaranduba, amplamente utilizada na construção civil nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, buscando adaptar as condições de construção locais e semelhança com as condições usuais de projeto.

2.1.2. Fibra de Carbono e Matriz epóxi

Para a técnica de reforço com PRFC (Polímeros Reforçados com Fibra de carbono) proposta, foi utilizado um tecido de fibra de carbono bidirecional (0°/90°) (Figura 17) O tecido adquirido possui desenho sarja 2x2, tratamento cru, 5,0 (+/-0,2) fios/cm, 200 g/m², espessura 0,40 mm e sem furos.

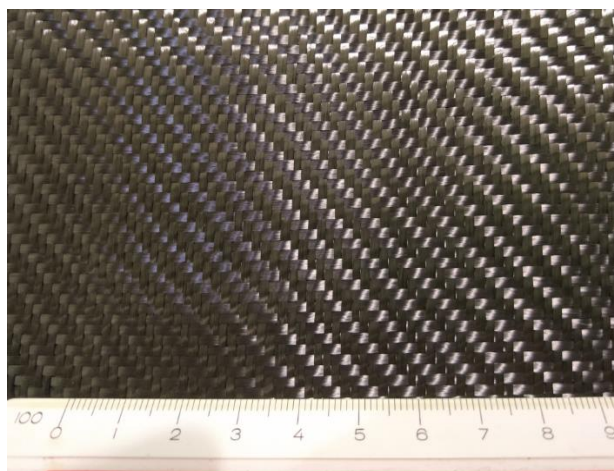
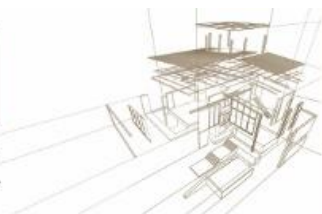


Figura 17: Tecido de fibra de carbono bidirecional.


Como material utilizado na matriz do compósito de reforço adotou-se um composto de dois componentes: resina base e endurecedor (agente de cura). Como material utilizado como matriz no reforço, optou-se por trabalhar com o sistema de resina epoxídica comercialmente encontrado como ARALDITE® GY 250 (resina) e SQ 3154 (endurecedor).

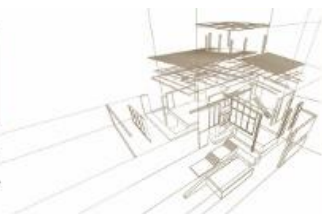
2.2.3. Produção das cavilhas reforçadas


Foram destinadas 36 cavilhas com reforço e 36 cavilhas sem reforço para o ensaio de flexão. As cavilhas foram obtidas a partir de peças de seção quadrada e foram aparelhadas e usinadas, ficando com diâmetros finais de 16mm, 18mm e 20 mm. O reforço envolveu as etapas de preparação do tecido, corte do tecido, preparação do sistema epóxi, envolvimento da fibra na cavilha e retirada da fita adesiva colocada para evitar o desalinhamento das fibras na etapa de corte.

Percebeu-se que seria difícil envolver o tecido na madeira de seção circular, pois no tecido não havia rigidez suficiente para envolver na cavilha sem causar um desalinhamento nas fibras durante a aplicação da resina. A solução encontrada para garantir um tecido com uma maior manuseabilidade foi envolvê-lo com a fita adesiva de papel que inicialmente era somente utilizada pelos distribuidores da fibra para cortá-la em menores partes. A etapa subsequente a produção das cavilhas foi a etapa de aplicação do reforço com a fibra de carbono, ilustrada no *Tabela*.

Tabela 1: Sequência de reforço das cavilhas e os respectivos equipamentos utilizados.

Etapas	Operação	Ferramentas	Produto final
Preparação do tecido	Colagem de fita adesiva para evitar o desalinhamento das fibras	Tesoura e Fita adesiva de papel	
Corte do tecido	Corte do tecido considerando a área de envolvimento nas cavilhas	Tesoura, esquadro e régua	Tecido na medida para envolvimento na cavilha



Preparação do sistema epóxi	Preparação do sistema epóxi considerando a proporção 100:50 para resina/endurecedor	Copo plástico/silicone e balança digital	Sistema epóxi em processo de cura. Pronto para laminação na cavilha
Impregnação	Impregnação do tecido de fibra de carbono com o sistema epóxi	Pincel e rolo desaerador	Tecido de fibra de carbono impregnado com resina epóxi
Envolvimento da fibra	Envolver tecido de fibra de carbono na cavilha	Lona plástica antiaderente ao epóxi	Cavilha envolvida no tecido. Peça pronta para cura de 24 horas.
Retirada da fita adesiva	Retirar Fita adesiva colocada para evitar o desalinhamento das fibras	Tesoura/Estilete	Cavilha reforçada sem fita adesiva
Produto Final	Cavilhas reforçadas com fibra de carbono		

Após a etapa de laminação, foi necessário retirar a fita adesiva inicialmente colocada nos tecidos de fibra de carbono para evitar o seu desalinhamento durante a etapa de envolvimento na cavilha. Nesta fase foi necessária cautela para evitar danos a fibra e a madeira envolvida. Para execução do trabalho, foi imprescindível a utilização de um estilete comum e luvas de tecido para proteção das mãos. A adição da camada de fibra de carbono a cavilha de madeira resultou no aumento de 1 mm no diâmetro do conector.

2.2. Métodos

2.2.1. Ensaio de flexão nas cavilhas

Foram confeccionadas 12 cavilhas para cada diâmetro e condição de reforço. As mesmas foram divididas em diferentes grupos. Um grupo foi submetido a uma camada de reforço e outro grupo de cavilhas que não foi reforçado. Foram comparados os valores de resistência a flexão, a eficiência da técnica proposta. A Figura 18 ilustra a cavilha não reforçada e a cavilha reforçada.



Figura 18: Perspectiva do corpos-de-prova do ensaio de flexão nas cavilhas.

O comprimento escolhido foi de 460 mm, atendendo a relação $l/h > 21$ para evitar a influência do cisalhamento na flexão, como descrito estudo de Rocco Lahr (1983) sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira.

O procedimento de ensaio de flexão nas cavilhas é executado através do método do ensaio de flexão em três pontos baseado na NBR 7190 (ABNT, 1997). Na execução do ensaio, foi acoplado ao disco da prensa um perfil tubular de aço de 5 cm de diâmetro e 15 cm de comprimento. O perfil tubular foi fixado ao disco por dois grampos de metal, também conhecidos como “sargento”. Na Figura é possível observar a adaptação feita para execução do ensaio.

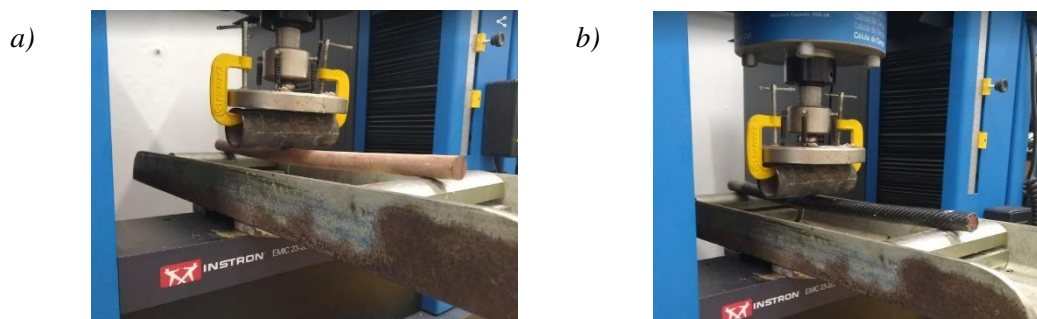
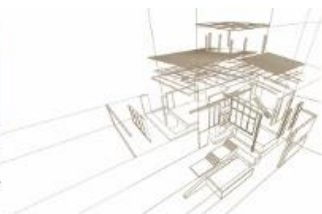


Figura 5: Execução do ensaio de flexão em cavilhas: a) sem reforços; b) reforçadas com uma camada.

O ensaio foi proposto de maneira semelhante por Pereira e Calil Junior (2018) na avaliação de ligações cavilhadas para painéis de DLT (*Doweled Laminated Timber*). Através deste experimento, foram obtidas as cargas máximas de ruptura na flexão das cavilhas. Além disso, foi possível avaliar e comparar a deformação entre as cavilhas reforçadas e não reforçadas. A taxa de incremento utilizada neste ensaio foi de 10 MPa/min.

3. ANÁLISES DE RESULTADOS

3.1. Ensaio de flexão das cavilhas



Nos gráficos apresentados na Figura 19 é possível observar a diferença dos resultados para a condição de reforço analisada. Em todas as condições as cavilhas com reforços apresentaram cargas máxima maiores que as cavilhas sem reforço. Os resultados obtidos para o ensaio de flexão nas cavilhas estão apresentados na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

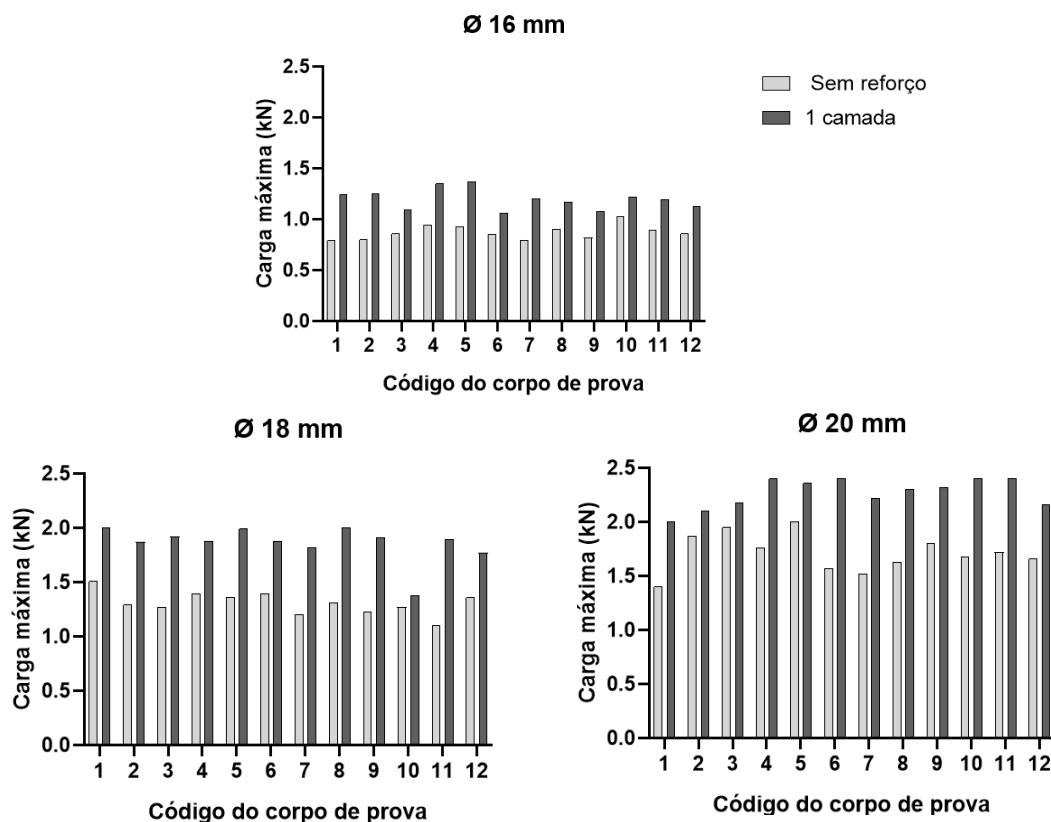


Figura 19: Gráfico de colunas para o ensaio de flexão das cavilhas.

Tabela 4: Resultados do ensaio de flexão das cavilhas nas cavilhas de Ø20 mm

Estatística descritiva	Ø16 mm		Ø18 mm		Ø20 mm	
	SR*	1C**	SR	1C	SR	1C
Valor médio (kN)	0,87	1,20	1,31	1,86	1,71	2,27
Desvio padrão	0,07	0,10	0,11	0,17	0,18	0,14
Mediana (kN)	0,86	1,20	1,30	1,89	1,70	2,31
Coefficiente de variação	8,20%	8,27%	8,12%	8,94%	10,25%	5,99%
Valor mínimo (kN)	0,79	1,06	1,10	1,38	1,40	2,00
Quantidade de amostras	12	12	12	12	12	12

*SR :cavilhas ensaiadas na sua condição natural

** 1C: cavilhas que receberam uma camada de reforço de fibra de carbono

Considerando a média dos resultados obtidos, a partir dos diferentes diâmetros avaliados, observou-se uma resistência maior em todos conectores que receberam o reforço. Observa-se um incremento de aproximadamente 38% para as cavilhas de Ø16 mm reforçadas, 42% para o diâmetro de Ø18 mm e 33% para o diâmetro de Ø20 mm. Tal resultado indica maior ganho de

resistência mecânica à medida que a camada de fibra representa uma porcentagem maior da área da seção transversal da cavilha.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados dos ensaios de flexão das cavilhas, concluiu-se que a técnica de reforço atribuí ao conector circular de madeira um aumento da sua resistência à flexão com a adição de uma camada de fibra de carbono.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Laboratório de Madeiras (LabMad) e o Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM), ambos da Universidade Federal da Bahia. Agradecemos também a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) do Governo Federal pelo apoio a pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira. Brasil, Rio de Janeiro.

Calil Junior, C.; Antonio Rocco Lahr, F.; Dias, A. A.(2003). Dimensionamento de elementos estruturais de madeira. Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira.

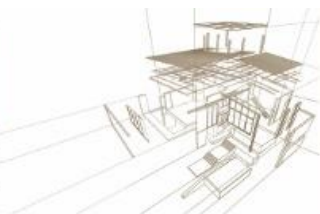
Gomes, O. F. (1997). Estudo das ligações cavilhadas impregnadas com resinas estirênicas empregadas em estruturas de madeira. Universidade de São Paulo.

Palma, P.; Kobel, P.; Minor, A.; Frangi, A. (2014). Ligações Estruturais do tipo madeira-madeira com placas de madeira densificada e cavilhas de FRP.5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, p. 1–18.

Pereira, M. C. M., Calil Junior, C. (2018). Resistência de ligações cavilhadas aplicando a proposta do novo método de ensaio de ligações mecânicas em estruturas de madeira. São Carlos.

Rocco Lahr, F. A. (1983). Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira. São Carlos.

Santos, C. L. (2013). Comportamento mecânico de ligações do tipo cavilha em estruturas de madeira. Universidade da Beira Interior.



CASA CON ESTRUCTURA DE MADERA DE MARCO RÍGIDO CON ARTICULACIONES DE CLAVIJAS DE MADERA DURA ENCOLADAS

RIGID FRAME WOODEN HOUSE STRUCTURE JOINTED WITH GLUED IN HARDWOOD DOWELS

Benitez Alejandro ^{1*}, Itagaki Naoyuki², Soares Rafaela R.³, Nogara Pierre⁴

¹Centro universitario Tacuarembó - Udelar. Tacuarembó, Uruguay, Dr. Arq. PDU Procesos Industriales de la Madera

²Universidad Prefectural de Akita. Akita, Japón, Dr. Ing. Departamento de Materiales

³Centro Universitario Uninovafapi. Teresina, Piauí, Brasil, Arq. Departamento de arquitectura

⁴FADU – Udelar, Instituto de la Construcción, Montevideo, Uruguay, MSc. Arq. Instituto de la Construcción

* Contacto: alejandro.benitez@cut.edu.uy

Resumen

En una estructura de madera, es difícil unir rígidamente los elementos estructurales, como en una estructura de acero. Estas articulaciones son un método que inserta clavijas de madera dura entre los miembros estructurales y se rigidiza con el encolado. Desarrollamos la unión combinada con clavijas de madera dura y pernos metálicos de 16 mm. Las clavijas de 12 mm de diámetro hechas de arce duro se pegan a la columna y viga de madera laminada encolada de madera de Sugi de sección 120 x 360 mm, con adhesivos de poliuretano para hacer las muestras de las juntas. Se ensayaron 3 partes del marco para medir la resistencia al momento que conforman las juntas del marco portal de dos pisos. Como resultado de la prueba sobre la unión viga-columna del segundo piso, el momento máximo fue de aproximadamente 35 kN·m y la rigidez rotacional fue de aproximadamente 5,500 kN·m/rad. La rigidez rotacional de la unión viga-columna del primer piso fue casi igual a la del segundo piso. Sin embargo, dado que la viga había fallado, su valor de momento máximo fue del 70%. Como resultado de la prueba sobre la articulación de la columna y la fundación, el momento máximo fue de aproximadamente 20 kN·m y la rigidez rotacional fue de aproximadamente 6,500 kN·m/rad. El rendimiento estructural de un marco rígido de dos pisos se analizó a partir de los resultados de estas pruebas. Como resultado del análisis, se estimó la fuerza de resistencia horizontal definitiva.

Palabras-clave: joint, rigid frame, wooden house structure, moment-resisting test

Abstract

In wooden structure, it is difficult to join structural members rigidly since there is no method of unifying material like welding of steel structures. The joint with glued-in hardwood dowels is the method of inserting hardwood dowels between structural members, and hardening with glue. We developed the joint combined with glued-in hardwood dowels and bolts. Dowels of 12mm in diameter made of hard maple are glued into column and beam members of Sugi glulam with polyurethane adhesives to make joint specimens. The diameter of a bolt is 16mm, and the section of a column and a beam is 120x360mm. Moment-resisting tests about 3 type joint parts in a two-story portal frame using this joint were carried out. As a result of the test about the beam-column joint of 2nd story, the maximum moment was approximately 35kN·m and the rotational stiffness was approximately 5,500 kN·m/rad. The rotational stiffness of the beam-column joint of 1st story was almost equal to that of 2nd story. However, since the beam had failed, its maximum moment value was 70%. As a result of the test about the sill-column joint, the maximum moment was approximately 20kN·m and the rotational stiffness was approximately 6,500 kN·m/rad. The structural performance of a two-story portal frame was analyzed from these test results. As a result of analysis, the ultimate horizontal resistant force was estimated.

Keywords: joint, rigid frame, wooden house structure, moment-resisting test



1. INTRODUCCIÓN

Construir un muro de apoyo para asegurar la resistencia de terremotos es una solución acertada en una estructura. Para un proyecto de conformación reducida en un terreno en donde se espera incluir la vivienda, un local comercial y garaje la propuesta estructural puede ser difícil. El marco rígido en tal sentido, resulta una solución efectiva para tal fin. El desarrollo de la técnica de conectar una columna y una viga rígidamente es necesario para establecer la construcción de los marcos.

En una estructura de madera, es difícil unir rígidamente los elementos estructurales, ya que no existe un método para unificar materiales como la soldadura de estructuras de acero. La unión con clavijas de madera dura pegadas, es un método que inserta clavijas de madera dura entre los miembros estructurales.

Koizumi (Koizumi 2001) llevó a cabo la prueba de resistencia al momento sobre esta articulación y aclaró que era muy alta la rigidez y la resistencia. Sin embargo, el fracaso de la misma es la fragilidad. En el caso del montaje de la unión con adhesivo y su curado en el sitio de la construcción, es más difícil. Para poner esta junta en práctica para una construcción, tenemos que resolver estos problemas.

Desarrollamos una junta con clavijas de madera dura pegados y pernos, controlando así la fragilidad del fallo. Además, también desarrollamos la estructura rígida para una casa.

2. ESTRUCTURA DE CASA DE MADERA DE MARCO RÍGIDO CON ARTICULACIONES DE CLAVIJAS DE MADERA DURA ENCOLADAS

2.1 Juntas pegadas con clavijas de madera dura

La unión con clavijas de madera dura pegadas es un método en el cual se insertan clavijas de madera dura entre los miembros estructurales y se pegan con cola poliuretánica. Investigaciones previas se han informado (Koizumi 2001, Jorgen 2001, Koizumi 1998, Koizumi 1998a, Sazaki 1999, Koizumi 1999). Koizumi presentó su teoría basada en el modelo Volkersen. Itagaki propuso la articulación con clavijas de madera dura pegadas utilizando complementariamente el método de pernos para aplicar esta teoría (Kameizawa 2006). El ejemplo de la junta viga-columna se muestra en la Figura 1.

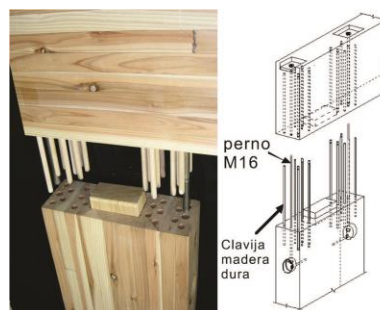
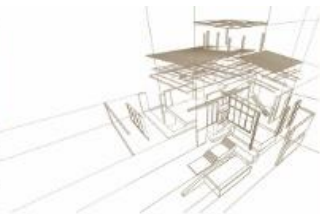


Figura 1: Junta con tacos y clavijas de madera dura pegados y pernos metálicos

2.2 Estructura de madera de marco rígido



En la figura 2 se muestra un esquema de la estructura de marco rígido de la casa unida con clavijas de madera dura pegados (Itagaki 2006). Tres marcos rígidos están dispuestos delante y detrás del cuerpo del edificio. Estos seis cuadros resisten la fuerza horizontal. Las alturas por piso es de 2,727 mm, y la altura máxima es de 6,716 mm. El espacio total es de 93m². El marco de construcción es simple tipo caja.

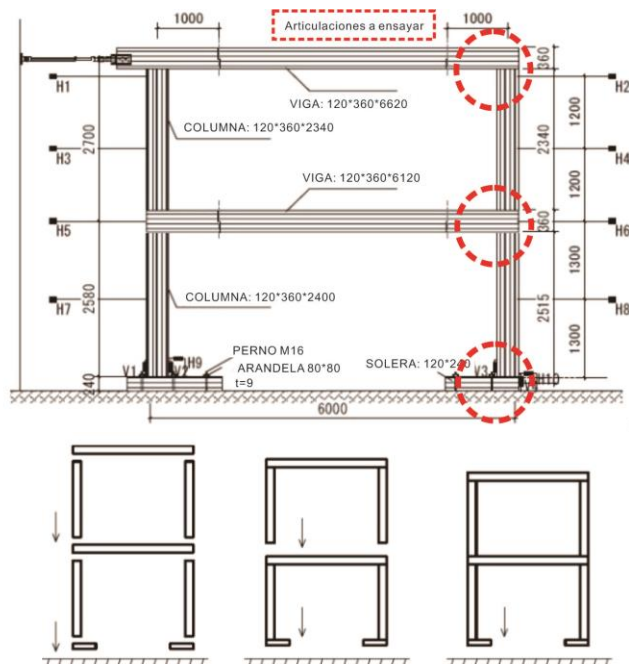


Figura 2: Estructura de marco rígido y montaje

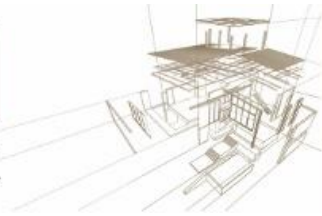
2.3 Juntas del marco rígido

En la figura 3 se detallan las uniones del marco rígido. Las clavijas de 12 mm de diámetro hechas de arce duro se pegan en la columna y la viga con adhesivos de poliuretano para hacer las juntas a ensayar. La columna y la viga estaban hechas de sugi (cedro japonés, *Cryptomeria japonica*) con un grado de resistencia JAS (estándar agrícola japonés) de E75-F240 (el módulo de elasticidad es 7500N / mm², el módulo de ruptura es 24N/mm²). La sección de una columna es 120 x 360 mm. Los pernos se combinan para evitar la disminución rápida de la fuerza de resistencia después de que fallen las clavijas de madera (Kameizawa 2006a). El diámetro de los pernos es de 16 mm. La ubicación de las clavijas de madera dura y pernos en cada junta es la misma. La profundidad de la clavija en la columna es de 96 mm, el resto es de 120 mm. El propósito de esto es que las clavijas colaboren gradualmente.

3. RESISTENCIA AL MOMENTO SOBRE LAS JUNTAS DEL MARCO RÍGIDO

3.1 Especimen y método de prueba

Se probaron tres juntas de tipo (DBT6, DBT8 y DBS7) que se muestran en la Figura 3. Las pruebas de resistencia al momento se llevaron a cabo como se muestra en la Figura 4. DBT6 es un modelo de una cuarta parte del marco rígido. Se supone que el centro de la columna y el centro de la viga son un punto de apoyo. DBT8 es un modelo por el cual



la columna del primer piso y el segundo piso se dividen al medio. DBS7 es un modelo del marco del marco rígido del primer piso en la mitad inferior. En la etapa donde el ángulo de deformación de cada junta alcanzó un valor de: $1/300$, $1/200$, $1/150$, $1/100$, $1/75$ y $1/50$ rad, la dirección de la carga fue cambiada, empujada y tensionada. La carga se incrementó hasta que el ángulo de rotación alcanzó $1/10$ rad. Bajo la aplicación de carga, medimos continuamente el desplazamiento de la articulación y de los miembros.

3.2 Resultado del ensayo del encuentro viga-columna sobre segundo piso

Un ejemplo de la relación entre el ángulo de rotación y el momento de la parte de la unión se muestra en la Figura 5. La Figura 6 muestra la curva envolvente de la relación entre la rotación ángulo y el momento de la parte conjunta en el lado de compresión. Los valores de las propiedades estructurales se calcularon a partir del modelo perfecto de elasto-plasticidad al que se sustituyeron las curvas envolventes (HOWTEC 2001). Los resultados se muestran en la Tabla 1.

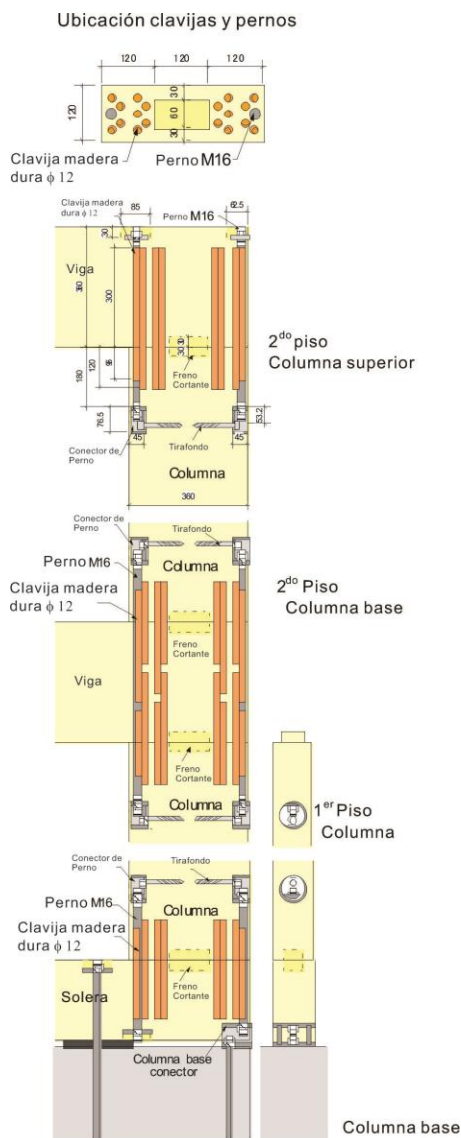


Figura 3: Detalle de las juntas

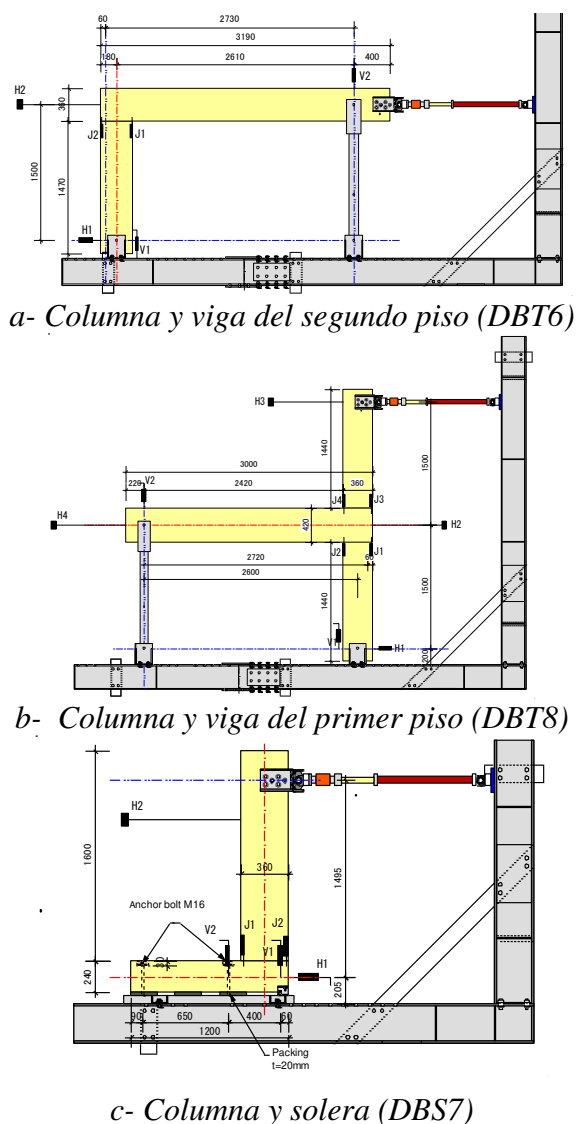
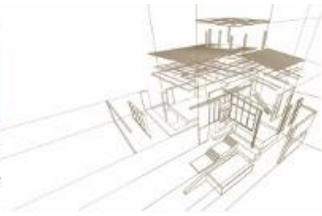


Figura 4: Método de ensayo de las juntas



La fuerza resistente permisible para carga temporal se asumió $15.41 \text{ kN} \cdot \text{m}$.

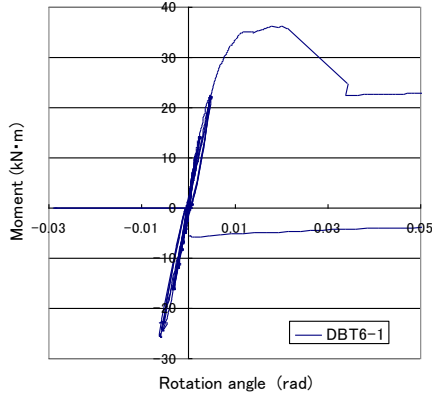


Figura 5: Relación entre el ángulo de rotación y el momento de la articulación

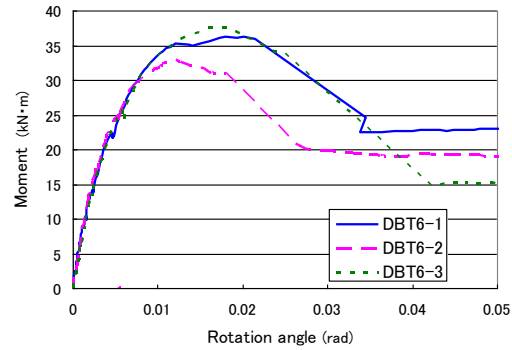


Figura 6: Relación del ángulo de rotación y el momento en la articulación

Tabla 1: Propiedades estructurales de la articulación

Especimen	θ_y (rad)	M_y ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	K ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$)	M_{max} ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	θ_u (rad)	f_d	Valor 5th percentile con 75% confianza		M_d ($\text{kN} \cdot \text{m}$)
							M_y ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	$2/3 M_{max}$ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	
DBS6-1	0.0037	20.31	5427	36.23	0.0215	3.43			
DBS6-2	0.0031	18.08	5794	33.07	0.0181	3.40			
DBS6-3	0.0039	20.48	5293	37.55	0.0248	3.79			
DBS6 Ave	0.0036	19.62	5505	35.61	0.0215	3.54	15.41	18.9	15.41

donde:

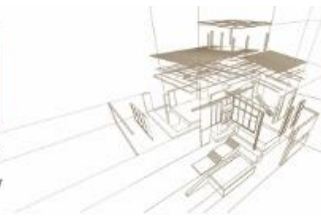
- θ_y : Ángulo de rotación del punto de fluencia
- M_y : Momento del Punto de fluencia
- K : Rigidez rotacional
- M_{max} : Momento máximo
- θ_u : Ángulo de rotación final
- m : Factor de ductilidad
- M_d : Momento admisible



Figura 7: extracción de clavijas de madera

3.3 Resultado del ensayo del encuentro viga-columna sobre primer piso

La Figura 8 muestra un ejemplo de la relación entre el ángulo de rotación y el momento de la parte de la junta. La figura 9 muestra la curva envolvente en el lado de compresión. Los valores de las propiedades estructurales se enumeraron en la Tabla 2. Cuando el ángulo de rotación alcanzó $1 / 150 \text{ rad}$, se produjo una grieta desde el borde



de la viga hasta la fibra (Figura 10), y la carga disminuyó. Posteriormente, la grieta que se produjo desde la esquina de la junta progresó, se conectó con la grieta a lo largo de la fibra de la viga, el fallo de flexión se produjo en la viga con un sonido fuerte (Figura 10). Como resultado, la carga disminuyó considerablemente.

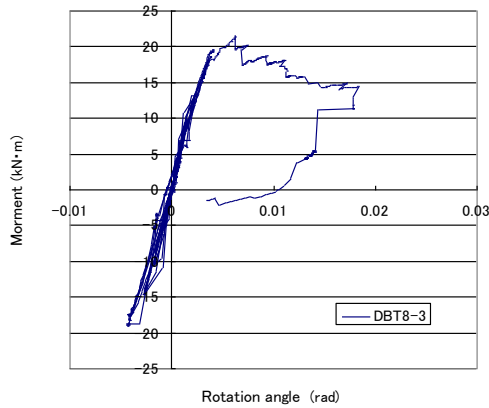


Figura 8: Relación del ángulo de rotación y el momento de la articulación

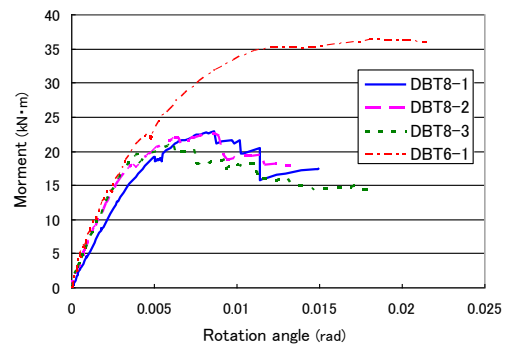


Figura 9: Relación del ángulo de rotación y el momento en la articulación

Tabla 2: Propiedades estructurales de la articulación

Especimen	θ_y (rad)	M_y (kN·m)	K (kN·m/rad)	M_{max} (kN·m)	θ_u (rad)	μ	Valor 5th percentile con 75% confianza		M_a (kN·m)
							M_y (kN·m)	$2/3 M_{max}$ (kN·m)	
DBT8-1	0.0032	15.33	4727	24.71	0.0114	2.38			
DBT8-2	0.0025	15.35	6021	24.36	0.0125	3.44			
DBT8-3	0.002	13.48	6641	23.25	0.0111	3.62			
DBS8 Ave	0.0026	14.72	5797	24.11	0.0117	3.15	10.47	13.36	10.47

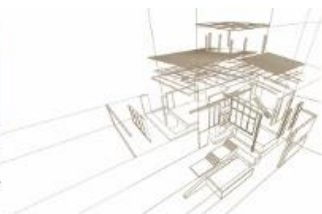
donde:

- θ_y : Ángulo de rotación del punto de fluencia
- M_y : Momento del Punto de fluencia
- K : Rigidez rotacional
- M_{max} : Momento máximo
- θ_u : Ángulo de rotación final
- m : Factor de ductilidad
- M_d : Momento admisible



Figura 10: Falla de la articulación

La rigidez rotacional de DBT8 es casi la misma que DBT6, pero el momento del límite elástico y la rigidez máxima son bajos. En DBT8, la clavija de madera no se despegó ya que la falla y flexión ocurrió en la unión de la viga. La ductilidad es menor que DBT6. Se calculó el valor del quinto percentil con un nivel de confianza del 75% del momento



de rendimiento y el valor de $2/3$ del momento máximo. La fuerza de resistencia admisible para la carga temporal se supuso $10.47\text{kN}\cdot\text{m}$.

3.4 Resultado del ensayo del encuentro columna-solera

La Figura 11 muestra un ejemplo de la relación entre el ángulo de rotación y el momento de la parte de la unión. La Figura 12 muestra la curva envolvente en el lado de compresión. Los valores de las propiedades estructurales se publican en la Tabla 3. Cuando el ángulo de rotación alcanzó $1/150\text{rad}$, la división a lo largo de la dirección de la fibra ocurrió en la esquina del conector de la base. En $1/100\text{rad}$, la falla a flexión ocurrió en la esquina del encuentro entre columna y solera, y la fuerza de resistencia disminuyó. (Figura 13)

La rigidez rotacional de DBS7 es un poco más alta que DBT6 y DBT8, pero el momento del límite elástico y la rigidez máxima es más baja. En DBS7, la clavija de madera no se retiró ya que la falla y doblado ocurrió en el encuentro de la solera. La ductilidad es menor que DBT6.

Se calculó el valor del 5^{to} percentil con un nivel de confianza del 75% del momento de fluencia y el valor de $2/3$ del momento máximo. La fuerza de resistencia admisible para una carga temporal se estimó del momento de fluencia obtenido en $6,75\text{ kN}\cdot\text{m}$.

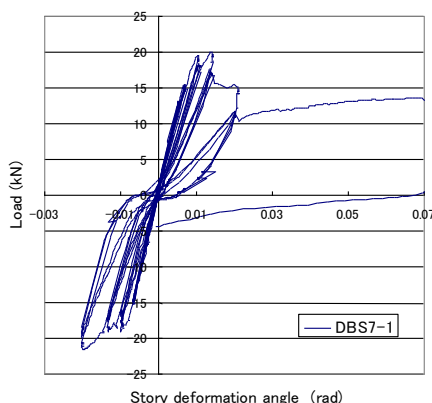


Figura 11: Relación entre el ángulo de rotación y el momento de la articulación

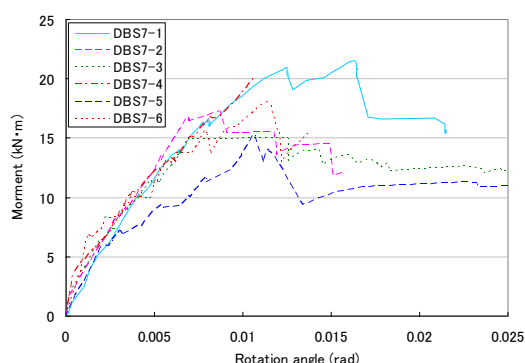
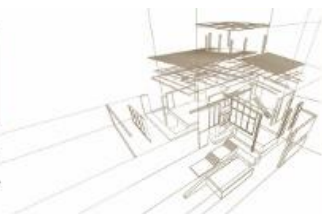


Figura 12: Relación del ángulo de rotación y momento en la articulación

Tabla 3: Propiedades estructurales de la articulación

Especimen	Θ_y (rad)	M_y ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	K ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$)	M_{max} ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	Θ_u (rad)	μ	Valor 5th percentile con 75% confianza		M_{α} ($\text{kN}\cdot\text{m}$)
							M_y ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	$2/3 M_{max}$ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	
DBS7-1	0.0021	12.43	5690	23.90	0.0084	2.30			
DBS7-2	0.0017	11.29	6685	19.18	0.0048	1.76			
DBS7-3	0.0011	8.46	7413	16.67	0.0064	3.11			
DBS7-4	0.0017	10.65	6418	20.00	0.0042	1.54			
DBS7-5	0.0013	7.76	6114	15.37	0.0033	1.58			
DBS7-6	0.0017	11.27	6616	18.01	0.0046	1.89			
DBS7 Ave	0.0016	10.31	6534	18.85	0.0053	2.03	6.75	8.81	6.75



donde:

- θ_y : Ángulo de rotación del punto de fluencia
- M_y : Momento del Punto de fluencia
- K : Rigidez rotacional
- M_{max} : Momento máximo
- θ_u : Ángulo de rotación final
- m : Factor de ductilidad
- M_d : Momento admisible



Figura 13: Falla de la articulación

4. ANÁLISIS DE UN MARCO RÍGIDO DE 2 PISOS

4.1 Modelo de análisis

Se realizó un análisis incremental estático sobre un marco de dos pisos. Se supone que la fuerza horizontal se agrega desde el lado izquierdo del modelo de acuerdo con la distribución vertical para el coeficiente de esfuerzo cortante por piso. El momento final (M_u) de la viga se calcula con un módulo de sección que reduce en un 20% el tamaño de la sección.

Viga sobre segundo piso: tamaño de sección 120x360 mm, $M_u = 49.7\text{kN}\cdot\text{m}$

Viga sobre primer piso: tamaño de sección 120x420 mm, $M_u = 67.7\text{kN}\cdot\text{m}$

Se instala el mismo resorte giratorio en el extremo de la columna, en la viga y la articulación de la columna. La bisagra se instala en la intersección con la columna en la viga. Además, la bisagra está instalada en la base de la columna. La propiedad mecánica del resorte giratorio y la bisagra se instalaron como resultado de las pruebas de resistencia al momento explicadas en el punto 3.

4.2 Modelos de relación entre el ángulo de rotación y el momento de las uniones

La propiedad mecánica de este resorte giratorio en el extremo de la columna es como un modelo bi-lineal para conectar el punto máximo con el punto de fluencia de DBT6 que se muestra en la Figura 14.

La bisagra en la intersección con la columna en la viga tiene una propiedad mecánica como modelo trilineal para conectar el punto máximo con con el punto de fluencia y el punto final de DBT8 que se muestra en la Figura 15.

La propiedad mecánica de la bisagra de la base de la columna es como un modelo trilineal para conectar el punto máximo con el punto de fluencia y el punto final de DBS7 que se muestra en la Figura 16.

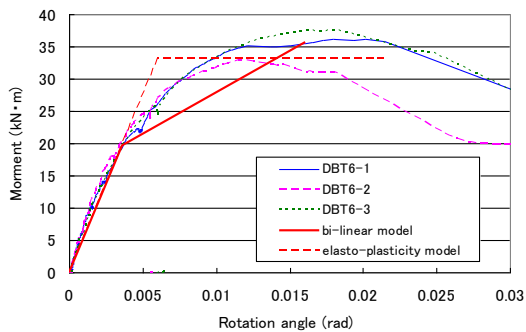


Figura 14: Modelo de comportamiento de la deformación en DBT6

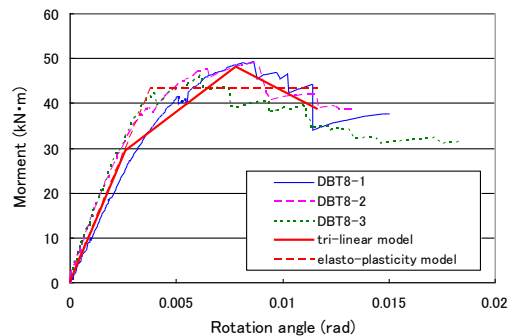


Figura 15: Modelo de comportamiento de la deformación en DBT8

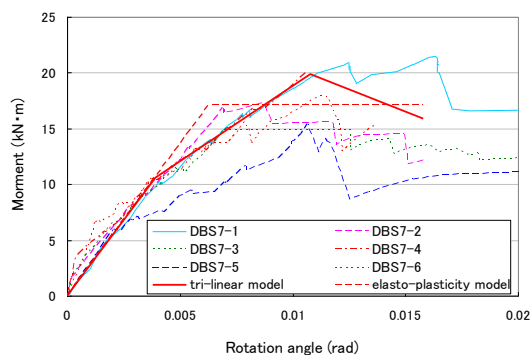


Figure 16: Modelo de comportamiento de la deformación en DBS7

4.3 Resultados de análisis

La relación entre el ángulo de rotación y esfuerzo cortante por piso obtenida de acuerdo con el resultado del análisis incremental estático se muestra en la Figura 17. El marco puede colapsar cuando ocurre la falla de flexión en la viga, por lo que se supone que el esfuerzo cortante inmediatamente antes en la articulación de la viga alcance el punto máximo es la capacidad de carga horizontal.

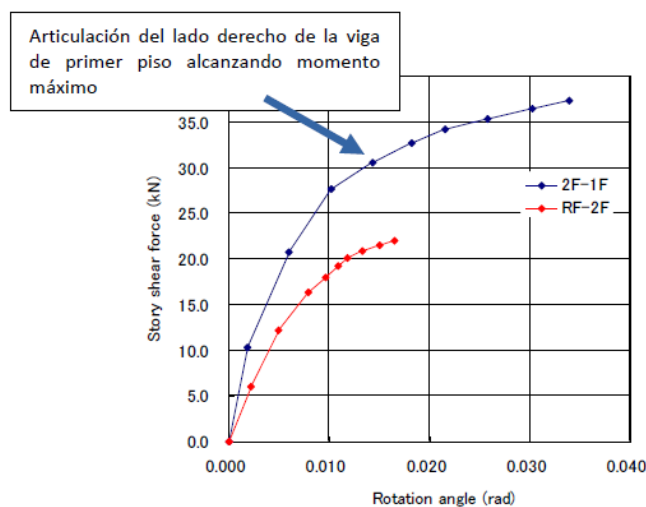


Figura 17: Relación entre el ángulo de rotación y la fuerza de corte por piso



El diagrama de momento y el diagrama de esfuerzo cortante se muestran en la Figura 18 y la Figura 19, respectivamente.

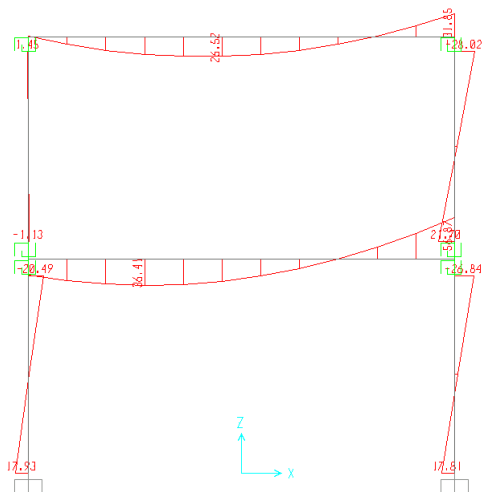


Figura 18: Diagrama de momentos

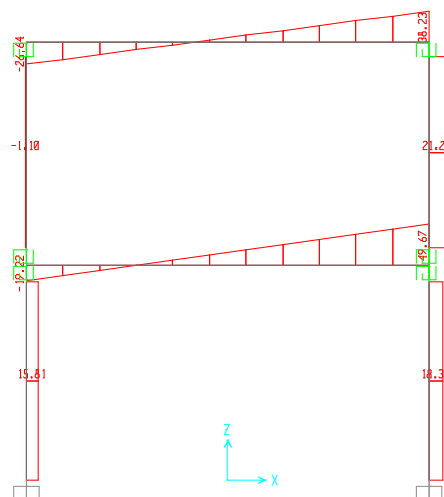


Figura 19: Diagrama de esfuerzo cortante

4. CONCLUSIONES

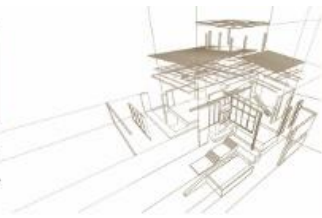
Desarrollamos la unión combinada con clavijas de madera dura encoladas y pernos. Se llevaron a cabo pruebas de resistencia al momento sobre 3 tipos de unión de un marco rígido de dos pisos usando esta unión.

Como resultado de la prueba sobre la unión viga-columna del segundo piso, el momento máximo fue de aproximadamente $35 \text{ kN}\cdot\text{m}$ y la rigidez rotacional fue de aproximadamente $5,500 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$. La rigidez rotacional de la unión viga-columna del primer piso fue casi igual a la del segundo. Sin embargo, dado que la viga había fallado, el valor de momento máximo fue del 70%. Como resultado de la prueba sobre la unión entre la solera y la columna, el momento máximo fue de aproximadamente $20 \text{ kN}\cdot\text{m}$ y la rigidez rotacional fue de aproximadamente $6.500 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$.

El rendimiento estructural de un marco rígido de dos pisos se analizó a partir de los resultados de estas pruebas. Como resultado del análisis, la fuerza de resistencia horizontal final se estimó en 34.18 kN para el primer piso y 20.15 kN para el segundo piso.

AGRADECIMIENTOS

Parte de este trabajo se realizó como parte de "El proyecto de promoción de proyectos de investigación semillas en uso práctico" (con el apoyo de la universidad de la prefectura de Akita) y el proyecto de colaboración industria-academia-gobierno en el área de la cuenca de "Yoneshiro", con el apoyo del Ministerio de Educación, Cultura, Deportes, Ciencia y Tecnología de Japón (MOMBUKAGAKUSHO), la fundación Akita Wood Technology Transfer Foundation y "El proyecto subsidiado del desarrollo de tecnología líder sobre Vivienda y Arquitectura" (con el apoyo del Ministerio de Tierra, Infraestructura y Transporte).



REFERENCIAS

Jorgen L. J., et al. (2001), "Axially Loaded Glued-in Hardwood dowels", *Wood Science and Technology*, 35, pp. 73-83.

Itagaki N., et al. (2006), *The Development of the Rigid Frame Wooden House Structure Jointed with Glued-in Hardwood Dowels*.

Japan Housing and Wood Technology Center (HOWTEC), (2001), *Allowable stress design for timber frame structures house*, pp 151-152

Kameizawa K., et al. (2006), "Development of a Joint Combined with Hard Wood Dowels and Tension Bolts for Wooden Structure", *Proceedings of AIJ Tohoku Chapter Architectural Research Meeting*, Vol. 69, Structure, pp. 183-186.

Kameizawa K., Itagaki N., Takahashi M., Kimura H. and Benitez A., (2006a) "Development of a Joint Combined with Hard Wood Dowels and Tension Bolts for Wooden Structure", *Proceedings of AIJ Tohoku Chapter Architectural Research Meeting*, Vol. 69, Structure, pp. 183-186.

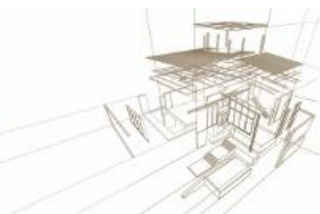
Koizumi A., et al. (1998), "Withdrawal Properties of Hardwood Dowels in End Joints I. Evaluation of shear performance of adhesives", *Journal of the Japan Wood Research Society*, Vol. 44, No. 1, pp. 41-48.

Koizumi, et al. (1998a), "Withdrawal Properties of Hardwood Dowels in End Joints II. Effects of dowel diameters, Young's moduli of adherends, dowel spacings and numbers of dowels", *Journal of the Japan Wood Research Society*, Vol. 44, No. 2, pp. 109-115.

Koizumi A., et al. (1999), "Withdrawal Properties of Hardwood Dowels Glued Perpendicular to the Grain", *Journal of the Japan Wood Research Society*, Vol. 45, No. 3, pp. 230-236.

Koizumi A., et al. (2001), "Moment-resisting Properties of Post-to-sill Joints Connected with Hardwood Dowels", *Journal of the Japan Wood Research Society*, Vol. 47, No. 1, pp. 14-21.

Sasaki T., et al. (1999), "End Joint with Glued-in Hardwood Dowels in Timber Construction I. Bending properties of beams jointed with single row of dowels", *Journal of the Japan Wood Research Society*, Vol. 45, No. 1, pp. 17-24.



AVALIAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA REFORÇADA COM FIBRAS VECTRAN

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL EVALUATION OF GLUED LAMINATED TIMBER BEAM REINFORCED WITH VECTRAN FIBERS

Vilela, Ramon ^{(1) (2) *}; Mascia, Nilson Tadeu ^{(3) (2)}; Donadon, Bruno Fazendeiro ^{(4) (2)}

⁽¹⁾ Eng. Civil, Mestrando no programa de pós-graduação.

⁽²⁾ Faculdade Estadual de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.
Campinas, Brasil

⁽³⁾ PhD. Eng. Civil. Professor titular.

⁽⁴⁾ MSc. Eng. Civil, Doutorando no programa de pós-graduação.

* Contato: ramonvilela@outlook.com

Resumo

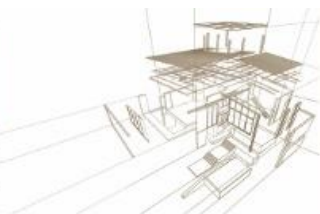
Fibras sintéticas são utilizadas como reforço em vigas de madeira lamelada colada (MLC) para melhorar seu desempenho mecânico, como aumento de rigidez (MOE), aumento de resistência (MOR), além de mudar o modo de ruptura frágil das vigas para dúctil, conferindo maior segurança às mesmas. O presente trabalho analisa os resultados experimentais de vigas de MLC com reforço de fibra sintética e os compara com resultados numéricos, por elementos finitos, e analíticos, pela seção transformada. Três vigas de MLC de dimensões estruturais foram produzidas com lamelas de madeira da espécie *Pinus Elliottii*, uma espécie de madeira de baixa resistência e de origem de reflorestamento no Brasil. Tais vigas foram coladas com adesivo de Isocianeto de Emulsão Polimérica e reforçadas com fibra sintética de Vectran[®], posicionado abaixo da última camada da viga. As vigas foram submetidas a ensaio de flexão, sendo o carregamento aplicado até a ruptura, entretanto, esta análise limitou-se ao regime elástico das vigas. Para a modelagem numérica realizada via o software ANSYS[®], utilizou-se das propriedades mecânicas da viga previamente ensaiada sem o reforço estrutural. Os resultados obtidos indicam aproximações aceitáveis de deslocamentos verticais e tensões normais devido à flexão, ambas a favor da segurança estrutural, validando a possibilidade do uso do método dos elementos finitos para o projeto de MLC reforçada com fibras de Vectran[®].

Palabras-clave: MLC, reforço estrutural, fibra sintética, elementos finitos.

Abstract

Synthetic fibers applied as reinforcement in glued laminated timber beams (Glulam) intend to increase their mechanical performance, such as increasing their stiffness (MOE), their strength (MOR), and altering the brittle to the ductile failure mode of these beams, giving them greater security. This paper investigates the experimental results of Glulam beams reinforced with synthetic fiber subjected to bending test and compares with results obtained by the numerical procedure based on the Finite Element Method and the analytical transformed section method. Three structural size Glulam beams were produced with layers of *Pinus elliottii*, a low-strength grade wood species and are of reforestation origin in Brazil. They have been glued with adhesive of Isocyanate Polymeric Emulsion and reinforced with Vectran[®] synthetic fibers positioned under the last layer of the beam. A three-point bending test has been performed for loading applied until the beams rupture, but with the analysis have been restricted at the elastic regime of them. The numerical modeling has been carried out with the commercial Ansys Workbench 19 using the mechanical properties of the previously experimented beam without the structural reinforcement. The obtained results indicate acceptable fits of the vertical displacements at midspan, and normal stresses, both in favor of structural safety, what validates the possibility of using the FE to design glulam beams reinforced with Vectran Fibers.

Keywords: Glulam, structural reinforcement, synthetic fiber, finite elements.



1. INTRODUÇÃO

A Madeira Laminada Colada (MLC) pode ser considerado a evolução de elementos estruturais de madeira serrada, isto devido ao seu processo produtivo, aumento de sua rigidez e capacidade de resistência médias, bem como por reduzir a variabilidade de propriedades físicas e geométricas (Fiorelli and Dias 2011). Além disso, o elementos de MLC possuem um grande potencial de aplicação estrutural (e arquitetônico), como diversos estudos têm demonstrados teórica, experimental e numericamente (Ramage et al., 2017; Solarov and Glisic, 2014; Tsalkatidis, 2014).

Embora o MLC apresente melhora em algumas características quando comparado à madeira serrada, pesquisas sobre reforço estrutural têm sido realizadas com o objetivo de investigar seu desempenho mecânico, em especial, para espécies de madeira com menor resistência, com foco no aumento da rigidez e resistência. Tais estudos mostram que o reforço pode contribuir para a resistência à flexão, diminuindo o desvio padrão desta característica, e mudando o modo de ruptura de frágil (na tração) para uma ruptura dúctil (na compressão), (Bertoline et al., 2016).

Entre os materiais utilizados para reforço em vigas MLC, destacam-se os metálicos e fibroso. Atualmente, pesquisas com fibras de carbono (André 2006; Glišović et al. 2016, 2017), sintéticas de vidro (Raftery and Harte, 2011; Fiorelli and Dias, 2006; Lopez-Anido and Xu, 2002), poliméricas (Bertoline et al. 2016; Jacob and Barragán 2007), bem como, com fibras naturais (Solarov and Glisic, 2014; Bertoline et al., 2016; Mascia et al., 2014), vêm sendo destacadas. Além disso, o arranjo do reforço é outro fator importante a ser considerado, podendo ser usado lateralmente nas extremidades da viga (Fawwaz and Hanna, 2002), embutida em sulcos ao longo da viga ou por colagem externa, cada uma delas utilizada para fins diferentes.

Neste contexto, existem alguns modelos numéricos e analíticos que podem ser utilizados para análise e dimensionamento de vigas de MLC reforçadas, tais como o método analítico da seção transformada e o numérico método dos elementos finitos (MEF).

Assim sendo, este trabalho conduz ensaios experimentais envolvendo vigas de MLC reforçadas com fibras sintéticas de Vectran[®] sujeitas a flexão, tendo seus resultados comparados com os obtidos pelo método da seção transformada e aqueles produzidos pela modelagem numérica com auxílio do software comercial ANSYS[®].

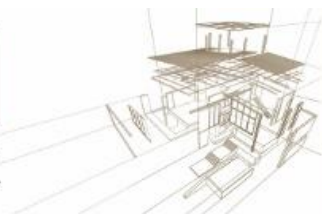
Cabe dizer que este artigo se limita a análise no regime elástico, considerando que este procedimento pode ser aplicado em situações frequentes de carregamentos, tensões e deslocamentos limitados por fatores de segurança no estado limite de serviço. Ressalta-se ainda, que fibras sintéticas de Vectran[®] ainda não são utilizadas na construção civil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Para realizar o procedimento experimental, três vigas de MLC, denominadas VR4, VR6 e VR8 neste trabalho, foram ensaiadas sem reforço estrutural primeiramente, e, posteriormente, reforçadas com fibras sintéticas de Vectran[®] coladas com adesivo de Emulsão Polimérica de Isocianeto (EPI).

As vigas de MLC foram produzidas com nove camadas de lamelas de aproximadamente 20 mm de espessura cada, sendo que cada camada recebeu classificação visual, conforme NBR 7190:1997 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997). A seção transversal final das



vigas de MLC resultaram em uma altura média de 180 mm e largura de 53 mm. As amostras utilizadas nesta pesquisa foram obtidas de espécies de madeira *Pinus Elliottii*, originárias de regiões de reflorestamento no Brasil.

O módulo de elasticidade de cada viga foi avaliado por ensaio de flexão à três pontos a partir da aferição dos deslocamentos no meio do vão, considerando os efeitos devido à flexão e cisalhamento. Para isso, considerou-se a teoria de vigas de Timoshenko na determinação analítica do deslocamento no meio do vão, que para o esquema do ensaio, foi calculada pelo Princípio dos Trabalhos Virtuais, conforme Equação 1.

$$P^* \delta = \int_x \frac{MM^*}{EI} dx + \int_x \frac{\kappa VV^*}{GA} dx, \quad (2)$$

Onde, P^* é o carregamento virtual no meio do vão, δ é o deslocamento real no meio do vão, M e M^* são as funções de momento fletor devido ao carregamento real e virtual, respectivamente, E é o módulo de elasticidade longitudinal da viga, I é o momento de inercia da seção transversal, κ é o fator de forma, V e V^* é o esforço cortante devido ao carregamento real e virtual, respectivamente, G é o módulo de elasticidade transversal ou de cisalhamento, A é a área da seção transversal.

A Equação 2 é obtida aplicando as integrais da Equação 1 com as devidas condições de contorno.

$$\delta = \frac{Pl^3}{48EI} + \frac{\kappa Pl}{4GA}, \quad (3)$$

Onde, P é o carregamento real, que para a NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997) deve ser definido pela diferença entre os carregamentos à 50% e 10% do carregamento máximo, e l é o vão entre apoios.

Considerando o fator de forma para seções retangulares $\kappa = 1,2$, estabelecendo a relação $G = E/14$, e isolando o módulo de elasticidade longitudinal, obtém-se a Equação 3.

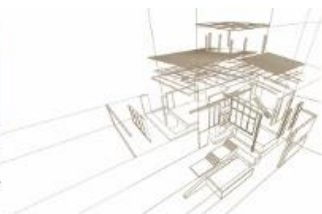
$$E = \frac{P}{\delta} \left(\frac{l^3}{48I} + \frac{21l}{5A} \right), \quad (4)$$

Entretanto, o módulo de elasticidade foi obtido experimentalmente e as outras propriedades mecânicas da madeira foram determinadas a partir de relações estabelecidas na literatura (Bodig and Jayne 1982) para pinus.

O adesivo utilizado para colar as camadas da viga e o tecido de reforço foi o de Emulsão Polimérica de Isocianeto (EPI), produzido a partir dos componentes ReacTITE EP-925 e Hardener 200. O primeiro componente citado é um adesivo de emulsão de acetato de polivinila, e o outro componente, um difenilmetano diisocianato (MDI) polimérico. A densidade do adesivo foi de 1280 kg/m³ e o módulo de elasticidade longitudinal do mesmo é informada como 4,00 GPa (Franklin Adhesives & Polymers 2018).

O tecido utilizado como reforço foi produzido a partir de fibras de Vectran[®], obtido pela fiação por fusão de um polímero de cristal líquido (PCL), (Kuraray 2018). A densidade da fibra é de 1400 kg/m³, seu módulo de elasticidade longitudinal é de 50,16 GPa, e sua tensão de ruptura é de 2850 MPa (Campbell, 2010). O volume específico do adesivo foi estimado considerando 5% de volume de vazios no tecido do reforço, conforme recomendado em Mendonça (2005).

2.2. Ensaios Experimentais



A *Figura 3* mostra o esquema do ensaio de flexão à três-pontos conduzido para a obtenção dos deslocamentos e tensões normais das vigas de MLC com e sem reforço de fibras sintéticas. O mesmo esquema foi estabelecido para produzir os modelos analítico e numérico, tendo seus resultados posteriormente comparados aos resultados experimentais no regime elástico dos materiais componentes.

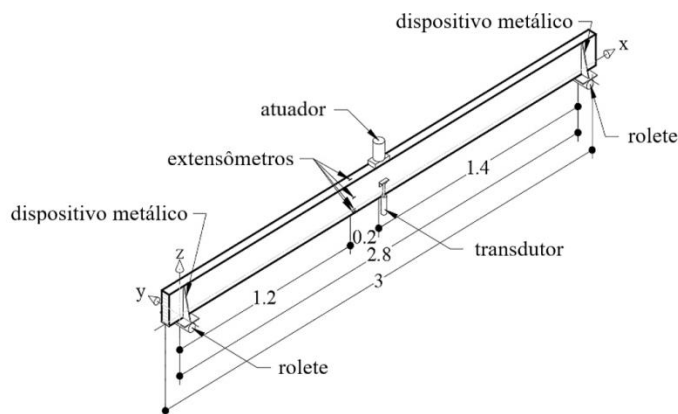


Figura 3: Esquema do ensaio em perspectiva isométrica, medidas em metros.

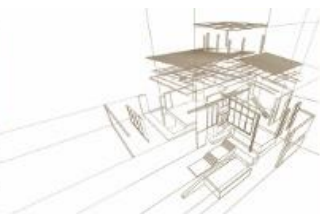
A *Figura 3* exhibe o posicionamento dos equipamentos e dispositivos utilizados no ensaio a flexão. Note que abaixo da célula de carga (atuador) foi posicionado uma chapa espessa para distribuir o carregamento ao longo de 10 cm, para suprimir os efeitos de embutimento na lamela superior. Também foram posicionados seis extensômetros à 20 cm do meio do vão. Ainda no meio do vão, mas na lateral da viga, foi posicionado um transdutor digital. Foram posicionados dispositivos metálicos nos apoios a fim de evitar possíveis rotações ao redor do eixo x devido excentricidade do atuador no eixo y (inicial ou por deformação durante o ensaio). O ponto de origem cartesiano utilizado para os modelos numérico e analítico coincidem com o representado na *Figura 3*.

A *Figura 4* apresenta uma das vigas preparada para a realização do ensaios, que foi conduzido no Laboratório de Estruturas (LES) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).



Figura 4: Viga preparada para o ensaio.

Os dados produzidos pelos transdutores, bem como os obtidos pela célula de carga e extensômetros, foram coletados por um aquisitor de dados da marca Micro-Measurements®, modelo 5100B SCANNER. O tempo de aquisição foi a cada 1 segundo. O dispositivo para



aplicação do carregamento foi um pórtico aberto apoiado em quatro pontos da laje de reação, com capacidade máxima de 300 kN. O atuador foi composto por um macaco hidráulico com acionamento manual fixado no pórtico.

A primeira etapa do ensaio foi conduzida com a finalidade de determinar o módulo de elasticidade longitudinal da viga sem reforço, onde o carregamento, estimado por ensaio prévio, foi de aproximadamente metade do carregamento máximo resistido. Foi determinado um módulo de elasticidade longitudinal único para todas as lamelas da viga. Nesta etapa, a viga foi equipada somente por um transdutor posicionado no meio do vão, conforme *Figura 3*.

A *Tabela 8* traz as localizações cartesianas dos extensômetros e do transdutor posicionados para a leitura das deformações específicas e deslocamentos dos ensaios experimentais das vigas reforçadas.

Tabela 8. Posições cartesianas dos extensômetros e transdutor, origem conforme Figura 3.

Position in the axis	E1	E2	E3	E4	E5	E6	T1
X (mm)	1.200,00	1.200,00	1.200,00	1.200,00	1.200,00	1.200,00	950,00
Y (mm)	0,00	-2,65	-2,65	-2,65	0,00	0,00	-2,65
Z (mm)	180,00	145,00	100,00	55,00	0,00	Var.*	90,00

* Posicionado abaixo do reforço, posição variável de acordo com a espessura do mesmo.

A teoria dos volumes para compósitos foi utilizada para estimar o módulo de elasticidade do tecido do reforço a partir do módulo de elasticidade, volume e peso específico dos componentes. O volume específico de fibra (V_f) e adesivo (V_a) contidos no tecido foi estimado conforme a Equação 4.

$$V_f = \frac{P_f / \rho_f}{P_f / \rho_f + P_a / \rho_a + V_v}; \quad V_a = \frac{P_a / \rho_a}{P_f / \rho_f + P_a / \rho_a + V_v}, \quad (5)$$

Onde f , a e v são índices para fibra, adesivo e vazio, respectivamente, P e ρ são o peso aparente e peso específico do componente, respectivamente, e V é o volume específico de vazios. Foi considerado um volume específico de vazios de $V_v = 5\%$, conforme Mendonça (2005).

O módulo de elasticidade longitudinal do tecido (E_t) é obtido aplicando-se a Equação 5.

$$E_t = E_f V_f + E_a V_a, \quad (6)$$

A *Tabela 9* lista as especificações do reforço aplicado em cada viga ensaiada. É importante notar que as três vigas foram reforçadas com diferentes camadas de tecido, sendo quatro, seis e oito camadas. A quantidade de amostras foram três, assumindo que a NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997) permite ao menos duas amostras para determinação do módulo de elasticidade da madeira. Dos ensaios experimentais, seguem os módulos de elasticidade longitudinal da madeira de cada viga, obtidos com a Equação 3: RG4 = 11,783.04 MPa, RG6 = 13,752.52 MPa e RG8 = 8,841.10 MPa.

Tabela 9. Características dos reforços.

Característica	VR4	VR6	VR8
Nº de camadas	4	6	8
Espessura (mm)	3.00	6.00	9.00
Peso da fibra (kg)	0.88	1.32	1.76
Peso do adesivo (kg)	0.87	1.20	1.42
ρ_t (kg/m³)	1,273.62	1,276.33	1,279.88



E_t (MPa)	15,081.94	15,603.33	16,285.86
-------------	-----------	-----------	-----------

2.3. Método Analítico

Para determinar a rigidez à flexão equivalente EI_{eq} da seção transversal da viga reforçada, o método da seção transformada (Gere, 2004) foi aplicado tomando a largura do reforço e multiplicando pelo fator η , definido pela Equação 6.

$$\eta = \frac{E_f}{E_w}, \quad (7)$$

Onde, E_f e E_w são o módulo de elasticidade longitudinal da fibra e da viga de MLC, respectivamente.

O centro de gravidade da seção transformada no eixo z foi determinado pela Equação 7.

$$z_{CG} = \frac{A_w z_w + \eta A_f z_f}{A_w + A_f}, \quad (8)$$

Onde z_{CG} é o centro de gravidade de toda a seção transversal, A_i é a área da seção transversal do elemento i , sendo $A_i = b_i \cdot h_i$, z_i é a distância no eixo z do centro de gravidade da seção do elemento até o ponto de origem, w e f são os índices de madeira e fibra, respectivamente (Figura 5).

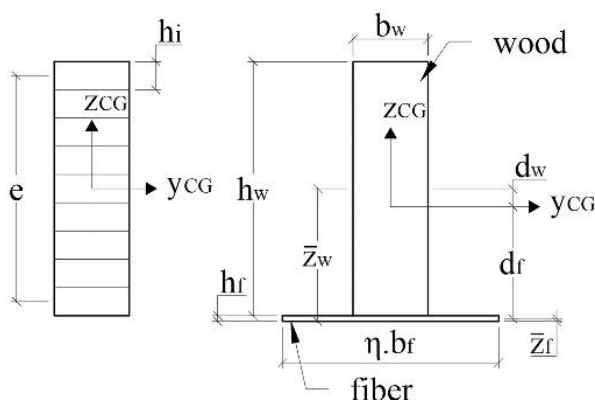


Figura 5: Parâmetros para o método da seção transformada.

A rigidez equivalente da seção composta EI_{eq} é determinada pela aplicação da Equação 8.

$$EI_{ef} = E_w \left[A_w \left(\frac{h_w^2}{12} + d_w^2 \right) + \eta A_f \left(\frac{h_f^2}{12} + d_f^2 \right) \right], \quad (9)$$

Onde d_w e d_f são a distância entre o centro de gravidade da seção total z_{CG} e o centroide de cada elemento (z_w and z_f), respectivamente (Figura 5).

Para obter uma melhor aproximação dos resultados, foram considerados os deslocamentos devidos ao esforço cortante. Assim sendo, a Equação 9 determina a rigidez ao cisalhamento equivalente para o método da seção transformada (FPInnovations 2012).



$$GA_{eq} = \frac{e^2}{\left(\frac{h_1}{2G_1b_1}\right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{2G_1b_i}\right) + \left(\frac{h_n}{2G_nb_n}\right)}, \quad (10)$$

Onde e é a distância entre o centro de gravidade das camadas superior e inferior, h_i é a espessura da camada i , G_i é o módulo de elasticidade de transversal da camada i , b_i é a largura da camada i (Figura 5).

As tensões normais ao longo da seção foram estimadas pelas expressões da Equação 10.

$$\sigma_w = E_w \frac{M}{EI_{eq}} z; \quad \sigma_f = \eta E_w \frac{M}{EI_{eq}} z, \quad (11)$$

Onde z é a posição da seção analisada ao longo do eixo z .

2.4. Método Numérico

No software comercial ANSYS® Workbench, o compósito fibra-adesivo foi assumido como um material elástico isotrópico (bem como no analítico) com coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$ e o módulo de elasticidade conforme Tabela 9. Um elemento ortotrópico foi utilizado para simular a madeira. Assim sendo, a Tabela 10 apresenta as relações determinísticas utilizadas como dados de entrada no software comercial ANSYS® para a simulação numéricas do ensaios.

Tabela 10. Relações para Pinus (Bodig and Jayne, 1982).

Relações	Valores adimensionais		
Módulo de elasticidade Longitudinais	E_L/E_L	E_L/E_T	E_R/E_L
	1.00	20.00	12.50
Módulos de elasticidade transversais	G_{LR}/E_L	$G_{f_{LT}}/E_L$	G_{RT}/E_L
	14.00	14.90	140.00
Coeficientes de Poisson	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{TR}
	0.37	0.42	0.45

Tanto a madeira como o reforço foram simulados com elemento SOLID185, que permite obter resultados a partir da ortotropia dos elementos. O contato entre a madeira e o reforço foi considerado “bonded”, i.e., sem deslizamento relativo entre os elementos. O tamanho máximo dos elementos foi limitado em 10 mm. Assim sendo, a malha gerada produziu 34.260 elementos SOLID185, 32.562 elementos de contato CONTA174, 32.562 elementos TARGET170 além de 30 elementos de superfície SURF154.

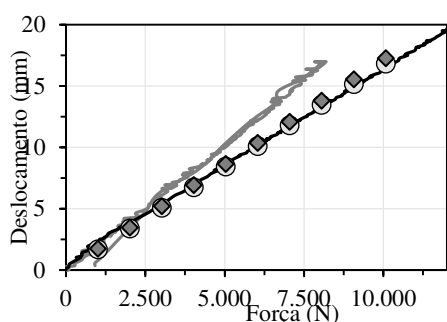
Os apoios foram impostos pela ferramenta de condição de contorno “displacement”, onde restringiu-se os deslocamentos no eixo x , y e z na mesma posição indicada na Figura 3. As rotações não foram restringidas. Já o carregamento foi aplicado em uma área de (100×53) mm² no centro do vão como pressão sobre um bloco metálico com conexão “frictionless” (sem atrito) com o topo da viga. Os deslocamentos para um carregamento de 10 kN foram obtidos pela subdivisão do “step” em 10 etapas.

3. RESULTADOS E DICUSSÕES

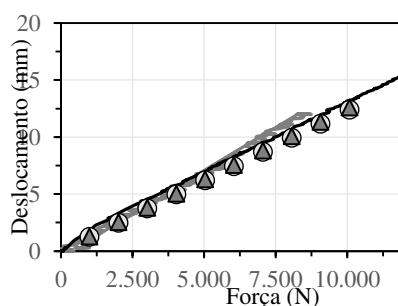
3.1. Deslocamentos



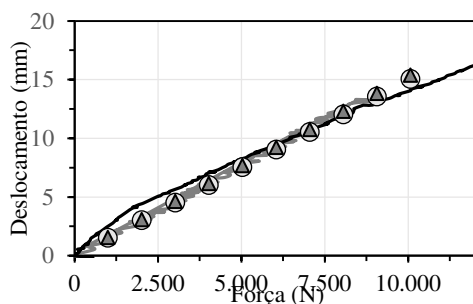
A *Figura 6a* mostra os resultados de deslocamentos no meio do vão obtidos experimental, analítico e numericamente da viga VR8 para a amostra com e sem reforço. Os resultados da viga não reforçada apresenta uma redução de rigidez próximo ao carregamento de 2 kN. Este comportamento não foi observado na amostra ensaiada da mesma viga após o reforço, da qual os resultados mostraram-se mais lineares. Os resultados numéricos da viga reforçada se comportaram com um padrão linear e produzem uma diferença constante de 2,53% entre eles. Para esta viga reforçada com oito camadas de tecido de Vectran®, o reforço com fibra sintética conferiu maior rigidez ao elemento estrutural além de proporcionar melhor uniformidade de sua rigidez.



a) Viga VR8



b) Viga VR6



c) Viga VR4

Legenda:

- Sem Reforço - Experimental
- Reforçada - Experimental
- Reforçada - ANSYS
- ◆ Reforçada - Analítico

Figura 6: Deslocamentos no meio do vão.

Na *Figura 6b* estão plotados os resultados de deslocamento no meio do vão da viga RG6, reforçada com seis camadas de tecido de fibra sintética. Um comportamento sutilmente bilinear foi observado nos resultados da viga sem reforço, mas que pode ser considerado desprezível. Enquanto nos resultados experimentais da viga reforçada encontra-se um comportamento de rigidez linear e mais rígido comparado à viga sem reforço. Os resultados numéricos e experimentais para a viga com reforço tiveram uma diferença de 1,43% entre eles

A *Figura 6c* apresenta os resultados de deslocamentos no meio do vão produzidos pelos ensaios experimentais e modelos numérico e analítico para a viga reforçada com quatro camadas de tecido de fibra sintética, a RG4. Diferente dos resultados anteriores, a viga reforçada foi a que apresentou um ponto de mudança de rigidez, enquanto a viga sem reforço ficou mais próxima a um comportamento linear. Os resultados numérico e analítico tiveram uma diferença constante entre si de 2,05%, e apresentaram boa aproximação dos resultados experimentais próximos ao carregamento de 7kN.

Finalmente, a *Figura 7* destaca-se a diferença relativa entre os métodos numérico e analítico com relação aos resultados experimentais. Foi encontrado uma diferença constante entre os



métodos numérico e experimental, sendo que todos eles tiveram um padrão similarmente bilinear. Desta forma, constata-se que o comportamento ortotrópico da madeira (mais complexo), adotado para a simulação numérica, tem boa convergência com os resultados apresentados pelo modelo analítico (simplificado), no qual foi assumido um material isotrópico para a madeira. Assim sendo, para cálculos de elementos discretos, o método analítico da seção transformada pode ser adotado sem que haja prejuízo significativo na análise dos deslocamentos.

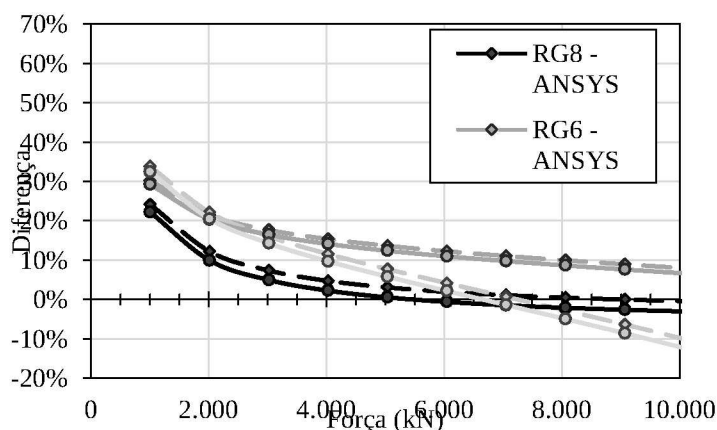
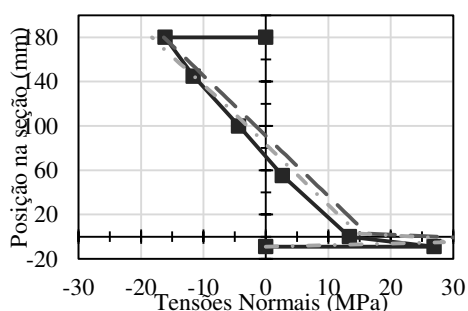
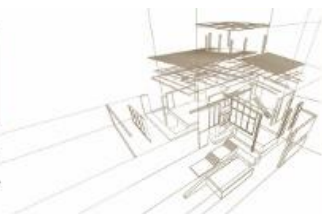


Figura 7: Diferença relativa entre o método analítico e numérico comparados com os resultados experimentais.

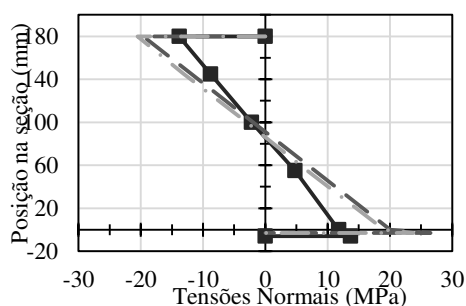
Outro aspecto observado na *Figura 7* foi que todas as curvas de diferença apresentaram uma distância maior para os carregamentos iniciais, próximos a 2kN, depois disso, houve diminuição da inclinação de todas as curvas de diferença relativa. A hipótese proposta pelos autores é que esta diferença inicial está relacionada com a aplicação do reforço com as fibras estando relaxadas. Neste caso, um determinado nível de carregamento seria necessário para tracionar as fibras de reforço para atingir seu comportamento desejado na estrutura. Esta observação aponta para a necessidade de aplicação de pré-tração do reforço quando deseja-se aumentar a eficiência do mesmo desde os carregamentos iniciais.

3.2. Tensões Normais

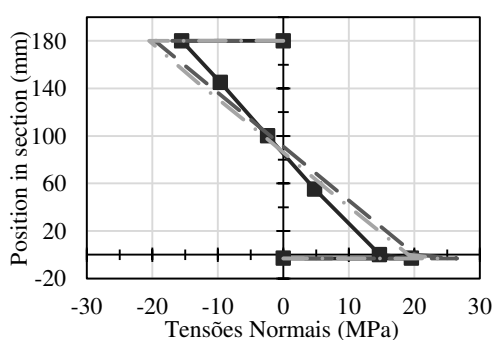
As tensões normais da viga de MLC reforçada VR8 obtidas pelo ensaio experimental, e métodos numérico e analítico estão plotados na *Figura 8a*. Tais resultados referem-se à posição dos extensômetros representados na *Figura 3* e um carregamento de 10,08 kN. A teoria das vigas (Gere, 2004) propõe uma distribuição linear das tensões para um material constante ao longo da seção. Comportamento este observado para os modelos numérico e analítico da seção transformada para a madeira, o que foi sutilmente diferente para os resultados experimentais, onde o módulo de elasticidade foi considerado constante e as tensões foram determinadas por $\sigma = E \cdot \epsilon$. Esta constatação evidencia uma variabilidade dos módulos de elasticidade ao longo da seção. Entretanto, existe uma aproximação consideravelmente boa para as tensões nas extremidades da viga tanto no topo (madeira) quanto na parte inferior (reforço), onde as tensões são críticas e utilizadas para projeto.



a) Viga VR8



b) Viga VR6



c) Viga VR4

Legenda:

- Experimental
- Analítico
- · - ANSYS

Figura 8: Diagrama de tensões para uma posição à 20 cm do centro do vão da viga para um carregamento de 10,08 kN.

A Figura 8b exibe as tensões normais encontradas ao longo da seção da viga reforçada VR6 em condições similares a viga anteriormente analisada. Observa-se que existe uma diferença de inclinação da curva de tensões normais obtidas pelo ensaio experimental comparadas aos métodos analítico e numérico. Este resultado pode indicar que a rigidez a flexão, consequentemente, o módulo de elasticidade dos métodos numérico a analíticos não são exatamente o mesmo que o do modelo experimental. Que, apesar de classificada, pode ter uma variação também ao longo do comprimento da viga devida a anisotropia da matéria prima das lamelas, a madeira. Entretanto, ao retornarmos à Figura 6b, que considera o comportamento global da viga, tal diferença de módulo de elasticidade não é tão relevante. Ainda na mesma viga, nota-se que as linhas neutras dos três resultados estão muito próximas entre si.

Para a viga reforçada VR4, os resultados de tensões normais estão apresentados na Figura 8c, nas mesmas condições de carregamento e posição de extensômetros que as anteriormente analisadas. Similarmente aos resultados da viga VR6, os resultados da VR4 apresentaram sutil diferença entre os resultados experimentais e os resultados analítico e numérico.

A

Tabela 11 mostra a diferença relativa das tensões normais determinadas pelos métodos analítico e numérico em comparação com os resultados obtidos experimentalmente por extensômetros. É notada uma considerável dispersão dos resultados. Fatores como a variabilidade local do módulo de elasticidade das lamelas, bem como o comportamento semi elástico da madeira após ter sido ensaiada previamente, podem justificar tais resultados.

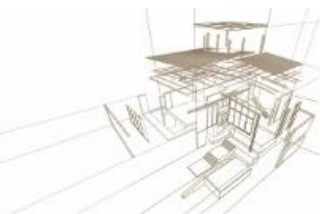


Tabela 11. Diferença relativa entre os resultados de tensões normais analíticos e numéricos comparados com os experimentais.

Viga	Método	E1	E2	E3	E4			E5	E6
					E4 (%)				
VR8	Analítico	1.32	14.67	61.90	147.83	24.65	25.48		
	Numérico	12.68	0.89	30.97	93.08	99.38	10.07		
VR6	Analítico	32.75	25.03	29.58	65.71	65.58	71.63		
	Numérico	40.98	24.45	2.96	14.38	58.53	54.11		
VR4	Analítico	26.55	23.95	17.64	64.88	36.43	35.52		
	Numérico	32.30	22.78	3.80	12.39	28.09	26.75		

4. CONCLUSÕES

Este estudo foi destinado a analisar os resultados dos deslocamentos e as tensões normais obtidos procedimentos experimentais, analíticos e numéricos de vigas de MLC reforçadas com fibras sintéticas submetidas à flexão. Além disso, foi realizada uma comparação às mesmas vigas antes do reforço estrutural.

Os resultados obtidos indicaram que diferenças entre os métodos de elementos finitos e de seção transformada em comparação aos resultados experimentais são aceitáveis quando analisados os deslocamentos, menores que 3% em todos os casos. Porém, para resultados de carregamento inicial, o reforço de fibras apresentou um comportamento não-linear devido a acomodação inicial do tecido. Este comportamento evidencia um baixo desempenho para os carregamentos iniciais, aproximadamente 10% do carregamento máximo. Entretanto, sua performance é reestabelecida posteriormente, onde os carregamentos são efetivamente utilizados como critério de projeto. Caso haja necessidade refinamento do método numérico, pode-se empregar um elemento de contato com comportamento bilinear, e para o método analítico, a aplicação de coeficientes de correções para pequenos carregamentos. A melhora na convergência dos resultados numéricos e analíticos, além do desempenho inicial do reforço, podem ser alcançados utilizando-se técnicas de pré-tração do tecido.

Apesar de apresentarem o mesmo padrão de comportamento e segurança, os resultados analíticos e numéricos da tensão normal apresentaram diferenças relativamente altas quando comparados aos resultados experimentais. Entretanto, tais diferenças foram a favor da segurança e são justificadas pela própria variabilidade local das camadas de MLC, que foram analisadas levando em consideração o módulo de elasticidade global.

Cabe destacar que o presente trabalho contribuiu para a avaliação de métodos que podem ser utilizados para dimensionamento e análise de vigas de MLC reforçadas com fibras sintéticas de Vectran®, fibra esta que ainda não é utilizada na construção civil. Apesar de ser realizado um procedimento determinístico das tensões e deslocamentos, os mesmos podem ser replicados probabilisticamente, o que tende a ser mais representativo para a madeira, que apresenta uma variabilidade relativamente grande comparada a outros materiais.

A utilização dos modelos numéricos e analíticos mostrou-se eficaz para este tipo de análise, que para os estados limites de utilização de vigas de MLC reforçadas com fibra, o cálculo dos deslocamentos é o aspecto mais relevante a ser considerado. O método da seção transformada mostrou-se altamente aplicável à casos como este, em que se considera elementos estruturais discretos, por ser facilmente programável. Entretanto, para análises globais mais complexas recomenda-se a utilização de métodos mais sofisticados, como o método dos elementos finitos.



AGRADECIMIENTOS

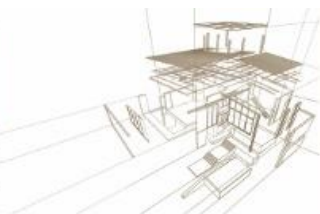
À Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de estudos (nº 05-P-04797-2019 e 05-P-04797-2019), ao Laboratório Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), que concedeu os equipamentos e suporte técnico para a execução dos ensaios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- André, A. (2006). *Fibres for strengthening of timber structures*. Master's Thesis. Luleå: Luleå University of Technology.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). *Projeto de estruturas de madeira*. NBR 7190:1997. Rio de Janeiro.
- Bertoline, C.A.A., Mascia, N.T., Basaglia, C.D. and Donadon, B.F. (2016). Analysis of fiber reinforced laminated timber beams. *Key Engineering Materials*, v. 668, p. 100–109 [online]. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.668.100>.
- Bodig, J. and Jayne, B.A. (1982). *Mechanics of Wood and Wood Composites*. New York: Van Nostrand.
- Campbell, F.C. (2010). *Structural Composite Materials*. Ohio, United States of America: ASM International.
- Fawwaz, M. and Hanna, A. (2002). Structural behavior of notched glulam beams reinforced by means of plywood and FRP. *Journal of Composites for Construction*, v. 6, n. 3.
- Fiorelli, J. and Dias, A.A. (2006). Fiberglass-reinforced glulam beams: mechanical properties and theoretical model. *Materials Research*, v. 9, n. 3, p. 263–269 [online]. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000300004>.
- Fiorelli, J. and Dias, A.A. (2011). Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation. *Materials and Structures*, v. 44, p. 1431–1440.
- FPInnovations (2012). *CLT Handbook: Cross-Laminated Timber*. Canadian: FPInnovations.
- Franklin Adhesives & Polymers (2018). *ReacTITE EP-925* [online]. Available from: <http://www.franklinadhesivesandpolymers.com/Wood-Adhesives-International/Wood-Adhesives/Application/Laminating-Glue/ReacTITE-EP-925.aspx> [Accessed 27 June 2018].
- Gere, J.M. (2004). *Mechanics of Materials*. 6th ed. Belmont: Thomson Learning.
- Glišović, I., Pavlović, M., Stevanović, B. and Todorović, M. (2017). Numerical Analysis of Glulam Beams Reinforced with CFRP plates. *Journal of Civil Engineering and Management*, v. 23, n. 7, p. 868–879 [online]. <https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1341953>.
- Glišović, I., Stevanović, B., Todorović, M. and Stevanović, T. (2016). Glulam Beams Externally Reinforced with CFRP plates. *Wood Research*, v. 61, n. 1, p. 141–154.
- Jacob, J. and Barragán, O.L.G. (2007). *Flexural Strengthening of Glued Laminated Timber Beams with Steel and Carbon Fiber Reinforced Polymers*. Master's Thesis. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology [online]. Available from: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/40294.pdf>.
- Kuraray (2018). *Vectran* [online]. Available from: <http://www.kuraray.com.br/Produtos/Vectran?Idioma=pt-BR> [Accessed 27 June 2018].
- Lopez-Anido, R. and Xu, H. (2002). Structural Characterization of Hybrid Fiber-Reinforced Polymer-Glulam Panels for Bridge Decks. *Journal of Composites for Construction*, v. 6, n. 3, p. 194–203 [online]. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:3\(194\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:3(194)).
- Mascia, N.T., Mayer, R.M. and Moraes, R.W. (2014). Analysis of Wood Laminated Beams Reinforced with Sisal Fibres. *Key Engineering Materials (Online)*, v. 600, p. 97–104.



- Mendonça, P.T.R. (2005). *Materiais Compostos & Estruturas-Sanduíches: Projeto e Análise*. 1st ed. Barueri: Manole.
- Raftery, G.M. and Harte, A.M. (2011). Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate. *Compos B Eng.*, v. 42, n. 4, p. 724–735.
- Ramage, M.H., Burridge, H., Busse-Wicher, M., Feredaya, G., Reynolds, T., Shah, D.U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P.F. and Scherman, O. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 68, n. 1, p. 333–359.
- Solarov, R. and Glisic, M. (2014). Glulam beams reinforced with FRP strips and their application in architecture. *Spatium*, n. 32, p. 1–6 [online]. <https://doi.org/10.2298/SPAT1432001S>.
- Tsalkatidis, T. (2014). Numerical simulation and analytical study of glulam timber beams. *International Journal of Engineering & Technology*, v. 3, n. 2, p. 129–136.



AVALIAÇÃO NUMÉRICA DE PEÇAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA COM REFORÇO DE FIBRAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO. FIRE EVALUATION OF FRP GLUED LAMINATED TIMBER

Nilson T. Mascia^{1*}, Saulo José de Castro Almeida² Ailton N. Alves³

¹Professor Doutor da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, Brasil

²Professor Doutor da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, Brasil

³Mestrando da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, Brasil

* Contato: Nilson Tadeu Mascia: ntm@fec.unicamp.br

Resumo

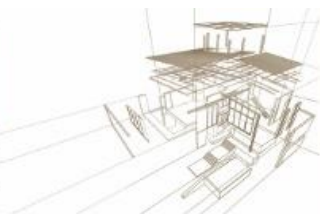
A aplicação de polímeros reforçados com fibras em estruturas de madeira tem sido amplamente utilizada com resultados que evidenciam uma melhoria no desempenho mecânico dessas estruturas. Em peças estruturais de madeira, o uso de fibras de reforço segue duas linhas mestras: fibras sintéticas como fibras de carbono, aramida e cristal líquido e, fibras naturais como fibras de sisal, curauá e basalto. Quanto à posição de colocação dos reforços, preferencialmente, a aplicação se dá externamente na região tracionada da peça. Quando se analisa a segurança em situações de incêndio, o comportamento do compósito, em função da degradação térmica, acrescenta maior complexidade às pesquisas; a definição da posição para a colocação do reforço, o tipo de fibra a ser aplicada e, principalmente, o comportamento da resina diante do aumento de temperatura, são questões que devem ser investigadas. Neste contexto, a atual pesquisa, ainda em andamento, visa apresentar um estudo relacionado ao comportamento mecânico de peças de madeira laminada colada reforçadas com fibras em situação pós-incêndio através de simulação numérica via Ansys software. Devido a seção carbonizada possui fraca colaboração estrutural além de apresentar trincas e retrações e, reforços poliméricos, baixa temperatura de transição da resina onde a temperatura deve ser inferior a 100°C, dependendo do tipo de resina utilizada, o estudo está sendo realizado com a colocação interna do reforço.

Palabras-clave: MLC, reforço estrutural, fibra sintética, incendio.

Abstract

The application of fiber reinforced polymers to wood structures has been widely used with results that show an improvement in the mechanical performance of these structures. In structural timber, the use of reinforcement fibers follows two main lines: synthetic fibers such as carbon fibers, aramid and liquid crystal, and natural fibers such as sisal, curauá and basalt fibers. As for the placement position of the reinforcements, preferably, the application occurs externally in the tensioned region of the piece. When the safety in fire situations is analyzed, the behavior of the composite, due to the thermal degradation, adds more complexity to the research; the definition of the position for the reinforcement placement, the type of fiber to be applied and, especially, the behavior of the resin in face of the increase in temperature are issues that must be investigated. In this context, this current research, still in progress aims to present a study related to the mechanical behavior of glued laminated timber reinforced with fibers in a post-fire situation through numerical simulation using Ansys software. The evaluation of the results points to the weak collaboration of the carbonized section with the application of reinforcement indicating the placement of reinforcement only in a region with temperature below 100°C depending on the type of resin used, the study is being performed with internal placement. of reinforcement..

Keywords: Glulam, structural reinforcement, synthetic fiber, fire.



1. INTRODUCCIÓN

El uso de la madera como elemento estructural liviano, combinado con todas las demás características, ha potenciado la investigación para dar al producto final una mayor confiabilidad; En esta línea, la investigación sobre madera laminada y pegada con compuestos de polímeros reforzados con fibra ha contribuido indudablemente a este propósito.

Sin embargo, la investigación que tiene como objetivo analizar la madera reforzada con polímeros y la madera sometida al fuego aún busca respuestas sobre el mejor uso de estos polímeros que usan resina en su matriz. Se han aplicado polímeros de resina epoxi, ya sea externa o internamente, entre chapas de madera, pero la resina epoxi tiene una temperatura de degradación cercana a los 65°C, lo que hace que su aplicación externa sea inviable; Las fibras aplicadas en la región carbonizada no son efectivas ya que el carbón tiene baja resistencia (MOE = 480 kN / m²) y su degradación conduce a la aparición de grietas.

2. INVESTIGACIÓN

La investigación en curso se lleva a cabo utilizando el software ANSYS y tiene como objetivo encontrar una respuesta numérica que sintetice la densidad, el tiempo de carbonización y la humedad para determinar la mejor posición de refuerzo mediante la búsqueda de respuestas de confiabilidad para el elemento estructural.

Definir la posición interna en la que el polímero permanece intacto y contribuye a la fiabilidad del elemento estructural es de suma importancia para el diseño. La ubicación de una isoterma que garantiza la integridad de la resina utilizada implica la definición de parámetros térmicos como la conductividad térmica y la isoterma de transición de la resina para obtener un compuesto residual estructuralmente confiable.

En cuanto a los diferentes tipos de fibras, tenemos: Fernando et al. (2015) investigaron polímeros reforzados con fibra de basalto (PRFB); Speranzini y Tralascia (2015) investigaron polímeros con fibras de lino y cáñamo, Yashida et al (2016) investigaron polímeros reforzados con fibra de vidrio (PRFV) y polímeros reforzados con fibra de carbono (PRFC); Basterra et al (2017) investigaron el polímero reforzado con fibra de vidrio, GRP con aplicación vertical interna; Donadon (2016) realizó estudios sobre vigas de madera de reforestación encolada reforzada con fibra y en 2017 Donadon et al. Se investigaron polímeros con fibras vegetales de cureuá y sisal, entre otros.

Por otro lado, los investigadores buscan caracterizar el comportamiento térmico de la madera; Sulleiman et al. (1999) observaron que el aumento de la temperatura conduce al aumento de la conductividad térmica y Zi Tao et al. (2010) realizaron mediciones experimentales de la conductividad térmica de la madera utilizando la técnica del medidor de flujo de calor y la fuente del plano transitorio y propusieron ecuaciones lineales correlacionadas con la densidad y la humedad de las especies estudiadas. Su trabajo presenta ecuaciones que permiten el cálculo de la conductividad térmica.

Para las maderas blandas como la especie PINUS SYLVESTRIS (Pinheiro Silvestre), la ecuación propuesta por los autores es:

$$k = 0,08805 + 0,0003888T \quad (1)$$

donde:

‘T’ es la temperatura en grados Celsius.



Considerando, por ejemplo, a temperatura de transición vítrea da resina epoxi igual à 65°C, la conductividad térmica corresponde à 0,1133, o que permite calcular la profundidad de la isoterma del polímero.

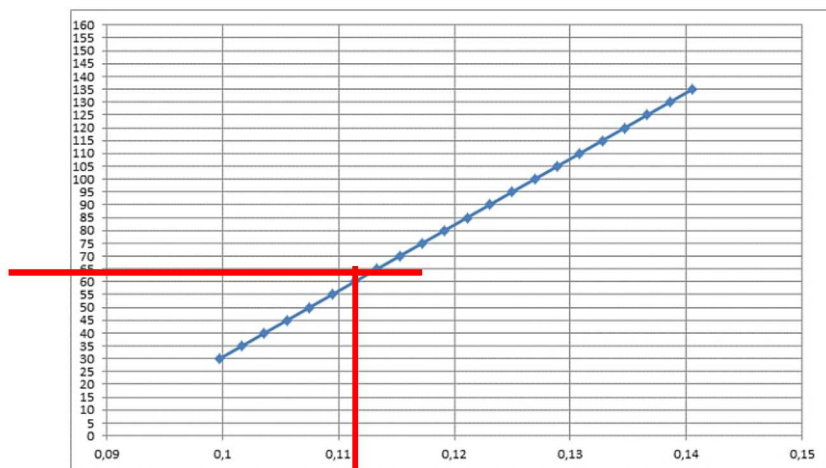


Figura 1: Conductividad térmica para pino silvestre à 65°C.



Fronteira de temperatura - 65°C

Figura 2: línea de degradación de resina epoxi(mediana)

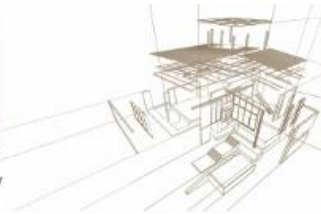
Frangi et al. (2008), encontraron las siguientes relaciones entre la profundidad de calentamiento del tiempo vesus el tiempo para la madera blanda:



CLEM

2019

18 al 20 de noviembre
Hotel Cottage
Montevideo - Uruguay



4º CONGRESO
LATINOAMERICANO
DE ESTRUCTURAS
DE MADERAS

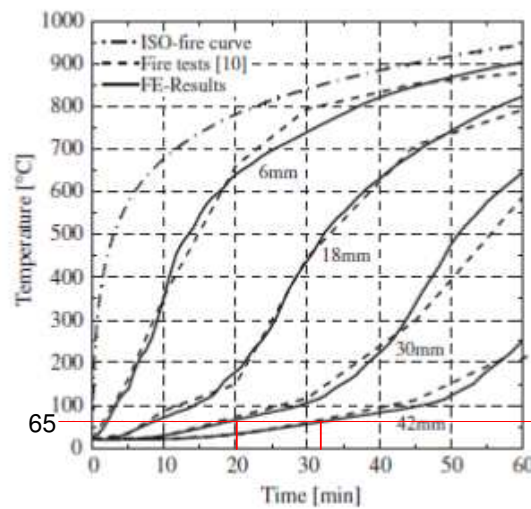


Figura 3: Comparación de temperaturas por FE-análisis térmica e testes de fogo a diferentes profundidades de muestras de madera expuestas al fuego ISO en un lado – fuente: Frangi (2008)

Según las pesquisas de Frangi et al. (2008), una profundidad de 42 mm tarda 32 minutos en alcanzar una temperatura de 65°C. Sin embargo, existe la influencia de las trincas y la contracción del carbón formado y el consiguiente aumento de la transferencia de calor por encima de 500°C (Cachim y Franssen, 2009). Cachim y Franssen (2009) relacionaron la densidad, el tiempo de exposición al fuego para determinar el isoterma de carbonización de varias especies:

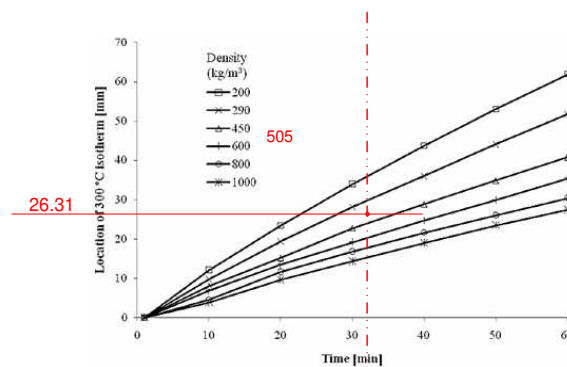


Fig. 4: Evolución de la profundidad de carbonización a lo largo del tiempo para diversas densidades- fuente Cachim e Franssen (2009).

En la misma línea, Martins (2015) evaluó una muestra de madera blanda y encontró el siguiente resultado:

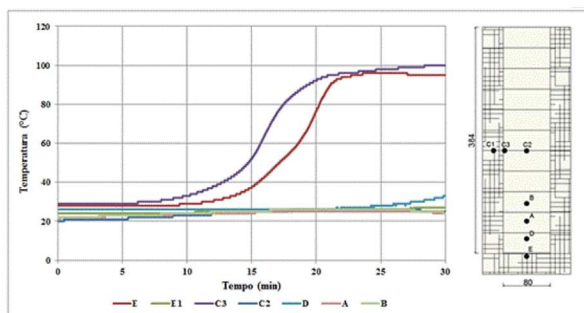


Figura 5: Distribución de temperatura en muestra de madera blanda laminada y pegada-
fuente: Martins (2015).

La isoterma de carbonización está dentro de los parámetros observados por Cachim y Franssen (2009). Martins (2015) encontró temperaturas de aproximadamente 35°C y 25°C para los puntos "D" y "C2", respectivamente.

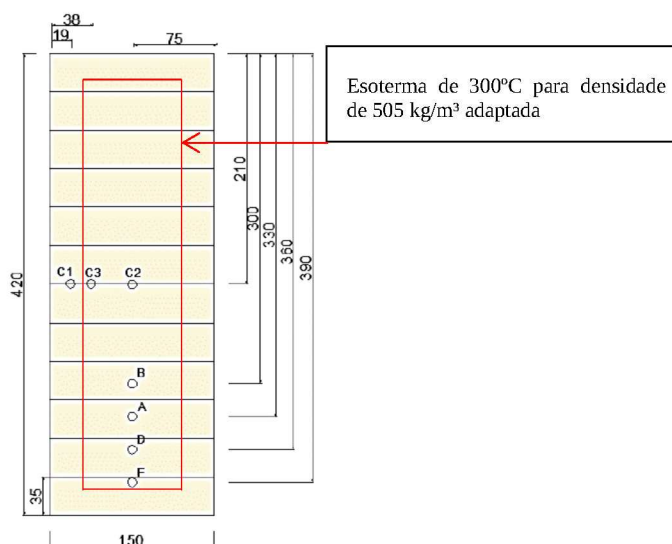


Figura 6: Esquema de isoterma de 300°C adaptada por los autores- tese de Martins para 32 minutos de exposición al fuego.

Saldanha (2018) probó vigas de madera PINUS laminadas y pegadas de acuerdo con el siguiente esquema; Sus resultados apuntan a un aumento de carga promedio del 27%:

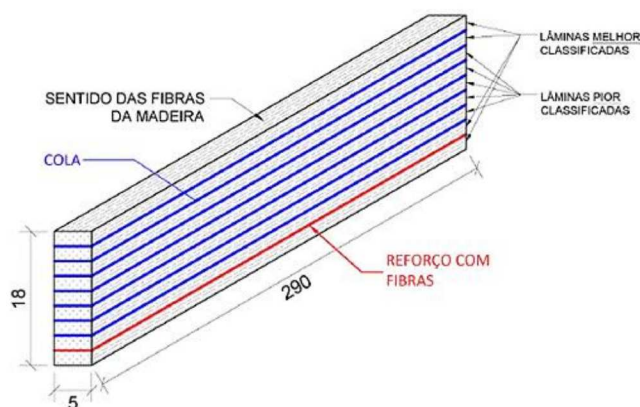


Figura 7: Esquema de montaje de las vigas probadas – fuente: Saldanha (2018).

La investigación actual parte de los resultados presentados por Saldanha (2018) y Martins (2015) para analizar la posición de instalación del refuerzo posterior al fuego con consideraciones sobre la temperatura ambiente y la situación de degradación de la resina:

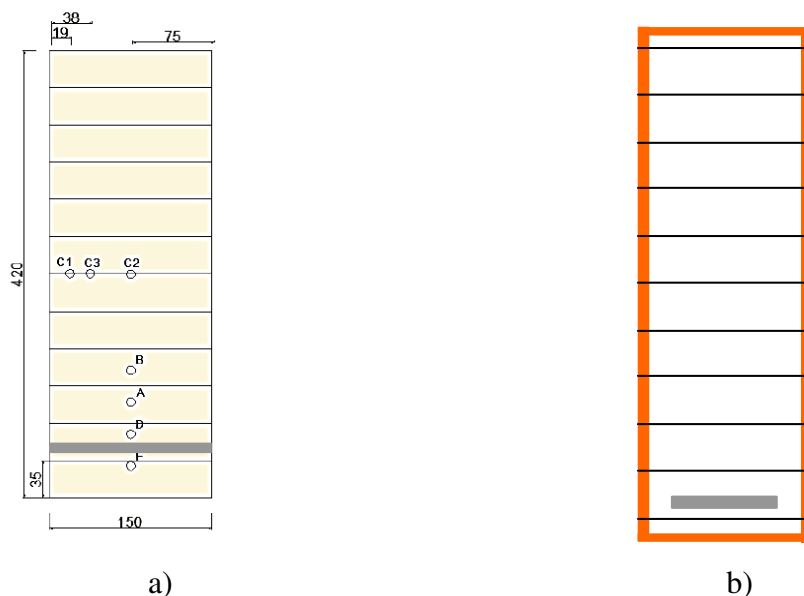


Figura 8: a) posición del refuerzo en temperatura ambiente e, b) posición posterior al fuego durante 32 minutos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BASTERRA et al (2017) Internal reinforcement of laminated duo beams of low-grade timber with GFRP sheets; Valladolid, Spain

CACHIM e Franssen (2009) – Assessment of Eurocode 5 charring rate calculation methods; journalFire Technology, volume 46

DONADON et al. (2017) Avaliação de fibras naturais de curauá e sisal para reforço de vigas de madeira laminada colada – CLEM/CIMAD, Buenos Aires, Argentina.

Donadon, Bruno Fazendeiro - Estudo de vigas de madeira de reflorestamento laminadas coladas reforçadas por fibras, 2016 – Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP.

FERNANDO, Frangi e Kobel (2016) Behaviour of basalt fibre reinforced polymer strengthened timber laminates under tensile loading



FRANGI et al. (2007). Charring model for timber frame floor assemblies with void cavities. ETH Zurich, Suíça

MARTINS, Gisele Cristina Antunes – Análise Numérica e Experimental de Vigas de Madeira Laminada Colada em Situação de Incêndio – tese de doutorado – 2016, São Carlos - SP.

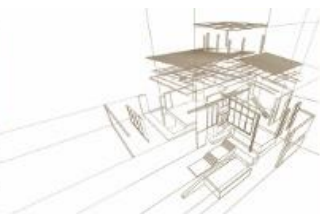
SALDANHA VICTOR, Renato. análise de vigas de madeira lamelada e colada reforçadas com fibras naturais e sintéticas através de ensaios de flexão, 2018 – dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP

SPERANZINI e Tralascia (2015) engineered lumber: lvl and solid Wood reinforced with natural fibres, 2010;

SULEIMAN et al., (1999) – Thermal conductivity and diffusivity of wood - Wood Science and Technology

YASHIDA et al (2016) Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets, 2016; ELSEVIER

ZI-TAO YU et al. (2010) experimental Measurements of Thermal Conductivity of Wood Species in China: Effects of Density, Temperature, and Moisture Content. China.



ANÁLISE TÉCNICA COMPARATIVA ENTRE OS USOS DE DLT E *DECKING* EM ESTRUTURAS DE MADEIRA

TECHNICAL COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN DLT AND DECKING USED FOR TIMBER STRUCTURES

Mocellin, Gabriel ^{(1)*}; Gavassoni, Elvidio ⁽²⁾

⁽¹⁾ Graduando em Engenharia Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Brasil

⁽²⁾ Prof. Dr. Eng. Civil. Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Brasil

* Contato: mocellin.gabriel@gmail.com

Resumo

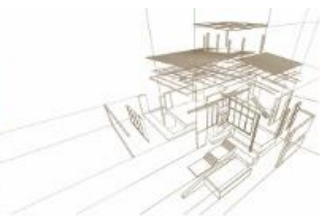
A crescente preocupação da sociedade com o meio-ambiente e com o desempenho das edificações atualmente dá ao emprego da madeira o caráter de alternativa sustentável e eficaz, uma vez que a madeira é um dos recursos mais sustentáveis disponíveis ao homem e as novas tecnologias de processamento da madeira permitem a confecção de peças mais resistentes que aço e concreto. Hoje, com o desenvolvimento tecnológico da madeira engenheirada, observa-se crescente vertente arquitetônica que valoriza este material: ano após ano, o número de projetos que utilizam a madeira de forma massiva aumenta. Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo a comparação estrutural de dois sistemas construtivos de pisos de madeira, a citar, o de *decking* e o de *Dowel Laminated Timber*, considerando-os como solução de engenharia para o patamar superior de uma torre de observação. São abordados os critérios de dimensionamento de ambas as soluções, baseando-se na normativas brasileira e norte-americana. São apresentados o dimensionamento da solução em *decking* e o pré-dimensionamento da solução em DLT. Observa-se que é possível conceber estruturas tecnicamente viáveis para ambas as soluções propostas. Enquanto a alternativa em *decking* emprega menos madeira em volume, a estrutura de DLT é mais leve.

Palavras-chave: Madeira Massiva, Torres de Madeira, Análise Estrutural.

Abstract

Society's growing concern about global environment and buildings performance is making timber show up as a sustainable and efficient alternative for structures, since it is one of the most sustainable resources available and its recent manufacturing technologies allows the production of pieces stronger than steel and concrete. Now, after engineered wood's technological development, a growing architectural tendency which enrich timber is observed: year over year, the number of massive timber projects increases. On this context, this work targets the structural comparison of two constructive systems, *decking* and *Dowel Laminated Timber*, considering them as engineering solutions for an observation tower upper-level deck. The design criteria are addressed based on Brazilian and north-American's specifications. *Decking's* details and DLT's pre-sizing are presented. It is concluded that both constructive systems are technically viable for the mentioned normative. Although *decking* design results in a structure that spends less wood in volume, DLT structure is lighter.

Keywords: Massive Timber, Wood Towers, Structural Analysis.



1. INTRODUÇÃO

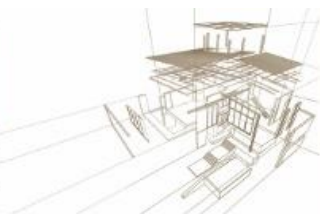
Pode-se atribuir a escolha da madeira, um dos primeiros materiais usados pelos seres humanos para fim estrutural, como material de construção a uma composição de fatores, dentre eles a relativa facilidade com que se pode extrair a madeira do ambiente e sua boa relação resistência/peso (Pfeil, 2003). Os primeiros registros de edificações construídas com madeira datam de cerca de 4500 a 3000 a.C. e já venciam vãos de até 7 m. (Kuklik, 2008).

Historicamente, a madeira perdeu espaço para a alvenaria a partir do século XVI, quando o desenvolvimento industrial tornou acessíveis o concreto e o tijolo. No século XVIII, se proibiu o uso de madeira como material estrutural em edificações europeias com exceção para pisos, vedação e telhados (Kuklik, 2008). As restrições impostas ao uso da madeira como elemento estrutural podem ser atribuídas à carência de tecnologias que melhorassem a qualidade das madeiras disponíveis uma vez que, por ser um material natural, a madeira está suscetível a defeitos que podem ser provenientes tanto do crescimento do tronco quanto do processamento das peças (Pfeil, 2003). Após o advento de novas tecnologias de construção com madeira como a Madeira Laminada Colada, bem como o aprimoramento das técnicas de cultivo, serragem e desdobramento da madeira (que em conjunto fizeram surgir a terminologia de “madeira engenheirada”), ano após ano o uso da madeira de forma massiva aumenta (Correia, 2009; Dias, 2018; Shigue, 2018). Encontra-se na madeira uma forma de construir edificações de alto desempenho que não comprometam os recursos naturais, com menos perdas e peças de maior qualidade (Pfeil, 2003). Neste cenário, é observada hoje uma vertente arquitetônica que valoriza este material no Brasil, dando protagonismo à madeira no sistema estrutural das edificações (Shigue, 2018).

Embora se observe uma crescente adoção de sistemas de madeira engenheirada na construção civil, no Brasil estruturas convencionais são comumente projetadas com madeira serrada. Para a construção de pisos e lajes de madeira, por exemplo, o sistema de decking é uma das tecnologias mais usadas em pisos externos. Seu dimensionamento é relativamente simples e está previsto na norma brasileira em vigor NBR 7190:1997 - Projeto de estruturas de madeira. Em outros países, todavia, outros sistemas construtivos já são utilizados, como por exemplo a tecnologia de *Dowel Laminated Timber* (DLT, que pode ser traduzido como Madeira Laminada "Cavilhada"), conceito que surgiu na década de 90 na Suíça e conhecido na Europa como *Dübelholz*. O DLT consiste em um sistema de madeira laminada no qual as lâminas são justapostas e conectadas entre si por cavilhas, formando painéis maciços compostos exclusivamente de madeira.

Enquanto solução de *decking* já é utilizada de forma ampla e encontra-se na literatura muitas referências e manuais técnicos a seu respeito, o sistema construtivo de DLT pode ser considerado inovador e recente no Brasil de forma que a literatura brasileira acerca deste ainda é incipiente. Tal fato é corroborado pela ausência da disponibilidade de DLT entre os produtos comercializados no mercado brasileiro em uma extensiva pesquisa realizada por Shigue, 2018. Mundialmente, essa tecnologia já foi empregada em diversas construções, como por exemplo em museus, aeroportos, escritórios, hotéis e edifícios corporativos.

Segundo o escritório de engenharia StructureCraft, dentre as principais características do sistema DLT destacam-se a leveza, o bom comportamento em situação de incêndio, o alto desempenho termo acústico e o apelo estético de uma estrutura feita somente com madeira. Adicionalmente a essas características que são comuns a todas as soluções de madeira massiva, destaca-se o caráter sustentável deste sistema, que otimiza a utilização da madeira proporcionando quase nenhum desperdício de material. Outra vantagem do DLT frente a outros sistemas de madeira engenheirada está no fato de que o maquinário necessário para a sua confecção pode ser considerado simples. Tipicamente, as dimensões de painéis pré-fabricados



em DLT variam entre 2,4x6,0m e 3,0x18m, e o transporte dessas placas constitui sua limitação principal.

A leveza é uma característica comum a todas as estruturas de madeira. O estudo comparativo feito por Vara (2015) mostra que uma estrutura em madeira pesa cerca de 20% da estrutura equivalente em concreto armado, no caso de uma residência unifamiliar de aproximadamente 100 m².

Sistemas de madeira massiva, como o DLT, apresentam bom comportamento em situação de incêndio por serem constituídos de peças robustas. Embora a madeira seja um material combustível, o carvão produzido na sua combustão cria uma camada isolante que retarda a penetração das chamas e protege a porção central das seções dos elementos, mantendo suas propriedades mecânicas (Figueroa, M.J.M. e Moraes, P.D. de, 2009) e permitindo que a estrutura apresente tempo de resistência ao fogo suficiente para a evacuação da edificação, por exemplo.

Deste modo, a fim de comparar de forma técnica dois sistemas construtivos usados na construção de pisos e lajes de madeira (sendo um tradicional e muito utilizado, outro inovador e ainda pouco difundido), utiliza-se um estudo de caso em que são propostas as duas alternativas: *decking* e DLT. É utilizado como base o projeto do deck superior de uma torre de observação concebida por alunos da disciplina de Estruturas de Madeira do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná.

A torre é projetada com o objetivo de proporcionar aos visitantes do parque temático Beto Carrero World uma vista panorâmica das suas principais atrações. A concepção arquitetônica da torre segue a ideia de utilizar ao máximo a madeira, otimizando suas propriedades. A estrutura portante da torre é treliçada, com seção quadrada e uniforme ao longo de sua altura, escadas laterais externas e um deck superior coberto.

A solução em *decking* é proposta de forma a atender às disposições da NBR 7190:1997, enquanto a alternativa em DLT atende às considerações da normativa norte-americana para construções de madeira NDS (2018) por ser um código de referência mundial, mais atualizado e já utilizado em estruturas feitas em DLT.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da laje

A torre utilizada como objeto deste artigo foi concebida para servir como ponto de observação panorâmica do parque temático Beto Carrero World, localizado no litoral do estado de Santa Catarina, no município de Penha. A localização da torre dentro do parque está representada na Figura 1.

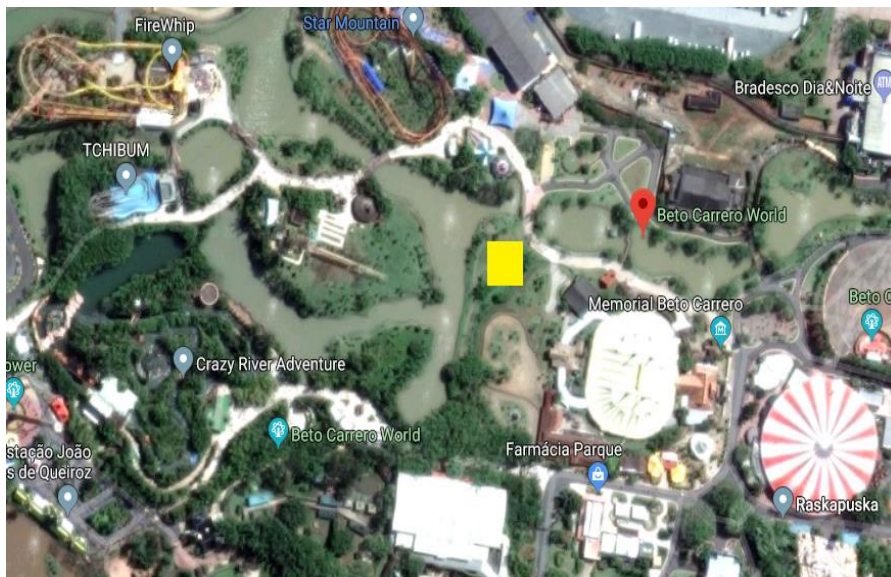


Figura 1: Imagem de satélite do parque, localização da torre em amarelo ($26^{\circ}48'02.7''S$ $48^{\circ}36'58.0''O$). Google (2019)

Define-se que o deck superior esteja à 18 m de altura em relação ao terreno, tenha dimensões de 14x14 m e que seja coberto, mas sem vedações laterais. Uma vista da torre e a planta do deck são apresentados na Figura 2.

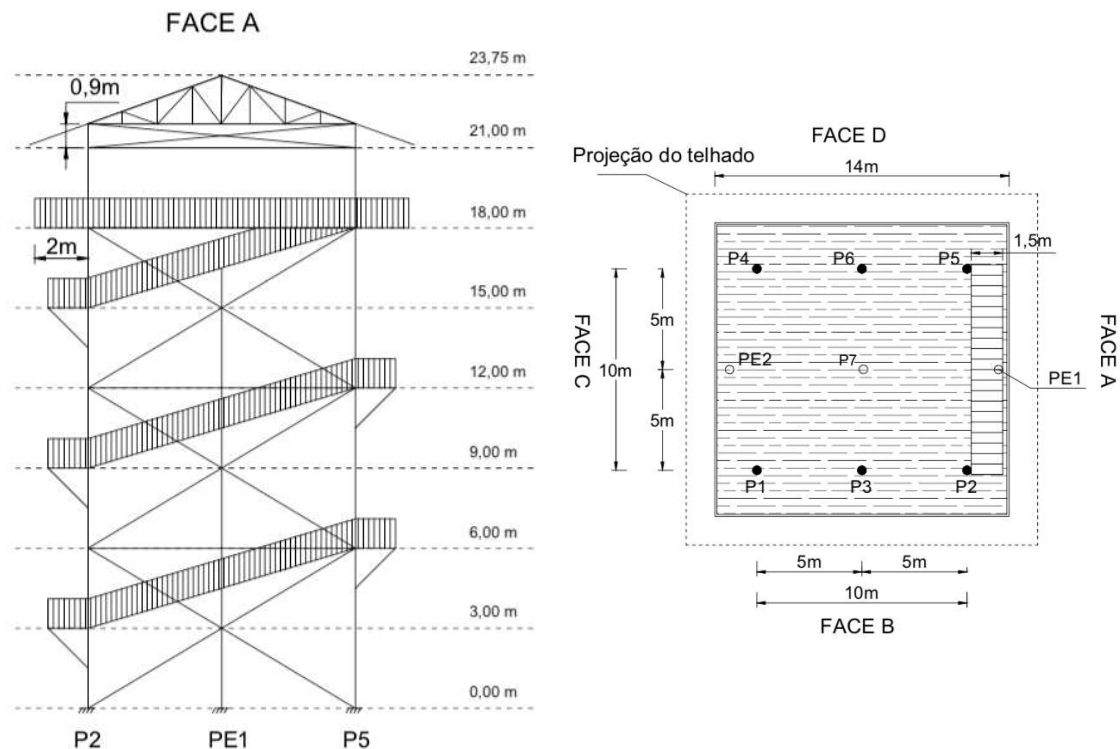
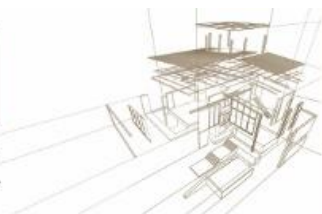


Figura 2: Elevação da torre e planta do deck

2.2. Solicitações características



O dimensionamento das soluções subsequentes considera as combinações normais de carregamentos dispostas na NBR 8681:2003, em que foram consideradas as solicitações características discutidas a seguir.

2.2.1. Peso próprio

Considerado conforme a massa específica de cada espécie de madeira, apresentadas na Tabela 1. Para as combinações de carregamentos, considera-se o peso próprio como carregamento permanente.

Tabela 1: Propriedades¹ das madeiras utilizadas

Espécie de madeira	Nome científico	Massa específica (kg/m ³)	Módulo de elasticidade E ₀ (MPa)	Máxima tensão normal sob flexão f ₀ (MPa)
Ipê	<i>Tabebuia serratifolia</i>	1068,0	18011,0	76,0
Eucalipto Citriodora	<i>Eucalyptus citriodora</i>	999,0	18421,0	62,0
Douglas fir-larch	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	490,0	13100,0	9,31

2.2.2. Uso e ocupação

Considera-se 4 kN/m² (carregamento de arquibancada segundo a NBR 6120:1980) uniformemente distribuídos. A carga acidental de vento não é considerada devido ao fato de que por ser uma estrutura vazada e horizontal não há, a princípio, diferenças de pressão entre as faces inferior e superior do deck; não obstante, a força global do vento sob a torre é resistida pelos elementos de contraventamento.

Para as combinações de carregamentos, considera-se que o carregamento de uso é acidental de média duração.

2.3. Dimensionamento da solução em decking

Em um deck, resumidamente, as cargas solicitantes são transmitidas das régua para os barrotes e destes para as vigas, que por sua vez são apoiadas nos pilares da estrutura. Um desenho esquemático da estrutura de um deck é apresentado na Figura 3.

¹ Para Ipê e Eucalipto, valores da NBR 6170:1997 considerando umidade padrão de 12%. Para Douglas fir-larch, valores do Suplemento da NDS de 2018.

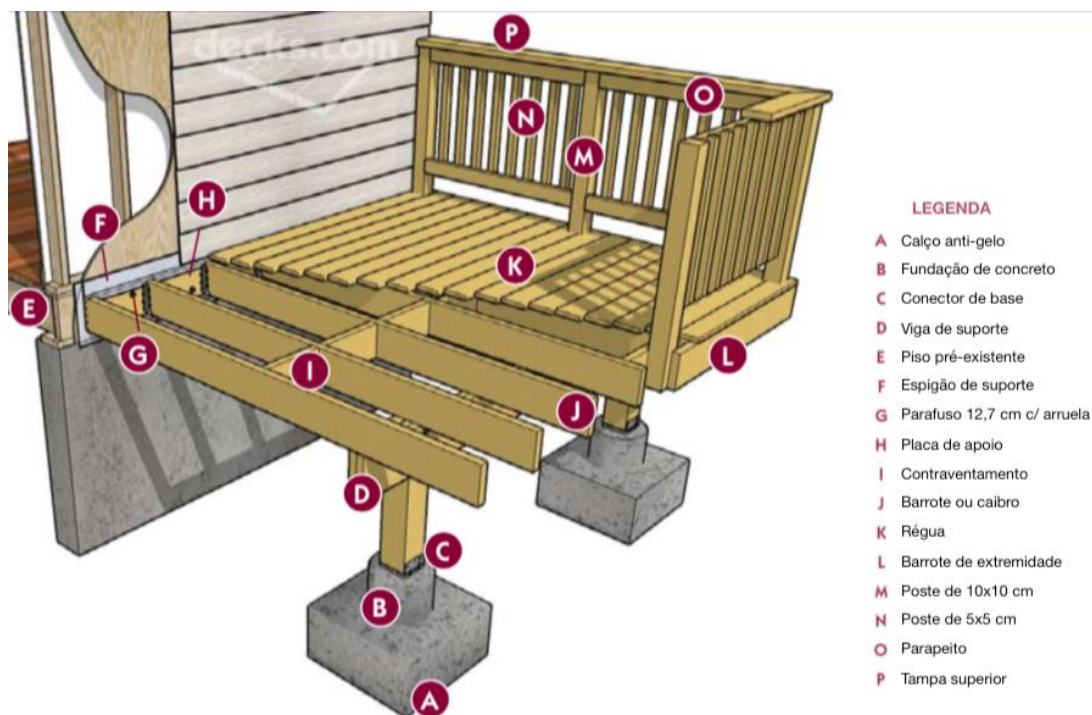
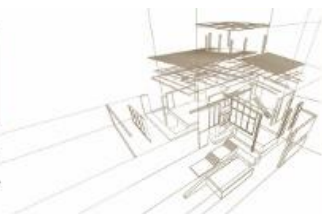


Figura 3: Esquema de um deck de madeira. Adaptado de Decks.com (2008)

Considera-se que todos os elementos do deck estão submetidos a flexão simples. É escolhido dimensionar as peças para atendimento ao Estado Limite Último (ELU) e verificar as deformações frente ao Estado Limite de Serviço (ELS).

2.3.1. Combinações

Em consonância com as disposições da NBR 8681:2003, considera-se os seguintes coeficientes de majoração das cargas para a combinação normal de ações no Estado Limite Último: $\gamma_g = 1,3$ para o peso próprio; $\gamma_q = 1,4$ para o carregamento de ocupação.

2.3.2. Estado Limite Último (ELU)

O dimensionamento para o ELU consiste em verificar a estabilidade das peças frente aos seguintes estados: compressão e tração na flexão simples, cisalhamento, esmagamento da peça em seus apoios e estabilidade lateral.

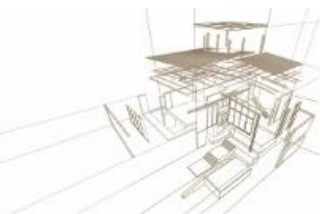
As equações (1) e (2) representam o estado de tração e compressão na flexão, respectivamente. O equilíbrio da peça frente ao cisalhamento é alcançado satisfazendo-se a equação (3). A equação (4), quando verificada, garante que não haverá esmagamento da peça em seus apoios e a equação (5) determina o máximo comprimento da peça l_j para o qual se garante a estabilidade lateral.

$$\sigma_{t0,d} = \frac{M_d}{W_t} \leq f_{t0,d}, \quad (1)$$

$$\sigma_{c0,d} = \frac{M_d}{W_c} \leq f_{c0,d}, \quad (2)$$

$$\tau_{90,d} = \frac{Q_d \cdot S}{b \cdot I} \leq f_{90,d}, \quad (3)$$

$$\sigma_{c90,d} = \frac{R_d}{b \cdot c} \leq f_{c90,d}, \quad (4)$$



$$\frac{l_1}{b} < \frac{E_{c,ef}}{\beta_M \cdot f_{cd}} \quad (5)$$

onde:

- $\sigma_{t0,d}$ e $\sigma_{c0,d}$ são as tensões de tração e compressão máxima paralela às fibras solicitantes de cálculo, respectivamente,
- M_d é o momento fletor solicitante de cálculo,
- W_t é o módulo de resistência à flexão pura,
- $f_{t0,d}$ e $f_{c0,d}$ são as resistências à tração e compressão máxima paralela às fibras, de cálculo, respectivamente,
- $\tau_{90,d}$ é a tensão de cisalhamento perpendicular às fibras solicitante de cálculo,
- Q_d é a força cortante solicitante de cálculo,
- S é o momento estático da seção,
- b é a dimensão da base da seção,
- I é o momento de inércia da seção solicitada,
- R_d é a reação no apoio do elemento analisado,
- l_1 é o vão máximo para que se garanta estabilidade lateral da peça,
- $E_{c,ef}$ é o módulo de elasticidade à compressão efetivo,
- β_M é o coeficiente de correção, que depende da relação h/b .

2.3.3. Estado Limite de Serviço (ELS)

A verificação feita para o ELS consiste em garantir que a deformação da estrutura para as combinações de solicitações características seja inferior aos limites da norma, considerando os carregamentos característicos solicitantes de média e longa duração. As deformações devem considerar o fator de fluência da madeira para a devida classe de umidade e durações dos carregamentos.

A deformação de cálculo da estrutura δ , portanto, é obtida pela equação (6).

$$\delta = \delta_{instantânea} \cdot (1 + \varphi), \quad (6)$$

onde:

- $\delta_{instantânea}$ é a deformação elástica,
- φ é o coeficiente de fluência.

A flecha limite para pisos de acordo com a NBR 7190 é de $l/300 \leq 15$ mm para um vão l entre apoios e $l_b/150 \leq 15$ mm para um vão l_b em balanço.

2.4. Dimensionamento da solução em DLT

O dimensionamento das placas é feito segundo as considerações da normativa norte-americana para construções de madeira NDS (2018) e com base nas disposições apresentadas pelo escritório de engenharia StructureCraft (2019).

Em linhas gerais, o dimensionamento das lâminas que compõem as placas de DLT é feito a partir da definição dos vãos a serem vencido e considerando que as lâminas geralmente têm largura nominal de 5 cm. Dimensiona-se, portanto, a altura das lâminas. É detalhado também o posicionamento das cavilhas, que trabalham principalmente resistindo ao corte. Resistência adicional é conferida à ligação com cavilhas devido ao fato de que estas são inseridas com umidade muito abaixo da umidade da peça de madeira; quando a cavilha entra em equilíbrio com a peça ela incha levemente, o que mobiliza o atrito entre as duas peças (StructureCraft, 2019).



O pré-dimensionamento desta estrutura é feito com a madeira Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*) de classe estrutural e utilizando-se as tabelas apresentadas no guia *Dowel Laminated Timber Design & Profile Guide*, que relacionam o vão a ser vencido na direção axial das lâminas com a seção mínima necessária às peças, conforme a espécie de madeira e considerações sobre o carregamento atuante.

3. RESULTADOS

3.1. Detalhamento para a solução em decking

A Tabela 2 apresenta as seções e vãos para os quais os elementos atendem as considerações da NBR 7190:1997. As régua são de Ipê, e os demais elementos são de *Eucalipto Citriodora*.

Para as combinações de carregamentos, considera-se classe 3 de umidade do ambiente, e os seguintes valores de coeficientes de modificação para as propriedades das madeiras: $k_{mod,1} = 0,6$; $k_{mod,2} = 0,8$; e $k_{mod,3} = 0,7$.

Os coeficientes de fluência considerados são $\varphi = 2,0$ para o peso próprio e $\varphi = 1,0$ para o carregamento de ocupação da torre.

Tabela 2: Resumo do dimensionamento para a solução em decking

Elemento	h (cm)	b (cm)	Vão (cm)	I_1 (cm)	$\sigma_{0,d}$ (MPa)	$f_{0,d}$ (MPa)	Flecha (mm)	Flecha adm. (mm)
Régua	2,0	10,0	50	3950	2,8	12,6	0,2	1,7
Barrotes	15,0	5,0	150	242	4,3	10,4	3,0	5,0
Vigas (biapoiadas)	45,0	20,0	500	1188	4,4	10,4	10,6	15,0
Vigas (balanço)	45,0	20,0	200	1188	2,8	10,4	3,1	13,3

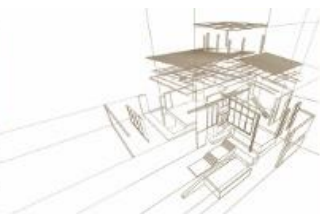
3.2. Detalhamento para a solução em DLT

Utiliza-se a tabela de pré-dimensionamento para vão simples com madeira Douglas Fir classe Estrutural (*Single Span Sel Str*), revestimento com placas cimentícias de 5 cm de espessura na face superior das placas de DLT, mostrada na Tabela 3.

Tabela 3: Pré-dimensionamento em DLT. Adaptado de StructureCraft (2019)

Vão (m)	Carga de ocupação (kN/m ²)				
	2,00	2,50	3,50	5,00	7,50
4,27	5x15	5x15	5x15	5x15	5x15
4,57	5x15	5x15	5x15	5x15	5x15
4,88	5x15	5x15	5x15	5x15	5x20
5,18	5x15	5x15	5x15	5x15	5x20
5,49	5x15	5x15	5x15	5x20	5x20
5,79	5x15	5x15	5x20	5x20	5x20
6,10	5x15	5x15	5x20	5x20	5x20

Interpola-se os valores tabelados para obter as seções mínimas necessárias para resistir ao carregamento de ocupação de 4 kN/m² com vão de 5 m. Para estas condições, portanto, lâminas de 5x15 cm atendem às considerações da NDS segundo o guia da StructureCraft, já considerando a aplicação de placas cimentícias na face superior das placas de DLT.



3. DISCUSSÃO

3.1. Comparação das duas soluções

Quando comparadas com uma laje de concreto, ambas as soluções em madeira podem ser consideradas estruturas leves (o peso de concreto armado para a mesma área de laje, adotando uma espessura de 8 cm, seria de aproximadamente 34 toneladas), em consonância com os resultados encontrados por Vara (2015). Comparadas entre si, observa-se que o volume de madeira na solução em DLT é cerca de 30% superior ao deck convencional, enquanto a solução em *decking* é quase 60% mais pesada que a alternativa maciça, embora essa relação seja muito dependente das espécies de madeira escolhidas. A Tabela 4 apresenta de forma resumida o volume e peso para as duas soluções propostas.

Tabela 4: Resumo das soluções em termos de volume e peso

Solução	Volume de madeira (m ³)	Peso (ton)
Decking	22	22
DLT	29	15 ²

Outra análise relevante é a de resistência ao fogo. A NBR 7190:1997 não apresenta diretrizes de projeto quanto a esse tema, porém há considerações a respeito deste assunto na NBR 14432:2001. Caso desconsiderada a diferença nas taxas de carbonização por se tratarem de espécies de madeira diferentes, seria esperado que a solução em DLT apresentasse tempos de resistência ao fogo superiores à solução em *decking* por ter uma superfície específica menor; todavia, a taxa de carbonização é maior quanto menor a massa específica da madeira (Figuerola, M.J.M. e Moraes, P.D. de, 2009, apud Njankouo, Dotreppe e Franssen, 2004), portanto é necessário que se faça o cálculo preciso da resistência ao fogo das duas soluções para que conclusões sejam tiradas.

Quanto à durabilidade, ambas as soluções necessitam de cuidados quanto ao controle da umidade da madeira para garantir o desempenho estrutural previsto: enquanto para a solução em *decking* basta o tratamento superficial dos elementos com impregnante (stain), é preciso revestir a superfície das placas de DLT com placas cimentícias impermeabilizadas.

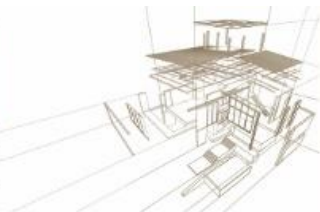
4. CONCLUSÃO

É possível conceber duas soluções estruturais para a edificação em questão. Pelo conjunto de fatores explicitados, o sistema construtivo em DLT é uma alternativa viável sob o ponto de vista técnico. Outras análises, todavia, não são dispensadas.

É necessário aprofundar o detalhamento das conexões e ligações para se obter projetos básicos satisfatórios. Além disso o dimensionamento do DLT deve ser feito de modo a verificar a tabela de pré-dimensionamento e utilizar também uma espécie de madeira disponível no cenário nacional. Ainda, é preciso que seja elaborado o projeto a nível executivo. As demais partes constituintes da torre também devem ser dimensionadas e detalhadas. Pretende-se elaborar os orçamentos (incluindo mão de obra e não apenas material) de ambas as soluções apresentadas a fim de comparação.

Muitas outras comparações podem ser feitas entre as duas soluções apresentadas. A título de exemplo, poder-se-ia comparar seus desempenhos térmicos, a quantidade de carbono sequestrada, tecnologia construtiva necessária e análises dinâmicas das estruturas.

² Esse valor já considera o revestimento de placas cimentícias.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Wood Council (2017). National Design Specification for Wood Construction 2018 edition. USA.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1988). Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. NBR 6120. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. NBR 8681. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). Projeto de estruturas de madeira. NBR 7190. Rio de Janeiro.

Correia, E.A.S. (2009). Análise e Dimensionamento de Estruturas de Madeira. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Decks.com. (2008). Plans Guide. Winchester, VA, USA.

Dias, A. (2018). Como a madeira vai se transformar no principal material de construção de edifícios de múltiplos andares. São Paulo, Brasil.

Figueroa, M. J. M. e Moraes, P. D. de (2009). Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. Ambiente Construído, v. 9, n. 4, p. 157-174.

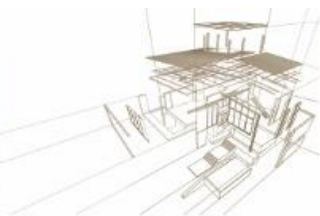
Kuklik, P. (2008). History of timber structures. In Handbook 1 – Timber structures, Leonardo Da Vinci Pilot Projects, Praga, República Checa.

Pfeil, W. e Pfeil, M. (2003). Estruturas de Madeira. Livros Técnicos e Científicos Editora SA, RJ, Brasil.

Shigue, E. K. (2018). Difusão da Construção em Madeira no Brasil: Agentes, ações e produtos. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.

StructureCraft (2019). DLT Design and Profile Guide v.4 – USA. BC, Canada.

Vara, A. F. F. (2015). Estudo Comparativo Entre Estruturas em Madeira e Estruturas em Betão Armado. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora, Évora, Portugal.



ANÁLISIS NUMÉRICO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE UN EDIFICIO DE MARCOS LIVIANOS DE MEDIANA ALTURA

NUMERICAL ANALYSIS OF THE SEISMIC PERFORMANCE OF A MID-RISE LIGHT FRAME TIMBER BUILDING

Benedetti, Franco ⁽¹⁾*; Opazo, Alexander ⁽¹⁾; Salgado, Mauricio ⁽²⁾; Ávila, Ignacio ⁽²⁾; Grandón, Juan Carlos ⁽²⁾; Nicool, Astroza ⁽²⁾

⁽¹⁾ MSc. Universidad del Bío Bío. Concepción, Chile

⁽³⁾ Ing. Civil. Concepción, Chile

* Contacto: fbenedet@ubiobio.cl

Resumen

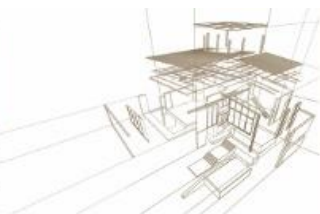
Esta investigación entrega un análisis detallado de la respuesta estructural de un edificio de madera de mediana altura con estructura de sistema marco plataforma. Se estudia un edificio residencial de mediana altura con un área de planta de 270 m² y 12,2 m de altura mediante modelos detallados no lineales. El análisis numérico se lleva a cabo en OpenSees, y se incluye todos los elementos constitutivos, desde el marco de madera hasta los clavos, los anclajes y la fricción, lo que produce elevada demanda computacional por lo que se utiliza computación paralela para ejecutar análisis pushover y dinámicos incrementales. Los resultados muestran que los elementos que más afectan a la respuesta global y el modo de falla son las uniones de corte y las conexiones OSB-madera. Se observa además que la fragilidad del sistema aumenta al disminuir la altura de edificio, debido a que en los diseños evaluados tienen menor capacidad de disipación de energía. En base a las curvas de capacidad se proponen límites de desempeño mediante la evaluación de la degradación de la rigidez, lo que sugiere que las estructuras de madera con marcos ligeros pueden alcanzar desplazamientos laterales más elevados sin sufrir daños. Finalmente se evalúa el efecto de la distribución de la capacidad entre los conectores en la capacidad estructural.

Palabras-clave: Edificios de madera, desempeño sísmico, análisis no lineal.

Abstract

This research provides a detailed analysis of the structural response of a light frame medium-height wooden building. A mid-rise residential building of 12.2 m height and a plan area of 270 m² is studied through detailed non-linear models. The numerical analysis is carried out in OpenSees, and all the constituent elements are included, from the wooden frame to the nails, the anchors, and the friction; which produces high computational demand being needed parallel computation techniques to execute pushover and incremental dynamics analyses. The results show that the elements that affect the most the global response and the failure mode are the shear connections and the OSB-wood joints. It is also observed that the fragility of the system increases when the height of the building decreases, because in the evaluated designs they have less energy dissipation capacity. Furthermore, Based on the capacity curves, performance limits are proposed by evaluating the stiffness degradation, which suggests that light-framed wooden structures can achieve high lateral displacements without significant damage. Finally, the effect of the distribution of the capacity among different connections on the structural capacity is analyzed.

Keywords: Timber buildings, seismic performance, non-linear analysis.



1. INTRODUCCIÓN

El sistema de marcos livianos de madera ha sido ampliamente utilizado para la construcción de edificios de mediana altura incluso en regiones sísmicas, pero hoy en día en Chile no hay evidencias de edificios construidos de madera con más de 2 pisos.

Uno de los mayores obstáculos para la construcción de edificios de mediana altura en marcos livianos de madera es que, aunque se ha demostrado que el desempeño sísmico es satisfactorio, las estructuras sufren desplazamientos laterales más altos que los límites impuestos por el código de diseño sísmico chileno (NCh 433:1999). Además, no existe desarrollo de un método claro de diseño y análisis en la práctica de la ingeniería Chilena.

Diversos estudios se han enfocado en estudiar el desempeño de sistemas estructurales basados en marcos livianos de madera (Li et al. 2010; Pang, Ziaie, Filiatrault 2012). Para ello se han realizaron modelos numéricos no lineales, los cuales sometidos a análisis dinámicos permitieron estimar el comportamiento frente a distintas acciones sísmicas de dichas edificaciones.

De igual modo, investigaciones a nivel internacional también han centrado sus estudios (Ellingwood, Rosowsky, Pang 2008; Li et al. 2010) en la determinación de la fragilidad de sistemas de marcos livianos en madera, con el propósito de estimar la probabilidad de daño de aquellas estructuras frente desastres naturales. A nivel local, se han realizado estudios empleados modelos numéricos orientados a viviendas, que según los análisis pseudo-tridimensional dinámico no lineal han permitido realizar estudios de la seguridad y serviciabilidad de viviendas residenciales sometidas a eventos sísmicos (Dechent et al. 2017).

En busca de una mejor comprensión de la respuesta sísmica de un edificio de mediana altura con marcos livianos de madera, en este trabajo se han desarrollado modelos numéricos no lineales de alto nivel de detalle de uno, tres y cinco pisos, con los que se ejecutan análisis estáticos no lineales y dinámicos incrementales (Vamvatsikos y Cornell 2002).

Por medio de los análisis pushover, se busca establecer qué elemento constitutivo de la estructura es más importante en la respuesta no lineal del edificio, en términos del modo de falla y curva de capacidad. Además, se formula una propuesta de estados límite de daño que permita asociar un indicador de daño estructural con el nivel de desempeño alcanzado.

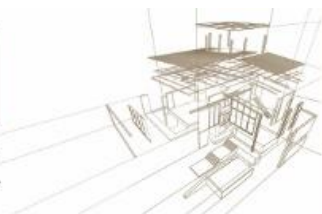
Por otro lado, basado en el desconocimiento de la respuesta sísmica de una edificación de madera, surge la interrogante respecto de cómo es su comportamiento bajo la acción de eventos sísmicos, en particular, de cuan susceptible pueden ser estas a fallar si no se diseñan de la forma adecuada. Para estudiar este comportamiento, se ejecutan análisis dinámicos incrementales, los que permitían caracterizar su respuesta bajo la acción de seis registros aceleración chilenos, y que finalmente permitió estimar las curvas fragilidad de las estructuras en sus dos direcciones.

2. CASO DE ESTUDIO

El presente capítulo entrega información general de los arquetipos, en él se señalan sus características geométricas en planta y elevación. Además, también se detallan las consideraciones empleadas para desarrollar el modelo numérico con las propiedades de sus elementos de conexión.

2.1. Descripción del edificio

Los casos de estudio hacen referencia a un edificio residencial de uno, tres y cinco pisos completamente estructurado en el sistema de marcos livianos de madera. La arquitectura se



desarrolla en el marco del Proyecto CORFO “Evaluación y propuesta de modificación de normativa de diseño estructural para la construcción de una edificación de mediana altura en Chile con estructura en madera utilizando el sistema de marco y plataforma”. Cada piso consta de cuatro departamentos, con una superficie total en planta de 270 m², donde el lado longitudinal posee 24 m, mientras que su dirección transversal mide 11.9 m. La altura total para el edificio de uno, tres y cinco pisos es de 2.44 m, 7.32 m y 12.2 m respectivamente, con una altura uniforme de entre pisos de 2.44 m para cada edificación. La Figura 1 presenta una vista de la configuración en planta de cada piso.

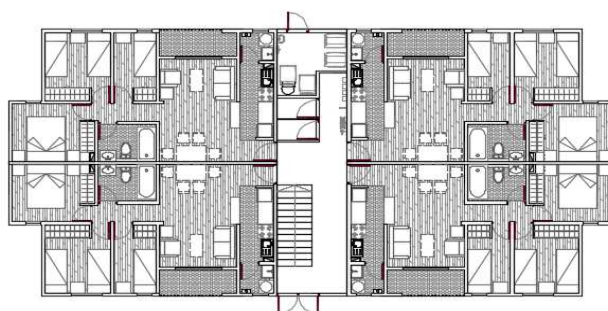


Figura 1: Vista en planta del edificio

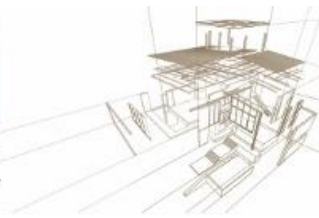
Para el prediseño estructural, se utilizó el código sísmico Chileno (NCh 433:2009), la norma chilena de diseño de madera estructural (NCh 1198:2014) y la el código SDPWS 2015 (AWC 2015). Los marcos de madera están confeccionados con madera aserrada de pino radiata, de dimensiones 45x12 mm (2x6 in), grado C16 de acuerdo con las normas Chilenas (NCh 1198:2014) y europeas, y tableros OSB de 11.1 mm de espesor en la cara exterior de los muros.

3. MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico se desarrolló en OpenSees (McKenna et al. 2002) con un enfoque muy detallado. Cada elemento estructural y todos los clavos y conexiones están incluidos en el modelo. Los tableros OSB se modelan utilizando elementos de shell, mientras que los pies derechos y soleras como barras elásticas. Para uniones madera a madera (conexiones entre pies derechos y soleras), OSB a madera, anclajes, hold downs y angle brackets se utilizan elementos links no lineales, cuyas leyes constitutivas se obtienen de ensayos mecánicos y de la literatura (Tomasi y Sartori, 2013; Humbert et al. 2014; Zisi 2009). Algunas de estas propiedades son mostradas en la Tabla 1, y la histéresis de la unión OSB-Madera, obtenida por ensayos cíclicos ejecutados en la Universidad del Bío-Bío, se presenta en la Figura 2.

Tabla 1: Propiedades de los conectores

Conexión	Δ_{fy} (mm)	Δ_{ult} (mm)	Ductilidad	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	Rigidez (kN/mm)
Hold Downs	13.0	24.0	1.84	100.0	7.31
Angle Brackets	10.0	24.8	2.48	21.6	2.48
OSB-Madera	3.5	10.0	2.85	1.4	2.85
Madera-Madera	--	--	--	--	0.25



Los arquetipos en primera instancia se modelaron como una estructura tridimensional acoplada con sus elementos perpendiculares utilizando el software SAP 2000 (Computers and Structures 2017), con el fin obtener de manera visual la geometría del edificio y general el preproceso para convertir el modelo a lenguaje OpenSees. La Figura 3 muestra el modelo geométrico de cinco pisos.

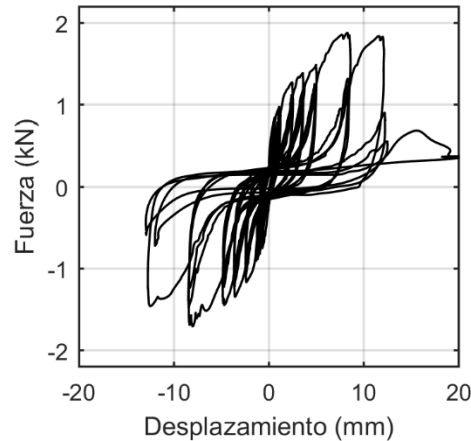


Figura 2: Histéresis unión OSB-Madera obtenida de ensayos cíclicos

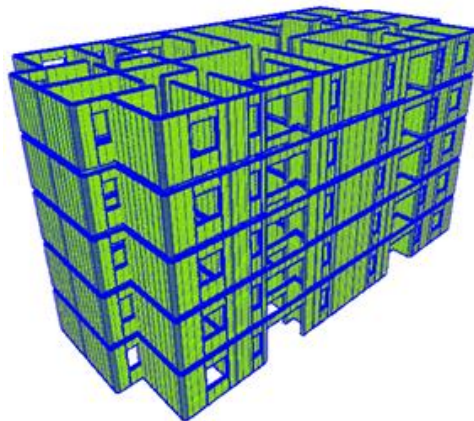


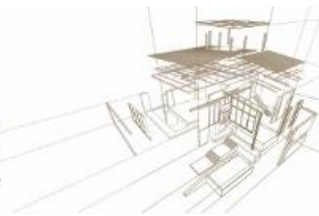
Figura 3: Modelo estructural edificio 5 pisos en SAP2000

Para simplificar, se asigna una restricción de diafragma rígido a nivel de cada piso. Además, para simular la interacción entre pisos y a nivel de cimentación, se considera una interfaz de contacto de fricción.

Debido al alto nivel al nivel de detalle del modelo (alrededor de 1.9 millones de GDL), la complejidad de los análisis sísmicos y la gran demanda computacional que estos generan, se utilizan técnicas de computación paralela. Esta herramienta computacional permite segmentar el modelo en distintos dominios para aprovechar todos los núcleos de proceso disponibles en la CPU.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis estático no lineal



Se realizaron análisis pushover sobre la estructura de cinco pisos variando la capacidad y la rigidez de las diferentes conexiones, con el objetivo de desarrollar un análisis de sensibilidad de la capacidad estructural global. La resistencia de las conexiones de madera a madera, la unión OSB a madera y los angle brackets se varían, así como el coeficiente de fricción.

Se observa una fuerte relación entre la capacidad de los conectores de corte (angle brackets) y la conexión OSB a madera con la capacidad de carga lateral global y el modo de falla, mientras que el efecto de la capacidad de madera a madera y el coeficiente de fricción pueden ser ignorados, pues su variación no afecta en gran medida a la resistencia lateral de la estructura.

En la Figura 4, se observa el fenómeno antes mencionado, en particular el caso de la unión OSB-madera. Se aprecia que a medida que aumenta la capacidad de la unión, la capacidad global del sistema se ve modificada, produciendo una mayor rigidez del sistema y en consecuencia menores desplazamientos. Esto además genera un modo falla más frágil, en donde el mecanismo de falla que controla es básicamente el deslizamiento de entre pisos, ya que la unión OSB a Madera tiene una capacidad tal que produce una mayor demanda sobre los Angle Brackets.

En la Tabla 2 se resumen los resultados más relevantes en cuanto a variación de la capacidad del sistema por elementos de unión. Se observa que si la capacidad OSB-madera se duplica, la ductilidad se reduce en un 63% con respecto al caso base en su dirección longitudinal, mientras que su lado más corto ésta decae a un 87%. Por su parte, la resistencia máxima se incrementa en ambas direcciones.

De igual modo, al disminuir la capacidad de la unión OSB a madera o al aumentar la capacidad de los Angle Brackets tal como se muestra en la Figura 5, el sistema sufre un leve aumento de la pendiente inicial, lo que se traduce en un aumento de la rigidez elástica en un 15% y 30% en la dirección longitudinal y transversal respectivamente (tabla 2). Sin embargo, en este caso el sistema posee una falla más dúctil otorgado por la unión OSB a madera dado la sobre capacidad de los conectores a corte. El mecanismo de falla predominante en este caso es el racking.

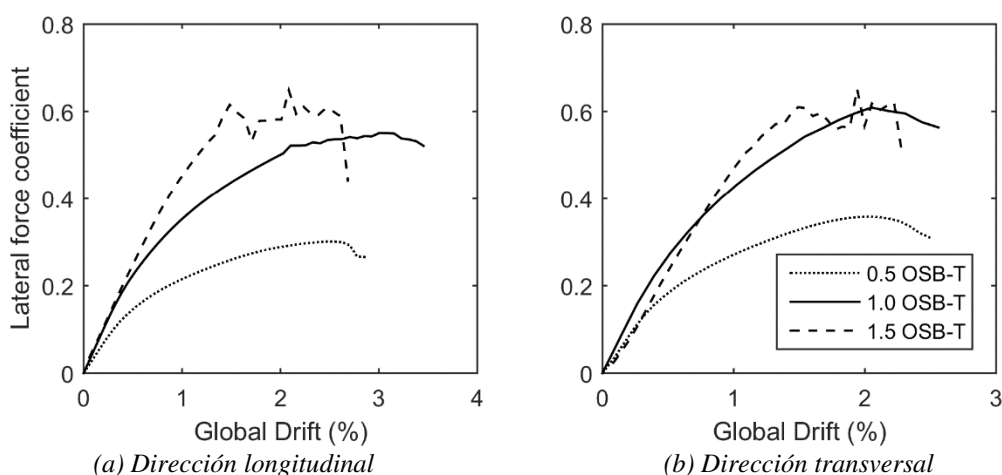


Figura 4: Variación de la curva pushover debido a cambios en la capacidad de la conexión OSB-madera

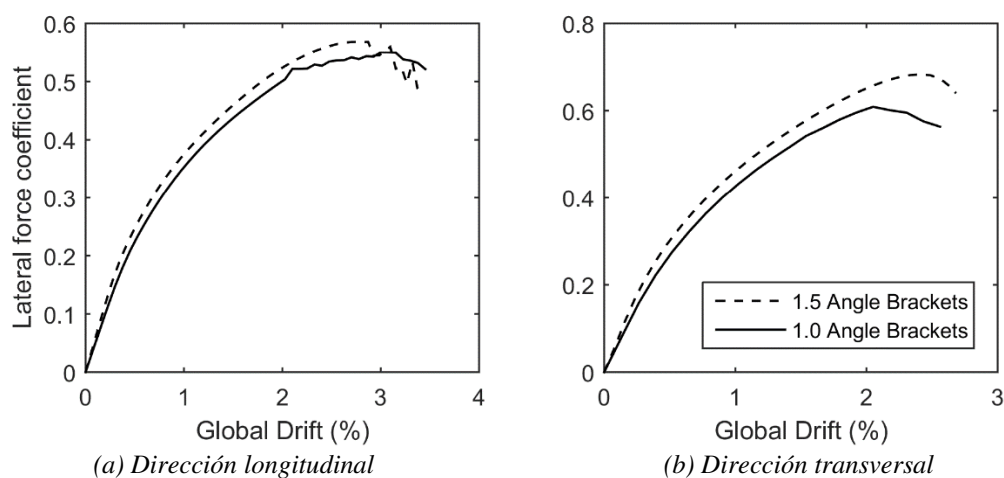
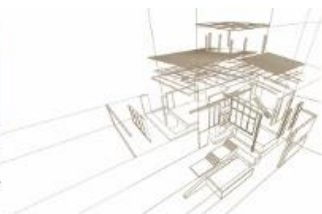


Figura 5: Variación de la curva pushover debido a cambios en la capacidad de los angle brackets

Tabla 2: Resumen de parámetros de respuesta en distintas condiciones de análisis

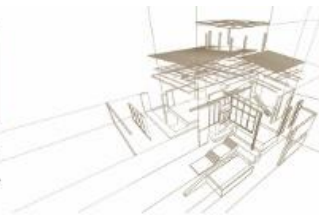
Condición	Dirección	Rigidez (kN/m)	$F_{\text{máx.}}$ (% del peso)	μ
Caso base	Longitudinal	8.97	0.55	3.52
Doble Capacidad OSB-Madera	Longitudinal	8.98	0.65	2.2
Mitad Capacidad OSB-Madera	Longitudinal	8.67	0.51	3.71
Doble Capacidad Angle Brackets	Longitudinal	10.55	0.57	3.16
Caso base	Transversal	10.69	0.61	2.2
Doble Capacidad OSB-Madera	Transversal	9.95	0.65	1.91
Mitad Capacidad OSB-Madera	Transversal	11.20	0.59	3.12
Doble Capacidad Angle Brackets	Transversal	13.82	0.68	3.00

4.2. Propuesta de estados límite

Basado en el análisis de la capacidad de carga lateral realizado en la estructura de cinco pisos, se hace una propuesta de estados límite de daño. Los cuatro estados límite se consideran de acuerdo a los umbrales de drift para cada nivel de desempeño, los que se definen en términos de un índice de ablandamiento final (D_f), estimado por medio del alargamiento del periodo producto del daño estructural (Lu, Huang y Zhou 2011; DiPasquale et al. 1990). En la Tabla 3 se muestran los valores D_f asociados a cada estado límite según Ghobarah (2004) y el drift global asociado al nivel de alargamiento del periodo del primer modo de vibrar.

Tabla 3: Índice de ablandamiento final para cada estado límite

Estado Límite	D_f	Drift global (%)
Completamente operacional	0.1	0.5
Operacional	0.2	0.8
Seguridad de la vida	0.4	2.0
Cercano al colapso	0.6	3.0



En la Figura 6 se muestra la curva de capacidad del sistema de cinco niveles en sus dos direcciones de análisis. Se puede observar que las estructuras basadas en marcos ligeros de madera pueden lograr amplias deformaciones manteniendo controlado el nivel de daño para desplazamientos de techo moderados, pero el sistema tiende a ser frágil, ya que para desplazamientos altos, la rigidez se degrada rápidamente. De igual forma, se destaca que la estructura se encuentra completamente operacional aun cuando su drift global es de 0.5%, valor muy por encima del desplazamiento límite de 0.2% para el estado operacional establecido para estructuras de hormigón (SEAOC 1995).

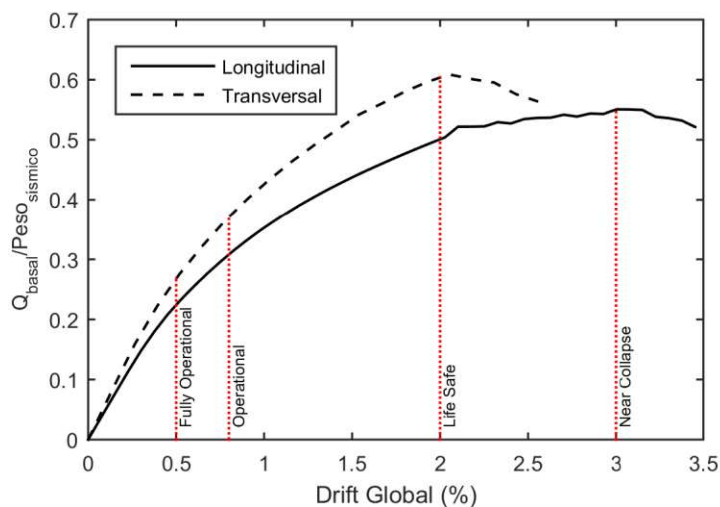


Figura 6: Estados límite para edificio de 5 pisos de marcos livianos

4.3. Control del modo de falla

Para analizar de forma simple el efecto de la distribución de capacidad entre los componentes del edificio y su efecto en el control del modo de falla, se evalúan un factor α que corresponde a la razón entre la capacidad en corte de los entre pisos (proporcionada por los angle brackets) y la capacidad de corte de los muros paralelos a su plano, y un factor β que relaciona la disminución de capacidad del piso en la altura del edificio. El efecto del factor α se evalúa en un edificio de un piso para aislar su efecto de otras variables, mientras que el factor β se analiza en un edificio de 3 pisos.

Los resultados del efecto de α =capacidad anclajes de corte/capacidad muros se presenta en la Figura 7, en donde se muestra el aporte del desplazamiento horizontal proporcionado por el deslizamiento de los muros y el aporte por el efecto de racking de los muros. Se observa que si α es 0,5 o 1, el sistema es frágil ya que posee una baja capacidad de deformación total, y que el aporte del deslizamiento a esa deformación horizontal es alto, en particular para $\alpha=0,5$. Por otra parte, para $\alpha>2$, el efecto es semejante, ya que el sistema logra elevada capacidad de deformación horizontal total, y que mayoritariamente esta capacidad de deformación queda explicada por el efecto de desangulación de los muros (racking).

Asimismo, al analizar el efecto de la distribución de capacidad en altura, factor β , se observa que si la distribución de la capacidad en altura es constante, no se logra un balance en el drift de entrepiso, por lo que el daño se concentra en un nivel y el sistema sufre una falla prematura (Figura 8 (a)), pero por el contrario, si la capacidad disminuye en altura de acuerdo a como varía



la demanda sísmica, se logra balancear el desplazamiento lateral de los pisos y por consecuencia el daño, proveyendo al sistema de un comportamiento menos frágil (Figura 8 (b)).

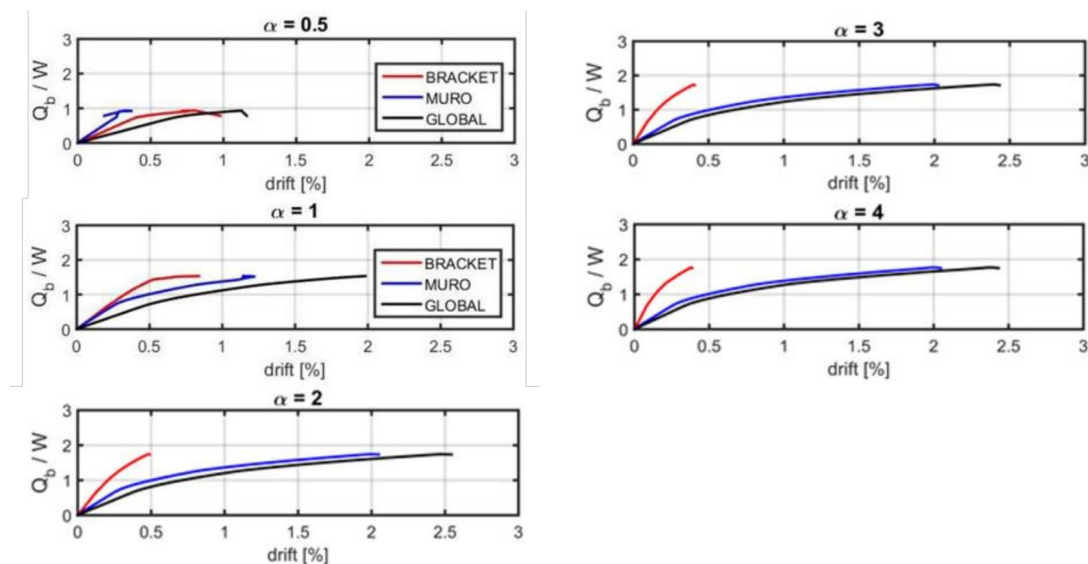
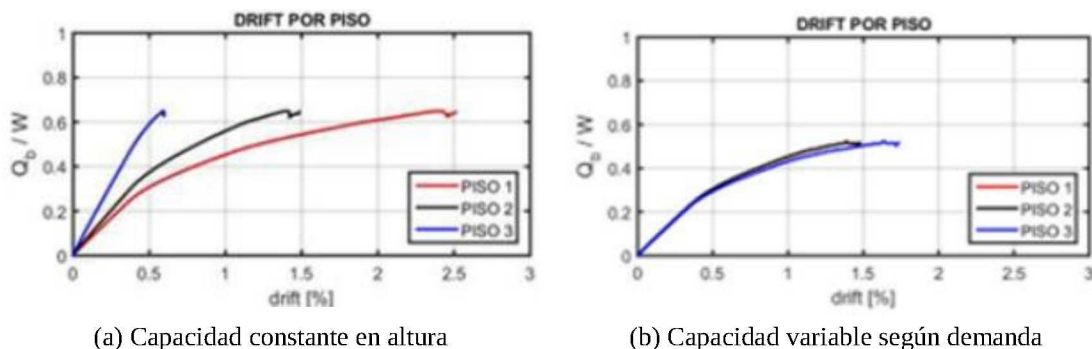


Figura 7: Distribución del drift de entre piso según relación de capacidad corte/capacidad muros



(a) Capacidad constante en altura

(b) Capacidad variable según demanda

Figura 8: Variación del drift por piso según distribución de capacidad en altura

4.4. Análisis de fragilidad

La estimación de la fragilidad se llevó a cabo por medio de análisis dinámicos incrementales (IDA, Vamvatsikos y Cornell 2002) en modelos de uno y tres pisos, ya que no fue posible ejecutar los análisis dinámicos sobre el sistema de cinco niveles producto el alto nivel de demanda cómputo. Para cada cantidad de pisos analizada, se definen 2 modelos: modelo frágil y modelo dúctil, con un $\alpha=0,5$ y $\alpha=2,0$ respectivamente, para evaluar si el efecto en el cambio de modo de falla genera algún cambio en la seguridad de los sistemas frente a cargas sísmicas.

Para los IDA se utilizan registros de las componentes horizontales de una estación para los terremotos chilenos de Punitaqui (1997), Tocopilla (2007) y Maule (2010). Los registros son normalizados y escalados a distintos factores como se recomienda en el código FEMA P695. Las curvas IDA se construyen considerando como indicador de daño estructural al drift de entrepiso, y como indicador de intensidad a la coordenada de aceleración espectral elástica.



Con los resultados de los IDA, se calculan las curvas de fragilidad para cada recepción de la estructura considerando tres niveles de daño (Figura 9). Los niveles de daño se calculan en base a las curvas de capacidad de cada modelo, y corresponden a un drift de entre piso de 0,5% (estado operacional), 1,5% (seguridad de la vida) y 2,5% (colapso).

Como se muestra en la Figura 9, el control del modo de falla a través de la distribución de la capacidad entre los muros y el corte provoca un aumento en la demanda de aceleraciones necesaria para alcanzar el colapso, ya que para una misma probabilidad, las aceleraciones del sistema dúctil son mayores que las del sistema frágil, llegando a ser de hasta un 30% más altas. El efecto del control del modo de falla es particularmente notorio en el estado de colapso, mientras que en el estado operacional y de seguridad de la vida la variación es combinada, y las curvas de fragilidad del sistema dúctil y frágil se cruzan. Esta situación es claramente explicada por el hecho de que al proveer de un modo de falla dúctil se mejora la seguridad ya que aumenta la ductilidad, pero no necesariamente cambia en la misma proporción la rigidez o la resistencia.

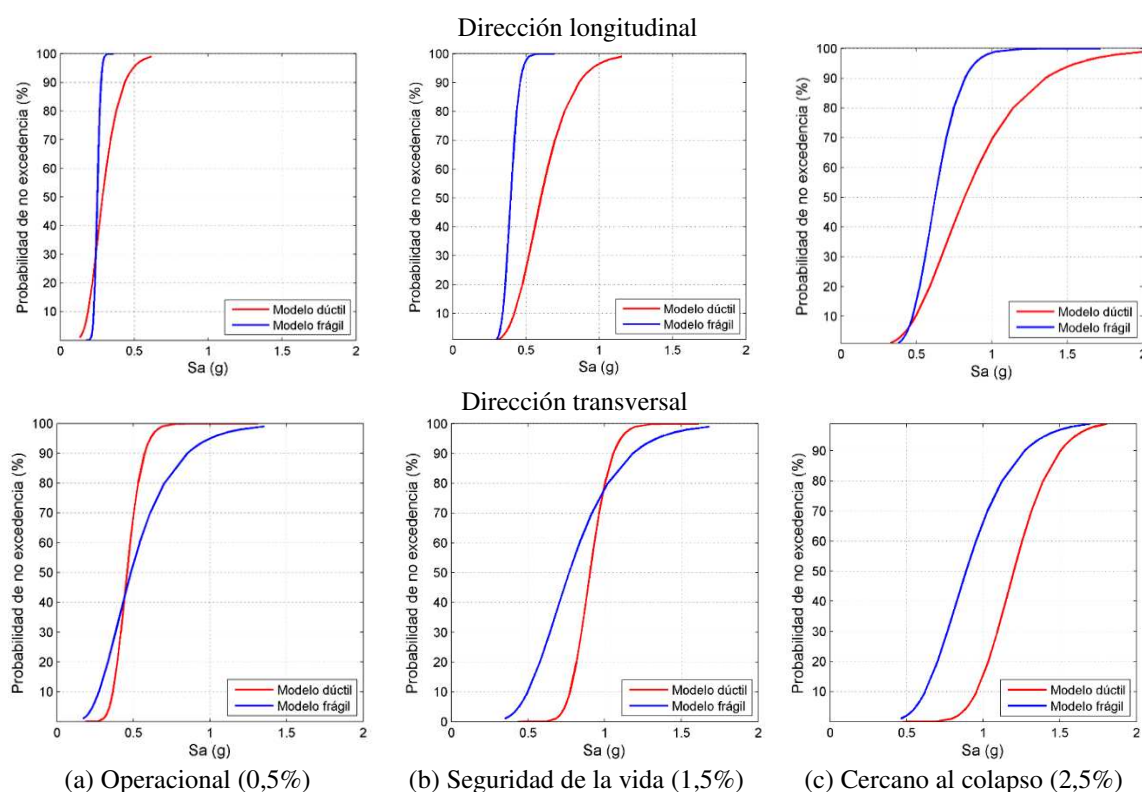
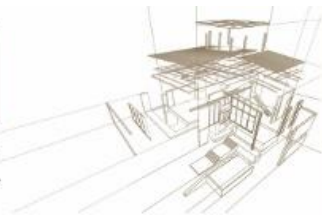


Figura 9: Curvas de fragilidad para distintos estados límite

Respecto a la seguridad del sistema respecto de la demanda máxima esperada (MCE), se evalúa el margen de colapso (CMR), el que corresponde a la razón entre la aceleración espectral al nivel MCE y la aceleración que provocaría un 50% de probabilidad de colapso. El nivel de aceleración máxima esperada es calculado según la norma NCh 2745:2013, y corresponde a 1,2 veces la demanda del espectro de diseño. La variación del CMR para niveles de MCE según demandas de diseño para distintos tipos de suelo se presenta en la Figura 10. Se observa que el modelo dúctil no induce mejoras en el margen de colapso, con respecto al modelo frágil, para demandas sísmicas bajas (suelos A, B y C), pero para las demandas altas el CMR crece hasta en más de 50%. El efecto anterior puede erróneamente sugerir que para bajas demandas máximas



esperadas, proveer de un modo de falla dúctil no generaría aumentos en la seguridad. Lo que se observa es un efecto combinado debido al cambio de la coordenada de aceleración espectral asociada a los distintos períodos del sistema dúctil y frágil. Como se muestra en la Tabla 4, en los casos en que MCE tiene pequeños aumentos, o incluso disminuciones (Suelos D y E), el margen de colapso crece significativamente. Por el contrario, cuando el CMR crece poco o disminuye (Suelos A, B y C), el nivel de MCE lo hice de manera importante. Esto quiere decir que el sistema dúctil es capaz de alcanzar el mismo nivel de seguridad que el sistema frágil, pero para demandas mucho más altas.

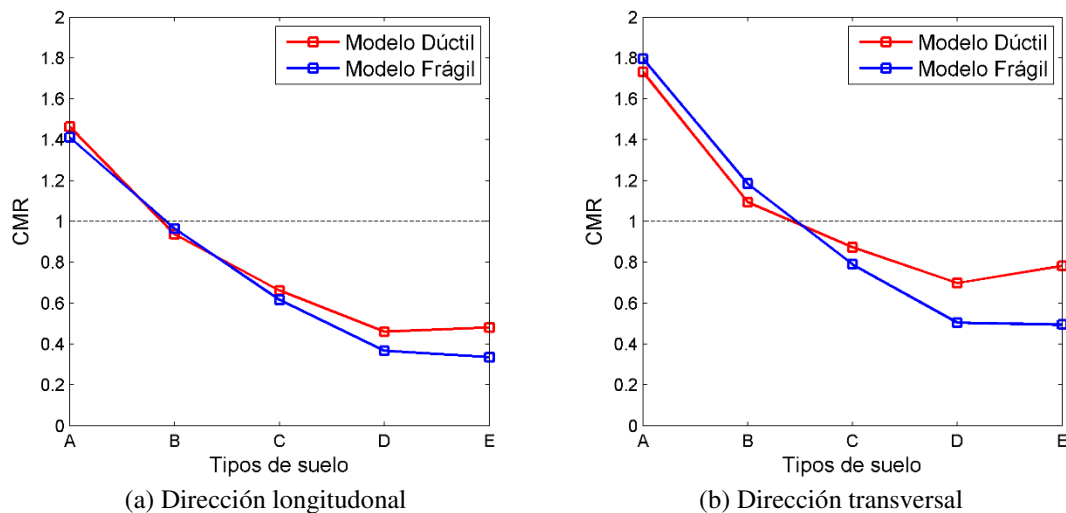


Figura 10: Margen de colapso para distintos niveles de demanda máxima esperada

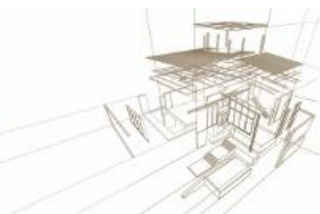
Tabla 4: Variación de margen de colapso (CMR) y de la demanda máxima esperada (MCE)

Demanda máxima esperada	Dirección longitudinal		Dirección transversal	
	Variación CMR (%)	Variación MCE (%)	Variación CMR (%)	Variación MCE (%)
Suelo A	3,64	26,41	-3,61	10,14
Suelo B	-2,87	34,88	-7,65	46,28
Suelo C	7,27	22,13	10,64	22,09
Suelo D	25,20	4,65	38,32	-2,34
Suelo E	43,11	-8,45	58,01	-14,51

5. CONCLUSIONES

Los resultados del análisis numérico de la capacidad de un edificio de mediana altura de marco de madera muestran que angle brackets y conexiones OSB a madera controlan la respuesta del edificio y el modo de falla. Este efecto sugiere que el detallamiento y la distribución de capacidad y rigidez entre elementos de un piso es fundamental para un modo de falla más dúctil, y por tanto se debe proveer elevada resistencia a los conectores de corte, para que predomine el desplazamiento lateral debido al descuadre de muros de corte.

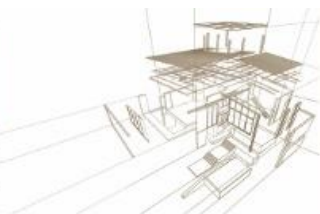
Proveer un modo de falla dúctil entrega a la estructura mayores niveles de seguridad frente al colapso para demandas sísmicas altas, mientras que para estados de daño menores, el efecto de la ductilidad tiende a ser menos importante. En estados globales de daños, los resultados indican que las estructuras de madera de marcos livianos son más flexibles pero menos dúctiles



que las de hormigón armado o acero. Para el mismo nivel de daño y degradación de rigidez, un edificio de madera de marco ligero puede alcanzar mayores drifts laterales que los de hormigón armado o acero. Se evidencia la necesidad de normativas de diseño sísmico chilenas que empleen el límite al desplazamiento propio para este tipo de edificaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Wood Council (2015). Special Design Provisions for Wind and Seismic. SDPWS 2015 U.S.A.
- Dechent, P., Silva, R., Giuliano, G., Dolan, J., Crempien, J., Matamala, J., Acuña, G. (2017). Desarrollo de un método prescriptivo para el diseño sísmico de estructuras de madera de mediana altura basado en el desempeño. Congreso latino americano de estructuras de madera, San Juan, Argentina. 2017.
- DiPasquale, E., Ju, J., Askar, A., Çakmak, A. (1990). Relation between global damage indices and local stiffness degradation. *Journal of Structural Engineering*, v. 116, n. 5, p. 1440–1456.
- Ellingwood, B., Rosowsky, D., Pang, W. (2008). Performance of light-frame wood residential construction subjected to earthquakes in regions of moderate seismicity. *Journal of Structural Engineering*, v. 134, n. 8.
- FEMA (2009). Quantification of building seismic performance factors. FEMA P695. Washington D.C., U.S.A.
- Ghobarah, A. (2004). On drift limits associated with different damage levels. Performance-based seismic design concepts and implementation, Bled, Slovenia.
- Humbert, J., Boudaud, C., Baroth, J., Hameury, S., Daudeville, L. (2014). Joints and wood shear walls modelling I: Constitutive law, experimental tests and FE model under quasi-static loading. *Engineering Structures*, v. 65, p. 52–61.
- INN (2009). Diseño sísmico de edificios. NCh433:1996 Mod 2009. Chile.
- INN (1013). Análisis y diseño de edificios con aislamiento sísmico. NCh2745:2013. Chile.
- INN (2014). Madera- Construcciones en madera - Cálculo. NCh1198:2014. Chile.
- Li, Y., Yin Y., Ellingwood, B., Bulleit, W. (2010). Uniform hazard versus uniform risk bases for performance-based earthquake engineering of light-frame wood construction. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, v. 39, n. 11, p. 119-1217.
- Lu, X., Huang, Z., Zhou, Y. (2011). Global seismic damage assessment of high-rise hybrid structures. *Computers and Concrete*, v. 8, n. 3, p. 311–325.
- McKenna, F., Fenves, G. L., Filippou, F., Mazzoni, S., Scott, M., Elgamal, A., Yang, Z., Lu, J., Arduino, P., McKenzie, P., Deirlein, G., Law, K. (2006). OpenSees. University of California. U.S.A.
- Pang, W., Ziaie, E., & Filiatrault, A. (2012). A 3D model for collapse analysis of soft-story light-frame wood buildings. World conference on timber engineering. 2012, Auckland, New Zealand.
- SAP2000, versión 20.0: Analysis reference manual. Computer and Structures Inc. 2017.
- Structural Engineers Association of California (1995). Vision 2000 - A framework for performance based earthquake engineering. Los Angeles, U.S.A.
- Tomasi, R., Sartori, T. (2013). Mechanical behaviour of connections between wood framed shear walls and foundations under monotonic and cyclic load. *Construction and Building Materials*, v. 44, p. 682–690.
- Vamvatsikos, D., Cornell, A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, v. 31, n. 3, p. 491-514.
- Zisi, N. (2009). The Influence of Brick Veneer on Racking Behavior of Light Frame Wood Shear Walls. Ph.D. Dissertation. University of Tennessee.



DESEMPEÑO SÍSMICO DE MUROS MIDPLY ELABORADOS CON MADERA CHILENA

SEISMIC PERFORMANCE OF MIDPLY WALLS MANUFACTURED WITH CHILEAN TIMBER

Schmitt, Cristian¹; Cárcamo, Sebastián^{1*}
Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

* Contacto: secarcamo@uc.cl

Resumen

Los muros de corte de madera Midply consisten en una variación del sistema marco plataforma para lograr una mayor resistencia a las cargas laterales. La placa arriostrante se ubica al centro del muro con pies derechos por ambas caras, lo que permite que las fijaciones trabajen a cizalle doble, entregando una carga lateral admisible aproximadamente dos veces mayor al muro convencional. Este sistema tiene su origen en Canadá con procesos de manufactura que consideran maderas del hemisferio norte e investigación que incluye su aplicación en destacados casos como el edificio “Neeswood”. El presente artículo estudia la manufactura y desempeño de estos paneles en Chile. Para evaluar su factibilidad de implementación se analizaron paneles construidos pino radiata certificado disponible en el mercado local. Se caracterizó el comportamiento sísmico del sistema mediante ensayos de Carga Lateral Monotónico y Cíclica.

Los resultados fueron comparados con ensayos similares realizados en Canadá. El comportamiento de los clavos trabajando a doble cortadura presentó la resistencia deseada y absorbieron la energía aplicada en el muro en forma de deformación permanente. La comparación de resultados muestra que los muros Midply fueron capaces de alcanzar una carga lateral similar a otros muros Midply manufacturados con madera SFP. Sin embargo, los tipos de fallas estuvieron determinadas por los distintos anclajes utilizados y requiere un rediseño de la configuración de ensayo para su correcto estudio y evaluación.

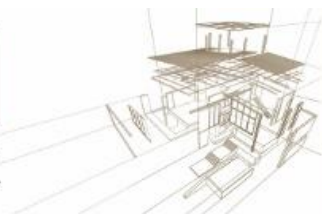
Palabras-clave: muros de corte en madera, cizalle doble, ensayo de carga lateral.

Abstract

Midply timber shearwalls consist on a variation of the platform frame system in order to achieve a higher resistance to lateral loads. The shearplate is located at the middle of the panel with studs on both sides, which allows connectors a double shear behaviour with approximately double the rigidity of standard shearwalls. This building system has its origin in Canada with manufacturing processes that consider lumber from the northern hemisphere and research that includes its application in outstanding study cases such as the "Neeswood" building. This article studies the manufacture and performance of these panels in Chile. To evaluate its feasibility, the analysis studies panels manufactured with certified radiate available in the local context. Seismic behavior was characterized using Monotonic Lateral Loads tests and Cyclic with Alternate Loads tests.

Results were compared with similar tests conducted in Canada. The double shear performance of connectors showed the expected resistance and absorbed the applied energy to the wall as permanent deformations. Results show that Midply walls achieve similar lateral loads to other Midply walls manufactured with SPF stud-grade lumber. However, wall failures were caused by different anchoring systems used so the test configuration requires a design for a proper analysis and evaluation.

Keywords: timber shearwalls, double shear, lateral loads test.



1. INTRODUCCIÓN

Los edificios deben soportar tanto cargas verticales como cargas laterales. Es por esto que toda estructura debe contar con un sistema de resistencia lateral que impida su colapso producto de la acción del viento o sismos. La resistencia lateral se puede lograr mediante el uso de riostras, marcos rígidos o muros arriostrantes, entre otros. En estructuras de marco plataforma para edificios de madera el sistema comúnmente utilizado es el de muros arriostrantes. Este elemento se compone por marcos con pies derechos y soleras de madera aserrada donde, por una de sus caras, se clava una placa rígida de madera (i.e. OSB o terciado) que lo proveen de la rigidez lateral requerida. Cuando el muro arriostrante recibe cargas laterales los clavos se someten a esfuerzo de corte comportándose de manera dúctil.

En el diseño de edificios de madera en mediana altura, la inclusión de aperturas y generar recintos de mayores dimensiones consisten en uno de los principales desafíos para las demandas en las resistencias laterales de las estructuras debido a sus requerimientos sísmicos y la reducción de longitud de los muros arriostrantes. Es por esto que se han estudiado nuevas soluciones que aumente la resistencia lateral de los muros de madera y posibiliten diseños más flexibles.

El sistema Midply consiste en una variación del sistema marco plataforma para lograr una mayor resistencia a las cargas laterales. Este sistema fue creado por Dr. Erol Varoglu de Forintek Canada Corp. y el Profesor S.F. Stierner de la Universidad de British Columbia en 1998 (Varoglu et al, 1998). El sistema de paneles considera los mismos componentes del muro arriostrante estándar pero con una disposición diferente con el objetivo de reducir los costos de la construcción y mantener los procesos constructivos y dimensiones del sistema de entramado. En el caso del sistema Midply la placa arriostrante se ubica al centro del muro con pies derechos por ambas caras creando uniones en donde las fijaciones (clavos o tornillos) trabajaran con dos planos de corte, lo que permite una mayor resistencia a esfuerzos laterales (figura 1). Los pies derechos en los muros Midply están rotados 90° respecto a la posición de estos elementos en muros tradicionales, es decir que la placa arriostrante es clavada en la cara más ancha de los pies derechos.

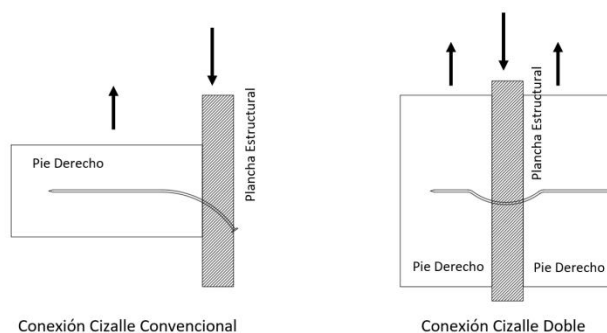


Figura 1: Comportamiento de las fijaciones en un muro arriostrante de madera convencional y en un muro Midply.

Esto aumenta la capacidad de carga y la superficie de clavado, evitando fallas por astillamiento de la madera cuando se clava muy cercano al borde (Karacabeyli et al, 2001). Este sistema corresponde a elementos de muros arriostrantes, su aplicación no pretende ser utilizado en la totalidad del edificio, sino que está orientada a zonas con altas cargas laterales o situaciones en que los requerimientos estructurales o diseño arquitectónico no permiten la longitud requerida de muros para lograr el desempeño deseado. La capacidad de carga a los esfuerzos laterales al menos duplica a la de un muro arriostrante convencional (Ni, 2008).



Este sistema se ha aplicado en estructuras de hasta 6 pisos, teniendo un buen desempeño, como parte de ensayos sísmicos a escala 1:1 en el año 2009 en Miki, Japon (Van De Lindt et al, 2011). En el año 2001 se construyó el primer edificio con el sistema Midply: el edificio Winslow Commons es un edificio residencial de 4 pisos en la Universidad de British Columbia, mientras que en 2018 se utilizó en un proyecto de viviendas en la prefectura Saitama, Tokyo (Lawlor, 2018).

En los últimos años Chile ha experimentado un creciente desarrollo en la aplicación de sistemas en madera. Entre las iniciativas se encuentra el desarrollo de proyectos de viviendas sustentables utilizando el sistema marco plataforma, jardines infantiles en paneles de madera contralaminada (CLT) y regeneración de edificios públicos utilizando estructuras masivas (Gobierno de Chile, 2017). El desarrollo de muros Midply elaborados con madera producida localmente representa una posibilidad para el diseño de proyectos con mayor flexibilidad de diseño en sus plantas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Ensayos experimentales y manufactura de muros Midply

Los ensayos experimentales realizados por Forintek han sido desarrollados de acuerdo a los estándares constructivos canadienses. Los principales factores que inciden en el desempeño de los paneles son: el sistema de conexiones de anclaje y el tipo de madera utilizada.

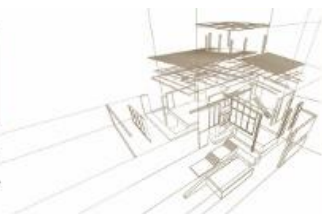
Los ensayos realizados por Forintek y NEES Wood han utilizado dos sistemas de conectores con resultados exitosos en ensayos de paneles: el sistema “hold-down” (Buitellar, 2001) y barras de acero (Karacabeyli, 2001). En el ensayo de un prototipo de un edificio de 6 pisos en marco de madera en la mesa vibratoria en Miki, Japón, dos muros Midply dobles fueron instalados desde el primer hasta el quinto piso para proveer la resistencia lateral necesaria. Para prevenir el colapso de los paneles en los extremos de los paneles por esfuerzos de tracción, se usaron barras de acero en cada extremo en lugar de los tradicionales conectores “hold-down” (Van De Lindt et al, 2011).

Otras simulaciones realizadas en Nueva Zelanda con modelos numéricos incorporaron han estudiado la utilización *slip-friction connectors* en muros Midply para evaluar su desempeño sísmico. Los resultados predictivos del modelo se alinearon con los resultados obtenidos del trabajo experimental realizado por FPInnovations en Canadá (Loo et al., 2009).

La construcción de los paneles Midply considera madera con resistencia adecuada para su uso como elementos estructurales (stud-grade lumber) de clasificación SPF (spruce-pine-fir). Este tipo de madera se utiliza comúnmente para la construcción de estructuras de marco plataforma en Canadá y Estados Unidos y está compuesto principalmente por especies de píceas (*Picea glauca* y *Picea mariana*), pino (*Pinus banksiana*) y abeto (*Abies alba*).

Asimismo, las simulaciones realizadas en Nueva Zelanda con modelos numéricos por Loo et al (2009) consideraron para sus cálculos madera aserrada Canadiense SPF y tableros de OSB con un Módulo de Young de 10Gpa. Los resultados predictivos del modelo se alinearon con los resultados obtenidos del trabajo experimental realizado por FPInnovations en Canadá

La construcción de estructuras de madera en Chile se caracteriza por la utilización masiva de pino radiata (*pinus radiata*), una especie conífera de crecimiento rápido. La madera aserrada certificada con clasificación mecánica se clasifica en los grados C16, C24, MGP10 y MGP12. La madera MGP10 es aquella que posee mayor potencial de homologación con SPF en su aplicación en estructuras de madera, aún cuando poseen características físicas y mecánicas distintas.



Las escuadrías de los listones difieren de acuerdo a los procesos de manufactura de los distintos países, así un listón de dimensión nominal 2"x6" MGP10 posee dimensiones reales de 35mm x 138mm, mientras que el mismo listón SPF es de 38mm x 140mm.

En la Figura 2 se comparan: Módulo de Elasticidad (E), Tensión Admisible a Flexión (Ff), Tensión Admisible a Compresión Paralela (Fcp) y Tensión Admisible a Cizalle (Fcz) de las maderas MGP10 y SPF. Pese a que el SPF es una madera más flexible que el MGP10, en general las tensiones admisibles son mayores. Por lo que se estima que los modos de falla y su comportamiento histerético debieran variar el desempeño de los muros.

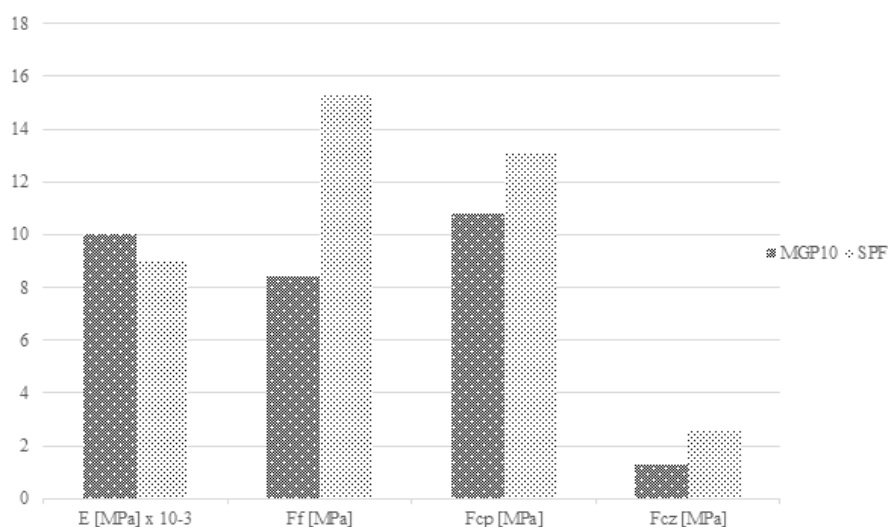


Figura 2: Propiedades físicas de la maderas MGP10 y SPF.

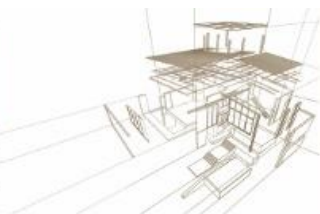
Las placas arriostrantes de OSB utilizadas en el contexto chileno cumplen con la certificación APA – The Engineered Wood Association (APA, 2015) utilizada en Norteamérica que certifica sus normas de desempeño, por lo que se ha considerado homologable para efectos del estudio.

La aplicación del pino radiata al desarrollo de paneles Midply representa una oportunidad para expandir el uso de este sistema en un país sísmico como Chile. En base a lo anterior, resulta de interés conocer el desempeño de los muros Midply con maderas chilenas, en especial su desempeño a la compresión. Esta investigación estudia el desempeño sísmico de paneles fabricados con materiales chilenos para poder compararlo con las características de los paneles fabricados con especies del hemisferio norte.

2.2. Metodología

El estudio de los muros considera dos rondas de ensayos para evaluar distintos sistemas de anclaje de muros, los que tienen como función resistir el levantamiento que experimenta un muro ante una carga lateral en uno de sus extremos.

La primera ronda consideró 2 ensayos de carga lateral monotónico con anclajes tipo “Hold Down” y 2 con sistema de barras de acero con compensador “ATS”. Ante la inexistencia de conectores prefabricados locales que se ajusten a la dimensión de las soleras de acuerdo a los esfuerzos estructurales solicitados, se fabricaron herrajes “Hold Down” a partir del diseño desarrollado por FPIInnovations en experiencias anteriores (Buitellar, 2001). El sistema de barras de acero es producido para sistemas convencionales de marco plataforma por lo que se debió modificar la conexión con la solera para ajustarse a la dimensión de éstas. A partir de los resultados de la primera ronda, se seleccionó el sistema de anclaje con mejor desempeño



para evaluar su comportamiento en 2 ensayos de carga lateral cíclica según protocolos ISO98 y comparar sus resultados con el desempeño de muros construidos con madera SPF.

Para definir la configuración de los muros se utilizó como referencia la matriz de ensayos realizada en la Universidad de British Columbia (Varoglu et al, 2007) debido a que considera simulaciones de terremotos mediante ensayos monotónicos y cíclicos según protocolos ISO98. El estudio considera diversas configuraciones de dimensiones de listones, espaciamentos y placas arriostrantes para muros principalmente de 2.44 [m.] por 2.44 [m.], pero también para muros de 1.22 [m.] por 2.44 [m.].

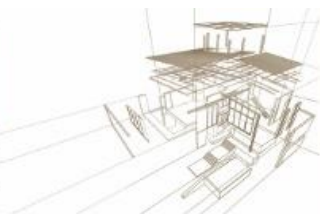
Asimismo, la resistencia a esfuerzos laterales de los muros depende de la configuración de placas arriostrantes utilizadas. Estudios con paneles de hasta 2.4 [m.] por 7.3 [m.] han utilizado de placas completas en los muros, en vez de varias placas unidas, posee un mejor desempeño y podría traer beneficios en los procesos de prefabricación (He et al, 1999). En Chile la dimensión máxima para placas de OSB es de 1.22 [m.] por 2.44 [m.]. Esta dimensión de probeta permite utilizar una placa completa y eliminar variables ocasionadas por la unión entre placas.

Se fabricaron 6 probetas de largo de 1.22 [m.] y 2.44 [m.] de altura con las mismas escuadrías, espesor de placas y espaciamento de clavado. Se consideró madera de pino radiata Arauco MGP10 impregnada en Boro en escuadrías de 2"x6" y 2"x4", placa OSB LP de 11.1 mm de espesor y clavos helicoidales de 3". Cada panel considera 3 pies derechos dobles 2"x6" espaciados a 61cm. con dos pies derechos de borde 2"x4"; solera inferior y superior doble 2"x6"; y solera superior de amarre 2"x4". El clavado de los listones con la placa de OSB se realizó con un espaciado cada 100 mm.

La configuración de los ensayos considera un muro de reacción de hormigón armado sobre el que se ubica un brazo actuador que aplica las cargas laterales a la probeta. Estas cargas son distribuidas por medio de una viga y una placa de traspaso de carga. Estos elementos son estructurados en acero y se conectan al panel por medio de pernos de anclaje tanto en el borde superior. El borde inferior la probeta se fija sobre una base de acero mediante pernos de anclaje (Figura 3).



Figura 3: Configuración de ensayo de carga lateral cíclica.



3. RESULTADOS

3.1. Ensayos Monotónicos

Los ensayos monotónicos fueron realizados para estudiar el comportamiento del muro con los dos tipos de conectores anteriormente descritos: “Hold Down” (MP/HD) y “ATS” (MP/ATS). Los muros fueron sometidos a una carga lateral hasta su colapso, registrando su curva Fuerza - Desplazamiento. En la figura 4 se presentan dichas curvas para los 4 ensayos monotónicos realizados.

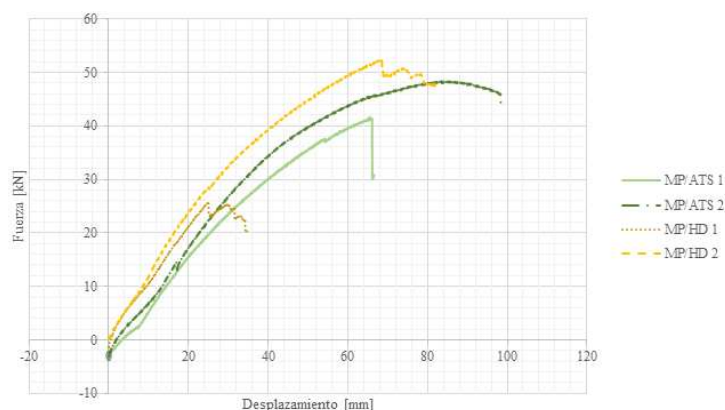
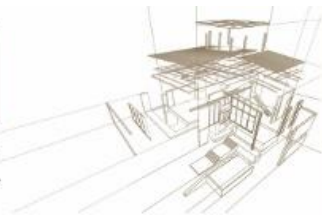


Figura 4: Gráfico fuerza/desplazamiento de ensayos monotónicos.

Se aprecia que los muros, en general, presentaron fallas frágiles. Los modos de falla estuvieron asociados a los elementos de borde, es decir en los pies derechos de borde o los anclajes. En el caso de los muros con “Hold Down”, el anclaje presentó una falla frágil localizada en su plancha inferior del herraje, donde la soldadura se desprendió súbitamente. En el caso de los muros con sistema de barras de acero, pese a presentar una menor rigidez inicial, alcanzaron mayores desplazamientos que permitieron desarrollar la fluencia de los clavos y disipar la energía del modo deseado. La falla en este caso se desarrolló en la solera y desprendiendo el pie derecho de borde (figura 5).



Figura 5: Fallas en los elementos de borde en anclaje “Hold Down” (izq); barra de acero (der).



Para analizar el comportamiento sísmico de la configuración Midply del muro se compara la capacidad disipativa observada en ambos sistemas de anclaje durante los ensayos monotónicos. A partir de los resultados, se propone utilizar el sistema de barra de acero con “ATS” para los ensayos cíclicos y evaluar el comportamiento del muro en su rango no lineal.

3.2. Ensayos Cíclicos

Se realizaron dos ensayos cíclicos con conectores de barra de acero para estudiar su comportamiento histerético y la resistencia ante cargas sísmicas. Para el desarrollo del ensayo se utilizó el mismo protocolo de carga definido el ISO 98 . Los parámetros de carga se definieron a partir de los resultados de lo ensayos monotónicos.

Los resultados de los ensayos presentan fallas en los elementos de bordes. En ambos casos fueron los pies derechos de borde fallaron a compresión. En la figura 6 se presentan las curvas histeréticas de los ensayos realizados.

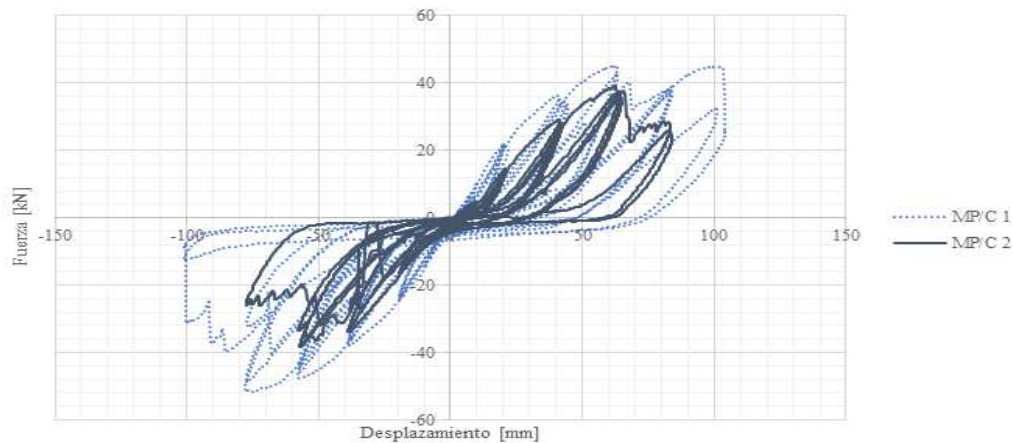
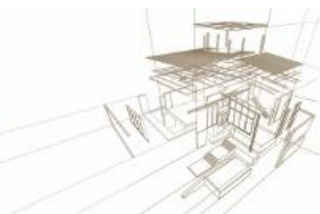


Figura 6: Gráfico fuerza/desplazamiento de ensayos cíclicos.

Se puede apreciar que las dos probetas ensayadas presentan cierto nivel de disipación y una rigidez pronunciada en el primer tramo. Cerca de los 50 mm de desplazamiento, ambos muros entran en un rango no lineal pronunciado. Este comportamiento es producto de la deformación de las fijaciones de clavos que actúan a doble curvatura (figura 7).



Figura 7: Comportamiento de las fijaciones a doble curvatura en ensayo cíclico



Los ensayos cíclicos realizados son comparados con los resultados obtenidos por Forintek (Varoglu et al, 2007). Ambos muros estudiados corresponden a muros de 1.22 [m.] por 2.44 [m.] que fueron sometidos al mismo protocolo de carga (ISO 98). Los resultados de ambas series de ensayos se presentan en la figura 8,.

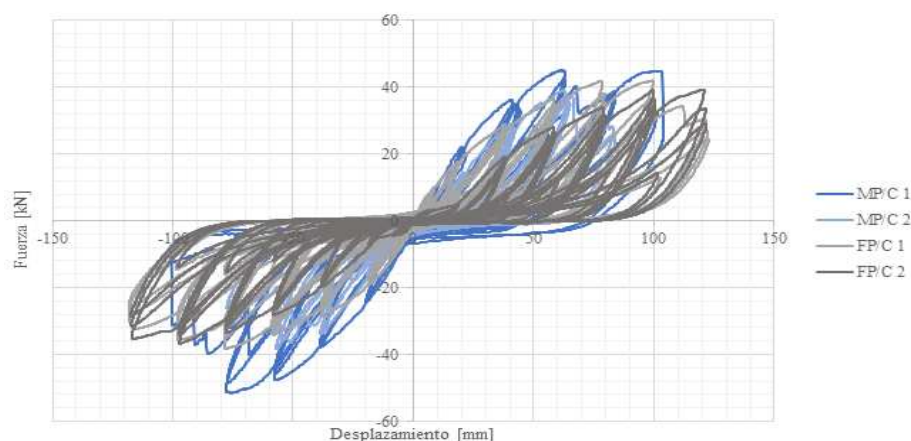


Figura 8: Gráfico fuerza/desplazamiento de ensayos cíclicos para ensayos muros Midply con pino radiata (MP) y para los ensayos realizados por Forintek con SPF (FP).

Los muros estructurados con SPF poseen una carga admisible levemente menor, sin embargo presentan una mayor disipación que los muros estructurados con pino radiata MGP10. Este comportamiento es esperable al comparar las propiedades de ambas maderas, expuestas en la figura 2, donde se indica que la madera SPF es más flexible (mayor E) pero con tensiones admisibles mayores (Ff, Fcp, Fcz).

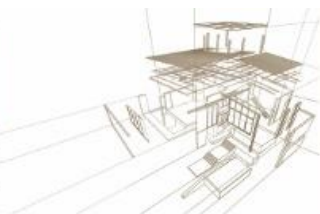
El comportamiento de los muros de corte no depende exclusivamente de la madera que los componen, este también está definido por la configuración del muro, fijaciones y anclajes. Al compatibilizar a estas variables, las diferencias apreciadas reflejarían la incidencia del cambio de madera.

4. CONCLUSIONES

Se realizó un set de ensayos para evaluar el desempeño de muros Midply utilizando madera pino radiata producido en Chile. A partir de los ensayos monotónicos se apreció que, dada la alta resistencia del muro, es necesario utilizar anclajes de alta capacidad (barras continuas de acero con sistema de compensación “ATS”) para que el muro pudiese entrar en un rango no lineal y observar la disipación de energía incurrida en las fijaciones trabajando a cizalle doble

Se realizaron ensayos cíclicos para un muro de 1.22 [m.] de largo con sistema de anclaje de barra de acero y fueron comparados con los ensayos realizados por Forintek con la misma configuración pero diferente especie madera. Se apreció que las resistencias de ambos muros varían levemente, siendo la madera chilena más resistente, sin embargo los muros con madera SPF permitieron un rango no lineal mayor, disipando así mayor energía.

Se propone investigar a futuro el comportamiento del muro variando su longitud y optimizando sus elementos para resistir de mejor manera los esfuerzos compresión/tracción en los que incurren sus extremos



AGRADECIMIENTOS

El equipo de investigadores quiere agradecer al Dr. Marjan Poposki y Dr. Chun Ni de FPIInnovations por su buena disposición y colaboración en este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APA (2015) Oriented Strand Board. Guía de Productos W410. The Engineered Wood Association. Tacoma, WA, Estados Unidos.

Buitellar, M. (2001). Static and Dynamic Testing of the Midply™ Shear Wall System, Master of Applied Science Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

CORFO (2017) Cuenta Pública 2017. Gobierno de Chile.

He, M., Magnusson, H., Lam, F. & G. L. Prion, H. (1999) Cyclic Performance of Perforated Wood Shear Walls with Oversize OSB Panels Journal of Structural Engineering-asce - J STRUCT ENG-ASCE. Vol 125

Karacabeyli, E., Stiemer, S. & Ni, C. (2001) MIDPLY Shearwall System. Proceedings of Structures Congress 2001, Washington, D.C. May

Lawlor, S. (2018) Canadian Midply Shear Walls Launched in Japanese Residential Housing. Canada Wood Today-The Canada Wood Group Blog. Accedido julio 2019 en <https://canadawood.org/blog/canadian-midply-shear-walls-launched-in-japanese-residential-housing/>

Loo, W. Y., Quenneville, P. & Chouw, N. (2009) Seismic behaviour of timber shear walls with load-limiting slip-friction connectors. Proceedings of 2009 NZSEE Conference, Christchurch, New Zealand, April.

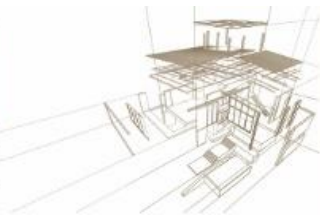
Nelson, R., Patel, S. & Arevalo, R. (2003) Continuous Tie-Down Systems for Wood Panel Shear Walls in Multi Story Structures. Structural Magazine, March 2003.

Ni, C., Follesa, M., Popovski, M. & Karacabeyli, E. (2008) Assessment of Seismic Design Parameters for Midply Wood Shear Wall System. 10th World Conference on Timber Engineering. Miyazaki, Japan, June.

Van De Lindt, J.W., Pei, S. & Pryor, S.E.(2011) Construction and Experimental Seismic Performance of a Full-scale Six-story Light-frame Wood Building. The Proceedings of the Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Procedia Engineering 14 (2011) 1599–1605

Varoglu, E. & Stiemer, S.F. (1998). US5782054: Wood Wall Structure. United States Patent.

Varoglu, E., Karacabeyli, E., Asce, M., Stiemer, S., Ni, C., Buitelaar, M. & Lungu, D. (2007) Midply Wood Shear Wall System: Performance in Dynamic Testing. Journal of Structural Engineering-asce v. 133 n. 7. p. 1035



COMPORTAMIENTO A CORTE DE COMPUESTOS MADERA-HORMIGÓN FABRICADOS DE MADERA LAMINADA ENCOLADA URUGUAYA

SHEAR BEHAVIOR OF TIMBER-CONCRETE COMPOSITES MADE UP OF URUGUAYAN GLULAM BEAMS

Domenech, Leandro ⁽¹⁾*; Durán, Magdalena ⁽²⁾; Contreres, Álvaro ⁽²⁾; Baño, Vanesa ⁽³⁾

⁽¹⁾ Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

⁽²⁾ Bach. Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

⁽³⁾ Dr. Ing. Montes. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

* Contacto: ldaguilar@fing.edu.uy

Resumen

Este trabajo aborda una investigación teórico-experimental sobre el comportamiento a corte de compuestos madera-hormigón producidos localmente. Para su fabricación se utilizó madera laminada encolada de pino y eucalipto uruguayos (*Pinus taeda/elliottii* y *Eucalyptus grandis*), ambas especies de rápido crecimiento y con propiedades mecánicas inferiores a las comúnmente usadas en este tipo de compuestos. El objetivo del trabajo es validar la conexión entre estas especies de madera y el hormigón a través de conectores metálicos de tipo pasador (*i.e.* barras de acero conformado fácilmente disponibles en Uruguay) adheridos mediante resina epoxi. Para ello se ensayaron a corte directo, según la norma EN 26891, ocho probetas (cuatro de cada especie) y se midió la carga última de rotura y la curva fuerza-desplazamiento. A partir de estos resultados se estimó la resistencia y el módulo de deslizamiento (Kser) de la unión en los compuestos de ambas especies. Los valores obtenidos se compararon con los teóricos, calculados a partir de las ecuaciones de Johanssen (propuestas en el Eurcódigo 5) para conexiones madera-metal y a partir de las planteadas por Ceccotti.

Palabras-clave: compuestos madera-hormigón, comportamiento a corte, madera laminada encolada, barras de acero conformado.

Abstract

This paper deals with the theoretical and experimental shear behavior of locally produced TCC. These composites were fabricated with Uruguayan pine and eucalyptus (*Pinus taeda/elliottii* and *Eucalyptus grandis*) glulam, both species of rapid growth and with lower mechanical properties than those commonly used in this type of composites. The objective of this work is to validate the connection between concrete and these wood species through mechanical fasteners: formed steels bars, easily available in Uruguay, bonded by epoxy resin. Eight samples (four of each species) were tested in direct shear, according to EN 26891, to obtain the maximum strength load and the force-displacement curve. These results were used to estimate the strength and slip modulus (Kser) of the TCC joints for both species. These values were compared with the theoretical ones: those calculated from the Johanssen equations (proposed in Eurocode 5) for steel-to-timber connections and those proposed by Ceccotti.

Keywords: Timber-concrete composites, shear behavior, glued laminated timber, steel fasteners.



1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el uso de los compuestos madera-hormigón se ha incrementado a nivel mundial (particularmente, en Europa), tanto en entresijos de edificios, como en tableros de puentes vehiculares (Días *et al.* 2016). A nivel internacional, la mayor parte de las investigaciones en el tema están enfocadas al desarrollo de métodos de cálculo para diseñar estructuras compuestas (Días *et al.* 2018); estos estudios han proporcionado una sólida base para transformar el conocimiento en aplicaciones prácticas. Muchos de estos estudios se centran en la determinación de la carga última y el comportamiento carga-desplazamiento de los compuestos madera-hormigón al utilizar diferentes tipos de conectores de corte.

Por citar uno, He *et al.* (2016) concluye que las ecuaciones teóricas utilizadas para predecir la resistencia a corte de la unión, utilizando conectores de tipo pasador como son los tirafondos, son conservadoras, y, por lo tanto, útiles en el diseño. En Sudamérica, Cardenas *et al.* (2010) estudió el comportamiento de puentes vehiculares formados por una estructura mixta de madera-hormigón, y estableció que los valores obtenidos para el módulo de deslizamiento fueron superiores, hasta en un 100 %, a los determinados con la norma europea.

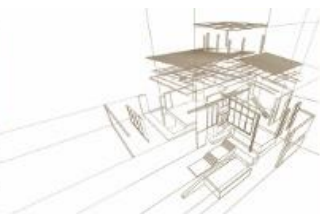
En Uruguay, si bien son muy comunes los entresijos acero-hormigón, no se han realizado estudios ni prototipos de compuestos madera-hormigón. Más aún, la investigación del comportamiento mecánico de las especies locales de madera se encuentra poco desarrollada. Por lo tanto, si se desea seguir tendencias globales y regionales, en donde la madera juega un rol de gran importancia en la construcción de todo tipo de estructuras, es fundamental lograr un nivel de conocimiento que permita sentar las bases para un crecimiento sostenido del sector.

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento a corte de secciones mixtas de madera laminada encolada (MLE) y hormigón, unidas mediante conectores metálicos de tipo pasador. Los resultados obtenidos serán aplicados al cálculo estructural de un entresijo, con el fin de realizar actividades deportivas. Dicho entresijo, compuesto de madera-hormigón, está formado por una losa de hormigón y viguetas de MLE, unidos entre sí por conectores de corte.

La construcción de entresijos y otras estructuras de madera-hormigón presenta varias ventajas. Por un lado, se optimiza el funcionamiento según las capacidades estructurales de los materiales componentes: el hormigón trabaja a compresión y la madera, a tracción. Rijal *et al.* (2014) afirma que las estructuras con secciones compuestas tienen un mejor desempeño que las estructuras tradicionales, en las que solamente se utiliza la madera. El hormigón brinda una gran rigidez y masa por unidad de volumen, lo que aporta un buen comportamiento dinámico y de aislación acústica. En comparación con una solución que utiliza solamente madera, el hormigón también protege a las viguetas de madera de la acción del ambiente (por ejemplo, en tableros de puentes) y permite aumentar la resistencia a la propagación del fuego.

La clave en el diseño de secciones mixtas madera-hormigón es asegurar un correcto funcionamiento de los conectores que unen ambos materiales. Existen diferentes elementos que pueden ser utilizados con este fin, incluyendo tirafondos de diversos tipos, o barras de acero conformado (Días *et al.* 2018). De acuerdo con las limitantes de cada proyecto (como puede ser la ausencia de mano de obra calificada, la escasez de tiempo o un presupuesto exiguo) se decide optar por un tipo u otro de conectores. En el caso del mercado uruguayo, las barras de acero conformado adheridas mediante resina epoxi pueden ser una solución económicamente rentable, con características mecánicas adecuadas y que no requiere personal calificado.

Por este motivo, se decidió investigar sobre el comportamiento de estos conectores en madera laminada encolada de pino y eucalipto uruguayos (*Pinus taeda/elliottii* y *Eucalyptus grandis*), ambas especies de rápido crecimiento y, por lo tanto, con propiedades mecánicas inferiores a las



comúnmente usadas en este tipo de compuestos (tanto en Europa y Norteamérica, como en países de la región: Brasil, Argentina o Chile) (UNIT 1261:2018; UNIT 1262:2018).

En ambos casos, se determina la fuerza última resistida por la unión y los desplazamientos relativos en relación con la fuerza aplicada. Estos resultados se comparan entre sí y se utilizan para validar el uso de normas internacionales como el Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995-1-1:2006) aplicadas a elementos de ingeniería fabricados con madera uruguaya.

2. MARCO TEÓRICO

El análisis teórico de una sección compuesta trabajando a cortadura simple comprende dos factores fundamentales: la fuerza que es capaz de resistir la unión, y el deslizamiento que se da entre ambos materiales componentes al variar la fuerza aplicada.

Para determinar los desplazamientos entre las superficies de madera y hormigón se modela al conjunto de la unión mediante un resorte con una determinada constante elástica, llamada módulo de deslizamiento. Esta se obtiene de forma experimental, aunque existen diferentes métodos de cálculo teórico, propuestos por varios autores. El presente trabajo se centra en la comparación de los resultados experimentales con los obtenidos mediante dos métodos de cálculo, propuestos por el Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995-1-1:2006) y por Ceccotti (1995).

El Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2006) propone, para conectores de tipo pasador como las barras de acero conformado, la Ecuación (1) para determinar el módulo de deslizamiento (K_{ser}) en [kN/mm]. Sin embargo, Ceccotti (1995) define la Ecuación (2) para calcular K_{ser} en [kN/mm].

$$K_{ser} = 2 \rho_m^{1.5} d / 23 \quad (1)$$

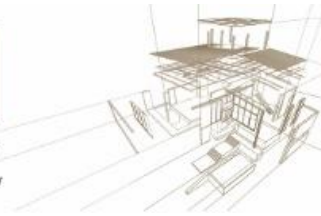
$$K_{ser} = 0.125 d E_{0,mean} \quad (2)$$

donde:

- d es el diámetro del conector [mm]
- ρ_m es la densidad media de la madera [kg/m^3]
- $E_{0,mean}$ es el módulo de elasticidad medio en dirección paralela a las fibras [MPa]

En cuanto a la fuerza que es capaz de resistir la unión, actualmente no existe una norma que plantee cómo determinar la capacidad resistente en el caso madera-hormigón. Sin embargo, el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2006) sugiere que para su cálculo se utilicen las ecuaciones de Johanssen, considerando a el hormigón como una placa de acero gruesa. Esta consideración es correcta si la losa es construida con un hormigón cuya resistencia a compresión sea tal que la madera se aplaste antes que la zona de la losa solicitada por el conector plastifique. En este caso, las deformaciones internas en el hormigón pueden asumirse despreciables, por lo que la losa se comporta como una placa gruesa de acero. En esta instrucción se plantean tres posibilidades de falla de la unión: i) por aplastamiento de la madera; ii) por una combinación de plastificación de la madera y plastificación simple del conector; y iii) por plastificación de la madera y plastificación del conector, generando una doble rótula.

Las tres expresiones de Johanssen correspondientes a cada uno de los tres modos de fallo se presentan en la Ecuación (3). La carga que resistirá la unión ($F_{v,Rk}$) será, por lo tanto, la menor de las tres expresiones (a, b o c) determinada con estas ecuaciones. Dichas ecuaciones tienen en cuenta la penetración del conector en la madera (t_1), la resistencia al aplastamiento de la madera ($f_{h,k}$), calculada en relación con su densidad característica, el momento plástico del conector ($M_{y,r,k}$) y la resistencia al arranque del conector ($F_{a,R,x}$).



$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,k} t_1 d & \text{(a)} \\ f_{h,k} t_1 d \left(\sqrt{2 + \frac{4 M_{y,r,k}}{f_{h,k} t_1^2 d} - 1} \right) + \frac{F_{a,R,x}}{4} & \text{(b)} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,r,k} f_{h,k} d} + \frac{F_{a,R,x}}{4} & \text{(c)} \end{cases} \quad (3)$$

Ceccotti (1995) utiliza una única ecuación para determinar la carga de diseño resistida por la unión ($F_{v,Rk}$), tal cual se presenta en la Ecuación (4).

$$F_{v,Rd} = 1,5 \sqrt{2 M_{y,d} f_{h,d} d} \quad (4)$$

donde:

- $f_{h,d}$ es la resistencia al aplastamiento de diseño de la madera,
- $M_{y,d}$ es el momento plástico de diseño del conector.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

Se fabricaron ocho probetas de madera-hormigón para la realización de los ensayos de cortante de los conectores, tal y como se muestra gráficamente en la Figura 20. Las dimensiones de las probetas son similares a las utilizadas por He *et al* (2016) y respetan las restricciones establecidas en la norma BS-EN 1380 (2009). La conexión entre la madera y el hormigón se realizó a través de 4 conectores por probeta, de 12 mm de diámetro y 15 cm de largo. Para la colocación de estos dentro de la madera, se realizaron perforaciones con un taladro de 8 cm de largo y se fijaron mediante resina epoxi, Sika Anchor Fix.

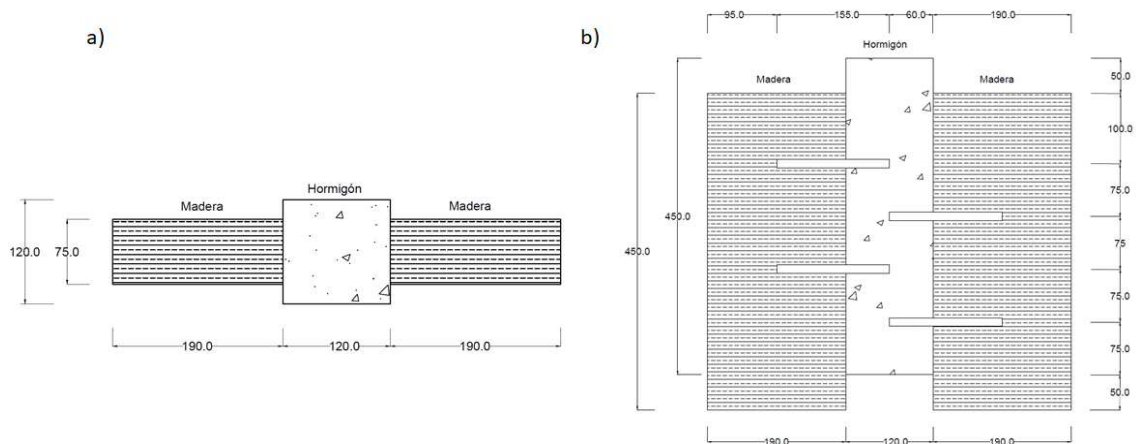


Figura 20: a) Planta y b) alzado, esquemáticos, de las probetas (unidades en [mm])

Cuatro probetas fueron fabricadas usando madera laminada encolada de *Pinus taeda* (P1, P2, P3 Y P4), y las otra cuatro usando MLE de *Eucalyptus grandis* (E1, E2, E3 y E4). Las propiedades mecánicas (módulo de elasticidad medio y densidad característica) de la MLE de ambas especies se presentan en la Tabla 4 (Moya *et al.* 2018; Baño *et al.* 2019).



Para simular el efecto de la losa del entrepiso, se utilizó un hormigón en masa con una resistencia característica de 30 MPa, a partir del cual se fabricaron cuatro probetas testigo. Estas fueron elaboradas y ensayadas a compresión según se establece en las normas IRAM 1524 (1982) y UNIT NM 101 (1998), respectivamente. La Tabla 5 muestra los resultados de resistencia a la compresión (f_c) obtenidos de los ensayos a los 7 días y a los 28 días.

Tabla 4: Propiedades Mecánicas de la MLE (Moya et al. 2018; Baño et al. 2019)

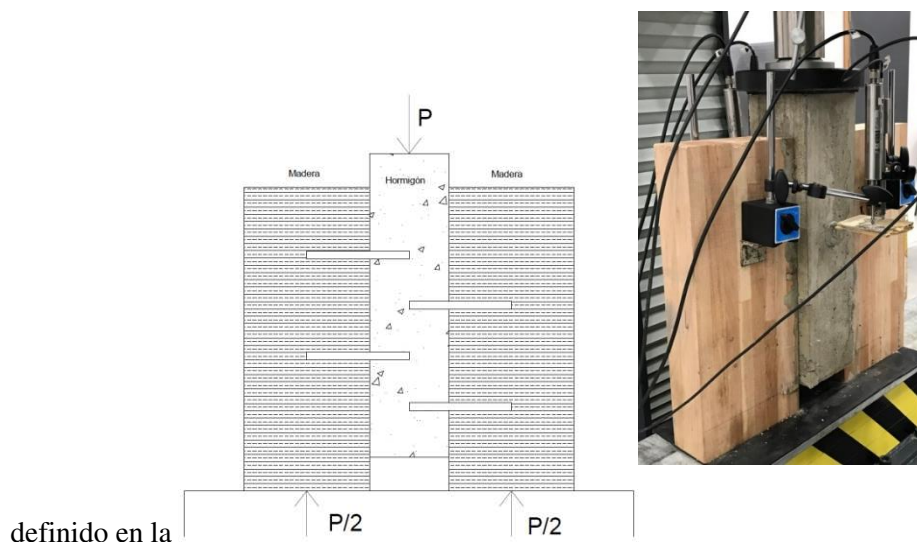
	<i>Pinus taeda</i>	<i>Eucalyptus grandis</i>
$E_{0,mean}$ [MPa]	8321	13 800
ρ_k [kg/m ³]	440	490

Tabla 5: Resultados de los ensayos a compresión en el hormigón

Probeta testigo	f_c [MPa]	
	7 días	28 días
Nº1	39.0	42.2
Nº2	35.8	42.2
Promedio	37.4	42.2

3.2. Metodología de ensayo

El ensayo consistió en aplicar una fuerza (P) sobre el hormigón, según el esquema de cargas



definido en la Figura 21a, de manera de generar así desplazamientos relativos entre la madera y el hormigón. Para ello se utilizó un banco de ensayos universal Controls, con capacidad de carga de 300 kN. Para medir los desplazamientos relativos, se colocaron cuatro comparadores (o extensómetros)

digitales, dispuestos tal y como se muestra en la

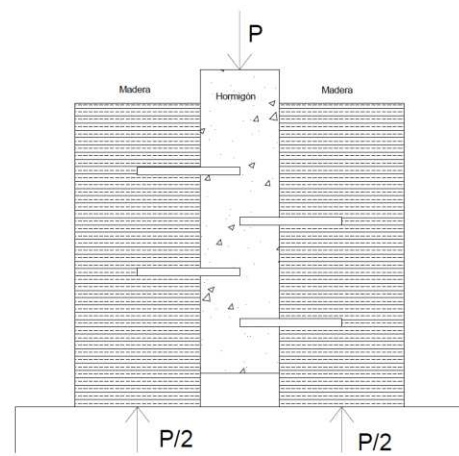


Figura 21b. Se consideró como desplazamiento relativo al promedio de las cuatro mediciones.

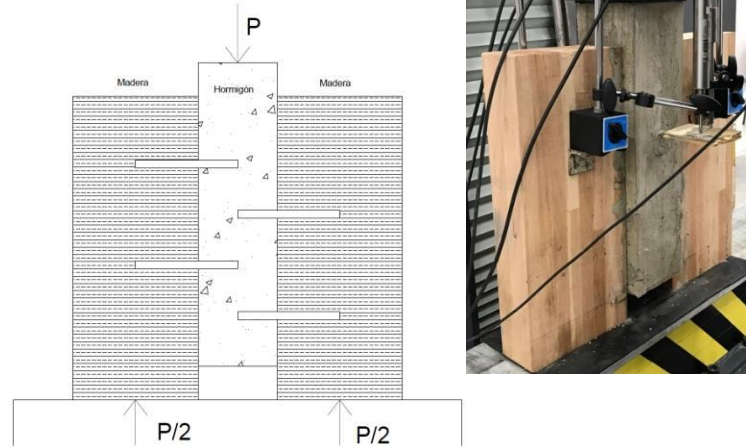
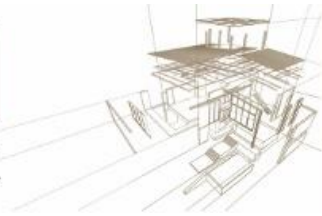


Figura 21: a) Esquema de carga, y b) disposición de los comparadores

El procedimiento de ensayo de las uniones mecánicas en madera está por la norma BS-EN 26891 (1991). En esta se establece que la carga debe aplicarse según la relación fuerza-tiempo que se muestra en el gráfico de la Figura 22a. Como puede observarse, sobrepasados los ocho minutos desde el inicio del ensayo, no es necesario apearse a ningún protocolo. Por lo tanto, después de ese tiempo se continuó aplicando la carga en base a una determinada relación desplazamiento-tiempo, de forma que la curva fuerza-tiempo continúe con la misma pendiente, aunque el ensayo ya no se encuentre regulado por esa relación.

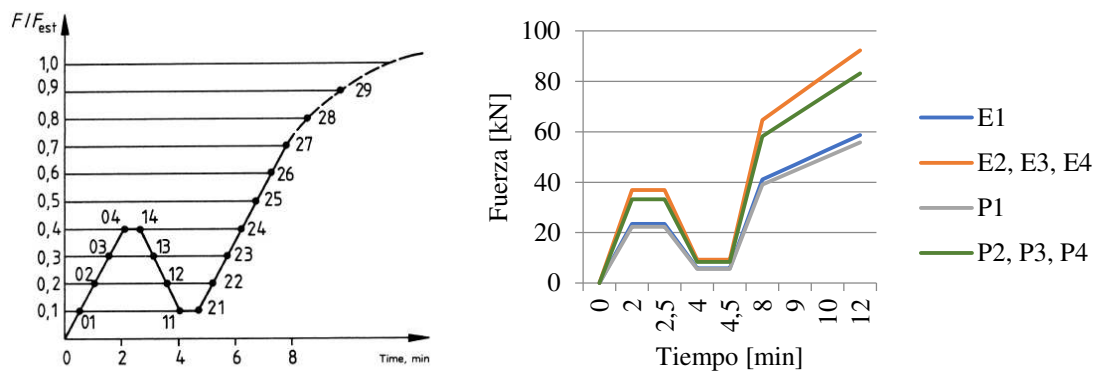
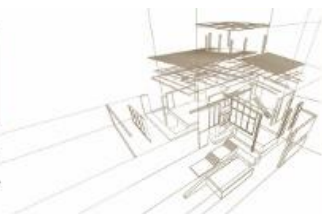


Figura 22: a) Ciclo de carga definido por la norma BS-EN 26891 (1991), y b) procedimiento de carga para las probetas "E1", "E2, E3, E4", "P1" y "P2, P3, P4"

La fuerza aplicada inicialmente fue F_{est} , que fue hallada de acuerdo con lo propuesto en el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2006). A su vez, la norma BS-EN 26891 (1991) establece que, después de ensayada la primera probeta, si la carga última obtenida difiere en un porcentaje mayor al 20 % de F_{est} , se debe ajustar la curva de cargas para la siguiente probeta. En este caso, el nuevo valor de F_{est} pasa a ser la carga última obtenida en el ensayo anterior. Si para la siguiente probeta no se obtiene esta diferencia del 20 % de F_{est} con respecto a la anterior, el procedimiento de carga debe seguir con la misma curva fuerza-tiempo que la anterior.



En la probeta E1 se utilizó la curva de carga-descarga definida en el gráfico de la Figura 3b. Como se comenta en el Capítulo **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la carga última obtenida para E1 difirió en un porcentaje mayor al 20 % de F_{est} . Por lo tanto, se ajustó F_{est} para el resto de las probetas de la misma especie. Así, el ciclo de carga-descarga aplicado a las probetas E2, E3 y E4 fue el expresado en el gráfico de la Figura 3b. Al ensayar estas probetas, la carga última obtenida se mantuvo dentro del rango antes mencionado, por lo que el procedimiento de carga no fue modificado.

Lo mismo sucedió con el grupo de las probetas P1, P2, P3 y P4. Se utilizaron dos protocolos de carga-descarga: uno para la probeta P1 (obtenido a partir de la primera F_{est} , estimada según la normativa europea), y otro para las probetas P2, P3 y P4 (obtenidos a partir de la F_{est} ajustada con el resultado del primer ensayo). Ambas curvas se presentan en la Figura 3b.

3.3. Metodología de análisis

Con los resultados recabados mediante el procedimiento descrito, se halló la fuerza máxima (F_u) y el coeficiente de deslizamiento (K_{ser}) para cada una de las probetas. Para ello se siguió lo propuesto por la norma BS-EN 26891 (1991), que indica que la fuerza máxima es aquella alcanzada para un desplazamiento de 15 mm o aquella que produzca la rotura de la probeta.

Por otro lado, para calcular el coeficiente de deslizamiento se realizaron las gráficas carga-desplazamiento según lo especificado en la norma BS-EN 26891 (1991). Los rangos tomados para realizar dichas gráficas fueron los comprendidos entre $0.1 F_{est}$ y $0.4 F_{est}$. Finalmente, para la obtención del módulo de deslizamiento de cada probeta se halló la pendiente de la recta que mejor aproxima cada uno de los gráficos mencionados anteriormente.

4. CÁLCULOS TEÓRICOS

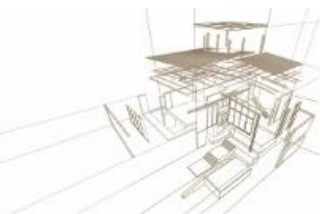
A partir las dos teorías presentadas en el Capítulo 2 (Marco teórico), se calcularon los módulos de deslizamiento y las fuerzas últimas.

Según lo propuesto en el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2006), para hallar K_{ser} se precisa conocer la densidad media de la madera (ρ_m) y el diámetro del conector (d). Mientras que según, Ceccotti (1995), es necesario conocer el diámetro del conector (d) y el módulo de elasticidad medio en la dirección paralela a las fibras ($E_{0,mean}$). Estos valores fueron presentados en el Capítulo 4. En la Tabla 6, se muestran los resultados obtenidos mediante los dos métodos.

Por otro lado, los datos utilizados para calcular la fuerza que resiste la unión según el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2006) son los siguientes: resistencia característica al aplastamiento de la madera ($f_{h,k,eucalipto} = 35.7$ MPa y $f_{h,k,pino} = 31.9$ MPa), penetración del conector en la madera ($t_1 = 80$ mm), diámetro del conector ($d = 12$ mm), momento de plastificación del conector ($M_{y,r,k} = 95\,932$ Nmm) y resistencia al arranque del conector ($F_{a,R,x} = 0$ N). Por último, para calcular la fuerza última según Ceccotti (1995), se toman en cuenta: el momento de plastificación del conector ($M_{y,d} = 104\,727$ Nmm) y su diámetro (d), en conjunto con la resistencia característica de aplastamiento de la madera ($f_{h,k}$, cuyos valores ya fueron presentados). En resumen, los resultados teóricos de la fuerza última se presentan en la Tabla 7.

Tabla 6: Resultados teóricos de coeficiente de deslizamiento (K_{ser})

K_{ser} [kN/mm]	Pino	Eucalipto
Ceccotti (1995)	49.8	82.8



EN 1995-1-1 (2006)	51.0	59.5
--------------------	------	------

Tabla 7: Resultados teóricos de fuerza última (F_u)

F_u [kN/mm]	Pino	Eucalipto
Ceccotti (1995)	53,7	56,5
EN 1995-1-1 (2006)	55,7	58,7

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

La Figura 23 presenta tres imágenes de la rotura de la probeta P1, de pino. En la Figura 23a se puede observar cómo el hormigón se fisuró, en la Figura 23b se muestra la flexión que sufrió el conector, mientras que en la Figura 23c se identifica el aplastamiento localizado de la madera.

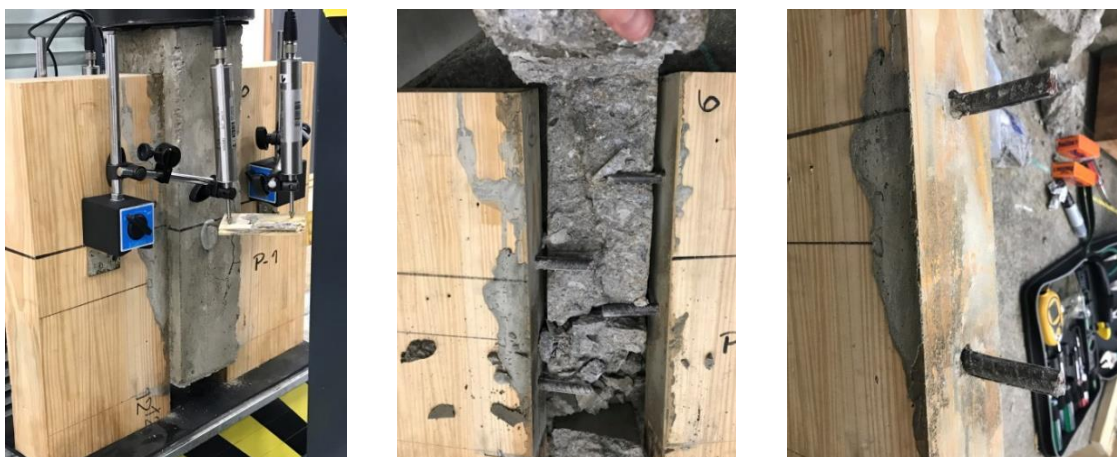


Figura 23: Rotura de la probeta de pino P1: a) fisura en el hormigón, b) flexión en el conector, y c) aplastamiento en la madera

Análogamente, en la Figura 24 se muestran tres imágenes correspondientes a la probeta de eucalipto E1. Las restantes probetas, no mostradas, mostraron un comportamiento similar.

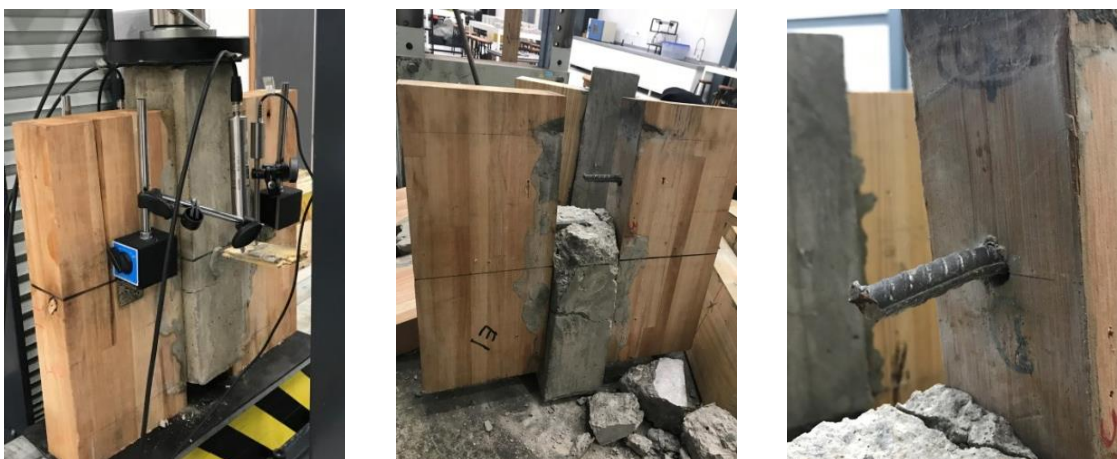
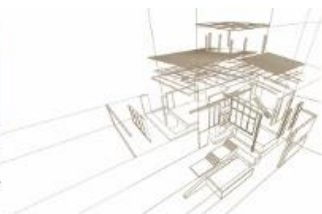


Figura 24: Rotura de la probeta de pino E1: a) fisura en el hormigón, b) flexión en el conector, y c) aplastamiento en la madera



Las curvas fuerza-desplazamiento se hallaron según se presentó en el Capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** La Figura 25a muestra el diagrama fuerza-desplazamiento para las probetas de pino P1, P2, P3 y P4 y la Figura 25b el correspondiente a las probetas de eucalipto, E1, E2, E3 y E4.

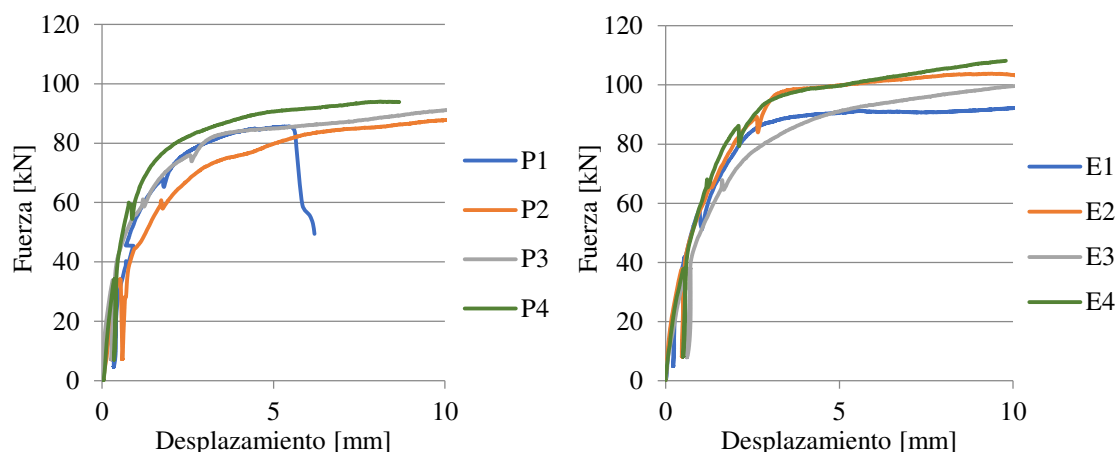


Figura 25: Diagrama fuerza-desplazamiento de a) P1, P2, P3 y P4, y b) E1, E2, E3 y E4

A partir de estas curvas se obtuvo la fuerza última y el módulo de deslizamiento para cada probeta, tal y como se explicó en el Capítulo 3 (Materiales y métodos), según la BS-EN 26891 (1991). En la Tabla 8 se muestran los resultados correspondientes a las probetas de pino y en la Tabla 9 los de las probetas de eucalipto. En resumen, los resultados experimentales y teóricos se muestran en la Figura 26: en la Figura 26a se presentan los coeficientes de deslizamiento y en la Figura 26b las fuerzas últimas (de rotura) halladas.

Tabla 8: Resultados experimentales de pino, K_{ser} y F_u

	P1	P2	P3	P4	Promedio
$K_{ser,exp}$ [kN/mm]	56,4	78,0	91,7	103,4	82,4
$F_{u,exp}$ [kN]	83,2	92,1	92,1	96,1	90,9

Tabla 9: Resultados experimentales de eucalipto, K_{ser} y F_u

	E1	E2	E3	E4	Promedio
$K_{ser,exp}$ [kN/mm]	110,2	70,9	55,1	56,5	73,2
$F_{u,exp}$ [kN]	92,3	103,8	103,5	110,9	102,6

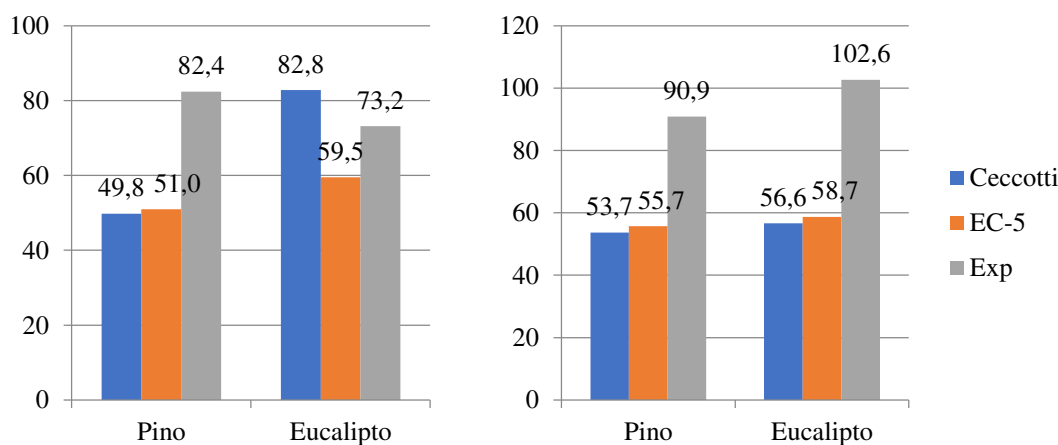
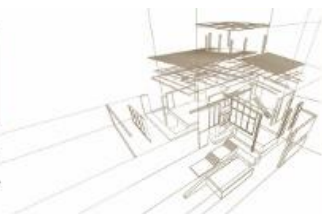


Figura 26: Resultados de a) módulo de deslizamiento, K_{ser} [kN/mm], y b) resultados de fuerza última, F_u [kN]

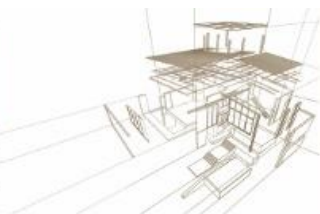
Sobre los resultados presentados anteriormente:

- Se observa que los valores promedio experimentales de F_u son mayores que los teóricos en ambas especies, y para los dos modelos de cálculo teórico.
- En cuanto al K_{ser} , se observa lo mismo en el pino. Sin embargo, en el eucalipto, los resultados experimentales son menores que el valor teórico según Ceccotti (1995). Una posible explicación de este fenómeno es que la Ecuación (1) para calcular el K_{ser} según el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2006) solo tiene en cuenta la densidad de la madera. Esta es solo ligeramente superior en la MLE de eucalipto (490 kg/m^3) que en la de pino (440 kg/m^3). Sin embargo, en la Ecuación (2), tomada de Ceccotti (1995), entra en juego el módulo de elasticidad, que es mucho mayor en la MLE de eucalipto ($13\,800 \text{ MPa}$) que en la de pino (8321 MPa). Según los resultados obtenidos, Ceccotti (1995) podría estar sobreestimando el valor de K_{ser} en la madera de eucalipto nacional. Esto puede deberse a que su ecuación se validó para especies de coníferas con relaciones entre el módulo de elasticidad y la densidad similares a las obtenidas en el pino uruguayo, $E/\rho = 19 \cdot 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2$, mientras que el *Eucalyptus grandis* uruguayo tiene una relación mucho mayor, $E/\rho = 28 \cdot 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2$.
- Si se observan los resultados experimentales individuales de K_{ser} de las probetas de eucalipto, se puede observar que solo una superó el valor promedio hallado para el pino. No es posible explicar dichos resultados con lo analizado en este artículo, sino que se necesita mayor investigación para entender el fenómeno.

6. CONCLUSIONES

En primer lugar, se concluye que las fuerzas últimas obtenidas de ambas especies de madera uruguayana resultaron satisfactorias. Estos valores permiten validar, al menos para los conectores utilizados (barras de acero conformado adheridas mediante resina epoxi), los cálculos teóricos propuestos por la literatura para el cálculo de estructuras madera-hormigón en Uruguay.

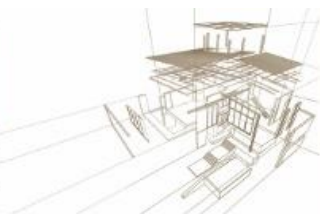
Por otro lado, teniendo en cuenta el módulo de deslizamiento, también es posible validar los cálculos teóricos para los compuestos de MLE de pino. Sin embargo, en los compuestos de MLE de eucalipto, los resultados experimentales son menores que el valor teórico obtenido según Ceccotti (1995). Esto último puede ser consecuencia de que el eucalipto nacional presenta una densidad muy baja en relación con su módulo de elasticidad. De esta manera, desde el punto



de vista de las propiedades mecánicas, se asemeja más a una conífera que a una frondosa. De hecho, la norma UNIT 1262 (2018) recomienda que el *Eucalyptus grandis* uruguayo sea considerado como una C20, clase resistente que corresponde a una conífera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baño V., Pérez-Gomar C., Vega A., Godoy D., Cardoso A., Moya L. (2019). Relationship between structural properties of sawn timber and glulam beams of Uruguayan Eucalyptus and Pinus species. Documento de trabajo (sin publicar). Universidad de la República y Universidad ORT Uruguay, Montevideo, Uruguay.
- BS-EN 26891:1991, ISO 6891:1983. Timber structures. Joints made with mechanical fasteners. General principles for the determination of strength and deformation characteristics. BSI, London, United Kingdom.
- BS-EN 1380:2009. Timber structures. Test methods. Load bearing nails, screws, dowels and bolts. BSI, London, United Kingdom.
- Cardenas M., Schanack F., and Ramos Ó.R. (2010). Diseño, construcción y ensayo de una estructura de sección mixta madera laminada-hormigón para su uso en puentes. Revista de la construcción, v. 9, n. 2, p 63-75.
- Ceccotti, A. (1995). Timber-concrete composite structures (E13). In Blass *et al*, Timber Engineering STEP 2. Centrum Hout, Almere, Netherlands.
- Dias A., Schänzlin J., and Dietsch P. (2018). Design of timber-concrete composite structures: A state-of-the-art report. COST Action FP1402 / WG 4, Shaker Verlag Aachen, Düren, Germany.
- Dias A., Skinner J., Crews K., and Tannert T. (2016). Timber-concrete-composites increasing the use of timber in construction. European Journal of Wood and Wood Products, v. 74, n. 3, p. 443-451.
- He G., Xie L., Wang X., Yi J., Peng L., Chen Z., Gustafsson P.J., and Crocetti R. (2016). Shear behavior study on Timber-Concrete Composite Structures with Bolts. BioResources, v. 11, n. 4, p. 9205-9218.
- IRAM 1524 (1982). Hormigón de cemento portland. Preparación y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral. IRAM, Buenos Aires, Argentina.
- Moya L., Pérez-Gomar C., Vega A., Sánchez A., Torino I., and Baño V. (2019). Relación entre parámetros de producción y propiedades estructurales de madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis*. Maderas. Ciencia y Tecnología, v. 21, n. 3.
- Rijal R., Samali B., Shrestha R., and Crews K.I. (2014). Experimental and analytical study on dynamic performance of timber-concrete composite beams. Construction and Building Materials, v. 75, p. 46-53.
- UNE-EN 1995-1-1:2006. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación (2006). AENOR, Madrid, España.
- UNIT 1261:2018. Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de pino taeda y pino ellioti (*Pinus taeda* y *Pinus elliotii*) (2018). UNIT, Montevideo, Uruguay.
- UNIT 1262:2018. Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) (2018). UNIT, Montevideo, Uruguay.
- UNIT-NM 101:1998. Hormigón. Ensayo de compresión de probetas cilíndricas (1998). UNIT, Montevideo, Uruguay.



PROPUESTA DE MODELADO DE ESTRUCTURAS COMPLEJAS DE MADERA: MUSEO DE ARTE LATINOAMERICANO EN URUGUAY

MODELLING PROPOSAL OF COMPLEX TIMBER STRUCTURES: A LATIN AMERICAN MUSEUM CASE STUDY

Domenech, Leandro ⁽¹⁾ *; Mazzei, Carlos ⁽²⁾; Baño, Vanesa ⁽³⁾

⁽¹⁾ Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

⁽²⁾ Ing. Civil. OAK Ingeniería. Montevideo, Uruguay

⁽³⁾ Dr. Ing. Montes. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

* Contacto: ldaguaiar@fing.edu.uy

Resumen

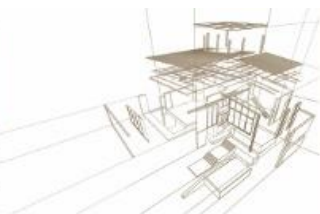
El desarrollo tecnológico de los productos de ingeniería de madera ha abierto un abanico de posibilidades a los arquitectos e ingenieros. Como consecuencia, las estructuras de madera se han tornado cada vez más complejas de modelar, lo que se combina con las dificultades inherentes al material. Este artículo presenta una propuesta metodológica de modelado de estructuras complejas de madera a partir de un caso particular: el Museo de Arte Latinoamericano en Uruguay. La sala de esculturas del museo presenta una cubierta de doble curvatura, con vigas —curvas y de sección variable— y correas de madera laminada encolada. La metodología consiste en la utilización sinérgica de dos softwares: el SAP2000, que permite el modelado y análisis estructural mediante el método de los elementos finitos; y el MATLAB, que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. En este último se pueden generar —mediante un algoritmo— las matrices (de nodos, de conectividad o de solicitaciones, por ejemplo) del sistema a introducir en el SAP2000, para luego resolver el problema y analizar los resultados. Este método posibilita la modelización y el análisis de estructuras como la del museo, que, ya sea por la complejidad de su geometría, por la dificultad en la introducción de las cargas o por otra particularidad, hagan inviable el modelado directo a partir de la utilización de un solo único software.

Palabras-clave: madera, análisis estructural, modelado, programación.

Abstract

The technological development of wood engineered products has opened a world of possibilities to architects and engineers. Consequently, timber structures have become more complex to model, which adds to the inherent difficulties of the material. This paper presents a methodological proposal to model complex timber structures from a case study: the Museum of Latin American Art in Uruguay. The museum's sculpture room has a double-curved roof, with glulam purlins and beams —of curved axis and variable section—. The method consists in the synergic use of two software: SAP2000, which allows to model and analyze a structure using the finite element method; and MATLAB, which offers an integrated development environment with its own programming language. The latter allows to generate —with an algorithm— the system matrices (e.g., of nodes, connectivity or forces) to be introduced in SAP2000, to then solve the problem and analyze the results. This method allows to model and analyze structures such as the museum, which either by the complexity of its geometry, by the difficulty in the introduction of the loads or by another particularity, make direct modeling infeasible from the use of a single software.

Keywords: timber, structural analysis, modelling, scripting.



1. INTRODUCCIÓN

La madera, junto a la mampostería, es el material más antiguo usado en la construcción. Entre finales del siglo XIX y XX, los países occidentales la sustituyeron parcialmente por nuevos materiales, como el hormigón o el acero. Sin embargo, en las últimas décadas, y en una transición hacia un modelo de bioeconomía, la construcción con madera se ha incrementado y convertido en un fenómeno global (Dangel 2016). Este incremento no se debe únicamente a sus conocidas ventajas ambientales, sino también a las estructurales —buena relación resistencia-peso propio—, las estéticas, de ahorro de energía en su proceso de producción (con respecto a otros materiales), de disposición final tras su vida útil, etc.

El desarrollo de diversos productos de ingeniería de madera (EWP, del inglés *Engineered Wood Products*) ha sido un motor fundamental en la popularización de la madera como material estructural. En el último siglo, los sistemas constructivos con madera han pasado del uso de madera aserrada de pequeñas secciones para “entramado ligero”, al sistema “poste y viga” con piezas de mayor sección —principalmente de madera laminada encolada (MLE)— al uso de grandes volúmenes de madera en forma de paneles en el sistema constructivo “*mass timber*” (Natterer 2004). Aunque la evolución en la aparición de los sistemas constructivos sigue este orden, actualmente conviven todos los sistemas. Con el fin de cubrir grandes superficies con un bajo volumen de madera, surgen las estructuras tipo “cáscara”, “membrana” o *shell*, mucho más eficientes en la relación entre su resistencia estructural y el volumen de madera utilizado.

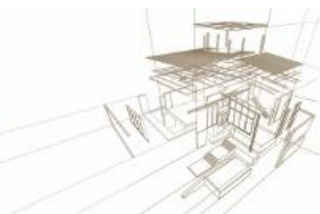
Los EWP han abierto un abanico de posibilidades a los arquitectos e ingenieros a la hora de diseñar estructuras, con piezas capaces de salvar grandes luces y con elementos de secciones, curvaturas y formas variables. Como consecuencia, las estructuras de madera se han tornado cada vez más complejas de modelar, lo que se combina con las dificultades inherentes al material (como su ortotropía, el comportamiento elastoplástico en compresión, y el análisis a largo plazo). Ejemplos destacados de estructuras tridimensionales de madera en Europa son las obras del ingeniero Julius Natterer —como el ExpoDach2000 en Hannover— (Natterer 2004).

En Uruguay existen básicamente tres limitantes en la concepción de un proyecto estructural complejo (espacial) de madera. La primera se debe a la escasa tradición en la construcción con madera en el país (en parte, debido a que las primeras plantaciones forestales son de la década del 90); la segunda está relacionada con la falta de EWP de producción local; y la tercera con la escasa formación académica en estructuras de madera. El creciente interés de la industria local en el desarrollo de productos estructurales en madera, ligado a la actual oferta de formación en ingeniería civil, arquitectura e ingeniería forestal (Baño and Moya 2018) está haciendo que estas limitantes se puedan salvar en un corto plazo de tiempo.

El objetivo de este trabajo es presentar una propuesta metodológica de modelado de estructuras complejas de madera a partir de un caso particular de una estructura tridimensional: el Museo de Arte Latinoamericano en Uruguay. La sala de esculturas del museo es la primera estructura espacial compleja que se diseña en el país, utilizando elementos de madera laminada encolada de sección variable y doble curvatura. Este tipo de estructuras requiere de un enfoque de modelado y diseño estructural distinto al tradicional, en el que se utilice más de un *software* para viabilizar el análisis estructural.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El Museo de Arte Latinoamericano es un proyecto cultural —de exhibición y promoción del arte— que albergará colecciones de reconocidos artistas latinoamericanos (como Soto, Cruz-



Diez, Torres García y Le Parc, entre otros). Está prevista su inauguración en Manantiales — Maldonado, Uruguay— para la temporada estival de 2020-2021.

2.1. Descripción del proyecto

La obra se emplazará dentro del predio de la Fundación Atchugarry, una organización sin fines de lucro creada por el escultor uruguayo Pablo Atchugarry con el fin de promover las artes. Pablo Atchugarry —principal impulsor del proyecto— planteó como objetivo para el museo amalgamar el arte latinoamericano y poner en comunión obras de distintos artistas de la región.

El diseño arquitectónico y proyecto del museo está a cargo del arquitecto uruguayo Carlos Ott. Ott ganó el reconocimiento internacional cuando ganó, entre más de 700 proyectos, el concurso internacional para construir el edificio de la Opera de la Bastilla en París. Hoy en día, su estudio de arquitectura cuenta con oficinas en Toronto, Quebec, Shanghai, Dubai y Montevideo. Algunas de sus obras destacadas son: la Terminal de pasajeros del Aeropuerto Internacional de Ushuaia Malvinas Argentinas (1995, Argentina); el National Bank of Dubai (1997, Emiratos Arabes); y la Torre de las Telecomunicaciones de Montevideo (2002, Uruguay).

El presente caso de estudio se centra en la estructura de la cubierta de la sala de esculturas, cuyo diseño estructural está a cargo del estudio Oak Ingeniería (integrado por los autores de este artículo). La estructura cubrirá un área de 1600 m² y será realizada, casi en su totalidad, por elementos de MLE de procedencia aún no definida. La Figura 1 muestra tres fases representativas del diseño del presente proyecto: partiendo de líneas conceptuales, se finaliza con la elaboración de un modelo tridimensional de la ingeniería.

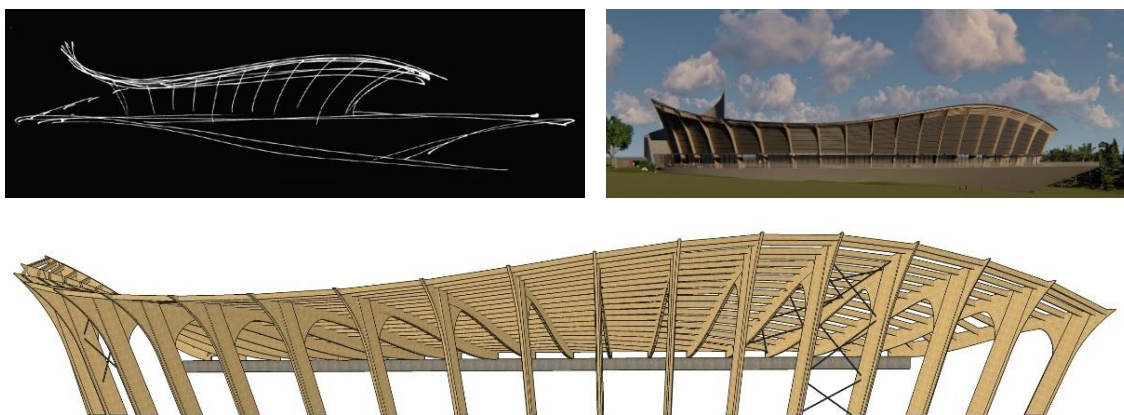
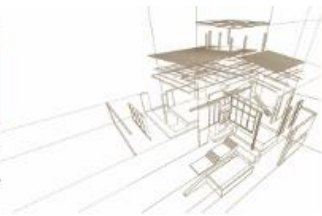


Figura 1: Museo de Arte Latinoamericano de la Fundación Atchugarry; a) diseño conceptual (Carlos Ott), b) render y fotomontaje, y c) modelo BIM de ingeniería (Oak Ingeniería)

2.2. Geometría de la estructura

La estructura de la cubierta se compone, simplificada, de tres elementos principales: a) pórticos principales; b) correas; y c) elementos de arriostramiento. La Figura 2 muestra, de forma esquemática, las medidas en planta.

Los 19 pórticos son de geometría (longitud, altura y forma) única, de manera de otorgarle una doble curvatura a la cubierta. Cada pórtico se compone de una viga simple de curvatura y sección variable (135 x 1000-1300 mm²), unida rígidamente en el vértice a un pilar doble de sección constante (2 x 90 x 1300 mm²). Adicionalmente, por razones estéticas, se dispone de un elemento curvo de sección variable, paralelo a los pilares, con el fin de generar vértices en fachada sin sacrificar la clase de servicio a la cual estará sometida la unión rígida. La longitud



horizontal máxima es de aproximadamente 27,45 m (pórtico 13, Figura 3.a), y la altura vertical máxima al vértice de fachada es de aproximadamente 15,23 m (pórtico 19, Figura 3.b)

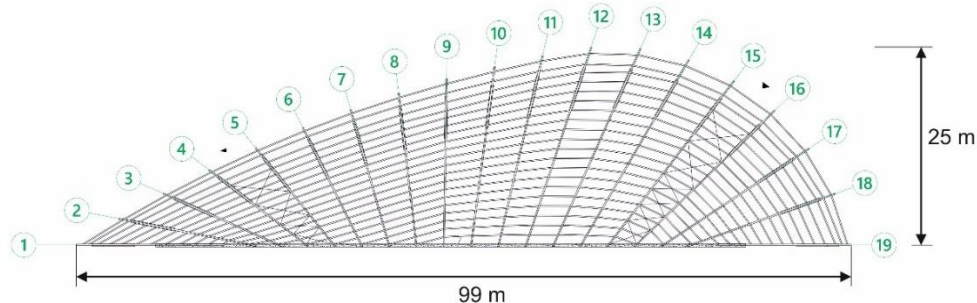


Figura 2: Planta de la estructura de cubierta (Oak Ingeniería)

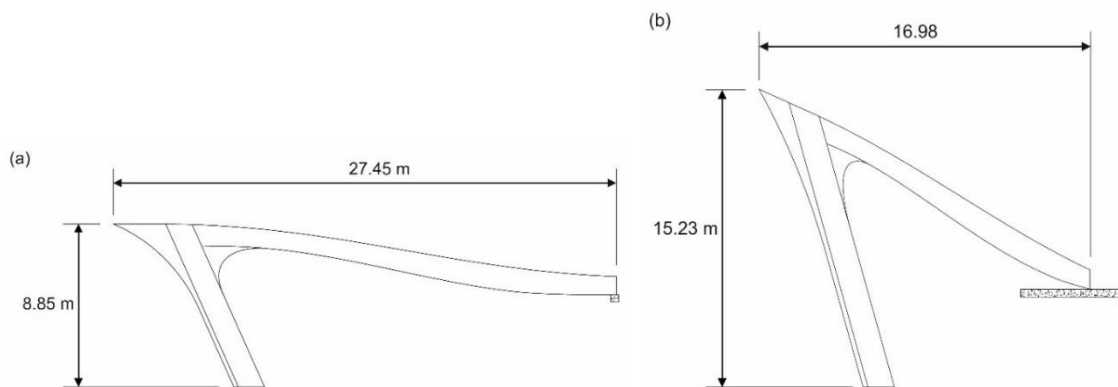


Figura 3: a) Pórtico 13, y b) pórtico 19 (Oak Ingeniería)

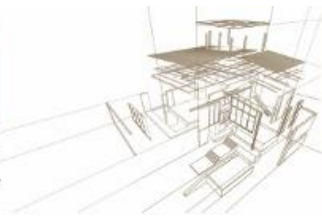
3. ACCIONES DE VIENTO

Dada la geometría particular de la cubierta, el estudio de la acción del viento sobre la estructura resulta de gran interés y requiere de una atención particular. La geometría no se encuentra contemplada por las normas de viento de aplicación como la UNIT 50:84 (1984) o la UNE-EN 1991-1-4 (2007). Este aspecto obliga a tomar ciertas simplificaciones y consideraciones para su aplicación, como se detallará en los siguientes párrafos.

3.1. Coeficientes de presión exterior

En este punto, el objetivo fue obtener los coeficientes de presión exterior en la cubierta para cada dirección de viento, partiendo de 0° perpendicular al lado recto y aumentando de a 45° en sentido horario —como se muestra en la Figura 4.a—.

Para ello, en primer lugar, se discretizó la estructura en 18 elementos, utilizando como referencia la ubicación de los pórticos. En cada elemento se tomaron tres valores de ángulos: α_1 , α_2 y α_3 (Figura 4.b). Obtenidos los parámetros α_1 , α_2 y α_3 para cada elemento, se procedió a aplicar la Tabla 7.3a y 7.3b de la norma EN 1991-1-2 (2007), analizando las situaciones de viento según las direcciones locales de cada elemento (Figura 4.c). Cabe destacar que para las direcciones 90° y 270° el elemento se divide en dos zonas: una superior con inclinación α_2 y otra inferior con inclinación α_3 . En caso de que el valor α_2 o α_3 fuera menor a 5° , se consideró,



para ese sector, y para las direcciones 90° y 270° , que la cubierta era plana. Este aspecto implicó que en estos casos se aplicara la Tabla 7.3b con α_1 como único parámetro de entrada.

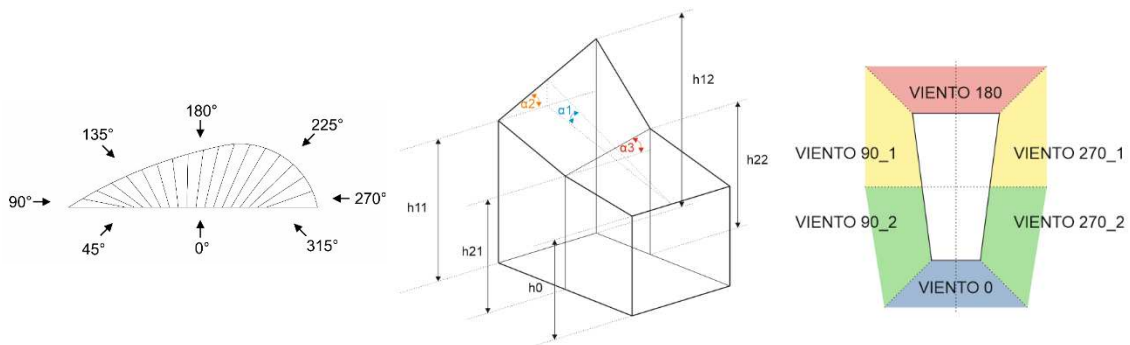


Figura 4: a) Direcciones globales de viento; b) parámetros angulares de cada elemento; y c) mapa de ubicación de direcciones locales de viento

Para cada elemento y cada dirección local de viento (Figura 4.c) se obtuvieron los coeficientes F, G, H e I —según la Figura 7.7 de la UNE-EN 1991-1-4 (2007)—. Luego, fijada una dirección global de viento, y dependiendo de la orientación de cada elemento en la estructura, se puede convertir dicha dirección global en una dirección local particular. Esto permitió obtener, para cada elemento, los coeficientes F, G, H e I asociados a cada dirección global (Figura 4.a)

El coeficiente I se obtuvo solo en aquellos casos en los que α_2 o α_3 resultaron menores a 5° . Esta situación se da en tres elementos, por lo que, a modo de simplificación y del lado de la seguridad, no se tuvo en cuenta el coeficiente I. En todos los casos se adoptó el coeficiente H como el correspondiente a presión exterior general. Por otra parte, para localizar la zona de aplicación de los coeficientes de borde F y G, se evaluó dimensionalmente a la estructura completa respecto a las direcciones globales de viento. A modo de ejemplo, en la Figura 5 se muestra la localización de los efectos de borde para la dirección de viento 135° . El ancho de influencia de la zona F-G es de aproximadamente 3 m.

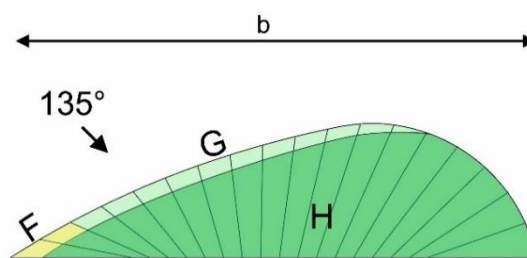


Figura 5: Localización de la zona de borde para el caso de viento 135°

Los coeficientes de presión exterior en fachada se determinaron siguiendo un razonamiento análogo al anterior: se evaluó para cada dirección global la orientación de la fachada de cada elemento y se calcularon los coeficientes asociados según la norma UNE-EN 1991-1-4 (2007).

3.2. Coeficientes de presión interna y totales

Los coeficientes de presión interna se calcularon de acuerdo al apartado 7.2.9 de la norma UNE-EN 1991-1-4 (2007). De forma conservadora se consideró al coeficiente de presión interna como el 90% del coeficiente de presión externa en los huecos de fachada, teniendo en cuenta



que el 90% de los huecos se encuentran en la fachada frontal. Finalmente, se obtuvieron los coeficientes totales combinando los coeficientes de presión interior y exterior. Este método de cálculo dio lugar a una distribución de cargas compleja, tal cual se muestra en la Figura 8.

4. METODOLOGÍA DE MODELADO PROPUESTA

El proceso de diseño de una estructura incluye varias etapas, que varían ligeramente de acuerdo a distintos autores (Pahl and Beitz 1988; Ertas and Jones 1996; Dym and Little 2009). Según Dym and Little (2009), estas fases son: a) definición del problema; b) diseño conceptual; c) diseño preliminar; d) diseño detallado; y e) comunicación del diseño. Dentro del diseño detallado, el modelado numérico de la estructura —o análisis estructural asistido por computadora— se ha vuelto un paso casi ineludible en estos tiempos. Este capítulo se centra en el proceso de modelado estructural y en las metodologías disponibles para tal fin.

4.1. Metodología tradicional: SAP2000

La forma más habitual de modelar una estructura es a través de un *software* de análisis y diseño estructural, que permite la creación de un modelo basado en el método de elementos finitos (MEF) a través de una interfaz gráfica. Algunos ejemplos de programas comúnmente utilizados son el SAP2000 (Computers and Structures), el Robot Structural Analysis Professional (Autodesk) y el CYPECAD o CYPE 3D (CYPE Ingenieros).

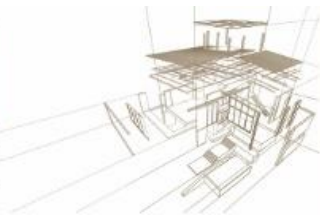
El SAP2000 es un *software* de modelado, análisis y dimensionado de variadas estructuras, como edificios, estadios, torres, plantas industriales, represas, entre otras (Computers and Structures, Inc. 2017). A través de su interfaz gráfica es posible crear un modelo tridimensional de una estructura y luego analizarla mediante el MEF. Algunos de los estudios que se pueden realizar son: análisis estáticos y dinámicos (*modal*, *time-history*, *power-spectral-density*, entre otros), análisis lineales y no lineales (incluyendo no linealidades geométricas), análisis en el tiempo (por ejemplo, construcción por etapas o efectos de fluencia y retracción).

La relativa sencillez de su interfaz gráfica (que permite un modelado rápido y una visualización directa de los resultados) y la versatilidad para realizar diversos tipos de análisis en variadas estructuras lo convierten en uno de los *softwares* más utilizados por la industria en Uruguay. Es particularmente eficiente cuando se desea modelar estructuras geoméricamente sencillas —o importables desde otro programa de dibujo, como AutoCAD (Autodesk) o Revit (Autodesk)— y sometidos a cargas y condiciones de borde que puedan definirse de forma simple. Sin embargo, por sí solo, el SAP2000 presenta ciertas limitaciones cuando se trata de modelar estructuras que no reúnan estas condiciones, como en el caso del museo de este trabajo.

4.2. Metodología numérica: MATLAB

Una alternativa a la resolución mediante un *software* específico de análisis estructural es el cálculo (modelado) numérico con un lenguaje de programación, generalmente utilizando un entorno de desarrollo integrado. Algunos ejemplos de programas de análisis numérico con lenguajes propios son: MATLAB (MathWorks) y Mathematica (Wolfram Research). También es posible utilizar un lenguaje específico (como Fortran o Python) a través de un compilador.

Ampliamente utilizado en el ámbito científico, el MATLAB es un *software* matemático que permite la manipulación directa de vectores y matrices, la visualización de funciones y datos, la implementación de algoritmos, y la creación de interfaces de usuario, entre otras capacidades. El lenguaje de programación propio es muy fácil de aprender, y da lugar a algoritmos sencillos y cortos en comparación a otros lenguajes (Kwon and Bang 1997).



Por ser un software matemático, es necesario plantear el problema de forma numérica, de forma que pueda ser resuelto mediante el MEF. De forma resumida, este proceso supone los siguientes pasos (Reddy 2005): a) representación y mallado del dominio; b) formulación simplificada del problema en los elementos finitos; c) ensamblaje de las ecuaciones de los elementos; d) imposición de las condiciones de contorno; y e) resolución e interpolación de la solución.

El procedimiento descrito debe realizarse para cada análisis particular que se desee realizar: este aspecto provoca que la metodología numérica de modelado sea extremadamente laboriosa y, por tanto, poco eficiente a nivel profesional. No obstante, presenta algunas ventajas en comparación a la metodología tradicional: el modelado y análisis es más transparente, en el sentido que se conoce más en profundidad el funcionamiento interno del *software*; es más flexible pues es posible introducir cualquier tipo de estructura (por ejemplo, de geometría o rigidez variable) y realizar cualquier tipo de análisis estructural; y, por último, suele ser más adaptable, ya que los pasos se pueden programar (por ejemplo, el mallado), por lo que no es necesario rehacer manualmente todo el modelo si cambian los datos de entrada.

4.3. Metodología propuesta: combinación de los *softwares*

De las metodologías presentadas se desprende que ninguna de ellas es particularmente adecuada (o conveniente) para el modelado de estructuras complejas (como la del museo), ya sea por su geometría (Capítulo 2) o por las características de sus cargas (Capítulo 3). Es, así, necesario usar una metodología distinta, que viabilice el modelado de este tipo de estructuras. Para ello, en este trabajo se propone la aplicación conjunta de dos *softwares*: el SAP2000 y el MATLAB.

El SAP2000 almacena los datos del modelo y otra información en una base de datos compuesta por tablas. Estas tablas se pueden editar directamente a través de una herramienta llamada *Interactive database editing* (Computers and Structures, Inc. 2017), que permite añadir o modificar todos los parámetros que definen un modelo (como los materiales, las secciones, la geometría, la conectividad de los elementos, las condiciones de borde, las cargas, etc.). A su vez, una vez realizado el análisis, el *software* dispone de otra herramienta, llamada *Show Tables* (Computers and Structures, Inc. 2017), que permite obtener tabulados todos los resultados del análisis (como, por ejemplo, los desplazamientos y las solicitaciones).

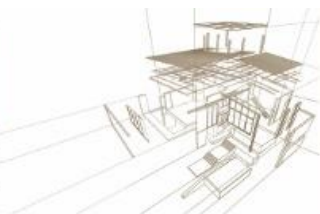
La idea detrás de esta metodología es utilizar el SAP2000 para modelar y analizar la estructura compleja, pero generar en MATLAB aquellos aspectos del modelo que, por su complejidad, no puedan realizarse fácil y directamente en el primero. De esta manera se aprovechan las ventajas de cada una de las metodologías: el SAP2000 sirve como software de análisis, con una potente interfaz gráfica (que permite modelar ciertas partes de la estructura y luego visualizar de forma directa los resultados); y el MATLAB sirve como herramienta matemática para elaborar, con flexibilidad, los aspectos más difíciles del modelo (como partes de la geometría, el mallado o las cargas), y para luego analizar y dimensionar la estructura a partir de los resultados numéricos.

4.4. Aplicación de la metodología propuesta al caso de estudio

Como ejemplo de la metodología combinada propuesta, en este punto se presenta cómo se aplicó a la estructura de madera del Museo de Arte Latinoamericano en Uruguay.

4.4.1. Particularidades de la estructura

Los recaudos gráficos que sirvieron como punto de partida del modelo fueron una planta con la disposición de los pórticos (Figura 2), y un alzado de cada uno de ellos (Figura 3). Los pórticos están formados por pilares dobles rectos y vigas simples de curvatura y sección variable. Por otra parte, luego de un proceso de optimización, se dispusieron las correas en planta, tal cual se



muestra en la Figura 2. La cubierta, sobre la que actúan las acciones de viento, queda entonces definida por la cara superior de las vigas y de las correas. Luego de un análisis simplificado, tal cual se presentó en el Capítulo 3, se obtuvieron unas presiones de viento variables para cada dirección de viento considerada. De estos comentarios se desprenden cuáles fueron las principales dificultades para modelar la estructura:

- las vigas son de curvatura y sección variable;
- las correas están definidas en planta, pero no en el espacio;
- las acciones de viento están aplicadas de forma distribuida no son uniformes a lo largo y ancho de la cubierta.

4.4.2. Metodología aplicada

El proceso de modelado de la estructura comenzó con la obtención, desde AutoCAD, de la geometría de los pórticos: esto es, los ejes de los pilares y las curvas superiores de las vigas (que definen la cubierta). Por otra parte, se diseñó en MATLAB una función que, para cada viga, define la altura de la sección de esta en función de la posición horizontal relativa a la viga. De esta función y de las curvas superiores de las vigas, se obtuvieron las curvas que pasan por los baricentros de las secciones de las vigas —mediante un algoritmo de MATLAB—.

Habiendo obtenido en MATLAB la geometría de los pilares y las vigas, se importó desde AutoCAD la posición en el plano de las correas. Mediante otro *script* de MATLAB, estas se proyectaron a los pórticos (a los ejes de las vigas curvas), de manera de posicionarlas en el espacio. Se obtuvieron las coordenadas de los puntos intersección entre las correas y las vigas, y se agregaron otros puntos en las vigas, de manera que no quedaran tramos de más de 25 cm. Este procedimiento dio lugar a una serie de nodos conectados por elementos de barra.

A partir de la información antes obtenida, se generó en MATLAB una matriz de 2194 nodos, una matriz de 2511 elementos de barra (*frames*), y una matriz de conectividad asociada. La matriz de nodos contiene una lista de puntos con la siguiente información: un índice (que indica el nodo en particular) y tres coordenadas (x , y , y z , definidas de forma global). La matriz de *frames* contiene una lista de los elementos de barra y de las secciones asociadas (previamente definidas en el SAP2000). Por último, la matriz de conectividad contiene la misma lista de elementos de barra, pero con otra información: un índice (que indica el *frame* en particular), y dos puntos, que representan aquellos nodos que cada elemento une.

Una vez generadas estas tres tablas (matrices en MATLAB), estas se pueden importar desde SAP2000 mediante la herramienta definida en el Punto 4.3. Para ello, primero es necesario definir los materiales (ortótropos, en el caso de la madera), y luego se generan las secciones que se emplearon en la matriz de *frames*. Entonces es posible importar la geometría generada en MATLAB y agregar elementos adicionales (como los tensores) o definir las condiciones de contorno (apoyos fijos en las vigas y los pilares). De esta forma queda definida la estructura de madera: en la Figura 6 se muestra una imagen tridimensional del modelo en este punto.

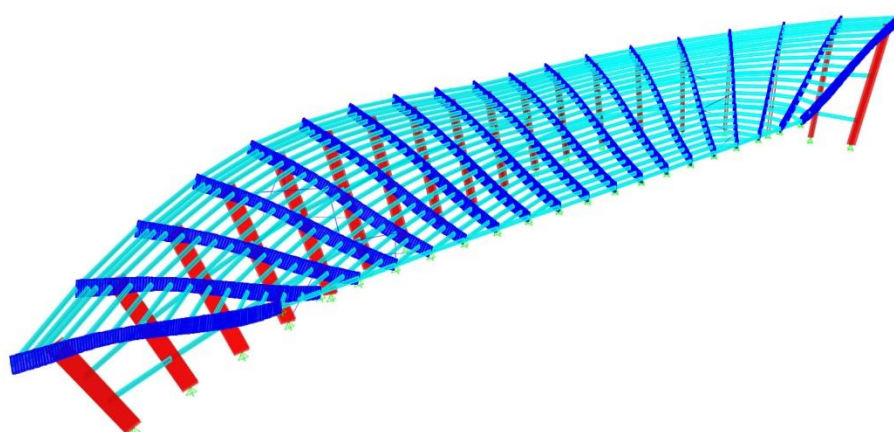


Figura 6: Imagen tridimensional del modelo una vez definida la geometría; en rojo se representan a los pilares, en azul a las vigas, y en celeste a las correas

La siguiente gran dificultad del modelo computacional fue la introducción de las acciones de viento, presentadas en el Capítulo 3. Por tratarse de cargas distribuidas, existen básicamente dos formas de acoplarlas al modelo: a) asignando cargas uniformemente distribuidas a los *frames*; o b) generando una cubierta ficticia mediante elementos de losa (*shell*) y asignando las presiones a los elementos de losa. Cada una de las opciones presenta algunas ventajas y otras dificultades.

En el caso de estudio, se decidió generar una cubierta mediante *shells*. La ventaja de esta opción es que las presiones se aplican directamente sobre estos elementos, para lo cual basta con conocer la dirección del viento y la posición en la cubierta. La principal dificultad es que, como la cubierta es de doble curvatura, normalmente no ocurre que cuatro puntos “cercaños” estén contenidos en el mismo plano. Por lo tanto, el mallado se debe realizar de forma numérica en MATLAB, y todos los elementos que deben ser triangulares (definidos por tres nodos).

El procedimiento seguido en MATLAB en este caso fue similar (aunque un tanto más laborioso) al presentado para la geometría. Mediante varias funciones y *scripts* se generó una matriz de 11973 nodos, una matriz de 19763 elementos de área (*shells*), y una matriz de conectividad. Aquí, la matriz de conectividad vincula a tres nodos por elemento. Estas tablas se importaron desde SAP2000 (luego de definir la sección de los *shells*) y se obtuvo la geometría final del modelo, tal como se muestra en la Figura 7.

El siguiente paso fue generar una tabla de presiones sobre los elementos de área. Para ello se creó —en MATLAB— una matriz con la siguiente información: una columna con los índices (que indican los *shells* en particular), otra columna con los nombres de los “*Load Patterns*” asociados a las direcciones de viento, y una tercera columna con los valores —que indican los coeficientes de presión total obtenidos mediante interpolación— para cada combinación de elementos de área y direcciones de viento (Figura 8).

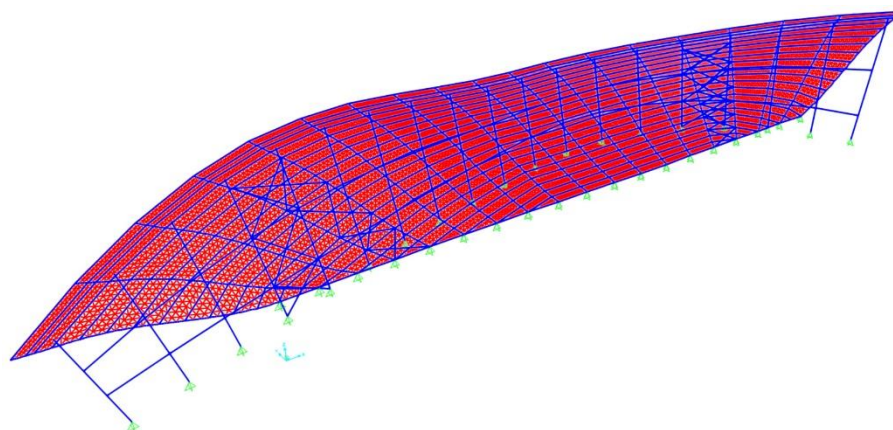


Figura 7: Imagen tridimensional del modelo una vez definidos los elementos de área

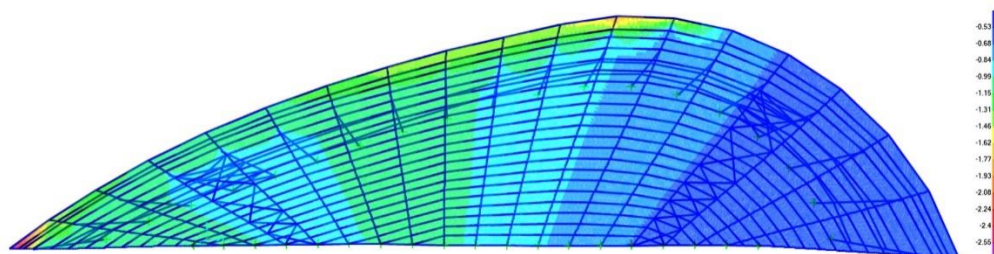


Figura 8: Asignación de presiones de viento a los elementos de área para el caso de viento 135° (I); los valores indican coeficientes de presión total

4.4.3. Resultados obtenidos: modelo numérico

El resultado de aplicar la metodología propuesta a la cubierta del museo fue la obtención de un modelo numérico tridimensional de la estructura. Este modelo se usará para analizar la estructura y para dimensionar los elementos que la conforman. En este proceso, también será de utilidad el MATLAB, ya que la utilización sinérgica de los dos *softwares* no está restringida al proceso de modelado: también aplica a la verificación y diseño de la estructura.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó una propuesta metodológica de modelado de estructuras complejas —de madera— mediante un caso de estudio sin precedentes en el Uruguay: la cubierta del Museo de Arte Latinoamericano. La metodología, que consiste en la utilización sinérgica de dos *softwares* (SAP2000 y MATLAB), posibilita la modelización y el análisis de estructuras como la del museo, que, ya sea por la complejidad de su geometría, por la dificultad en la introducción de las cargas o por otra particularidad, hagan inviable el modelado directo a partir de la utilización de un solo único *software* (como ocurre en la práctica).

Para algunos autores, estamos en el comienzo de una “era” de madera. La humanidad es cada vez más consciente de las virtudes ambientales de construir con este material y, paulatinamente, va descartando algunos de los prejuicios hacia la madera. Este proceso ha sido acompañado por un gran avance tecnológico en el desarrollo de productos de ingeniería de madera y por una capacidad creativa cada vez mayor de quienes diseñan estructuras. Para que este proceso



continúe, debe acompañarse de métodos —así como de profesionales e investigadores— capaces de hacer frente a las nuevas y desafiantes demandas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baño V., and Moya L. (2018). Curriculum development of postgraduate studies on timber construction for architects and engineers. In: *Engineering a better world: sustainable development of agricultural and forestry systems*. International Council of Academies of Engineering and Technological Sciences, Montevideo, Uruguay.

Computers and Structures, Inc. (2017). *CSI Analysis Reference Manual: For SAP2000, ETABS, SAFE and CSIBridge*. CSI, Berkeley, USA.

Dangel U. (2016) *Turning Point in Timber Construction: New Economy*. Birkhäuser, Basel, Switzerland.

Dym C.L., and Little, P. (2009). *Engineering Design*. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc, New York, USA.

Ertas A., and Jones J. (1996). *The Engineering Design Process*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc, New York, USA.

Kwon Y.W., and Bang H. (1997). *The Finite Element Method using MATLAB*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

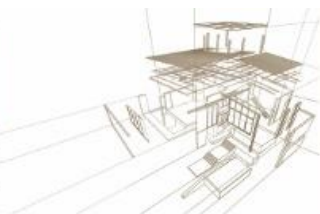
Natterer J. (2004). A way to sustainable architecture by new technologies for engineered timber structures. In: *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2004)*, Finland.

Pahl G and Beitz W. (1988). *Engineering Design: a systematic approach*. Design Council, London, UK.

Reddy J.N. (2005). *An Introduction to the Finite Element Method*. McGraw-Hill, New York, USA.

UNE-EN 1991-1-1. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento. AENOR, Madrid, Spain.

UNIT 50:84. *Acción del viento sobre construcciones* (1984). UNIT, Montevideo, Uruguay.



DESARROLLO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE FRAGMENTO- PROTOTIPO DE CICLOVÍA ELEVADA EN MADERA

DEVELOPMENT, CONSTRUCTION AND ASSEMBLY OF A PROTOTYPE FRAGMENT OF AN ELEVATED CYCLE PATH IN WOOD

Manuel Suazo U. ^{1*}, Víctor Rosales G. ², Franco Benedetti L. ³ Alan Jara C ³.

¹ Arquitecto. Depto. de Ciencias de la Construcción. FACORDI. UBB. Concepción, Chile.

² Ingeniero Civil en Ind. Forestales. Depto. de Ciencias de la Construcción. FACORDI. UBB. Concepción, Chile.

³ Ingeniero Civil. Depto. de Ingeniería Civil y Ambiental, Facultad de Ingeniería. UBB. Concepción, Chile.

* Manuel Suazo U.: msuazo@ubiobio.cl

Resumen

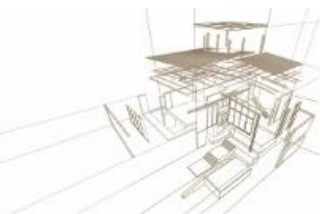
Apuntalado por las ventajas técnicas como su facilidad de manipulación, su prefabricabilidad y su bajo peso entre otras, la propuesta aborda el capítulo de la construcción en madera relacionado con las infraestructuras, proponiendo una idea replicable en diversos contextos: parques naturales, bordes costeros, nudos viales con problemas de conectividad, etc. Se trata de un fragmento-prototipo a escala real de una ciclo vía elevada en Madera, en el marco de una idea general de sistema de circulación de transporte sustentable tipo ciclos (bicicletas, patines, etc.) aplicable al campus Concepción de la Universidad del Bío-Bío en Chile. La estructura parte de piezas estructurales simples de pino insigne en escuadrías comerciales, formando pórticos en base a elementos compuestos, unidos con tornillos estructurales madera-madera, dispuestos al "tresbolillo" alternadamente. Las uniones se resuelven mediante pletinas de acero de 8 y 6 mm de espesor y pernos de acero de 10 y 12 mm de diámetro en corte simple y doble. La carpeta superior tipo diafragma, consta de placas contralaminados de 3 capas de eucaliptus nitens termo tratado de 56 mm de espesor dispuestas alternadamente. Sobre las placas se dispone de una membrana hidrorrepelente y una terminación en base a entablado de piezas cepilladas de eucaliptus nitens termo tratado. La protección de la estructura recoge el criterio "protección por diseño", tradicional en la construcción en Madera, complementándolo con el tratamiento directo de los elementos de madera, en este caso, con el uso de sales de boro en el pino insigne y termo tratamiento en el *eucalyptus nitens*.

Palabras-clave: Infraestructura en madera, prefabricación, elementos compuestos en madera

Abstract

Supported by technical advantages such as ease of handling, prefabricability and low weight among others, the proposal addresses the chapter of wood construction related to infrastructure, proposing a replicable idea in various contexts: natural parks, coastal edges, road knots with connectivity problems, etc. It is a prototype fragment on a real scale of a cycle path elevated in wood, within the general idea of a sustainable transport circulation system for cycles (bicycles, skates, etc.) applicable to the Concepción campus of the Universidad del Bío-Bío in Chile. The simple structural pieces start with insigne pine in commercial dimensions, forming framework on the basis of composite elements, joined with structural wood to wood screws, arranged to "quiver" alternately. The connection are made of 8 and 6 mm thick steel plates and steel bolts of 10 and 12 mm in diameter in single and double shear. The upper diaphragm-type folder consists of 3-layer laminated sheets of thermo-treated eucalyptus nitens, 56 mm thick, arranged alternately. On the plates there is a water repellent layer and a termination based on paneling of brushed pieces of thermo-treated eucalyptus nitens. The protection of the structure includes the criterion "protection by design", traditional in wood construction, complementing it with the direct treatment of the elements of the wood, in this case, with the use of boron salts for insigne pine and heat treatment for *eucalyptus nitens*.

Keywords: Infrastructure in wood, prefabrication, composite elements in wood



1. INTRODUCCIÓN

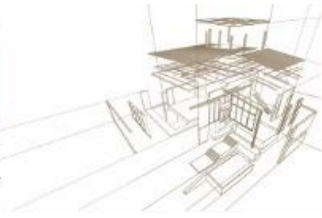
La emergencia ambiental ha promovido y estimulado el uso de estructuras en madera en áreas de la edificación que tradicionalmente eran exclusividad de materiales con alta relación costo-efectividad, pero con menores desempeños ambientales como el hormigón armado y el acero. Es así como ejemplos de infraestructuras en madera han aparecido en el mundo y a nivel local, que demuestran su aplicabilidad en contextos exigentes como la vialidad (figura 1).



Figura 1: Puentes de madera: Sneek – Holanda y Concepción – Chile

Esto se ve apuntalado por el desarrollo de mejoras en los temas más “débiles” asociados a la construcción en madera como pueden ser la marcada anisotropía mecánica o los problemas de durabilidad. El primer problema se ha enfrentado a través del desarrollo de los llamados productos de “Ingeniería de la Madera” como la madera Contralaminada entre otros. El segundo tema ha estimulado el desarrollo de técnicas de tratamiento de la madera para mejorar su durabilidad, que en condiciones desfavorables, puede ser dañada y destruida fácilmente por factores bióticos como hongos, insectos y horadores marinos, y/o por factores abióticos, como las condiciones ambientales (humedad relativa, lluvia, radiación UV, etc. (Garay, 2012). Ejemplos de estos desarrollos son el acetilado, el furfuralado o el termo tratado. A esto sumar ventajas conocidas, que hacen de la construcción en madera una opción muy competitiva, por citar alguna, el bajo peso reduce las solicitaciones sísmicas de cálculo y facilita la construcción y el montaje de componentes prefabricados más grandes, reduciendo el tiempo de montaje.

En este contexto se sitúa este proyecto, sobre la base de una idea que promueve la sostenibilidad urbana, mediante una propuesta de red de circulación interna superior dentro del campus Concepción de la Universidad del Bío Bío (Figura 2), para los llamados transportes tipo ciclos (bicicletas, patines, etc.), desarrollando el diseño de un prototipo construido a escala real, cuyo objetivos es movilizar las capacidades profesionales y técnicas de los profesionales y laboratorios de la Universidad.



A nivel de idea, esta red mayoritariamente se situaría sobre las actuales galerías cubiertas existentes en el campus (Figura 3), permitiendo un acceso directo a los segundos pisos de edificios existentes, con un mínimo impacto sobre el funcionamiento normal del espacio inferior (Figura 4). Además, como ejercicio propositivo, también se puede entender como un referente para abordar otro tipo de contextos en que la madera puede ser un material pertinente: redes de circulación dentro de parques naturales con un mínimo impacto sobre el paisaje; ciclo vías elevadas paralelas a bordes costeros concebidas como posibles barreras ralentizadoras de maremotos; o en nudos viales comprometidos urbanamente en que el peso de los componentes y su prefabricabilidad serían factores fundamentales.



Figura 2. Idea General de Circulación sobrepuesta sobre el Campus Concepción UBB y en flecha roja, la ubicación final del Fragmento-



Prototipo.

Figuras 3 y 4. Fotomontajes sobre galerías cubiertas y la propuesta base de intervención, un fondo de madera sobre una zona descubierta uniendo dos zonas cubiertas. Campus Concepción de la Universidad del Bío Bío.

El proyecto se ejecutó vía fondos del Ministerio de Educación de Chile a través de un Convenio de desempeño con la Universidad del Bío Bío, “CD – IneS Hábitat Sustentable”, que financió proyectos internos, que apuntaran a la “Explotación de

Figura 6. Fragmento de un plano de montaje de una viga secundaria.

La carpeta superior, consta de placas Contralaminadas de 3 capas de eucaliptus nitens termo tratado de 56x1000x2000 mm, dispuestas alternadamente para conformar un diafragma con algún grado de rigidez, y fijas a las vigas base mediante tornillos tipo WS de Simpson Strong Tie y selladas con una línea de silicona de junta y hojalatería en todo el perímetro de la carpeta. Sobre las placas se dispuso de una membrana hidrorrepelente grapada y sellada, y sobre ella una terminación en base a rastreles cada 1 m. y un entablado superior de piezas cepilladas de eucaliptus nitens termo tratado dispuesto diagonalmente para facilitar la evacuación del agua y mejorar la adherencia de la rueda de bicicleta.

La altura de cumbrera de la carpeta superior que separa las pendientes y las circulaciones, es la suma de la altura de las galerías existente, más la altura del conjunto viga + carpeta + entablado. Las dimensiones de la sección superior se ajustan a las prerrogativas normativas para este tipo de infraestructuras (MINVU, 2015), el perfil es de 4,4 m de ancho formado por dos bandas de 1,2 m en ambos sentidos y hacia un lado una banda de 2,0 m permite el estacionamiento de bicicletas o el paso de una circulación peatonal.

Las barandas de 1,4 m siguen el uso descrito: hacia afuera el plano inclinado de las barandas permite un ajuste más preciso de la rueda de bicicleta, y hacia adentro, las barandas se abren y sirven de soporte de una parrilla metálica que originalmente se planteó y proyectó como soporte para una celosía de protección y de captación del calor solar para autogenerar energía eléctrica (ver Figura 7).



Figura 7: Barandas del prototipo de ciclovía.

3. DISEÑO

Para el diseño de la ciclovía, se tomaron en consideración las dimensiones mínimas establecidas en el Manual de carreteras del Ministerio de obras Públicas para la ejecución de este tipo de obras (MOP, 2012). Inicialmente el diseño del prototipo era una estructura completamente en madera, y posteriormente por razones técnicas, cedió el paso a otros materiales más competentes en temas de durabilidad y estabilidad dimensional (Figura 8).

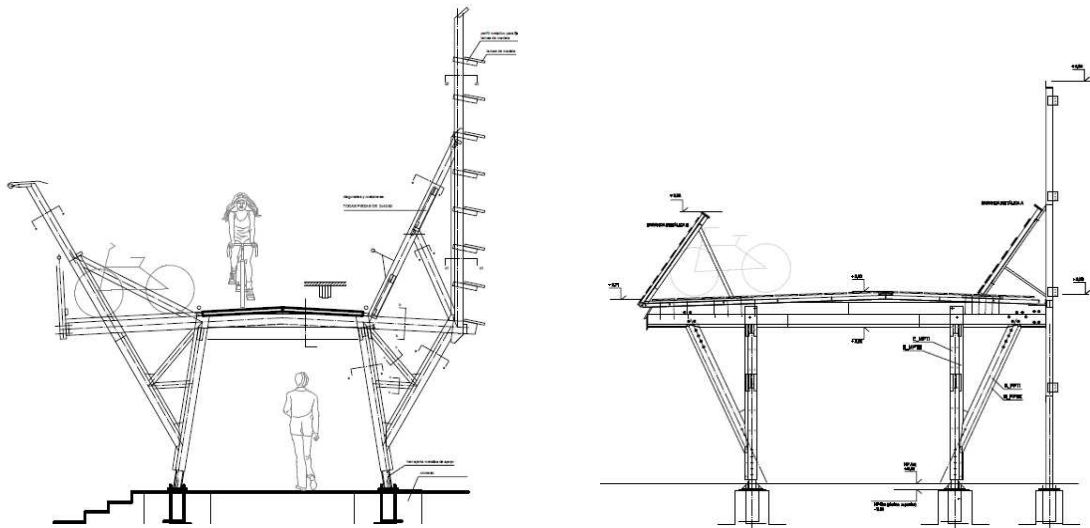


Figura 8: Versión en desarrollo y final del prototipo construido.

3.1. Protección de la madera

El tema de la durabilidad de la madera es una exigencia especialmente demandante en estructuras expuestas y con poco mantenimiento como pueden ser las infraestructuras de circulación. Existen dos estrategias que pueden complementarse y que se utilizaron en el prototipo construido: protección por diseño y tratamiento directo de la madera.

La primera es la denominada “protección por diseño” (Arriaga & Herrero, 2001), madurada en la construcción tradicional en madera, en la que en el desarrollo inicial del proyecto, con un diseño premeditado se procura proteger de los agentes abióticos degradadores de la madera (agua, lluvia, sol) a los elementos estructurales principales, así como algunos elementos secundarios se tratan como pieles de “sacrificio”, pensadas para ser reemplazadas en una lógica de mantenimiento. Consecuentemente, la estructura portante del prototipo se diseñó separada del suelo y contenida dentro de una rasante de 60° para evitar el efecto directo del sol y de la lluvia. Las vigas principales bajo la cubierta fueron protegidas en sus canes con tapacanes de madera bilaminada termo tratada y se utilizaron elementos de acero en los elementos de apoyo secundario expuestos sobre la carpeta superior. También, toda la hojalatería se dispuso en los bordes de la carpeta superior y cubriendo la parte superior de las uniones más comprometidas (Figura 9).



Figura 9. Protección por diseño

La segunda estrategia es la de mejorar la durabilidad mediante la incorporación de sustancias o el tratamiento directo de los elementos de madera. Todos los elementos de madera de pino insigne fueron tratados con una solución de Boro, protegida adicionalmente por un tratamiento superficial de un producto hidrorrepelente para protegerlo. Por otra parte, se utilizó termo tratamiento en todos los elementos de *Eucaliptus Nitens*: la carpeta superior en base a placas de madera Contralaminada, además de todos los elementos secundarios de protección como tapacanes de vigas, entablados de cubierta, rastreles y barandas.

3.2. Caracterización mecánica

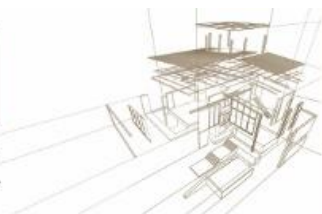
La estructuración se basa en pórticos rígidos transversales y longitudinales formados por puntales, columnas y vigas longitudinales de elementos compuestos de madera. Las secciones de los elementos quedan formadas por piezas de madera aserrada de 41 x 130 mm o 41 x 170 mm conectadas entre sí por medio de tornillos de 5 mm de diámetro, lo que permite la creación de elementos de longitudes mayores que las comerciales y en secciones con geometrías complejas.

La normativa de diseño utilizada para el cálculo estructural es la norma chilena NCh 1198:2014, tanto para la verificación de los elementos de madera como las uniones madera-madera y uniones con placas metálicas. La madera utilizada para armar las secciones de los elementos estructurales es madera de pino radiata con grado C16, teniendo los parámetros mecánicos mostrados en la tabla N° 1.

Tabla N° 1. Propiedades mecánicas de madera de Pino radiata grado C16 (INN, NCh1198. Madera – Construcciones en Madera - Cálculo, 2014)

Tensión admisible					Módulo de elasticidad en flexión	Índice de aplastamiento
Flexión	Compresión paralela	Tracción paralela	Compresión normal	Cizalle		
5.2 MPa	7.5 MPa	3.5 MPa	2.5 MPa	1.1 MPa	7900 MPa	5.65 MPa/mm

Como los elementos estructurales no son piezas macizas y su configuración de armado es atípico se ejecutan ensayos experimentales de flexión en la viga principal de los



marcos para caracterizar su comportamiento mecánico (Ver Figura 10), utilizando instalaciones del Pabellón Tecnológico de la Madera (PTM) Universidad del Bío-Bío. En la figura 11a se presenta la curva de carga vertical versus deflexión en el centro de la viga, observándose un comportamiento casi lineal en todo el rango de carga, con rigidez media para el nivel de carga de diseño (15 kN) de 4.3 kN/mm. La relación que existe entre la deflexión de la viga y la separación de las juntas en el borde traccionado se muestra en la figura 11b, de donde se tiene que la abertura de la junta en las piezas traccionadas es del orden de 0.6 mm para la deflexión al nivel de la carga de diseño, lo que asegura el comportamiento elástico de los tornillos de fijación.

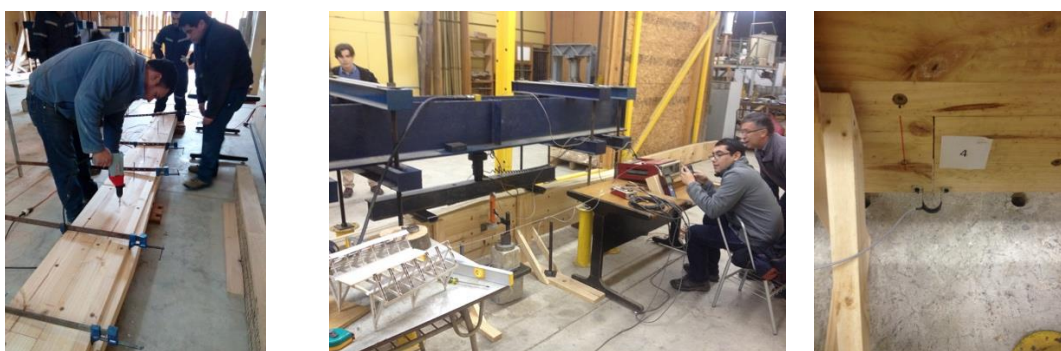
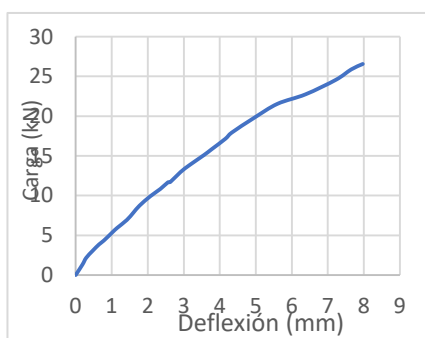
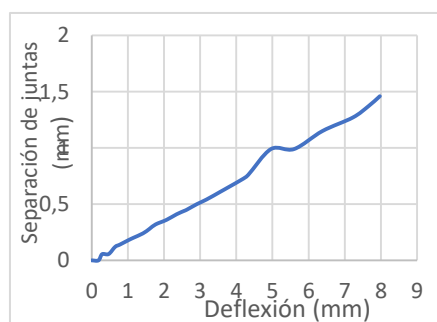


Figura 10: Viga principal – armado y ensayo de flexión.



a) Curva carga – deflexión



b) Curva deflexión – separación de juntas

Figura N° 11: Curvas de caracterización mecánica de viga compuesta

El análisis estructural se desarrolla por medio de un modelo en el software Robot Structural Analysis. Una vista esquemática del modelo 3D utilizado se presenta en la Figura 12. Las cargas y combinaciones de carga se determinan en base a la normativa chilena (INN, NCh3171:2010. Diseño estructural - Disposiciones generales y combinaciones de cargas, 2010) A pesar que el uso esperado de la ciclovía proporciona una elevada sobrecarga de diseño de 450 kg/m², la carga que controla el diseño de los elementos y uniones es el viento, ya que la estructura posee una gran área de oposición al viento. Por ser un sistema liviano, las cargas sísmicas son bajas y no son importantes en el diseño.

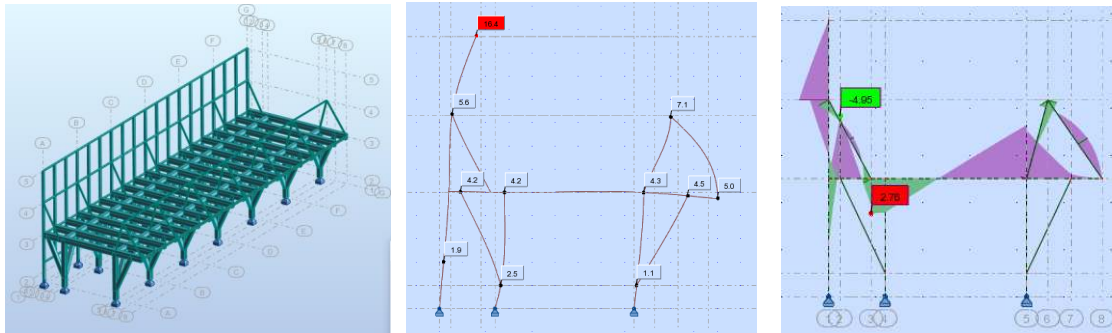
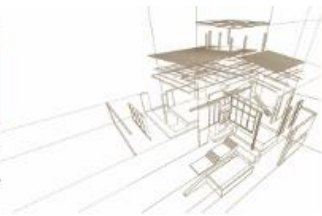


Figura 12: Vista isométrica del modelo estructural; Desplazamientos para la carga de viento (mm); Diagrama de momento para carga sísmica (kNm)

Un aspecto relevante en el diseño estructural fue el diseño de las uniones (ver Figura 13), dada la gran cantidad de elementos y piezas a conectar. Se diseñaron ocultas protegiéndolas del fuego, alojadas dentro de rebajes internos de las piezas de madera, usando pletinas de acero de 8 y 6 mm. de espesor y segmentos de hilo de acero de 10 y 12 mm. de diámetro unidos con pernos y dobles arandelas. Para el diseño se consideró corte simple y doble. Entre la carpeta y la parte superior vigas de estas zonas se insertó una pieza de hojalatería de protección.

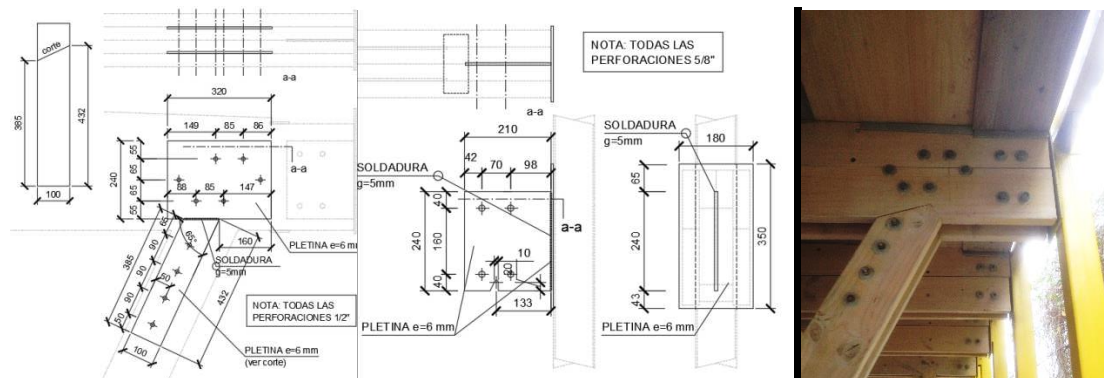


Figura 13- Configuración de uniones de viga principal: encuentro viga principal- tirante-diagonal y viga principal-parrilla metálica. Notar protección entre carpeta superior y viga.

3.3. Fabricación y montaje

El proyecto desde el comienzo se concibió desde piezas de tamaño pequeño existente en el mercado chileno, como una manera de proponer y promover una tecnología accesible a empresas de mediano o pequeño tamaño. Las piezas ya venían clasificadas y secas, lo que facilitó el trabajo y el ajuste en componentes más grandes.

La fabricación de los componentes se realizó en el Laboratorio de Diseño y Tecnología en Madera de la Universidad del Bío-Bío, con 2 carpinteros para la fabricación y montaje de los componentes en colaboración de alumnos en práctica de diversas carreras de la Universidad del Bío-Bío (Ver Figura 14).

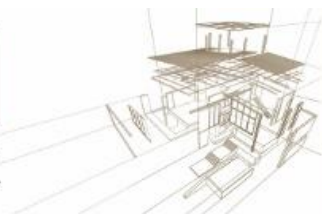


Figura 14: Fabricación y montaje de ciclovía.

Para cada componente, se desarrolló un protocolo de construcción en base a planos de montaje específicos, que buscaba simplificar la fabricación de componentes. Los componentes principales fueron fundamentalmente elementos lineales: vigas, columnas y diagonales-tirantes que se prefabricaron para ser montados en forma correlativa, luego de que el cemento podía entrar en carga, se fijaron las columnas ya armadas con las pletinas; luego las vigas longitudinales, las transversales y la carpeta. Los elementos secundarios se prefabricaron, mediante el uso de plantillas realizando control de procesos y productos, de manera de lograr materializar la obra con el mínimo desperdicio y tiempo de ejecución.

4. APRENDIZAJES Y CONCLUSIONES

La fabricación de elementos en madera, utilizando componentes con un bajo nivel de aplicación tecnológica, es posible y aplicable a la realidad productiva local; el prototipo de ciclovía elevada ha permitido lograr materializar una obra con la utilización de maderas comerciales utilizando medios de conexión mecánicos, a un costo competitivo. De modo de masificar este tipo de soluciones, también es posible la combinación inteligente de materiales, que permita bajar costos y disminuir riesgos por vandalismo, o aumentar la productividad en obra; todo ello dependerá del contexto de uso y los indicadores que se pretenda lograr.

Para el logro de obras en madera, que incluyan cortes y/o fresados de alta precisión, resulta importante tener control dimensional de las piezas que componen la estructura, no sólo a nivel de elemento, sino a nivel de piezas que se ajusten a tolerancias y alabeos que están relacionadas con los defectos de secado.

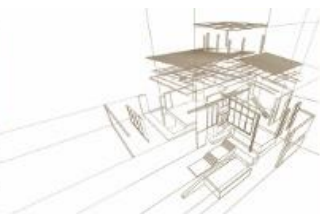
La protección por diseño, es una estrategia complementaria a los tratamientos que se utilizan en las piezas de madera. Fundamental resulta entender y visualizar el camino del agua, reforzando aquellos puntos donde las conexiones y elementos estructurales están presentes.

BIBLIOGRAFÍA

Arriaga, F., & Herrero, M. (2001). Protección de la madera mediante el diseño constructivo. 31 - 39: AITIM.



- Garay, R. (2012). Tratamiento químico de acetilación en madera de *Pinus radiata*. *Maderas, Ciencia y tecnología* 14, 103-113.
- INN. (2010). *NCh3171:2010. Diseño estructural - Disposiciones generales y combinaciones de cargas*. Santiago: Instituto Nacional de Normalización - Chile.
- INN. (2014). *NCh1198. Madera – Construcciones en Madera - Cálculo*. Santiago: INN_Instituto Nacional de Normalización- Chile.
- MINVU. (2015). Vialidad Ciclo – Inclusiva – Recomendaciones de Diseño. En *Manual Espacios Públicos Urbanos*. Santiago: Ministerio de Vivienda y Urbanismo - Chile.
- MOP. (2012). Seguridad Vial, capítulo 6.6 ciclovías. En *Manual de carreteras Volumen N° 6*. Santiago : Ministerio de Obras Públicas - Chile.



MEDICIÓN DE DUCTILIDAD EN UNIONES TIPO CLAVIJA EN MADERA CONTRALAMINADA DE EUCALIPTUS NITENS TERMO TRATADO

DUCTILITY MEASUREMENT IN PIN-LIKE JOINTS IN *EUCALIPTUS NITENS* THERMO-TREATED WOOD

Manuel Suazo U.^{1*}, Víctor Rosales G.², Franco Benedetti L.³

¹ Arquitecto. Depto. de Ciencias de la Construcción. FACORDI. UBB. Concepción, Chile.

² Ingeniero Civil en Ind. Forestales. Depto. de Ciencias de la Construcción. FACORDI. UBB. Concepción, Chile.

³ Ingeniero Civil. Depto. de Ingeniería Civil y Ambiental, Facultad de Ingeniería. UBB. Concepción, Chile.

* Manuel Suazo U.: msuazo@ubiobio.cl

Resumen

Proveer de ductilidad en zonas altamente sísmicas como en el caso de Chile, es fundamental para tener estructuras más seguras y con alta capacidad de disipación de energía. En el caso de la construcción en madera, en un contexto emergente de innovación con nuevos desafíos edilicios (rascacielos, infraestructuras, etc.), es en las uniones entre los elementos de la estructura donde se pueden disponer elementos, materiales o planear estrategias que pueden incrementar propiedades mecánicas, entre ellas la ductilidad.

En este contexto, se exponen los resultados de ensayos de Aplastamiento según las Normas ASTM D5764 norteamericana, fundamentales en las uniones comunes de tipo clavija (clavos, pernos, pasadores), de probetas hechas de placas Contralaminadas de madera termo tratada (thermowood), para medir sus propiedades mecánicas: resistencia, rigidez y ductilidad estática. Los resultados son incrementos de la ductilidad, debido a la disposición de fibras perpendiculares a la carga, creando un “efecto cuerda” que favorece una falla dúctil.

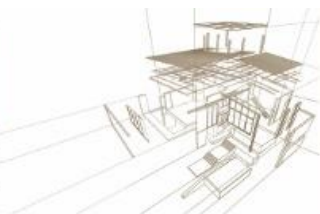
Palabras-clave: Ductilidad, Uniones, madera contralaminada

Abstract

Providing ductility in highly seismic areas, as in the case of Chile, is essential to have safer structures with high energy dissipation capacity. In the case of timber construction, in an emerging context of innovation with new building challenges (skyscrapers, infrastructure, etc.), it is in the joints between elements of the structure where elements, materials or planning strategies that can increase mechanical properties, including ductility.

In this context, the results of embedding tests, according to the American Standards ASTM D5764, fundamental in common pin-like joints (nails, bolts, dowels), of test pieces made from cross laminated timber plates of thermo-treated wood (thermo-wood), are exposed to measure their mechanical properties: strength, stiffness and static ductility. The results are increases in ductility, due to the arrangement of grain perpendicular to the load, creating a “rope effect” that favors a ductile failure.

Keywords: Ductility, Connections, cross-laminated timber



1. INTRODUCCIÓN

En estructuraciones de arquitecturas abiertas como pórticos rígidos o pórticos arriostrados, las uniones entre elementos lineales de madera pueden ser zonas fundamentales en cuanto a la provisión de capacidad resistente: resistencia, rigidez, ductilidad.

En ese sentido, en contextos sísmicos atendiendo al concepto neozelandés de “Diseño por Capacidad” (Priestley, 2011), los elementos lineales de madera en este tipo de estructuraciones, se diseñan para resistir dentro de su rango elástico evitando así las posibles fallas frágiles asociadas a elementos traccionados o flexionados y es, en las uniones entre elementos de madera donde se concentra la provisión de ductilidad que permite disipar energía sísmica, sin dañar la integridad global de la estructura (Brühl, Schänzlin, & Kuhlmann, 2014).

Un tipo de unión común en la construcción en madera es la que utiliza elementos de acero tipo “clavija”, clavos, pernos, pasadores (Arriaga, Iñiguez, Herrero, Argüelles, & Fernández, 2011) que aprovechando la posibilidad de aplastamiento dúctil de la madera, y controlando la posibilidad del desgarro frágil al producirse tracciones perpendiculares a la fibra, permite diseñar uniones capaces de incursionar en rango plástico, es decir, con un adecuado nivel de ductilidad (figura 1). A esto se suma la ventaja constructiva de que en muchos casos, las uniones son zonas visibles de la estructura y, por tanto, examinables en forma simple y fáciles de reparar, más aún en estructuras de madera, más livianas y manipulables.

En el contexto de los nuevos desafíos de la construcción en madera: edificios de mediana y de gran altura, equipamientos mayores, infraestructuras, etc, y observando la aparición de nuevos materiales en base a madera que mejoran sus prestaciones mecánicas y físicas, es fundamental caracterizar estos nuevos productos para sustentar su aplicación, cuestión que sustenta este documento.

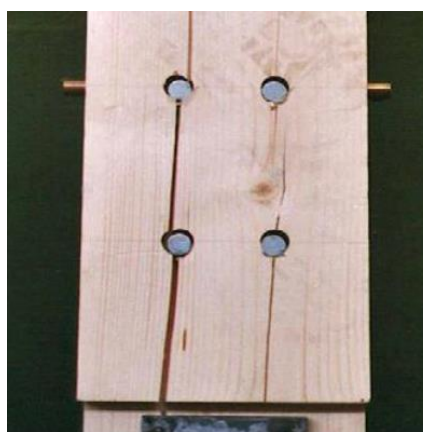
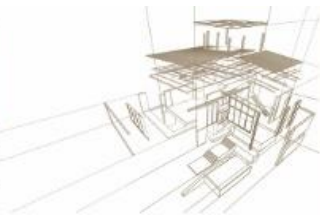


Figura 1: Uniones tipo clavija: falla dúctil con clavos (Viaje de Estudios MCM_UBB, septiembre 2009, Universidad de Biberach, Alemania) y falla frágil con pasadores (Blass & Schadle, 2011)



1.1. Importancia de la Ductilidad

La ductilidad (Figura 2) es la capacidad de un material, un elemento o de un sistema estructural global de deformar plásticamente sin romperse (Benavent-Climent, 2010), y proveerla a una estructura, no solo es favorable para un adecuado desempeño frente a sollicitaciones sísmicas, sino que otras razones para promover el diseño de estructuras dúctiles, pueden ser la de proveer estructuras seguras bajo cargas excepcionales o fallas repentinas locales, o para permitir el análisis plástico de redistribución de tensiones en estructuras hiperestáticas (Jorissen & Fragiaco, 2011).

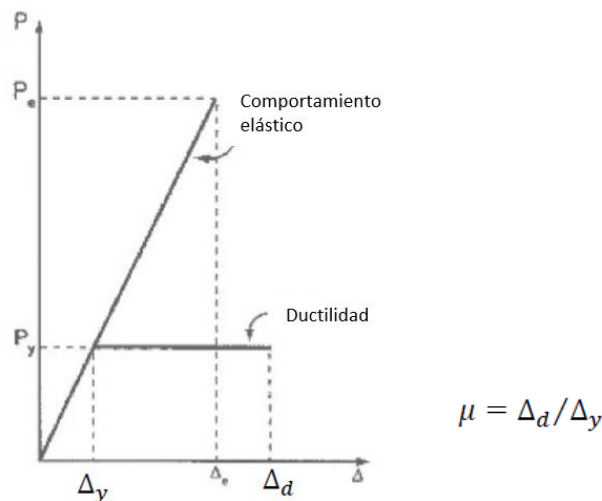


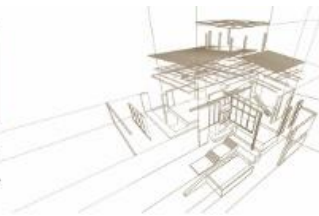
Figura 2: Comportamiento elástico no-dúctil (frágil) y definición de comportamiento dúctil μ (Buchanan, 2007)

La razón de proveer ductilidad en estructuras en zonas sísmicas, es que permite disipar energía bajo sollicitaciones sísmicas. Una importante disipación de energía, reduce el efecto del terremoto en una estructura, y en definitiva, conduce a un mejor comportamiento general: cuanto mayor es la ductilidad, más baja es la acción sísmica que tiene que ser considerada en el diseño (Jorissen & Fragiaco, 2011)

1.2. Uniones en madera y Ductilidad

En los últimos años se puede observar un abundante número de investigaciones que apuntan a proveer de mejoras e incrementos en las propiedades mecánicas en los medios de unión de madera. En general se trata de soluciones que apuntan a mejorar soluciones existentes, introduciendo elementos de reforzamiento, manipulando parámetros o disposiciones sensibles de uniones conocidas, o proponiendo uniones innovadoras en que convergen estratégicamente diversos desarrollos tecnológicos.

No necesariamente estos incrementos se dan en forma paralela: en algunas uniones aumenta la rigidez, en otras la resistencia y en otras es mayor la ductilidad. Desde el punto de vista del diseño estructural de las uniones, esto puede ser un dato importante, pues se abren distintas opciones de solución en una misma estructura: por ejemplo, en un diseño por capacidad, podremos distribuir mayor resistencia y/o rigidez en algunos puntos estratégicos de la estructura, y proveer de ductilidad en otros.



Centrándonos en la provisión de ductilidad, podemos citar por ejemplo, en uniones carpinteras tradicionales a compresión, (Branco, Piazza, & Cruz, 2011) caracterizan mecánicamente las distintas variaciones de las uniones embarbilladas; o en las uniones mecánicas con pernos, (Echavarría, Correa, & Echeverri, 2009) estudian el refuerzo con placas dentadas y su incidencia en la provisión de ductilidad; o se pueden citar algunas soluciones innovadoras como por ejemplo, la colocación de tornillos de rosca larga perpendiculares a la fibra y contiguos a los elementos tipo clavija presente en (Blass & Schadle, 2011), o el estudio de refuerzos con productos en base a Ingeniería de la madera, como placas de madera contrachapada en (Lederer, Bader, Unger, & Eberhardsteiner, 2016), o con placas de madera contralaminada (CLT) (Blass & Schadle, 2011); por último, mencionar investigaciones más innovadoras de (Leijten, 1998), que sustituyen pasadores, por tubos de acero hueco de mayor diámetro y placas de madera densificada.

2. METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE DUCTILIDAD EN MADERA CONTRALAMINADA DE EUCALIPTUS NITENS TERMO TRATADO

En este contexto, se presentan los resultados experimentales para caracterizar mecánicamente muestras de madera Contralaminada de *Eucaliptus Nitens* termo tratado frente al ensayo de Aplastamiento de la Norma ASTM D5764-97^a. En este caso se observó el aplastamiento por compresión de una unión con una clavija tipo pasador de 20 mm de diámetro sobre probetas de madera Contralaminada (CLT) cargadas axialmente, en distintos formatos y configuraciones para observar específicamente la influencia de las fibras perpendiculares en el control de la falla por tracción perpendicular.

2.1. Materiales

El *Eucaliptus Nitens*, es una especie latifoleada importada en Chile desde Australia en los años 70s, de rápido crecimiento, actualmente con un gran volumen de producción, utilizado fundamentalmente como provisión de pulpa de celulosa para la fabricación de papel. Aunque tiene altas propiedades mecánicas, alta densidad y resistencia, el principal inconveniente para su aprovechamiento como componente constructivo o estructural, tiene que ver con la propensión a la aparición de grietas superficiales e internas especialmente en el plano tangencial, producto de las tensiones internas por su rápido crecimiento y por la dificultad de secado (Rozas, Sánchez, & Pinedo, 2005). En este sentido, el Contralaminado, como producto de Ingeniería de la madera que refuerza las fibras perpendicularmente, y donde el impacto de la presencia de grietas en el aprovechamiento se puede reducir disponiendo el material más susceptible en las capas intermedias y alejado de zonas comprometidas tensionalmente, es una alternativa atendible de desarrollo.

Por otro lado, el termo tratamiento es un tipo de modificación de la madera que mejora algunas de sus propiedades y puede reducir otras. Consiste en someter a la madera a tres fases de alta temperatura controlada en un medio con presencia de vapor: la primera fase es de secado a alta temperatura, la segunda de tratamiento térmico, y la tercera de refrigeración y acondicionamiento de la humedad. El resultado es una reducción en la