



Programa de MÉTODOS COMPUTACIONALES APLICADOS AL CÁLCULO ESTRUCTURAL

1. NOMBRE DE LA UNIDAD CURRICULAR

Métodos Computacionales Aplicados al Cálculo Estructural

2. CRÉDITOS

10 créditos

3. OBJETIVOS DE LA UNIDAD CURRICULAR

Objetivos de enseñanza:

- Dotar a cada estudiante de las habilidades necesarias para aplicar el método de los elementos finitos (MEF) en el análisis y diseño estructural.
- Fomentar la capacidad de análisis crítico y la resolución de problemas complejos en el ámbito del diseño y cálculo de estructuras, mediante la integración de los conceptos teóricos del MEF con la práctica computacional y el razonamiento ingenieril.

Objetivos de aprendizaje:

- Familiarizarse con los principios fundamentales del MEF y su aplicación en el análisis estructural.
- Identificar y seleccionar el tipo de elemento finito más adecuado para la modelización de estructuras específicas, considerando sus propiedades y comportamiento mecánico.
- Alcanzar destreza en el manejo de software especializado en análisis estructural basado en el MEF, comprendiendo su funcionalidad, aplicación práctica y limitaciones en la resolución de problemas.
- Desarrollar habilidades para interpretar resultados obtenidos mediante software que utiliza el MEF, lo que implica validar soluciones y realizar un análisis crítico de los resultados.
- Implementar códigos de programación propios para resolver problemas simples de análisis estructural, utilizando un lenguaje de programación adecuado para tal fin.
- Aplicar los conocimientos teóricos y prácticos adquiridos en la resolución de problemas de ingeniería civil, tales como el análisis de barras, pórticos y losas, mediante el MEF.



4. METODOLOGÍA DE ENSEÑANZA

El curso incluye clases teóricas y prácticas en una combinación equilibrada para brindar a cada estudiante una comprensión profunda y práctica del MEF aplicado a problemas de ingeniería civil estructural. El curso se desarrolla a lo largo de un semestre, con 3.5 horas semanales de clases teóricas y 2 horas de clases prácticas de laboratorio utilizando computadora. Durante todo el semestre las/los estudiantes realizan un trabajo grupal que se desarrolla principalmente fuera del aula. Además del trabajo grupal cada estudiante tiene otras tres instancias de evaluación individual mediante dos parciales teórico-prácticos y un parcial computacional.

Clases teóricas:

En las clases teóricas se presentan los conceptos teóricos relevantes, los cuales son comunicados con anticipación, permitiendo a los estudiantes prepararse adecuadamente. Se abordan los principios esenciales del MEF, con un enfoque especial en las estrategias de programación del método. Posteriormente, se plantean problemas prácticos para aplicar los conceptos teóricos aprendidos, promoviendo así la participación activa de los estudiantes. Finalmente, se lleva a cabo un análisis de los resultados obtenidos en estos problemas, identificando errores comunes y consolidando los conocimientos presentados.

Clases prácticas:

En las clases prácticas se realiza una breve revisión de los conceptos abordados en las clases teóricas. Se introduce la temática y se explica cómo aplicarla utilizando el software especializado en análisis estructural basado en el MEF que se utiliza en el curso. Utilizando este software, se resuelven ejercicios prácticos del material de práctico y se comparan los resultados con las soluciones manuales presentadas en las clases teóricas. Esto les permite a las/los estudiantes adquirir habilidades prácticas en el uso del software y entender cómo aplicar los conceptos teóricos en situaciones reales. Finalmente, se pasa a una modalidad de clases de consulta donde se pueden plantear dudas sobre la resolución de otros problemas del listado de ejercicios proporcionados.

Trabajo grupal:

El trabajo grupal es fundamental para la integración de los contenidos del curso, donde cada grupo desarrolla un programa propio para resolver un problema específico de cálculo estructural. Para esta tarea, también se utiliza el software presentado en las clases prácticas, lo que permite integrar y aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo del curso en un contexto práctico y colaborativo. Cada grupo debe elaborar un informe detallando los procedimientos empleados para resolver los problemas asignados por el equipo docente, así como también agregar los resultados obtenidos.

	Horas Teórico	Horas Práctico	Horas Consulta	Horas Trabajo Grupal	Horas Evaluación	TOTAL
Presencial/Sincrónico	38.5	22.0	-	5	6	71.5
No Presencial/Asincrónico	17.0	19.5	-	30	12	78.5
TOTAL	55.5	41.5	-	35	18	150



5. TEMARIO

- 1. Modelado estructural y métodos numéricos:** Se aborda la definición de estructura real, el esquema básico de cálculo estructural y el modelo numérico estructural. Se introduce a los métodos numéricos para ingeniería estructural, incluyendo conceptos matemáticos fundamentales, métodos de integración numérica, técnicas para resolver sistemas lineales y no lineales, métodos de interpolación numérica, y el método de los elementos finitos en la elasticidad lineal.
- 2. Elemento de barra:** Se realiza una introducción al elemento finito de barra de dos nodos en 3D, incluyendo la definición de coordenadas locales y globales, así como el ensamblaje de la matriz de rigidez global de la estructura y el cálculo del vector de fuerzas equivalentes. Se presentan ejemplos básicos de programación para este fin. Además, se aborda el elemento finito de barra isoparamétrico y de tres nodos, con la presentación de ejemplos y ejercicios asociados.
- 3. Elemento bidimensional (estado plano):** Se aborda la teoría de elasticidad bidimensional junto con la introducción al elemento finito bidimensional. Se incluyen el elemento triangular de tres nodos y el elemento rectangular de cuatro nodos, junto con el cálculo del vector de fuerzas equivalentes. Se presentan ejemplos básicos de programación relacionados con este tema. Además, se introduce a los elementos bidimensionales isoparamétricos y de alto orden.
- 4. Elemento de viga y pórtico:** Se estudia la Teoría de Euler-Bernoulli junto con la introducción al elemento de viga de dos nodos en 2D y 3D. Se presenta también la Teoría de Timoshenko y el correspondiente elemento de viga de dos nodos en 2D y 3D. Además, se aborda el elemento de pórtico, con la definición de coordenadas locales y globales, el cálculo del vector de fuerzas equivalentes y ejemplos básicos de programación relacionados. Se incluye también el análisis de elementos de alto orden y de vigas sobre fundación elástica.
- 5. Elemento de losa y cáscara:** Se abordan las teorías de Kirchhoff y Reissner-Mindlin junto con la introducción de sus respectivos elementos rectangulares de losa de cuatro nodos. Presentación del elemento Kirchhoff-Mindlin. Se incluye el cálculo del vector de fuerzas equivalentes y el análisis de las condiciones de contorno en desplazamientos. Se presentan ejemplos básicos de programación relacionados con estos conceptos. Además, se exploran los elementos triangulares y de alto orden, junto con la presentación del elemento de cáscara.
- 6. Problemas de valores propios: vibraciones y pandeo:** Introducción al problema de dinámica de sólidos y vibraciones libres en estructuras, obteniendo las frecuencias naturales y destacando su importancia en el análisis. Se presenta también el problema de pandeo y su resolución a través del MEF, obteniendo cargas críticas de pandeo para distintas configuraciones estructurales.



Distribución horaria por tema:

TEMAS	HORAS DE CLASE PRESENCIAL	HORAS NO PRESENCIALES	TOTAL HORAS DEDICADAS POR LA/EL ESTUDIANTE
1. Modelado estructural y métodos numéricos	7.0	4.0	11
2. Elemento de barra	5.5	3.5	9
3. Elemento bidimensional (estado plano)	9.5	4.5	14
4. Elemento de viga y pórtico	11.0	7.0	18
5. Elemento de losa y cáscara	16.5	10.5	27
6. Prob. de val. propios: vibraciones y pandeo	11.0	7.0	18
Prueba teórico práctica	4.0	8.0	12
Prueba computacional	2.0	4.0	6
Trabajo grupal	5.0	30.0	35
TOTALES	71.5	78.5	150

6. BIBLIOGRAFÍA

Tema	Básica	Complementaria
1. Modelado estructural y métodos numéricos	1, 4	6, 7, 8, 9
2. Elemento de barra	1, 2	8, 10
3. Elemento bidimensional (estado plano)	1, 2, 4	8, 10
4. Elemento de viga y pórtico	1, 3	8, 11
5. Elemento de losa y cáscara	1, 3, 5	8, 12
6. Problemas de valores propios: vibraciones y pandeo	1, 5	11

6.1 Básica

1. P. Castrillo (2024). *Apuntes del curso de Métodos Computacionales Aplicados al Cálculo Estructural*. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. Disponible en el eva del curso.
2. E. Oñate (2013). *Structural Analysis with the Finite Element Method. Linear Statics. Volume 1: Basis and Solids*. Lecture Notes on Numerical Methods in Engineering and Sciences. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Barcelona; Springer-Verlag, Berlin, 2009. ISBN 978-1-4020-8732-5.
3. E. Oñate (2013). *Structural Analysis with the Finite Element Method. Linear Statics. Volume 2: Beams, Plates and Shells*. Lecture Notes on Numerical Methods in Engineering and Sciences. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Barcelona; Springer-Verlag, Berlin, 2009. ISBN 978-1-4020-8742-4.
4. O. C. Zienkiewicz y R. L. Taylor (2000). *The finite element method. Volume 1: The basis*. Butterworth-Heinemann, 5ta edición. ISBN 0-7506-5049-4.
5. O. C. Zienkiewicz y R. L. Taylor (2000). *The finite element method. Volume 2: Solid Mechanics*. Butterworth-Heinemann, 5ta edición. ISBN 0-7506-5055-9.



6.2 Complementaria

6. A. Quarteroni, R. Sacco, y F. Saleri (2007). *Numerical Mathematics*. Texts in Applied Mathematics. Springer-Verlag, Berlin, 2da edición. ISBN 3-540-34658-9.
7. A. Quarteroni, F. Saleri y P. Gervasio (2014). *Scientific Computing with MATLAB and Octave*. Texts in Computational Science and Engineering. Springer-Verlag, Berlin, 3ra edición. ISBN 978-3-642-12429-7.
8. S. S. Rao (2011). *The finite element method in engineering*. Elsevier. ISBN 978-1-85617-661-3.
9. S. R. Wu y L. Gu (2012). *Introduction to the Explicit Finite Element Method for Nonlinear Transient Dynamics*. John Wiley & Sons. ISBN:978-470-57237-5.
10. A. Canelas (2024). *Apuntes del curso de Elasticidad*. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. Disponible en el eua del curso.
11. W. D. Pilkey (2002). *Analysis and design of elastic Beams*. Computational Methods. John Wiley & Sons. ISBN: 0-471-38152-7.
12. S. Timoshenko (2001). *Strength of Materials, Part 1: Elementary Theory and Problems*. CBS Publishers & Distributors. ISBN: 8123910304.

7. CONOCIMIENTOS PREVIOS EXIGIDOS Y RECOMENDADOS

7.1 Conocimientos Previos Exigidos: Los conocimientos indispensables para seguir la unidad curricular: cálculo diferencial e integral en varias variables, cálculo vectorial, álgebra lineal, mecánica newtoniana, programación básica funcional, teoría de elasticidad lineal y resistencia de materiales: elementos estructurales de vigas y pilares.

7.2 Conocimientos Previos Recomendados: Los conocimientos complementarios que pueden ayudar a un mejor aprovechamiento del curso: resistencia de materiales: elemento estructural de losa.



ANEXO A

Para todas las Carreras

Esta primera parte del anexo incluye aspectos complementarios que son generales de la unidad curricular.

A1) INSTITUTO

Instituto o unidad: Instituto de Estructuras y Transporte (IET).

Departamento o área: Departamento de Estructuras.

A2) CRONOGRAMA TENTATIVO

Cronograma de avance semanal con detalle de horas de clase asignadas a cada tema.

Semana 1	Tema 1 (5.5 hs de clase).
Semana 2	Tema 1 (1.5 hs de clase). Tema 2 (4.0 hs de clase).
Semana 3	Tema 2 (1.5 hs de clase). Tema 3 (4.0 hs de clase).
Semana 4	Tema 3 (5.5 hs de clase).
Semana 5	Tema 4 (5.5 hs de clase).
Semana 6	Tema 4 (5.5 hs de clase).
Semana 7	Tema 5 (5.5 hs de clase).
Semana 8	Tema 5 (5.5 hs de clase).
Semana 9	Tema 5 (5.5 hs de clase).
Semana 10	Tema 6 (5.5 hs de clase).
Semana 11	Tema 6 (5.5 hs de clase).
Semana 12	
Semana 13	
Semana 14	
Semana 15	

A3) MODALIDAD DEL CURSO Y PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN

La evaluación de los aprendizajes consta de:

- Dos parciales teórico-prácticos: Se requiere que cada estudiante presente temas teóricos y resuelva ejercicios prácticos, que pueden incluir preguntas de opción múltiple y verdadero-falso. El primer parcial teórico-práctico (PPTP), se lleva a cabo durante el período designado para los primeros parciales del semestre e incluye los temas del 1 al 4 del temario. Por otro lado, el segundo parcial teórico-práctico (SPTP) se programa en un período especial entre el primer y segundo período destinado a los parciales del semestre, aproximadamente en la semana 13, y abarca los temas 5 y 6 del temario. Estos parciales contribuyen al puntaje total de los parciales teórico-prácticos (PTP) según la fórmula:

$$PTP = 0.5 PPTP + 0.5 SPTP.$$



- Un parcial computacional (PComp): En esta prueba se espera que cada estudiante resuelva un problema utilizando el software especializado en análisis estructural basado en el MEF que se ha utilizado en el curso. Esta prueba se lleva a cabo durante el período designado para los segundos parciales del semestre e incluye todos los temas del temario.
- La entrega de un informe sobre un trabajo grupal (Lab).

Todas las evaluaciones anteriores tienen un puntaje mínimo de 0 y máximo de 100.

El puntaje del curso (PC) se obtiene según la fórmula:

$$PC = 0.5 PTP + 0.35 PComp + 0.15 Lab.$$

- a) Para la **ganancia del curso** se debe obtener como mínimo:
 - PTP = 25.
 - PComp = 60.
 - Lab = 60.
- b) Para la **aprobación de la UC** se debe obtener como mínimo:
 - PTP = 60 o PC = 75.
 - PComp = 60.
 - Lab = 60.

Si la/el estudiante no cumple con la condición a), reprueba el curso y debe volver a inscribirse en la UC.

Si la/el estudiante cumple con la condición a) pero no con la condición b), debe realizar un examen. Este examen sigue el mismo formato que los parciales teórico-prácticos e incluye todos los temas del curso. Para superar el examen, se requiere alcanzar una puntuación de al menos 60. El examen tiene una escala de calificación que va desde 0 hasta 100 puntos.

Si se cumple la condición b), la/el estudiante queda exonerada/o de la UC y no necesita realizar el examen para aprobarla.

A4) CALIDAD DE LIBRE

Sin calidad de libre.

A5) CUPOS DE LA UNIDAD CURRICULAR

Cupos mínimos: sin cupos.

Cupos máximos: sin cupos.

APROBADO POR RES. CONSEJO FAC. ING FECHA 18/05/2024 EXP 061130-000019-24