

INFORME ACADÉMICO

Id 268:

EVALUACIÓN Y CONTROL DE ESTRUCTURAS DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO NACIONAL EN MAMPOSTERÍA CERÁMICA APLICANDO TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS

Autores: Morquio, Atilio; Aulet, Alina; Cetrangolo, Gonzalo; Domenech, Leandro; Moltini, Gonzalo; Sabalsagaray, Stela; Romay, Carola; Mussio, Gianella; Dalchiele, Enrique.

La CSIC publica en su página web:

- a) El resumen técnico del proyecto (hasta 250 palabras)
- b) Un resumen cuyo contenido sea accesible por un público amplio (hasta 250 palabras)
- c) Una imagen (en formato jpg) representativa del proyecto
- d) El presente informe académico

Resumen técnico

El patrimonio arquitectónico nacional está fuertemente vinculado con la mampostería cerámica utilizada para dar solución a las estructuras resistentes de los edificios. Su desempeño depende de la naturaleza y forma de trabajo conjunta entre mampuestos y morteros (ladrillos macizos artesanales y morteros de arena y cal).

El interés por su conservación, consecuente con la declaratoria de algunos inmuebles como Monumento Histórico o Bien de Interés Municipal, plantea el desafío de conocer en profundidad las características de estos materiales y su estado de conservación en edificios que llegan a superar 140 años en servicio.

La escasa información técnica disponible al respecto y la ausencia de una metodología de evaluación, preferentemente no destructiva, resultan en este sentido importantes dificultades para los técnicos responsables de obras de restauración, ampliación y reforma en estos edificios.

Este proyecto tiene como cometido avanzar en la definición de esta metodología, analizando diferentes técnicas no destructivas, en general desarrolladas para otros usos, evaluando tres aspectos fundamentales: su correlación con técnicas convencionales destructivas, su aplicabilidad in situ y su eventual complementariedad.

Los resultados han mostrado que algunas de ellas resultan más aptas que otras para el estudio de idénticas propiedades, que es posible establecer combinaciones de técnicas complementarias para estudiar integralmente la estructura, de modo que algunas técnicas aplican para un diagnóstico cualitativo y otras para determinaciones cuantitativas. Los procedimientos desarrollados a partir de la adaptación de las técnicas a los materiales estudiados evitan afectaciones visibles y minimizan la necesidad de extraer muestras.

Resumen dirigido a un público amplio

El patrimonio arquitectónico nacional está fuertemente vinculado con la mampostería cerámica por ser esta la tecnología constructiva de mayor aplicación durante los siglos XVIII y XIX. La solución estructural más habitual de este patrimonio, que supera en muchos casos los 150 años de edad, está basada en el trabajo conjunto de mampuestos y morteros.

El hecho de que, por sus valores culturales, muchos de estos edificios hayan sido declarados Monumento Histórico Nacional o Bien de Interés Municipal, revela el interés actual por su mantenimiento y restauración.

En este escenario resulta necesario disponer de herramientas para efectuar un correcto diagnóstico de su estado, que permita adoptar medidas correctivas o previsiones en el caso de ampliaciones o reformas. La mayor dificultad a la que se enfrentan los técnicos responsables de estas operaciones surge de la escasez de información técnica acerca de los materiales nacionales y componentes estructurales y de la ausencia de una metodología de evaluación, preferentemente no destructiva.

El presente proyecto tiene como cometido avanzar en la definición de esta metodología, analizando las técnicas no destructivas aplicables de acuerdo a la naturaleza de los materiales y las condiciones habituales en que se pueden ejecutar ensayos de mínimo impacto in situ y en laboratorio. Los resultados obtenidos han mostrado que puede establecerse un grupo de técnicas complementarias capaces en una primera fase de evaluar estas estructuras cualitativamente y posteriormente realizar determinaciones cuantitativas de su desempeño, sin implicar perjuicios a las características materiales de los edificios.



1) Transcriba los objetivos y/o metas planteadas en el proyecto:

1.1. Objetivo general:

Desarrollar una metodología basada en técnicas no destructivas aplicables a la evaluación y control de los sistemas murarios estructurales en mampostería cerámica del patrimonio arquitectónico nacional.

1.2. Objetivos particulares:

- Establecer las prestaciones y alcances de las diferentes técnicas no destructivas aplicables a la determinación de las propiedades relevantes de los sistemas murarios estructurales en mampostería cerámica.
- Analizar y correlacionar comparativamente los resultados obtenidos de la aplicación de las técnicas no destructivas y destructivas, empleadas para la determinación de las propiedades que caracterizan a los sistemas murarios estructurales más habituales de nuestro patrimonio.
- Establecer recomendaciones para la evaluación y control de los sistemas murarios estructurales en mampostería cerámica del patrimonio arquitectónico nacional.

2) Indique si se desarrollaron todas las fases previstas en el proyecto. En caso de no realización de actividades o modificación del cronograma, justifique y evalúe en qué medida se afectó la ejecución global del proyecto.

Se desarrollaron todas las fases previstas en el Proyecto.

3) Realice un informe de todas las actividades desarrolladas, explicitando en caso de corresponder la metodología y técnicas utilizadas.

En este punto se detallan las actividades desarrolladas en el marco del Proyecto, ordenadas según cómo fueron presentadas.

3.1. Actividad 1: Análisis bibliográfico y experimental de las prestaciones de las diferentes técnicas aplicables a los sistemas murarios estructurales habituales y sus lesiones frecuentes.

Esta actividad ha incluido el desarrollo de sub-actividades tendientes a definir el estado del arte en relación a los aspectos siguientes.

3.1.1. Configuración constructiva habitual de los sistemas murarios en mampostería cerámica de nuestro patrimonio y sus lesiones frecuentes.

Para alcanzar la síntesis propuesta se han realizado tareas de investigación documental y relevamiento de obras en pie. En el primero de los casos se ha consultado bibliografía relativa a la historiografía de la arquitectura nacional así como y especialmente, el Archivo de la Ciudad, con sede en el edificio del Cabildo, donde se conservan los expedientes de solicitud de permiso de construcción, ingresados entre 1882 y 1900, en los cuales se incluyen gráficos y memorias constructivas que detallan materiales y sistemas constructivos.

En el segundo de los casos se han tomado datos de relevamientos ejecutados en el marco de trabajos previos de investigación y formación de los investigadores, así como se han llevado a cabo visitas a los edificios patrimoniales tomados como referentes del presente trabajo: Capilla de Calera de las Huérfanas, Edificio Asilo Larrañaga y Aduana de Oribe.

3.1.2. Alcance de las técnicas y ensayos aplicables al objeto de estudio, identificando su potencial y limitaciones, así como su complementariedad con otras en función de los resultados cuantitativos o cualitativos esperables de las mismas

El estudio de las técnicas aplicables al análisis de estructuras en mampostería cerámica de carácter patrimonial ha tomado en cuenta los avances alcanzados por diferentes instituciones dedicadas a su investigación, desarrollo y normalización. En el ámbito de la investigación y desarrollo cabe señalar la actividad de RILEM (Unión internacional de laboratorios y expertos en materiales de construcción, sistemas y estructuras) a través de los Comités Técnicos TC 216-SAM (Strategies for the assessment of historic masonry structures with NDT), en actividad desde 2005 bajo responsabilidad de Prof. Luigia BINDA; y TC 239-MCM (On-site measurement of concrete and masonry structures by visualized NDT), operativo desde 2010 bajo supervisión de Prof. Masayasu OHTSU.

En relación a normalización destacan las normativa europea relativa al diagnóstico de edificios históricos y el Comité europeo de normalización CEN/TC 346 Conservación del patrimonio cultural, a través de sus diferentes grupos de trabajo, (CEN/TC WG1: General methodologies and terminology, CEN/TC WG2: Characterization and analysis of porous inorganic materials constituting cultural heritage y CEN/TC WG3: Evaluation of methods and products for conservation works on porous inorganic materials constituting cultural heritage), junto al aporte de la Organización Internacional de Normalización (ISO) a través de su comité técnico TC 179 Masonry y las recientemente aprobadas normas europeas sobre Diagnóstico de edificios históricos que incluyen a las obras denominadas de fábrica. Complementariamente se ha tomado como referencia el trabajo de una serie de investigadores cuyos aportes se detallan en el apartado siguiente.

3.2. Actividad 2: Determinación experimental en laboratorio

Esta actividad de determinación experimental en laboratorio ha abordado todas las etapas previstas en el proyecto incluyendo el estudio de mampuestos, morteros y unidades de mampostería, tanto en laboratorio como en edificio en pie, en particular en los edificios Asilo Larrañaga y Aduana de Oribe, de acuerdo a lo que se describe en el ítem siguiente del informe. Para la concreción de esta etapa han sido adquiridos los equipos previstos en el proyecto y ajustados los procedimientos experimentales a la aplicación concreta.

3.2.1. Materiales

Los materiales utilizados fueron seleccionados entre los que actualmente se emplean en la industria de la construcción con la condición de asemejarse a los materiales empleados en edificios históricos nacionales, de acuerdo a los objetivos planteados en el presente proyecto.

3.2.1.1. Ladrillos

De acuerdo al criterio antes indicado fueron empleados ladrillos cerámicos macizos, de fabricación artesanal, moldeados a mano y cocidos en hornos de campo, de dos clases: “colorado” (LAC) y “plateado” (LAP), según la designación habitualmente empleada para su comercialización. Estos fueron estudiados comparativamente en relación a ladrillos extraídos de edificios históricos con carácter de Monumento Histórico Nacional (procedentes del edificio Asilo Larrañaga, Hospital Maciel, Calera de las Huérfanas y Atarazana de Montevideo). La apariencia de estos mampuestos puede observarse en la Figura 3.1.

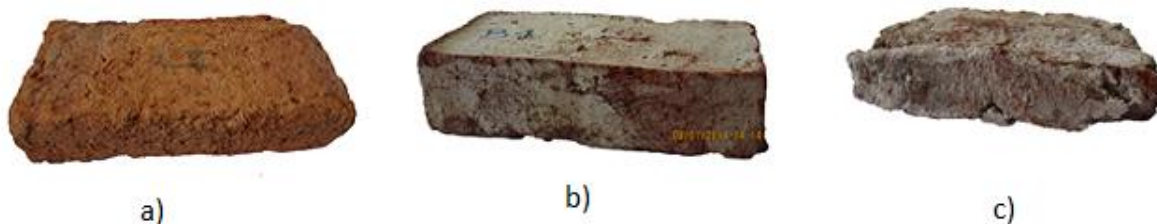


Figura 3.1. Mampuestos empleados: a) LAC, b) LAP, c) Ladrillos históricos

3.2.1.2. Cal

Asimismo se empleó cal aérea, parcialmente hidratada, comercializada en plaza con la marca CNC (Compañía nacional de cemento). De acuerdo a lo informado por el fabricante esta cal se presenta parcialmente hidratada en porcentajes variables de 10 % a 15 %.

3.2.1.3. Arena

La arena empleada tiene origen granítico y es comercializada como “terciada” (mezcla de arena fina y arena gruesa). La misma fue empleada para la elaboración de morteros de toma de similares características a los que figuran referenciados en memorias constructivas antiguas y a las que resultan del análisis de muestras de morteros extraídos de estructuras antiguas en mampostería cerámica del patrimonio nacional.

3.2.1.4. Cemento

Se empleó Cemento Portland (CP 40) procedente de la planta de cementos de ANCAP ubicada en el departamento de Minas para la elaboración de los morteros que fue aplicado en los encabezados y bases de ladrillos, probetas y muretes.

3.2.1.5. Producto hidrorrepelente

A los efectos de evaluar la efectividad de los productos hidrorrepelentes comercializados habitualmente como tratamiento de protección de muros de ladrillo visto, fue aplicado un hidrorrepelente basado en resina de silicona incolora, vehiculizada en agua, de densidad 1,015 kg/l, aplicada a pinceleta en dos capas sucesivas.

3.2.2. Diseño de la actividad experimental

El diseño de la actividad experimental se planteó de acuerdo a la propuesta inicial del proyecto en relación a:

- Establecer las prestaciones y alcances de las diferentes técnicas no destructivas aplicables a la determinación de las propiedades relevantes de los sistemas murarios estructurales en mampostería cerámica.
- Analizar y correlacionar comparativamente los resultados obtenidos de la aplicación de las técnicas no destructivas y destructivas, empleadas para la determinación de las propiedades que caracterizan a los sistemas murarios estructurales más habituales de nuestro patrimonio.

Fue necesario analizar previamente algunas propiedades de las materias primas que permitieron confeccionar probetas apropiadas para aplicar las técnicas destructivas y no destructivas incluidas en los objetivos.

3.2.2.1. Granulometría de la arena

Respecto a las dimensiones de las partículas de las arenas, fue analizada la composición granulométrica de la arena terciada así como la extraída de juntas de toma de muros del edificio Asilo Larrañaga, de acuerdo al instrumental y procedimiento de ensayo establecido en la norma UNIT 82. Las curvas granulométricas obtenidas se muestran en las Figuras 3.2 y 3.3.

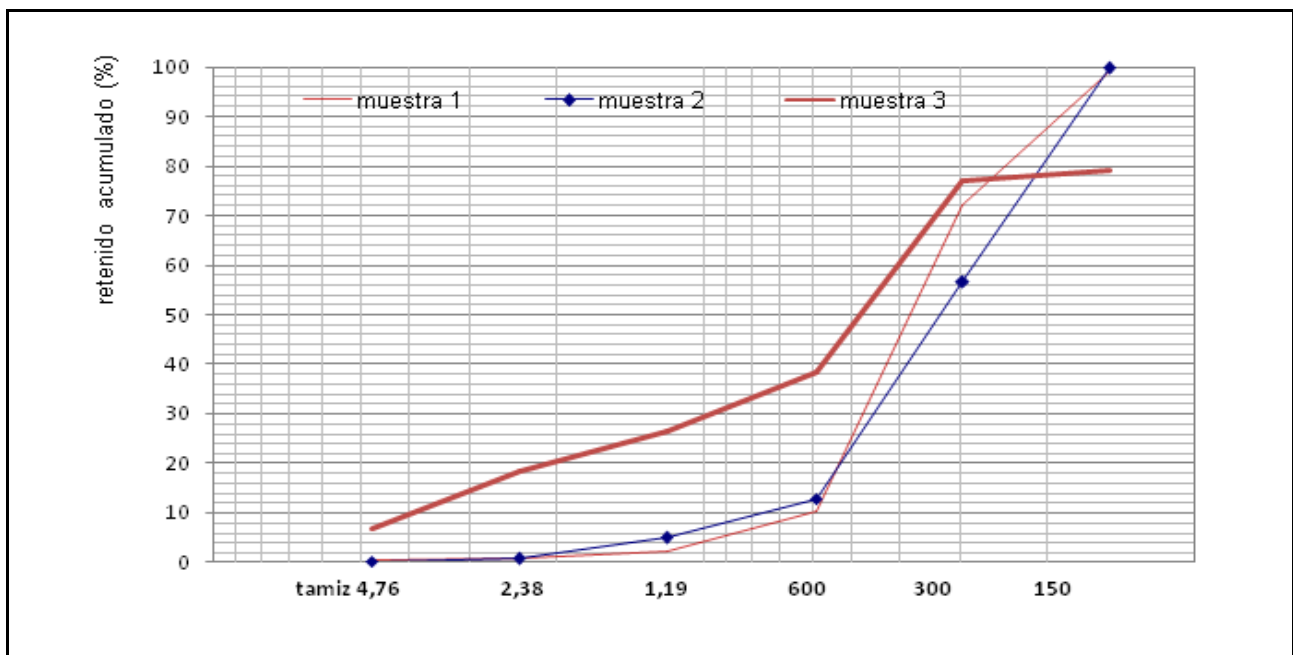


Figura 3.2. Distribución granulométrica de arenas de juntas de muros históricos.

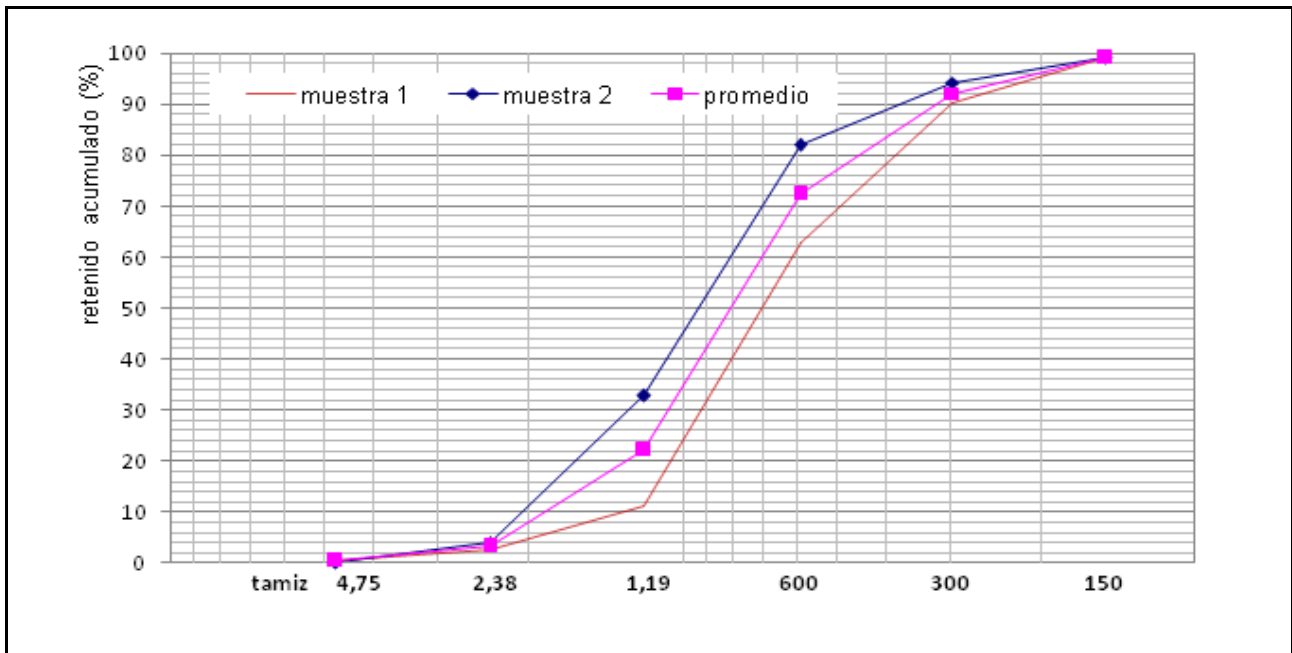


Figura 3.3. Distribución granulométrica de arenas terciadas.

3.2.2.2. Dosificación de morteros

Los morteros elaborados en laboratorio para la fabricación de las probetas fueron elaborados siguiendo la relación 3 partes de arena y 1 parte de cal en peso, que se corresponde en volumen a una relación de 3 partes de arena y 1,6 de cal. La relación agua/cal en peso fue variable entre 0,8 - 0,85 - 0,9 y 0,95. La Tabla 3.1 indica las cantidades de material empleados proporcionalmente para cada una de las mezclas.

Tabla 3.1 Materiales empleados en la elaboración de morteros

Agua/cal	Cal (g)	Arena (g)	Agua (g)
0,80	450	1350	360,0
0,85	450	1350	382,5
0,90	450	1350	405,0
0,95	450	1350	427,5

Su consistencia en estado fresco fue establecida a través de la determinación del método del escurrimiento y contrastada con los valores indicados en la norma UNE EN 1015-6 (que fija para morteros secos: escurrimiento < 140 mm, para morteros plásticos: escurrimiento entre 140 y 200 mm y para morteros fluidos escurrimiento > 200 mm), de manera de que todos los morteros alcanzaran una consistencia plástica. Los valores de escurrimiento respectivos y su correspondiente valor de Consistencia determinada según norma IRAM 1570 se indican en la Tabla 3.2. La Figura 3.4 muestra la ejecución de los ensayos.

Tabla 3.2 Explayamiento E (mm) y consistencia C (%) de morteros

Agua/cal	E (mm)	C (%)
0,80	14,5	45
0,85	16,3	63
0,90	17,2	72
0,95	19,1	91



Figura 3.4. Determinación del escurrimiento y consistencia de morteros sobre mesa de sacudidas.

Complementariamente se elaboró un mortero con contenido de cemento, en las proporciones 1 parte de cal, 3 partes de arena y 1/20 de cemento portland. Las probetas elaboradas con este mortero fueron designadas como A, B, C, D, E y F.

3.2.2.3. Confección de probetas

La fase experimental fue desarrollada sobre diferentes probetas en base a los mampuestos y morteros antes detallados.

Las mismas incluyeron probetas del tipo:

- Probetas prismáticas de 4x4x16 cm de morteros con las dosificaciones 0,8 - 0,85 - 0,9 (se descartó la dosificación 0,95 por la excesiva fluidez de la mezcla que no permitiría elaborar las probetas con mampuestos). Estas probetas fueron empleadas fundamentalmente para determinar resistencia a compresión y flexión.
- Unidades de ladrillos (incluyendo ladrillos artesanales colorados y plateados y ladrillos antiguos extraídos de los edificios inspeccionados). Estas probetas fueron empleadas para evaluar características dimensionales, densidad, resistencia a compresión y flexión, tasa inicial de absorción, absorción, resistividad eléctrica, constante dieléctrica, resistencia a la penetración y dureza superficial.
- Probetas dobles: elaboradas con dos unidades de ladrillo (artesanales colorados o artesanales plateados) y morteros de cemento. Las dimensiones de estas probetas se ajustan a los siguientes parámetros: espesor (ancho del mampuesto), altura (variable entre 11 cm y 13 cm equivalente a 2 altos de mampuestos y una junta elaborada aproximadamente de 2 cm en estado fresco), ancho (largo del mampuesto). Fueron empleadas para determinar resistencia a compresión del conjunto.
- Probetas triples (tripletas): elaboradas con tres unidades de ladrillo plateado y tres tipos de morteros de arena y cal (0,8 - 0,85 - 0,9). Las dimensiones de estas probetas se ajustan a los siguientes parámetros: espesor (ancho del mampuesto), altura (variable entre 17,5 cm y 20,5 cm equivalente a 3 altos de mampuestos y dos juntas elaboradas aproximadamente de 2 cm en estado fresco), ancho (largo del mampuesto). Estas probetas fueron empleadas para determinar resistencia a penetración y dureza superficial de juntas y mampuestos, así como para determinar la resistencia inicial al cortante.
- Muretes simples: elaborados con 5 unidades de ladrillos colorados o plateados y tres tipos de morteros de arena y cal (0,8 - 0,85 - 0,9). Las dimensiones de estas probetas se ajustan a los siguientes parámetros: espesor (ancho del mampuesto), altura (variable

entre 30,5 cm y 35,5 equivalente a 5 altos de mampuestos y cuatro juntas elaboradas aproximadamente de 2 cm en estado fresco), ancho (largo del mampuesto). Estas probetas fueron empleadas para evaluar propiedades respecto a la presencia de humedad. Se aplicaron sobre ellas técnicas de determinación de la permeabilidad, constante dieléctrica con geo-radar y resistividad eléctrica. Fueron tratados con hidrorrepelentes estableciendo una numeración que indica el tratamiento recibido: los marcados con un número 2 fueron tratados en una de sus caras mayores, los marcados con un número 3 fueron totalmente tratados en todas sus caras, los marcados con un número 4 no recibieron ningún tratamiento.

- Muretes de compresión: elaborados según la norma 1052, de espesor equivalente al ancho del mampuesto, alcanzando una altura de 7 hiladas y 6 juntas de mortero de las tres clases estudiadas (0,8 - 0,85 - 0,9). Las hiladas impares se construyeron con dos unidades enteras de ladrillo y las pares con dos medios ladrillos y un ladrillo entero. Estas probetas fueron empleadas fundamentalmente para obtener valores de resistencia a compresión de la mampostería y para confirmar valores de dureza superficial y resistencia a penetración de los morteros.
- Muretes de compresión diagonal: elaborados alcanzando una altura equivalente a su ancho, con 6 hiladas y 5 juntas de mortero de la clase 0,85. Las hiladas impares se construyeron con dos unidades enteras de ladrillo y las pares con dos medios ladrillos y un ladrillo entero.

La Figura 3.5 muestra imágenes de diferentes probetas elaboradas.



Figura 3.5. Imágenes de diferentes probetas elaboradas.

De cada una de las probetas elaboradas de morteros, ya sea para el ensayo de compresión y flexión como de juntas entre ladrillos se tomaron muestras para los estudios microestructurales, con las técnicas de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido.

La definición de las probetas “muretes de compresión”, implicó un estudio previo de comparación de diferentes alternativas: a) columnas de base cuadrada elaboradas con dos mampuestos dispuestos en hiladas transversales y 11 hiladas de altura, b) muretes de acuerdo a la norma UNE 1052 con espesor equivalente al largo del mampuesto, c) muros simples de 5 hiladas de altura equivalente a los denominados muretes simples y d) muretes de acuerdo a la norma UNE 1052 de espesor equivalente al ancho del mampuesto.

Sometidas a ensayo de compresión, en función del tipo de rotura observada y los valores de carga determinados se llegó a la conclusión que las probetas del tipo d) resultaban más representativas del comportamiento de la mampostería y su configuración y peso permitían su correcta manipulación en laboratorio (probetas de mayores dimensiones por su peso resultaban difícilmente manipulables y las exponían a movimientos excesivos que podían generar roturas o fallas en las juntas previas al ensayo).

Del mismo modo para la determinación preliminar de los valores esperables de resistencia inicial al cortante, fueron elaboradas probetas similares a las “tripletas”, construidas con 3 unidades de ladrillo, de las cuales la central se colocó desfasada, de manera de sobresalir unos centímetros respecto a las restantes dos. El ensayo de prueba se realizó sometiendo a carga de compresión la cara sobresaliente del ladrillo central.

La Figura 3.6 muestra estos ensayos preliminares sobre probetas de diferentes configuraciones.



Figura 3.6. Ensayos en laboratorio sobre probetas de diferentes configuraciones.

3.2.2.4. Edades de las muestras a ensayar

Las edades de ensayo fueron determinadas atendiendo a las características del proceso de carbonatación de la cal que permite a los morteros adquirir lentamente mayor resistencia. Esto fue evaluado paulatinamente a través de los ensayos de difracción de rayos X y de microscopía que como se informa más adelante fueron realizados periódicamente durante varios meses.

En síntesis:

- La edad para la determinación de la resistencia a compresión y flexión en morteros alcanzaron los valores de 28 días y 270 días.
- Los ensayos de compresión, cortante y corte fueron realizados a 270 días de edad.
- Los estudios sobre propiedades físicas relacionadas con la presencia de agua fueron realizados cuando las probetas alcanzaron 240 días de exposición a la intemperie.
- Los ensayos de resistencia a la penetración y dureza superficial en morteros fueron realizados a los 150 y 270 días de edad.

3.2.3. Técnicas empleadas

3.2.3.1. Geo-Radar

El geo-radar, o radar de penetración terrestre, es un método geofísico que utiliza impulsos electromagnéticos de radar para obtener información de lo que está por debajo de una superficie.

Originalmente desarrollado para el estudio del suelo, cada vez es más usado y estudiado en distintos ámbitos de la ingeniería civil, en los que se ha adaptado la antena con una frecuencia más alta para obtener la resolución requerida sobre las distancias más cortas que interesan en el ensayo de una estructura (McCann, D. et al).

Un radar de impulsos, mostrado en la Figura 3.7 cuenta con dos antenas, una que emite y otra que recibe ondas de microondas, una unidad de control, y un dispositivo de almacenamiento. La unidad de control del radar envía un pulso eléctrico a la antena transmisora que emite una onda electromagnética. Una vez emitida la onda, la energía reflejada en las discontinuidades internas es captada por la antena receptora y convertida en una señal digital por la unidad de control. Posteriormente la señal es guardada por el dispositivo de almacenamiento interno (Schuller, M).



Figura 3.7. Radar penetrante de tierra para hormigón (Marca GSSI, modelo StructureScan Mini).

Cuando la onda incide en una interfase entre medios con propiedades dieléctricas diferentes, parte de la onda se refleja y se transmite hacia el medio en el cual se propagaba, parte se propaga en el interior del medio sobre el que ha incidido, y parte es absorbida o atenuada. Las amplitudes de las ondas reflejadas están directamente relacionadas con los cambios en los parámetros constitutivos al pasar de un medio a otro.

La velocidad de propagación por el medio así como la atenuación de la señal depende de las propiedades eléctricas del material por el que circula la onda. La permitividad eléctrica condiciona la velocidad de la onda en el material mientras que la conductividad eléctrica determina la atenuación de la señal. Con la señal obtenida, determinando el máximo de la amplitud de la señal reflejada en función del tiempo, se puede determinar el tiempo de viaje de la onda por el material en estudio. Se debe tener en consideración al momento de interpretar la señal, el ruido que generan las reflexiones y los ecos de las interfases.

De acuerdo a la Ecuación 3.1, c es la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el medio.

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

c_0 es la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el aire (del orden de 3×10^8 m/s) y ϵ_r es la constante dieléctrica del medio o la permitividad relativa al aire.

En la Figura 3.8 se representa un esquema del funcionamiento del geo-radar.

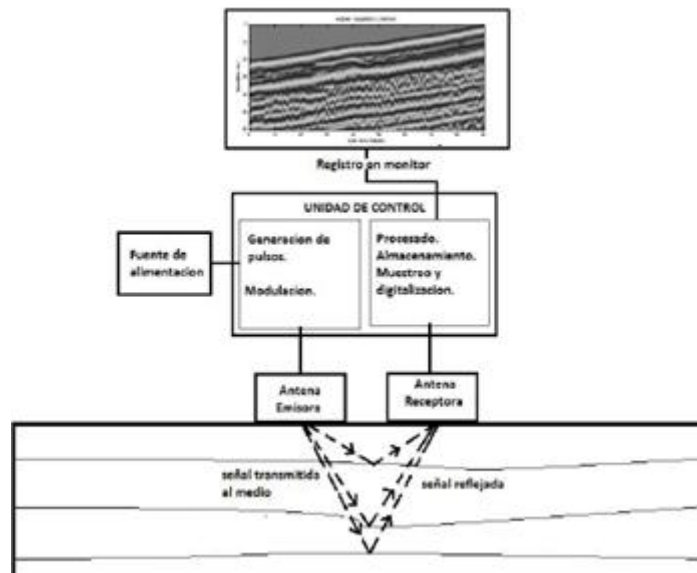


Figura 3.8. Esquema básico de funcionamiento del geo-radar

La Figura 3.9 muestra una señal tipo A-Scan que representa la Intensidad de la señal recibida en el geo-radar en función del tiempo.

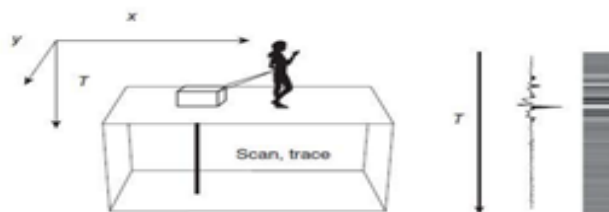


Figura 3.9. Esquema representativo de una señal A-scan.

La Figura 3.10 muestra una señal tipo B-Scan que representa la intensidad de la señal recibida en función del tiempo y la distancia recorrida.

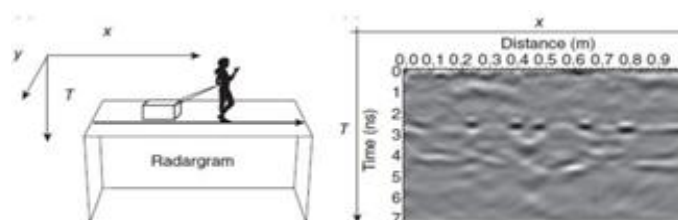


Figura 3.10: Esquema representativo de una imagen tipo B-scan.

3.2.3.2. Ultrasonido

Los ensayos de transmisión de pulsos ultrasónicos son métodos muy utilizados para la evaluación no destructiva de los materiales empleados en la ingeniería civil (Elhakam, A. et al). El principio detrás de la técnica refiere a una onda mecánica propagándose en el material, inducida usualmente por un transductor electro-acústico o por el golpe de un martillo, midiéndose uno o varios parámetros, tales como el tiempo de propagación de la onda, su amplitud, la atenuación dentro del material, el contenido de energía o el contenido de frecuencia (Suprenant, B. et al).

En la Figura 3.11 se muestra el equipo usado en este Proyecto, marca Proceq, modelo Pundit Lab con 2 transductores de 54 kHz, uno para la transmisión y otro para la recepción del pulso de ultrasonido, una unidad de procesamiento central, cables, una barra de calibración y un acoplante (Elhakam, A. et al).



Figura 3.11: Equipo para el ensayo de ultrasonido.

La unidad de control inicia un circuito de tiempo y manda una señal eléctrica al transductor que, mediante un cristal piezoeléctrico, convierte la energía eléctrica en una onda mecánica de baja energía y alta frecuencia. Los transductores son unidos al material mediante un acoplante (silicona, gel o cera) para eliminar el aire y maximizar la transmisión de energía. La onda viaja, se propaga a través del material hasta el transductor receptor, que convierte la señal mecánica en energía eléctrica. El tiempo de transmisión es mostrado en la pantalla de la unidad de control. Como la distancia entre sensores es conocida o se puede establecer, se calcula la velocidad de la onda de compresión, como el cociente entre la distancia entre los sensores y el tiempo que le lleva a la onda viajar desde el emisor al receptor.

En un material sólido, elástico e isótropo, la velocidad de propagación de las ondas de compresión P, están relacionadas con el Módulo de Elasticidad, el coeficiente de Poisson y la densidad mediante la fórmula mostrada en la Ecuación 3.2 (ACI 228.2R; ASTM C507).

$$c_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Las ondas de corte se propagan a una velocidad más lenta que las ondas de compresión, y su velocidad depende del módulo de corte G, el cual también depende del Módulo de Elasticidad y del coeficiente de Poisson y de la densidad del material (Ecuación 3.3):

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

La Figura 3.12 presenta las posibles configuraciones utilizadas para la transmisión del ultrasonido, hay tres posibles, dependiendo de la ubicación de los transductores en la pieza en estudio:

- Configuración directa: cuando los transductores se posicionan en caras opuestas.
- Configuración semidirecta: cuando los transductores se posicionan en caras adyacentes.
- Configuración indirecta: cuando los transductores se posicionan en la misma cara.

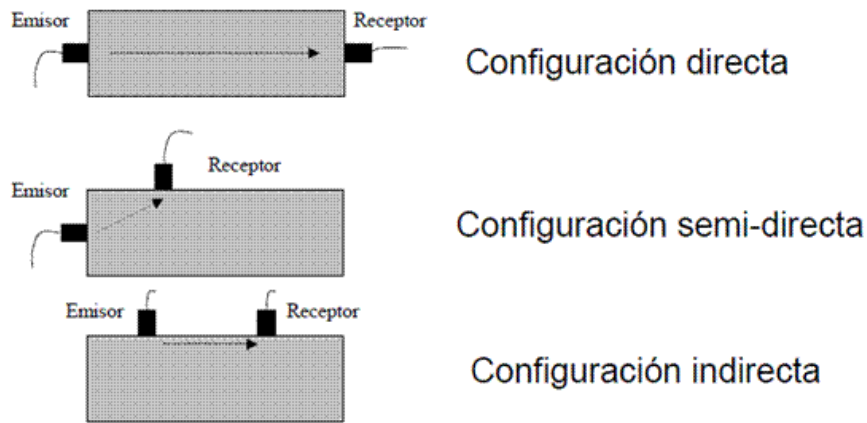


Figura 3.12: Esquema de las diferentes configuraciones que se puede utilizar.

3.2.3.3. Resonancia

Además del ultrasonido existen otras técnicas de transmisión de pulso disponibles para estudiar el comportamiento de los materiales. Estas técnicas, vinculadas a pulsos generados por impactos mecánicos, presentan un contenido de frecuencia sensiblemente más bajo que el ultrasonido, que varía entre 1 y 10 kHz, y una mayor dispersión (Elhakam, A. et al).

La transmisión del pulso se inicia al impactar el martillo contra el material siendo recibido, al atravesar el material, por el acelerómetro, generalmente colocado en la cara opuesta a la cara donde se aplica el golpe (ASTM C-215), como se muestra en la Figura 3.13.

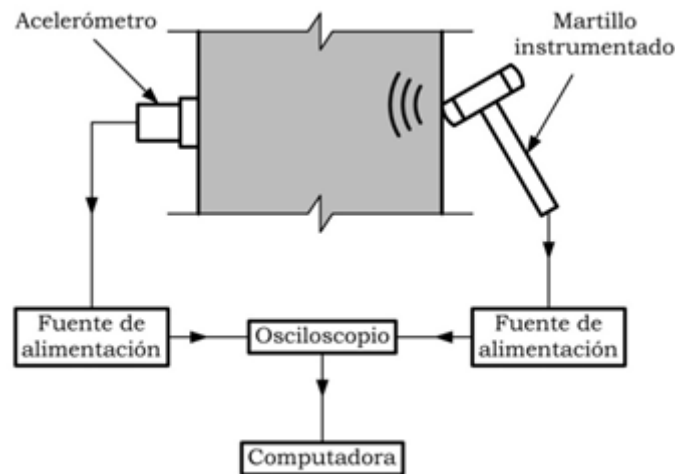


Figura 3.13: Esquema de funcionamiento de un ensayo de transmisión directa.

Este debe ser acoplado a la superficie del material usando cera, grasa u otros productos comerciales para tal fin, con el objetivo de fijarlos y de maximizar la transmisión de energía. Las señales en el osciloscopio se estudian y grafican, para analizar cualquiera de los parámetros asociados al pulso recibido, como el tiempo o el contenido de frecuencia, que brindan información sobre la estructura interna del material.

Diferentes modos de vibración pueden excitarse al ensayar probetas de morteros, pudiendo obtenerse así la frecuencia de vibración longitudinal y flexional. Luego es fácil calcular el módulo de elasticidad dinámico de la muestra ensayada.

Se calcula el módulo de elasticidad dinámico según la norma para el modo transversal como $E = C \cdot M \cdot n^2$ donde M es la masa del espécimen, n es la frecuencia transversal y $C = 0.9464 \cdot L^3 \cdot T/b \cdot t^3$ donde L es el largo del espécimen, T un factor de corrección obtenido de la norma, b y t las dimensiones de la sección, dependiendo del plano de flexión. Para el modo longitudinal resulta $E = D \cdot M \cdot n^2$, donde $D = 4L/bt$ y la frecuencia corresponde ahora a la frecuencia longitudinal.

3.2.3.4. Esclerometría

El esclerómetro o martillo Schmidt es un instrumento para la medición de la dureza superficial de distintos materiales empleados en la ingeniería civil. En este Proyecto fue usado el martillo Schmidt, marca Proceq de baja energía, tipo L, adecuado para la mampostería patrimonial o de baja calidad, mostrado en la Figura 3.14, que consiste en un pistón de acero endurecido unido a una pesa tensada con un resorte (ver Figura 3.15). Al presionar el equipo contra la mampostería el resorte se libera, impulsando la masa contra la superficie. El rebote de la masa es medido obteniéndose así un valor adimensionado en función de la dureza superficial del material, llamado número de rebote.



Figura 3.14. Martillo Schmidt, marca Proceq de baja energía, tipo L.

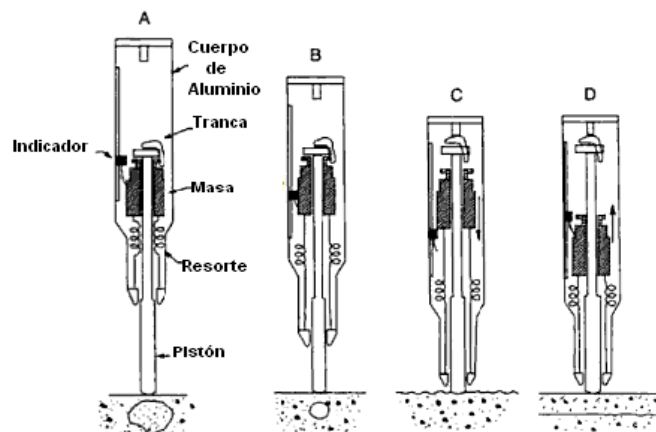


Figura 3.15. Principio de funcionamiento del Martillo Schmidt.

La principal aplicación del martillo Schmidt es la determinación de las variaciones en la condición de la mampostería y mortero a lo largo de la estructura. De manera rápida, sencilla y poco costosa pueden detectarse áreas deterioradas en las que sea necesario aplicar técnicas más complejas y probadas. La técnica es clasificada como no destructiva aunque suele dejar pequeñas marcas en la superficie de la mampostería, principalmente en ladrillos y morteros de baja calidad. (Método RILEM MS.D.2; ACI 228.1R; ASTM C805)

3.2.3.5. Resistencia a la penetración

El ensayo de prueba de penetración (también llamada prueba Windsor) es un método de caracterización de distintos materiales a partir de la medición de la profundidad de inserción, mediante un micrómetro, de un clavo de acero, accionado y disparado desde una “pistola” para obtener indirectamente la resistencia a compresión del material ensayado. Tanto el clavo como la energía de disparo del clavo están normalizados para ejercer siempre la misma presión sobre el clavo y el material ensayado mediante un resorte (Figura 3.16).

La teoría detrás del ensayo es que materiales con mayor resistencia a la compresión muestran mayor resistencia a la penetración, o lo que es lo mismo, o menor resistencia a la compresión menor resistencia a la penetración. Existen diversos estudios en hormigón que muestran la correlación positiva existente entre ambos parámetros. En todos los casos se recomienda generar una curva de correlación entre la resistencia a la penetración y la resistencia a la compresión.



Figure 3.16: Equipo Windsor Pin

La aplicación de la prueba original de penetración a la mampostería no es del todo convincente (Schuller, M.). Por un lado, en la mampostería intervienen muchos más factores que en el hormigón debido a la complejidad de los materiales y al carácter compuesto de los muros; y por otro, la dispersión entre las calidades de los mampuestos es más que considerable. Son varios los estudios que muestran la falta de correlación entre el ensayo y la resistencia a compresión (Suprenant, B. et al).

Para evaluar la resistencia a compresión de los morteros existe una adaptación de la prueba tradicional llamada Windsor Pin (ASTM C803), que utiliza la energía potencial de un resorte en vez de la de una explosión, y un clavo, en lugar de un cilindro de acero (Suprenant, B. et al). De realizarse con cuidado, la profundidad de penetración del clavo sirve como indicador de la resistencia (Schuller, M.).

3.2.3.6. Termografía

La Termografía Infrarroja es una técnica de ensayo no destructivo sin contacto, no invasivo y de relativo bajo costo, que revela la temperatura de la superficie de un cuerpo a través de la recepción de la radiación infrarroja (no nociva) que esta superficie emite. Cada cuerpo, por encima del cero absoluto emite radiación electromagnética.

Es una técnica rápida y de aplicación sencilla. Puede ser aplicado a una diversidad de materiales metálicos y compuestos, en la industria, en ingeniería civil, etc, pudiéndose inspeccionar amplias áreas en un ensayo único. Cuando el flujo de calor en un material es alterado por la presencia de anomalías o defectos se obtienen contrastes de temperatura en su superficie. Así,

el uso de la Termografía como método no destructivo de inspección está basado en la obtención y el análisis de las imágenes de esos patrones térmicos, ya sea de manera cualitativa como cuantitativa. El rango de medición de radiación infrarroja utilizado por esta técnica está en el espectro de longitudes de onda de 1.5 a 14.0 micrómetros. En la Figura 3.17 se muestra la cámara termográfica utilizada en este Proyecto.



Figure 3.17: Cámara termográfica modelo FLIR E6: Compact Thermal Imaging Camera with 160 x 120 IR Resolution and MSX

La ecuación 3.4 define la tasa de radiación de energía por unidad de superficie R en Watts por metro cuadrado.

$$R = e \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde e es la emisividad de la superficie, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann y T es la temperatura absoluta de la superficie en Kelvin.

Las imágenes obtenidas por la termografía infrarroja se ven influenciadas por la emisividad de la superficie (entre otras, distancia, humedad, temperatura aparente), que es una propiedad que se ve afectada por la rugosidad, el color y la temperatura, entre otros factores; por lo que una superficie puede mostrar en la termografía un cambio de temperatura, aunque lo que la genera puede no ser necesariamente un cambio de temperatura.

La Figura 3.18 muestra una imagen tomada dentro de una edificación patrimonial, donde se aprecia un cambio en las propiedades del muro, que puede deberse a un cambio de temperatura en sí mismo o a un cambio en la emisividad.

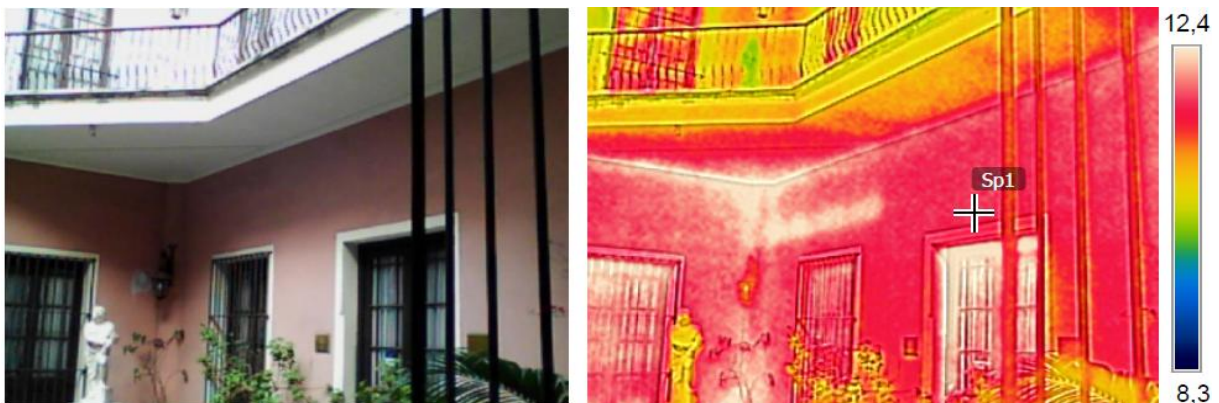


Figura 3.18: Foto original de una edificación, y la imagen termográfica de la misma edificación, tomadas ambas con la Cámara Termográfica.

3.2.4. Métodos experimentales

3.2.4.1. Características dimensionales y físicas

Dimensiones y planeidad

Las dimensiones correspondientes, longitud, ancho y altura de los ladrillos fueron determinadas a partir de la norma UNE-EN 722-16:2011, según lo establecido en el procedimiento a), por el cual se realiza una medición en cada una de las caras entre los puntos medios de las aristas opuestas. Se utilizó regla milimétrica y calibre de 0.02 mm de precisión.

Se aclara que debido a la falta de instrumental apropiado, no se realizaron las mediciones según el procedimiento b), que era el indicado para las características de los ladrillos.

Se elaboró el formulario FO.001/01 para el registro de datos y expresión de resultados.

La determinación de la planeidad de las caras de los ladrillos se realizó a partir de la norma UNE-EN 772-20:2001 y UNE-EN 772-20:2001/A1.

Una vez colocada las piezas sobre una superficie estable, se mide la longitud de las dos diagonales de cada cara utilizando una regla milimétrica. Para la determinación de la planeidad se mide las distancias entre la cara de la pieza y la regla ubicada sobre cada diagonal. Debido a la irregularidad de la superficie, se optó por utilizar calibre para la medición de las distancias en lugar de las calas de espesor como establecía la norma.

Se elaboró el formulario FO.002/02 para el registro de datos y expresión de resultados.

Ambos formularios se presentan en un Anexo del presente documento.

Densidad

En cuanto a la densidad de los materiales, a continuación se detalla la determinación en los ladrillos, la cal y la arena.

- Ladrillos: la determinación de la densidad en ladrillos fue realizada según la norma IRAM 12593, aplicada para conocer la densidad absoluta del ejemplar utilizando una balanza con precisión de 0.01g, balanza hidrostática y estufa con rango 0 a 150°C. El procedimiento de este ensayo implica partir del valor de masa húmeda (mh) obtenida en el estado saturado, pesar en balanza hidrostática cada ejemplar para determinar su masa suspendida en agua (ma) y posteriormente secar en estufa hasta masa constante (ms). Con los datos obtenidos se determinó la densidad ρ (g/cm³) de acuerdo a la siguiente expresión: $ms/(mh-ma)$.
- Cal: la cal utilizada posee una densidad declarada por el fabricante de 800 kg/m³.
- Arena: la densidad aparente de la arena empleada alcanzó el valor de 1300 kg/m³.

3.2.4.2. Desempeño de los materiales respecto al contenido y pasaje de agua

Fueron estudiadas diferentes propiedades vinculadas al desempeño de los materiales y componentes en relación al agua, por ser esta un agente habitual en los proceso de deterioro que conducen a patologías en las estructuras murarias de ladrillo. Se incluyeron en este sentido las propiedades de tasa inicial de absorción, absorción, permeabilidad, resistividad eléctrica, determinación de la constante dieléctrica mediante el empleo del geo-radar y las propiedades térmicas asociadas al contenido de humedad de los materiales.

Asimismo se incluyó en este estudio probetas tratadas con un producto de protección hidrorrepelente, de manera total (tratando la envolvente de la probeta en forma integral) o parcial (aplicando el producto en una de sus caras únicamente). La designación correspondiente a cada clase de probeta resultante fue indicada en el punto 3.2.2.

Para las propiedades de permeabilidad, resistividad eléctrica y determinación de la constante dieléctrica mediante el empleo del geo-radar las probetas fueron expuestas durante 240 días a la intemperie siendo afectadas por la radiación solar directa, lluvias y corrientes de aire naturales, tal como se muestra en la Figura 3.19. Posteriormente y para aplicar cada uno de los procedimientos correspondientes estas fueron sumergidas en agua libre de cloro, durante 10 segundos, 45 segundos y 5 minutos.



Figura 3.19. Probetas en condiciones de exposición para aplicación de los ensayos de permeabilidad, resistividad eléctrica, determinación de la constante dieléctrica mediante el empleo del geo-radar.

Tasa Inicial de Absorción de ladrillos

La determinación de la Tasa Inicial de Absorción fue realizada según la norma UNE EN 772-11, cuyo objetivo consiste en evaluar la capilaridad del mampuesto. La técnica utilizada requirió el empleo de un instrumental compuesto por balanza con precisión de 0.01g y estufa con rango 0 a 150 °C. El procedimiento incluyó las etapas siguientes.

- Preparación inicial de las muestras para el caso de ladrillos extraídos de edificios históricos: ejecutada en forma manual y superficial, empleando espátulas y cepillos de cerda plástica blanda, con el objetivo de retirar las capas adheridas de mortero.
- Determinación de la superficie de ensayo (A_s): dada la irregularidad de las muestras, para la determinación del área de las superficies ensayadas fueron tomados moldes reales sobre las mismas, los cuales fueron luego procesados digitalmente.
- Ensayo de tasa inicial de absorción: realizado de acuerdo al método de ensayo descrito en la norma de referencia, que consiste sintéticamente en secar la muestra hasta masa constante (m_s), colocar la superficie de ensayo de la misma en una capa de agua cubriendo 5 mm del alto de la muestra durante 60 segundos y determinar posteriormente la masa de la muestra húmeda (m_h). Con los datos obtenidos se calculó la Tasa inicial de absorción C ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$) según la expresión: $(m_h - m_s) / A_s$.

Se elaboró el formulario FO.003/01 para el registro de datos y expresión de resultados. El mismo es presentado como anexo del presente documento.

Alcance: se trata de un ensayo sencillo que puede ser aplicado sobre piezas individuales y requiere mínimo equipamiento

Limitantes: cuando se trata de mampuestos extraídos de muros históricos requiere de la limpieza previa de las caras del mismo, que en general posee restos de material de junta. La limpieza debe ser manual y con instrumento que no rayen u obturen los poros capilares superficiales, lo cual resulta en la práctica difícil de llevar adelante en todos los casos, dependiendo de la adherencia entre el mampuesto y los restos de mortero.

Absorción de agua

La determinación de la Absorción de agua ejecutada según UNE 67-027 tuvo como objetivo determinar la absorción total de agua del mampuesto. El instrumental requerido coincide con el utilizado en el ensayo de Tasa inicial de Absorción, y el procedimiento experimental consiste sintéticamente en secar la muestra hasta masa constante para la determinación de la masa seca (ms) y sumergir en agua el ejemplar, paulatinamente en un lapso de 3 horas hasta cubrirlo totalmente y determinar posteriormente la masa de la muestra húmeda (mh) definida como el valor de masa constante del ejemplar húmedo. Con los datos obtenidos se calculó la Absorción porcentual A (%) de acuerdo a la expresión $100 \times (mh - ms) / (ms)$.

Se elaboró el formulario FO.004/01 para el registro de datos y expresión de resultados. El mismo es presentado como anexo del presente documento.

Alcance: se trata de un ensayo sencillo que puede ser aplicado sobre piezas individuales y requiere mínimo equipamiento.

Limitantes: no presenta limitaciones relevantes, aunque es solo aplicable a piezas individuales.

Permeabilidad

Fueron aplicados los tubos Karsten (Figura 3.20a), diseñados para la determinación de la permeabilidad al agua de diferentes materiales simulando la presión ejercida por la lluvia cuando es impulsada por el viento. En este caso particular los tubos fueron fijados en la interfase junta - mampuesto (Figura 3.20b). Siguiendo recomendaciones como las establecidas en la norma Chilena NCh 2256/1 y el RILEM TEST 11.4, los tubos determinan un área circular de contacto con el componente a evaluar de 4,9 cm². Se fijó como criterio de evaluación la determinación del tiempo requerido para que se produzca un descenso en la columna de agua de 3, 4 y 5 cm³.



a)



b)

Figura 3.20. a) Tubos Karsten b) Tubos fijados en la interfase junta-mampuesto.

Alcance: se trata de un ensayo de fácil ejecución una vez colocados los tubos. Es representativa de situaciones de agua a presión que afectan a los paramentos.

Limitantes: las superficies en que se adhieren los tubos requieren cierta regularidad, cuando esta no se cumple resulta difícil asegurar la estanqueidad entre el tubo y la superficie. Una vez colocados los tubos deben permanecer fijos.

Resistividad eléctrica

La determinación de la Resistividad eléctrica fue utilizada para determinar el grado de saturación de las diferentes probetas, a partir de la determinación de la resistencia al pasaje de corriente eléctrica entre los polos extremos del dispositivo conocido como sonda de cuatro polos o sistema Wenner (Figura 3.21).

El mismo es ampliamente aplicado para el análisis de suelos en profundidad donde se alojan conexiones a tierra de instalaciones eléctricas para conocer la ubicación y profundidad de napas freáticas, rellenos de baja compacidad u obstáculos en predios destinados a obras civiles, así como para corregir la determinación de la permeabilidad al aire a edades tempranas en la capa de recubrimiento de piezas de hormigón.

El método se apoya en el hecho que la resistencia eléctrica se reduce conforme la pieza o probeta se satura con agua, por el hecho de que el material soluble de los mampuestos y probetas forma una solución iónica que puede conducir la corriente eléctrica.



Figura 3.21. Sonda de cuatro polos o sistema Wenner.

Alcance: la técnica permite determinar la resistividad en una zona cercana a la superficie ensayada.

Limitantes: el equipo no presenta sensibilidad a pequeños incrementos o reducciones de humedad, los valores resultantes en ese caso resultan inexactos.

Constante dieléctrica

En el Proyecto se usó un radar para hormigón marca GSSI, modelo StructureScan Mini, con el objetivo de detectar gradientes de humedad, tal como se explicó en el punto 3.3.3. La constante dieléctrica se obtuvo aplicando el geo-radar en las diferentes probetas (Figura 3.22).



Figura 3.22. Aplicación del geo-radar a una probeta de ensayo.

El funcionamiento del equipo depende de la emisión y recepción de ondas electromagnéticas con una frecuencia nominal de 1.6 GHz, permitiendo medir la distancia de avance de la onda. Esto implica que al utilizar la técnica conocida como pulso-eco, grafica varias señales del tipo A-Scan en un sistema de ejes en el cual, sobre el eje de las abscisas se ubica el punto donde se obtuvo la señal en una progresiva medida en cm y en el eje de las ordenadas se grafica la distancia en profundidad (a partir de una constante dieléctrica ingresada en el equipo), para obtener el B-Scan.

El procedimiento implicó en primer lugar el escaneo de la probeta de ensayo utilizando un separador de material no metálico que posibilitó mantener una distancia constante de 5 cm entre la superficie del equipo y la superficie de la probeta. En segundo lugar se interpuso una chapa metálica entre la superficie del equipo y la de la probeta y por último se colocó la misma chapa metálica por debajo de la probeta. De esta forma se obtuvieron las reflexiones producidas por la superficie del material en estudio y la chapa por debajo de la superficie ensayada. La Figura 3.23 muestra distintos B-Scan según cada una de las configuraciones.

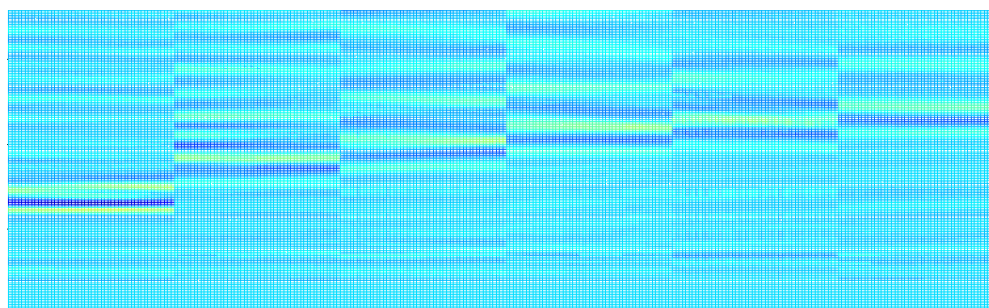


Figura 3.23. Gradiente de humedad en ladrillos con 6 niveles diferentes de humedad.

A modo de ejemplo, puede decirse que un aumento de humedad se identifica como un aumento del espesor aparente de las probetas, debido a que el tiempo en el que la onda se refleja en la superficie y retorna a la antena es mayor.

Alcance: dependiendo del espesor del muro, es posible que la reflexión del fondo del muro no se perciba en el equipo, por lo que puede ser necesario utilizar un reflector metálico del otro lado de la pared.

Limitantes: la superficie debe ser plana para poder obtener resultados consistentes, puede utilizarse una placa de material no conductor como superficie niveladora.

Propiedades térmicas

El estudio de las propiedades térmicas mediante cámara termográfica se utilizó para determinar el contenido de humedad en muros. Lo que se hizo fue someter a los muros a diferentes niveles de humedad y se tomó fotografías con la cámara termográfica a los efectos de poder determinar si es posible la verificación de las zonas con diferentes niveles de humedad en los muros. En la Figura 3.24 se muestran resultados de aplicar la técnica de termografía a diferentes estructuras.

Alcance: Detecta variaciones de temperatura en la superficie a partir de una medida de emisividad. De ser conocida la emisividad brinda información sobre posibles defectos (delaminaciones, grietas).

Limitantes: debe generarse una diferencia de temperatura para poder ver el efecto de la humedad en los muros. Puede haber un error al tener materiales diferentes o existir reparaciones que no sean observadas, debe ser complementada con otro método.

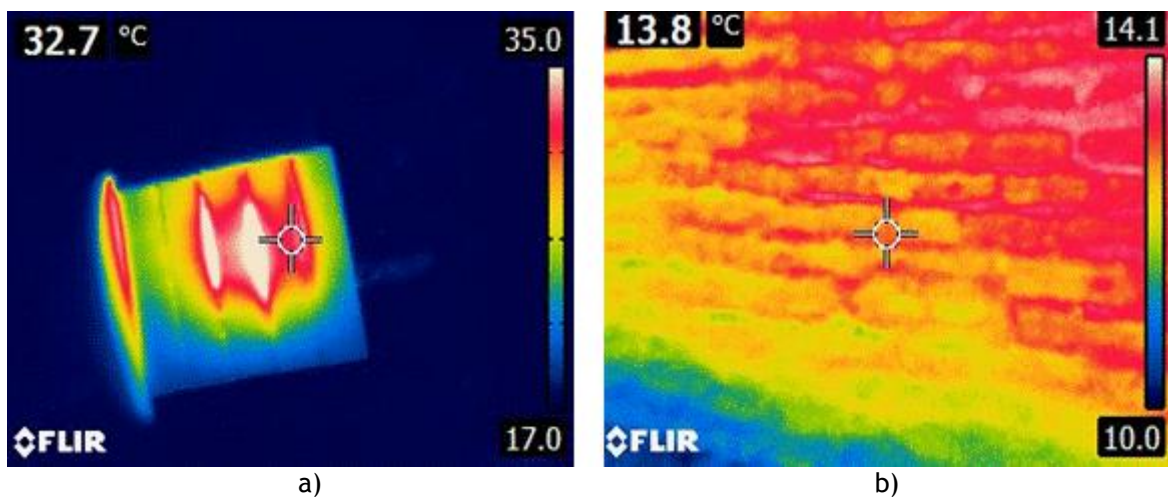


Figura 3.24. a) Murete de ladrillos sometido a una fuente de calor. b) humedad de cimientos en muro patrimonial.

3.2.4.3. Microestructura (DRX y MEB)

Microestructura (por Difracción de Rayos X)

La difracción de rayos X (XRD por sus siglas en inglés) es una de las técnicas usadas para el análisis cualitativo y cuantitativo de fases sólidas cristalinas, tanto orgánicas como inorgánicas que se puede aplicar en muestras de polvo, capas finas o cristales, de gran cantidad de materiales como minerales, rocas, sedimentos, metales, aleaciones, plásticos, materiales de construcción, productos químicos, entre otros.

La selección del tipo de radiación de Rayos X que incide sobre la muestra en un difractómetro, depende de la composición de la muestra y el objetivo del estudio. Para el análisis de difracción por rayos X normalmente se utilizan radiaciones de cobre (Cu), cobalto (Co), hierro (Fe) y cromo (Cr); cada uno de ellos tiene diferente poder de difracción al poseer longitudes de onda características.

Los patrones de XRD de las muestras de polvo, se obtuvieron con un difractómetro estándar Philips PW3710 (voltaje y corriente aplicados al tubo generador: 30 kV, 40 mA respectivamente y ánodo del tubo generador: de Cu K α con $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) del Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería (ver Figura 3.25). Las muestras fueron barridas variando el ángulo de 0° a 2θ .

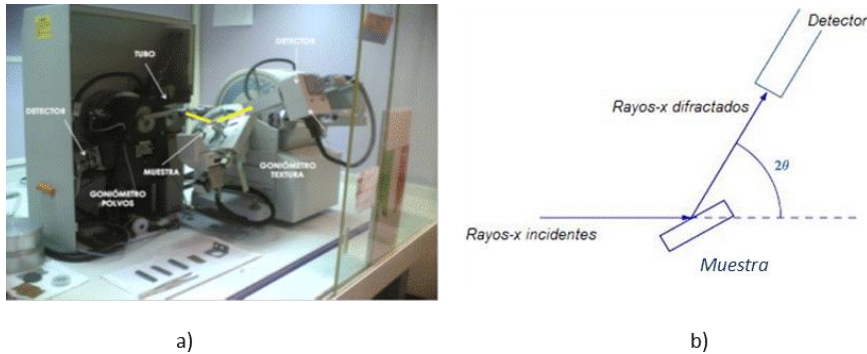


Figura 3.25. a) Equipamiento de Difracción de Rayos X b) Detalle del barrido automático que se realiza entre la muestra y el detector.

Siendo θ el ángulo con que inciden los RX sobre los planos cristalinos de la muestra. El fenómeno físico involucrado es la ley de Bragg que relaciona el ángulo de incidencia de la radiación sobre los planos cristalinos de la muestra cuando se produce la difracción por estos planos, y se dan las interferencias constructivas:

$$n \lambda = 2d \sin (\theta)$$

- λ : longitud de onda de los RX
- d : espaciado entre los planos cristalinos
- θ : ang de incidencia de la radiación de RX.

La figura de difracción se obtiene en un barrido automático, entre la muestra y el detector. Para barrer los diferentes ángulos, el detector debe girar dos veces más rápido a fin de mantener el ángulo 2θ con relación al haz irradiante.

El objetivo de la aplicación de esta técnica fue detectar, dentro de las fases cristalinas de las muestras, la presencia de calcitas (CaCO_3) y portlanditas (Ca(OH)_2) para evaluar cualitativamente el proceso de carbonatación en las muestras, realizando una caracterización de los morteros de cal según un seguimiento temporal.

Por tanto para este Proyecto, esta técnica nos permite identificar las diferentes fases presentes en la cal y en los morteros, tanto históricos como los fabricados en laboratorio y cuantificar en forma relativa una fase respecto a la otra en una misma muestra.

Microestructura (por Microscopía Electrónica de Barrido)

Otra técnica usada para la caracterización microestructural de materiales es la de microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés), que permite la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, entregando información morfológica del material analizado.

El funcionamiento del microscopio electrónico consiste en hacer incidir un haz de electrones que “barre” la muestra. Cuando esto ocurre, se generan, a partir de la colisión, distintos tipos de señal cuya detección permite examinar distintas características, pudiéndose realizar estudios de los aspectos morfológicos de zonas microscópicas de diversos materiales, además del procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas para conocer la composición de elementos de la muestra.

Las señales que se pueden detectar son electrones secundarios, electrones retro-dispersados y rayos X. En muchos casos son de interés los electrones secundarios, que son arrancados de la propia muestra por la acción del haz de electrones incidente. Esta señal formada por esos electrones secundarios proporciona una imagen de la composición de elementos superficial de la muestra (Rivas, M.).

Las medidas y fotos micro-estructurales realizadas para este Proyecto fueron obtenidas usando el microscopio electrónico de barrido (MEB) del Dpto de Microscopía de la Facultad de Ciencias, (Figura 3.26) combinado con Microanálisis por sonda EDS, en los modos de electrones retrodispersados y electrones secundarios marca: "Scanning Electron Microscopy JEOL 5900LV", con un voltaje de aceleración de 20 kV, equipado con una sonda de EDS (Energy Dispersive Spectrometry) (Thermo Scientific, modelo UltraDry Silicon Drift Detector) con el software y sistema de procesamiento de cuentas NORAN System 7 X-ray Microanalysis System. Esta microsonda EDS permite la caracterización de las fases cristalinas presentes en la muestra, así como su análisis químico elemental.

Las muestras fueron fijadas a un portamuestras a través de una cinta bi-adhesiva (cinta carbonatada) y en algunos casos las superficies de las muestras fueron metalizadas para garantizar la conductividad y mejor calidad de las imágenes obtenidas.

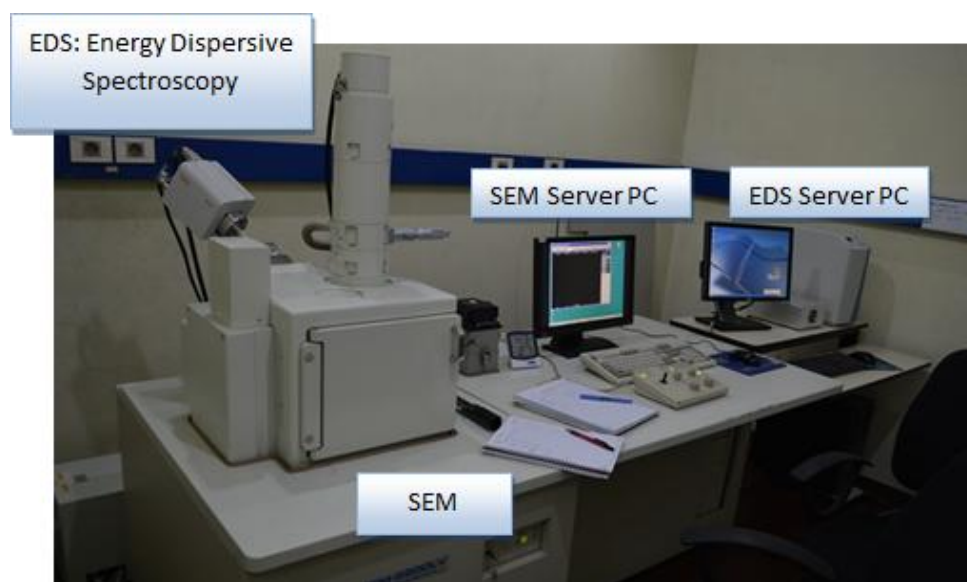


Figura 3.26. Equipamiento para Microscopía electrónica de barrido, marca JEOL, modelo 5900LV, con la sonda EDS incorporada.

3.2.4.4. Características mecánicas - Ensayos destructivos

Resistencia a tracción y compresión

Fue determinada la resistencia a tracción y compresión de morteros y mampuestos y la resistencia a compresión en muretes.

Para el caso de morteros fue aplicada la norma UNIT- ISO 679, sobre barras prismáticas de 160 mm de longitud y sección cuadrada de 40 mm. Las mismas fueron curadas en cámara húmeda durante 72 horas en sus moldes y posteriormente fueron desmoldadas para su conservación en ambiente de laboratorio a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 45 % de HR $\pm 5\text{ }%$, hasta la edad prevista de ensayo. El equipo de ensayo consistió en máquina de ensayo de capacidad máxima de carga 10.000 kgf, clase I y dispositivos accesorios, tal como se observa en la Figura 3.27.



Figura 3.27. Ensayo de resistencia a compresión y tracción por flexión de morteros

Para el caso de mampuestos, en el ensayo a compresión se siguieron las indicaciones de la norma UNE-EN 772-1 que implicó realizar previamente un encabezado para regularizar ambas tablas con un mortero de arena y cemento portland cuya resistencia a compresión a 2 días fue superior a 29 MPa. Para el caso de ladrillos antiguos fueron empleados mampuestos del edificio Hospital Maciel, datados de la misma década que el edificio Asilo Larrañaga y con dimensiones equivalentes. En el ensayo de tracción se utilizó el esquema de carga en tres puntos, separando los apoyos inferiores de la pieza 17,5 cm en el caso de ladrillos LAC, 15,5 en el caso de ladrillos LAP y 31 cm en el caso de ladrillos históricos del Hospital Maciel (Figura 3.28).

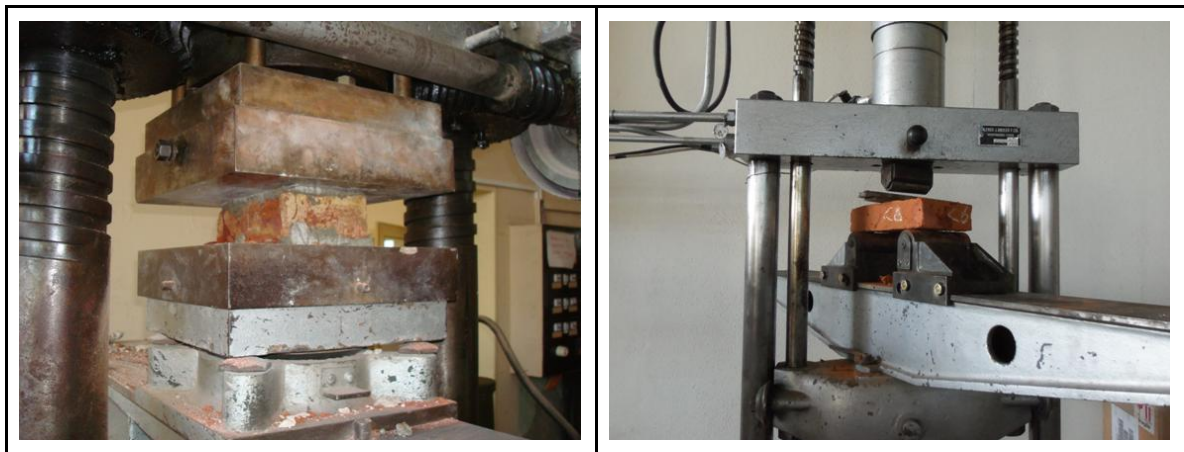


Figura 3.28. Ensayos de compresión y tracción por flexión sobre ladrillos.

Para el caso de muretes, fue aplicada la norma UNE EN 1052-1, elaborando las probetas de acuerdo a las indicaciones de la norma, y aplicando sobre ellas un encabezado para regularizar la cara superior e inferior con el mismo mortero de arena y cemento portland que en el caso de mampuestos (Figura 3.29).

Tanto en el caso de mampuestos como de muretes fue utilizada una máquina de ensayo de capacidad de carga 100 ton-f, clase I.



Figura 3.29. Ensayos de compresión sobre murete.

Resistencia al corte por compresión diagonal

El ensayo de resistencia al corte por compresión diagonal fue realizado de acuerdo a recomendaciones RILEM LUM B6 consiste en someter a un muro de dimensiones pequeñas (aproximadamente cuadradas y de un ladrillo de ancho) a una carga de compresión en la dirección diagonal. Esto es, formando 45 grados con la dirección en la que se colocan los ladrillos, como se muestra en la Figura 3.30.



Figura 3.30. Ensayo de resistencia al corte por compresión diagonal.

Al someter al muro a este tipo de esfuerzos se produce la falla que principalmente atraviesa la junta entre ladrillos y se propaga entre las zonas donde se introduce la carga. La resistencia al corte del muro se calcula como la carga de compresión aplicada al momento de la rotura, medida en N, dividido entre el área del rectángulo que forma la diagonal y el ancho del muro.

Resistencia inicial a cortante

El ensayo de resistencia inicial de cizallamiento o cortante indicado en la norma UNE EN 998 mide la resistencia a la adhesión de morteros asociados con determinadas unidades de albañilería. La norma de referencia indica valores de resistencia inicial al cizallamiento de 0,15 N/mm² para morteros de uso corriente y 0,3 N/mm² para morteros para juntas y capas finas.

El procedimiento de ensayo está indicado en la norma UNE EN 1052 y se aplica sobre pequeñas muestra de albañilería sometidas a cortante bajo una carga de 4 puntos, con una fuerza previa de compresión perpendicular a la junta de asiento. Esta fuerza de compresión previa alcanza valores de 0,2 N/mm², 0,6 N/mm² y 1,0 N/mm² cuando el mampuesto supera la resistencia a compresión de 10 N/mm², lo cual coincide con la situación ensayada. Se debe cargar la probeta con una velocidad constante entre 0,1 y 0,4 N/mm² por minuto (Figura 3.31).



Figura 3.31. Ensayo de resistencia inicial al cizallamiento o cortante con fuerza previa de compresión perpendicular a la junta de asiento.

Una vez realizado el ensayo debe analizarse la forma de fallo encontrada. De acuerdo a la Norma 1052-3, existen 4 posibles formas de fallo, que se muestran en la Figura 3.32.

<p>Fallo A: en la superficie de contacto entre el mortero y el mampuesto.</p>	<p>Fallo B: del mortero.</p>	<p>Fallo C: del mampuesto en la zona inmediata a la junta.</p>	<p>Fallo D: del mampuesto y del mortero.</p>

Figura 3.32. Posibles formas de fallo según Norma UNE EN 1052-3.

3.2.4.5. Características mecánicas - Ensayos no destructivos

Resonancia

La técnica de resonancia fue utilizada para obtener el módulo de elasticidad dinámico de probetas de mortero de cal y arena dosificadas con diferentes relaciones agua/cal.

En este Proyecto se usó el ensayo de transmisión directa del sonido, que consiste en la utilización de un martillo, un acelerómetro (PCB 353M180), una fuente de alimentación para los acelerómetros, un osciloscopio y una computadora para grabar las señales obtenidas del osciloscopio. La Figura 3.33 muestra una probeta siendo ensayada mediante impacto mecánico.

Para la determinación la frecuencia de resonancia se utilizó un osciloscopio marca Tektronic, modelo TB-2004. (ASTM C-215).



Figura 3.33. Osciloscopio utilizado en ensayo de resonancia.

La técnica consiste en la medida de la frecuencia de vibración generada por un impacto mecánico. A partir de las aceleraciones es posible obtener la frecuencia de vibración y con este valor obtener el módulo de elasticidad dinámico de la muestra ensayada. Para las muestras estudiadas se obtuvieron los módulos de elasticidad dinámicos vibraciones en sentido longitudinal y transversal.

Alcance: el alcance de los resultados obtenidos, es solamente de carácter orientativo y para poder distinguir materiales con diferentes características. Otra posible aplicación es la determinación de procesos que generan degradación de los materiales, como por ejemplo los ciclos de congelación y deshielo.

Limitantes: es necesario tener probetas o elementos de dimensiones regulares, lo que no es habitual encontrar en edificaciones patrimoniales.

Amplitud de Trasmisión de Ultrasonido

La realización de ensayos de ultrasonido tradicionales en mampostería histórica presenta un desafío debido a la heterogeneidad de los materiales. Habitualmente los ladrillos artesanales presentan mucha variabilidad de sus propiedades por el proceso de fabricaciones artesanal. Esta variabilidad hace que los ensayos de velocidad de pulsos ultrasónicos no sean los más adecuados para caracterizar elementos de mampostería.

Por esta razón se utilizó la amplitud de transmisión como parámetro para caracterizar las juntas de mampostería, más precisamente se utilizó la amplitud del primer pico como se muestra en las Figura 3.34 y 3.35.

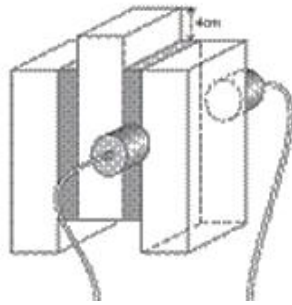


Figura 3.34. Dispositivo experimental para medir transmisión del ultrasonido a través de las juntas de mampostería.

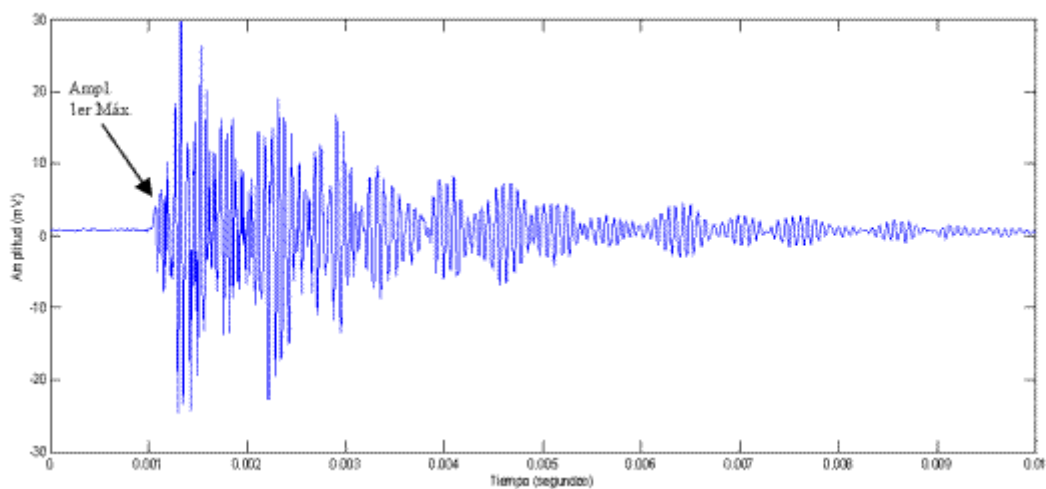


Figura 3.35. Amplitud de la señal obtenida aplicando ultrasonidos en las juntas de mampostería.

Alcance: el alcance de los resultados obtenidos, es solamente de carácter orientativo y para poder distinguir entre diferentes zonas construidas o realizadas con materiales de diferentes características. Otra posible aplicación es la determinación de procesos patológicos que afecten a la adherencia entre morteros y ladrillos.

Limitantes: la superficie de ensayo así como la presión ejercida por el operador pueden afectar los resultados.

Velocidad de propagación de Ultrasonido

Para caracterizar los ladrillos se utilizó la técnica de velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos, que consiste en colocar los transductores en las caras menores opuestas de los ladrillos y medir la velocidad que tarda la señal en atravesar la distancia longitudinal del prisma. Luego, a partir de la ecuación que determina la velocidad de propagación de las ondas de compresión P para un material sólido, elástico e isótropo, se obtuvo el módulo de elasticidad dinámico como una forma de caracterización.

Alcance: el alcance de los resultados obtenidos, es solamente de carácter orientativo y para poder distinguir entre diferentes zonas construidas o realizadas con materiales de diferentes características. Otra posible aplicación es la determinación de procesos patológicos que afecten a los ladrillos.

Limitantes: variabilidad intrínseca de las propiedades de los materiales estudiados.

Dureza Superficial

Para la determinación de la dureza superficial en morteros y mampuestos fue aplicado el esclerómetro tipo L, que resulta equivalente al habitualmente empleado en hormigones pero es recomendado para materiales de menor resistencia al aplicar una energía de impacto menor. La Figura 3.36 muestra el instrumental en aplicación.

Alcance: permite en primera instancia determinar la calidad del material, específicamente materiales de muy mala calidad muestran valores de número de rebote muy bajos. Números de rebote elevados no implican necesariamente materiales de buena calidad, ya que otros factores pueden afectar los resultados, tales como la carbonatación superficial.

Limitantes: la superficie de ensayo debe ser lisa para poder obtener valores representativos del material estudiado.



Figura 3.36: Medidas de dureza superficial con el Esclerómetro sobre diversas probetas.

Resistencia a la Penetración

La resistencia a la penetración fue aplicada sobre morteros y mampuestos utilizando el equipo Windsor Pin que consiste en un dispositivo mecánico que utiliza un resorte para introducir un clavo de acero, provocando en el material una cavidad cuya profundidad es medida utilizando el calibre del equipo para determinar posteriormente su equivalencia en mm. Si bien el equipo suministra una correlación con la resistencia esperable a compresión del material ensayado, esta calibración surge del ensayo de un material de materias primas y dosificación que difieren de los materiales ensayados en el presente proyecto. La Figura 3.37 muestra el equipo en aplicación. En este Proyecto se utilizó un equipo Windsor Pin de la marca James Instrument, modelo W-P-2000, para evaluar y caracterizar la calidad del mortero de mampostería estructural.

Alcance: permite en primera instancia determinar la calidad del material, específicamente materiales de muy mala calidad muestran valores de penetración mayores, mientras que al mejorar la calidad de los morteros el valor de penetración disminuye. Morteros de muy buena calidad (resistencia a la compresión elevada) muestran valores de penetración significativamente menores.

Limitantes: la superficie de ensayo debe ser lisa para poder obtener valores representativos del material estudiado. Morteros con valores de resistencia a compresión del mismo orden no muestra suficiente diferencias significativas en los resultados de resistencia a la penetración.



Figura 3.37. Aplicación del Windsor Pin.

3.2.5. Síntesis de las técnicas

En la Tabla 3.3 se muestra la lista de los diferentes ensayos y técnicas incluidos en la campaña experimental así como la utilidad de cada una de ellas.

Tabla 3.3. Lista de ensayos, propiedades y técnicas incluidos en la campaña experimental.

ENSAYO - PROPIEDAD - TECNICA	DESCRIPCIÓN	UTILIDAD
Análisis Termográfico (no destructiva)	Ensayo de determinación de diferentes propiedades térmicas de los muros. En laboratorio / In situ	Permite detectar zonas diferenciadas según grado de deterioro de los materiales
Evaluación de la Dureza superficial (no destructiva)	Ensayo de determinación de la dureza superficial de los mampuestos En laboratorio / In situ	Cohesión de la masa del mampuesto y del mortero en su cara expuesta. Ofrece datos de homogeneidad de respuesta en una superficie
Evaluación de la Permeabilidad (tubos Karsten) (no destructiva)	Permeabilidad al agua a presión atmosférica, En laboratorio / In situ	Verificar las condiciones antes y luego del envejecimiento, verificar rendimiento de tratamiento de protección con hidropelente o consolidante
Resistencia a Compresión de la mampostería	Ensayo de compresión centrada de probetas de muro de mampostería. En laboratorio	Evaluar la Resistencia a compresión de muros
Resistencia a Compresión de ladrillos	Ensayo de determinación de la resistencia a compresión centrada de un mampuesto. En laboratorio	Evaluar la Resistencia a compresión del mampuesto
Resistencia compresión de morteros	En laboratorio	Evaluar la Resistencia a compresión de morteros
Resistencia a tracción de ladrillos	En laboratorio	Evaluar la Resistencia a tracción de ladrillos
Resistencia a tracción de morteros	En laboratorio	Evaluar la Resistencia a tracción de morteros

Tabla 3.3 (cont.) Lista de ensayos, propiedades y técnicas incluidos en la campaña experimental.

ENSAYO - PROPIEDAD - TECNICA	DESCRIPCIÓN	UTILIDAD
Resistencia a corte por Compresión diagonal en mampostería	Ensayo de determinación de la resistencia al corte En laboratorio	Evaluar la Resistencia a corte de la mampostería
Resistencia inicial al cortante (adherencia)	Ensayo para determinar la capacidad de adherencia ladrillo mortero por resistencia inicial al cortante (en laboratorio)	Evaluar la Resistencia inicial al cortante vinculada a la adherencia, mortero - ladrillo
Resistencia a la penetración en morteros y/o ladrillos (no destructiva)	Ensayo de resistencia a penetración de morteros aplicando un impacto con equipo WINDSOR PIN. In situ	Evaluar la Cohesión de las capas superficiales del material
Ultrasonido (no destructiva)	Ensayo con equipo portátil con dos transductores de ultrasonido de baja frecuencia para evaluar la calidad del material. En laboratorio / In situ	Evaluar la calidad de la mampostería y sus juntas
Resistividad eléctrica (no destructiva)	Determina la corriente eléctrica que viaja a través del material aplicando el método Wenner.	Determinar el grado de humedad y homogeneidad en masa
Impacto eco (Impact echo) (no destructiva)	Determina el tiempo y espectro de frecuencia asociado con impacto mecánico superficial. En laboratorio / In situ	Diagnóstico para determinar grietas, evaluación de integridad, discontinuidades internas
DRX (no destructiva)	Análisis cualitativo y cuantitativo de fases sólidas cristalinas, orgánicas e inorgánicas, en muestras de polvo. En laboratorio.	Determinar los compuestos del material
SEM + EDX (Microscopía electrónica de barrido con sonda acoplada) (no destructiva)	Permite la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos. sin pulverizar muestra. En laboratorio.	Determinar Morfología y composición elemental
Geo-Radar (no destructiva)	Determina la constante dieléctrica del material vinculada con el contenido de humedad. En laboratorio / In situ	Determinar el grado de Humedad

3.3. Actividad 3: Determinación experimental en edificios en pie

De acuerdo al objetivo general del proyecto, fueron realizadas, complementariamente a las actividades de laboratorio, tareas de campo, trabajando sobre edificios históricos en pie con valor patrimonial reconocido, construidos en mampostería cerámica y con la particularidad de presentar componentes constructivos portantes de ladrillo a la vista.

Para ello fueron seleccionados los edificios: Capilla de la Calera de las Huérfanas, ubicada en Carmelo, Colonia y el Asilo de Huérfanos Dámaso Antonio Larrañaga ubicado en Montevideo. También se trabajó sobre otros edificios de interés como la Aduana de Oribe y sobre muestras de mampuestos obtenidas del Hospital Maciel y Atarazana de Montevideo.

En el caso de Asilo Larrañaga y Capilla de Calera de las Huérfanas fueron tramitadas y obtenidas las respectivas autorizaciones para realizar tareas de inspección visual, ensayos in situ y extracción de muestras cuando se entendió de interés, ante la Dirección general de Arquitectura de la UdelaR y la Comisión Nacional de Patrimonio Cultural de la Nación, dependiente del MEC, respectivamente.

3.3.1. Asilo Dámaso Antonio Larrañaga

3.3.1.1. Antecedentes

La obra se levanta en el predio ubicado entre Jackson, Eduardo Acevedo, Gonzalo Ramírez y San Salvador, predio donado por las señoras Martínez y Lermite, libre de construcciones. El proyecto original fue realizado por el arquitecto Víctor Rabú y comenzó a construirse en 1873, inaugurando el edificio conocido inicialmente como Asilo de Expósitos y Huérfanos en 1875. La Figura 3.38 muestra el edificio hacia 1895 aproximadamente (CMDf, referencia: 0565FMHB).



Figura 3.38. Edificio de Asilo Dámaso Antonio Larrañaga.

La historia del bien en relación a su valor patrimonial se inicia en 1976 cuando se declaró Monumento Histórico Nacional al edificio del Antiguo Asilo “Dámaso Antonio Larrañaga y a la “Parroquia Nuestra Señora del Huerto y San José”, quedando bajo tutela estatal según ley 14.440. En 1979 el edificio del Antiguo Asilo es desafectado y al año siguiente el padrón N° 16.432 fue empadronado a nombre del Consejo del Niño. En 1986 se afecta nuevamente el inmueble y un año después el Ministerio de Cultura decide su recuperación, llevando a cabo tareas de relevamiento, estudios preliminares, trabajos de apuntalamiento y consolidación de las construcciones existentes.

En 1996, por falta de recursos, el Poder Ejecutivo resuelve desafectar el Asilo, manteniendo bajo tutela solamente el Portal conteniendo el cuerpo central de la fachada San Salvador y a la Parroquia. En el 2000 el BHU se lo compra al Instituto Nacional del Menor y procede a realizar un concurso para la construcción de viviendas en el predio, que nunca se llegaron a construir. En el 2006 el Banco Hipotecario ofrece su venta a la UdelaR, quien define como destino del predio la Creación de una Facultad de Información y Comunicación, adquiriendo en 2007 el bien al BHU. Desde hace ya varias décadas el edificio se encontraba sin uso y alcanzando parcialmente estado ruinoso lo que motivó que en 2008 se cerrará parcialmente la calle de acceso por peligro de derrumbe y posteriormente se realizará el apuntalamiento de la fachada del Portal de Rabú, por parte de la UdelaR.

Actualmente se construye en este predio el edificio para la Facultad de la Información y comunicación de la UdelaR, conservando el acceso al ex asilo sobre la calle San Salvador, también conocido como Portal de Rabú, y la iglesia Nuestra Señora del Huerto y San José, obra del arquitecto Juan Tosi inaugurada en 1890; ambos con declaratoria de monumento histórico nacional. El nuevo proyecto conserva también un sector de las galerías de uno de los patios del ex asilo en la cual fueron llevadas adelante diversas actividades del proyecto.

3.3.1.2. Actividades realizadas

En acuerdo con la DGA de UdelaR y la empresa constructora encargada de la obra nueva en el predio fueron realizadas 4 visitas de inspección y pruebas de equipos. En las mismas se realizó una inspección y relevamiento de las estructuras murarias que se conservan del antiguo edificio del Asilo, documentando tipo de mampuestos, tipo de mortero, aparejo, espesores de muros y ancho de juntas. Fueron extraídas muestras de mampuestos para su análisis en laboratorio, así como se procedió a aplicar el equipo no destructivo Windsor Pin para determinación de la resistencia a penetración en morteros y ladrillos, y el equipo de ultrasonido. Las imágenes de la Figura 3.39 muestran estas pruebas en ejecución.



Figura 3.39. Aplicación de técnicas de Ensayos No Destructivos in situ.

Como avances parciales obtenidos de estas pruebas puede señalarse respecto de la resistencia a penetración que la calidad del mortero resulta evidente en la huella que deja el clavo de acero al penetrar en la junta.

En las juntas en mal estado (falta de cohesión de las capas superficiales) la destrucción abarca varios centímetros alrededor del lugar de impacto. Resulta dificultoso tomar la medida de penetración a través del calibre, debido al estado disgregado y a la irregularidad de la superficie resultante luego de aplicar el ensayo. Las juntas de morteros de reparación, donde se presume por su color, fue empleado mortero con cemento, resultan menos dañadas y la lectura de penetración además de inferior resulta menos imprecisa.

En cuanto a los resultados de ultrasonido, mostraron considerables diferencias en la amplitud en las zonas consideradas como originales y las zonas que fueron reparadas recientemente.

3.3.2. Capilla Calera de las Huérfanas

3.3.2.1. Antecedentes

De acuerdo a las fuentes documentales consultadas su construcción data del período comprendido entre los años 1741 y 1767, fecha en que fuera expulsada la Compañía de Jesús de nuestro país. Antecede a la presente una capilla original, por lo que se presume que la que se conserva fue construida en los últimos años del período mencionado sin conocerse fecha exacta del inicio de las obras.

La tecnología constructiva aplicada para su edificación es la de mampostería en piedra en cimentación y mampostería cerámica en paredes y cubierta. La Capilla conforma un cuerpo regular delimitado por una envolvente de muros perimetrales, que ocupa un área aproximada de 232 m² y altura estimada de 13 m al punto más alto de fachada este y oeste. En el período indicado fue completada su estructura muraria y la cubierta; asimismo se presume que fueron parcialmente ejecutados los trabajos de terminación (revocado) de las superficies de los paramentos. La cubierta abovedada es hoy inexistente y de acuerdo a las fuentes documentales colapsó tempranamente, sin que pueda precisarse la fecha de su caída. Fotografías de las primeras décadas del siglo XX documentan la permanencia de los restos de la bóveda al interior de la nave de la capilla.

El edificio sufrió daños adicionales a la caída de la cubierta, como los que se documentan en las imágenes del Álbum del Centenario de Carmelo de 1916. Estos daños refieren a la pérdida de sección de muro en esquina entre fachadas Este y Sur, formación de grietas y deformaciones especialmente acusadas en sector sureste y sur, de acuerdo a lo que puede apreciarse en las fuentes mencionadas (Figura 3.40).

De acuerdo a documentación suministrada y datos obtenidos del relevamiento in situ, la Capilla ha sido objeto de diferentes procesos de intervención entre los cuales destacan:

- 1938: colocación de 7 tensores entre pared norte y sur.
- 1951-52: construcción de vereda perimetral con talud empleando piedra de los cimientos de otras estructuras. Retiro de escombros de la bóveda caída, Se declara reconstrucción del extremo SO, construcción de viga perimetral superior y relleno de grietas con mortero de cemento Portland.
- 2002: eliminación de vegetación invasiva, consolidación de muros y revoques (consolidación de ladrillos sueltos, relleno de hendiduras en revoques).



Figura 3.40. Fotografía publicada en el Libro del Centenario, 1925.

3.3.2.2. Actividades realizadas

En junio de 2013 se realizó una visita de reconocimiento (Figura 3.41), para conocer y determinar el estado de conservación del monumento en base al detalle del mismo presentado en el informe del Proyecto de Actuación integral en Calera de las Huérfanas en clave de desarrollo local, llevado adelante por PNUD con la colaboración del País Vasco.



Figura 3.41. Visita de reconocimiento a Calera de las Huérfanas.

Los datos que siguen fueron tomados de dicho informe y confirmados en el sitio.

Mampuestos cerámicos:

Se han detectado diferentes piezas cerámicas, de producción artesanal, tales como ladrillos, tejas, piezas tipo “tejuelas” y piezas especiales que conforman molduras, pilastras, columnas adosadas, nichos, etc. En documentación histórica se menciona la producción de baldosas cuadradas y redondas, aunque no fueron encontrados vestigios de las mismas. Se han detectado al menos dos clases de ladrillos que difieren en dimensiones y coloración, pudiéndose establecer las características únicamente de los ubicados en sectores inferiores de la construcción, de acuerdo a los medios de inspección disponibles. Estas diferencias de coloración pueden responder a etapas de construcción sucesivas y/o a horneadas diferentes de los mampuestos. Se destaca especialmente el perfil de cambio de coloración sobre las fachadas Norte y Sur, en las cuales se observa un “escalonamiento” ascendente hacia la Fachada Este (Figura 3.42).



Figura 3.42. Perfil de cambio de coloración en la que se observa un “escalonamiento” ascendente sobre las fachadas Norte y Sur hacia la Fachada Este.

Este “escalonamiento” podría corresponderse con una primera etapa constructiva que hubiera contemplado el levantamiento de las hiladas necesarias para llegar al nivel de la bóveda del coro, hoy parcialmente conservada. Los mampuestos del sector inferior de los paramentos presentan dimensiones aproximadas de 43 cm de largo, 23 cm de ancho y 6 a 7 cm de alto. Estas proporciones se acercan a las dimensiones indicadas para ladrillos tipo “Mayor” o de “Iglesia” de acuerdo a disposiciones adoptadas por el Cabildo de Montevideo, hacia los primeros años del siglo XIX en su intento por normalizar el tamaño de las piezas.

Morteros de toma y morteros de revoque:

Se tiene constancia de la presencia de morteros en base a arena y cal para la toma de juntas entre mampuestos y para el revocado de los paramentos. Los mismos fueron en 2010 analizados en el LEMIT de la Plata confirmando su composición en base a aglomerante cal y como agregado arena de origen granítico.

Aparejo de los muros y alto de las juntas:

Se observa a la vista dado que es prácticamente inexistente el revoque en los paramentos. El mismo responde aproximadamente, para la fachada Sur al esquema general que se muestra en la Figura 3.43. No se aprecia la disposición de los mampuestos hacia el paramento interior ni las condiciones de traba entre los mismos en el espesor de los muros dado la inaccesibilidad al corazón de la masa muraria. El espesor de junta entre mampuestos es variable entre 2 y 4 cm.

La inspección realizada ha permitido detectar la resolución de algunos encuentros destacados entre los diferentes sectores y componentes constructivos que conforman los restos de bóveda. Algunos de estos detalles dan cuenta de la inexistencia de traba en ángulos y documentan la técnica constructiva aplicada. La Figura 3.44 señala el encuentro entre los planos concurrentes al ángulo de la sección de bóveda construida para resolver la descarga de la bóveda mayor, hoy inexistente, sobre los arcos y pilastras de los muros.

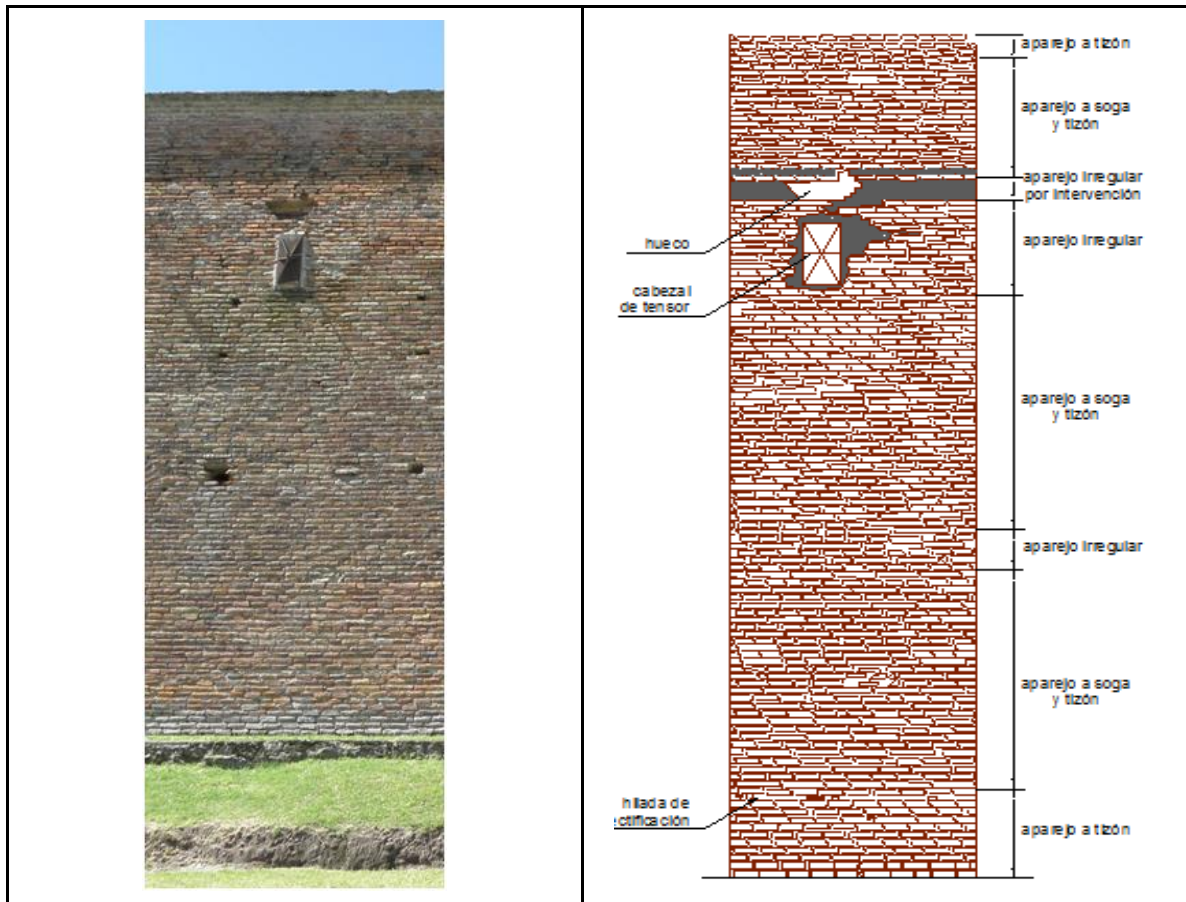


Figura 3.43. Detalle del aparejo de un sector de la fachada sur de la Capilla.



Figura 3.44. Detalle de encuentro de los planos concurrentes al ángulo de la sección de bóveda de apoyo de la bóveda mayor.

Con la documentación recabada y a partir de la inspección realizada se tomó contacto con el equipo de ingenieros agrimensores que realizaron el escaneo tridimensional del monumento, quienes aportaron el modelo digital. Dicho modelo permite conocer el grado de deformación de la fachada sur de la capilla, el cual mereció un análisis particular dado la entidad del desplome que presenta en la actualidad. La elaboración de diferentes hipótesis acerca de su estabilidad y condición de seguridad, así como la discusión acerca de la pertinencia de adoptar medidas de restauración más profundas, como la de techar el edificio, fueron discutidas por el equipo y dieron lugar al trabajo presentado al congreso internacional REHABEND 2014, el cual se adjunta al final del presente informe.

3.3.3. Aduana de Oribe

3.3.3.1. Antecedentes

Al iniciarse el asedio de la Plaza de Montevideo, en febrero de 1843, el jefe sitiador Gral. Manuel Oribe, asentado en el cerrito de la Victoria, estableció un punto de salida al mar para obtener vías de comunicaciones prácticas y seguras eligiendo para ello la zona del Buceo. Los buques de guerra argentinos, que sitiaban al puerto de Montevideo, vigilaban y protegían aquella línea de navegación, utilizaban la zona del Buceo para aprovisionarse de víveres frescos y agua potable. Las edificaciones que permitieron la instalación de una aduana el sitio se corresponden con el antiguo Saladero de Seco. Cuando se firma la Paz del 8 de octubre de 1851 el edificio quedó como refugio de pescadores y para junio de 1916, la Aduana de Oribe se convirtió en la primera sede del Batallón de Ingeniería Nº 1. A partir del 20 de diciembre de 1987 es la sede del Batallón Simbólico y Museo del Arma de Ingenieros, destino que se mantiene hasta el día de hoy.

El edificio tal como se puede apreciar el día de hoy resulta de la restauración de la construcción que mantiene su configuración y preserva su sistema constructivo original. Fue declarado Monumento Histórico Nacional en 1975. Como puede apreciarse en la Figura 3.45, mantiene a la vista los muros de ladrillo expuestos hacia el exterior como hacia el patio interior que configura el acceso del viejo edificio.



Figura 3.45. Vista desde la Rambla de la Aduana de Oribe.

3.3.3.2. Actividades realizadas

Fueron aplicadas las técnicas de termografía infrarroja y geo-radar para determinar la condición de humedad de los muros exteriores del edificio expuestos a los diferentes puntos cardinales. Pudo apreciarse las diferencias de temperatura superficial de cada una de estas fachadas en virtud del asoleamiento y la exposición a vientos, así como ubicar zonas de mayor contenido de humedad de acuerdo a las figuras que se muestran a continuación. El equipo de geo-radar permitió a su vez confirmar cuando las diferencias de temperatura detectadas con la cámara termográfica corresponden a la presencia de humedad o a la diferente exposición u otra propiedad del muro como el material de reparación (Figura 3.46 y 3.47).

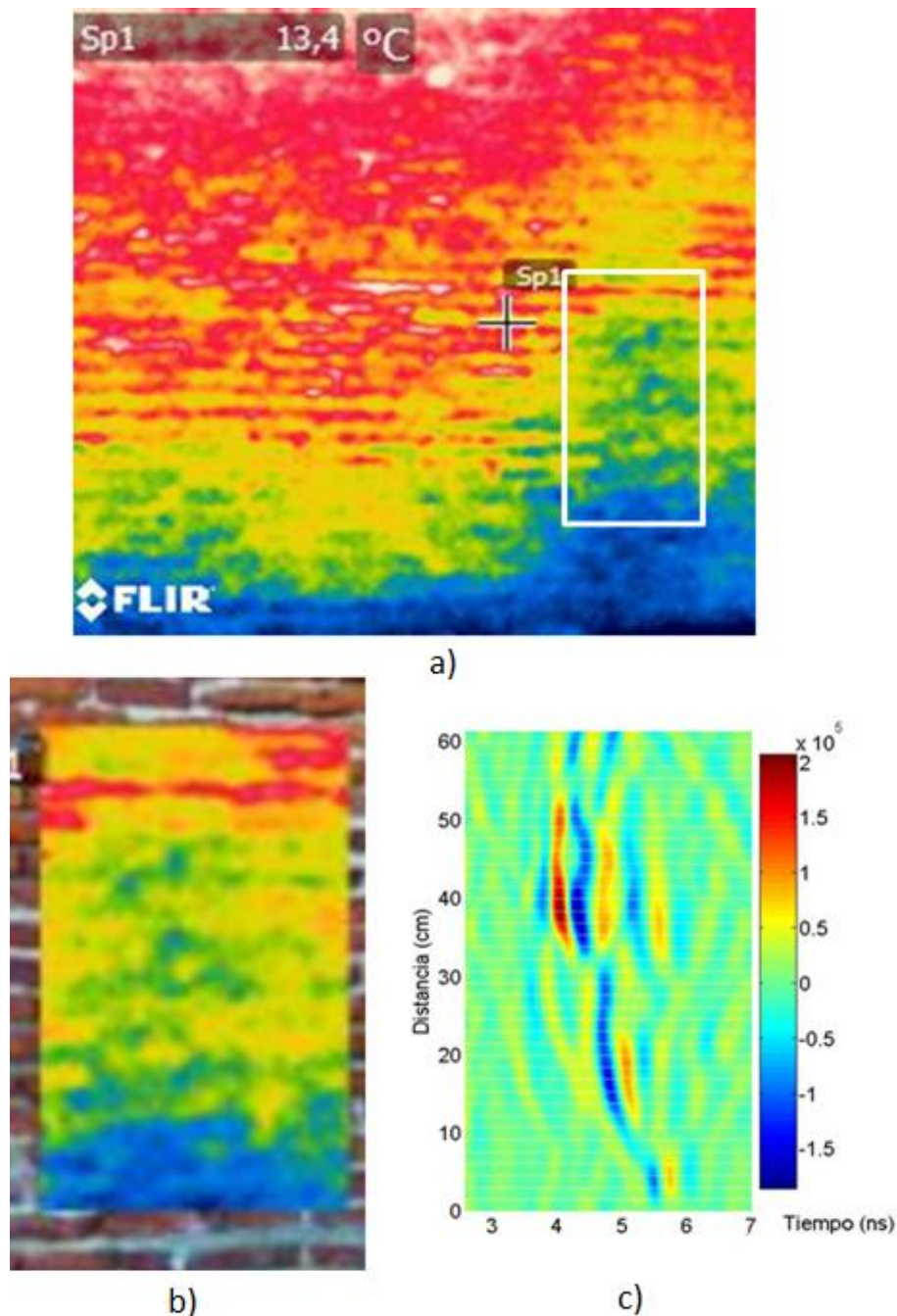
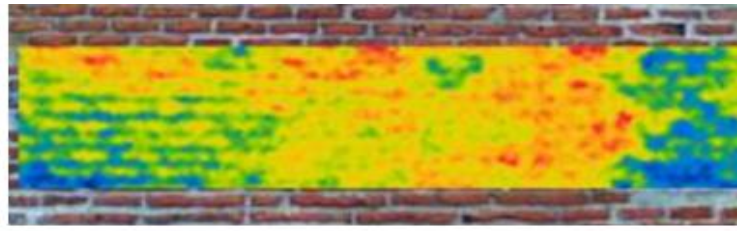
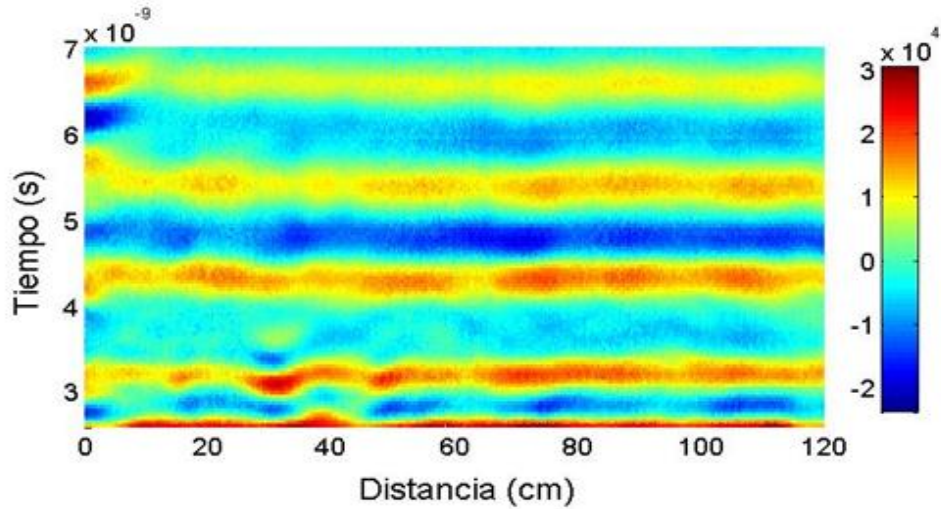


Figura 3.46. a) Imagen Termográfica donde se aprecian zonas con diferente temperatura, que potencialmente son indicadores de diferentes niveles de humedad. b) detalle de zona con variación de temperatura. c) Señal obtenida con el geo-radar donde se muestra variación del tiempo de reflexión de la onda, debido a un cambio en la constante dieléctrica a lo largo de la zona analizada (fuerte indicador de cambios en el contenido de humedad).



a)



b)

Figura 3.47. a) Imagen termográfica de un muro donde se muestran zonas con diferentes temperaturas, b) Imagen del geo-radar donde se muestra que no hay diferencias de humedad.

3.4. Actividad 4: Formulación de recomendaciones metodológicas para el control y evaluación de sistemas murarios estructurales en mampostería cerámica de valor patrimonial. Redacción de informe final y preparación de material de difusión

Los resultados alcanzados se exponen y analizan en el ítem siguiente, resultando en la metodología que sintetiza los avances alcanzados en la ejecución del proyecto. Se han realizado diferentes instancias de divulgación y enseñanza correlacionadas con estos resultados, tal como se detalla en el ítem 6.

4) Indique los resultados obtenidos en el proyecto.

4.1. Resultados de la revisión bibliográfica y de antecedentes

4.1.1. Antecedentes internacionales

Un análisis de la producción bibliográfica actual relativa a la conservación de las estructuras arquitectónicas de valor patrimonial permite confirmar que las estructuras en mampostería cerámica han sido incluidas en numerosas publicaciones en las cuales se documentan estudios relativos a mampuestos, morteros y componentes estructurales. Estas publicaciones provienen especialmente de los países europeos en virtud de las características de su patrimonio cultural y en respuesta a las fuertes políticas de preservación que los respectivos gobiernos han implementado. Responden mayormente a investigaciones relacionadas con la caracterización de componentes materiales, diagnóstico de las lesiones frecuentes y determinación de los métodos idóneos de preservación. Entre los programas de investigación más destacados pueden mencionarse el caso del programa “Onsite investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings” que lleva adelante la Comunidad Europea y el proyecto “Strategies for the assessment of historic masonry structures with Non Destructive Test” a cargo del RILEM.

En todos los casos, los avances alcanzados confirman que la mampostería cerámica representa en sí misma una tecnología particular, cuya singularidad reside fundamentalmente en la heterogeneidad de sus materiales y soluciones constructivas, logradas a partir del trabajo conjunto de mampuestos y mortero.

En particular, pueden mencionarse los trabajos realizados en el Politécnico de Milán, Italia por la investigadora L. Binda y su equipo, quienes sostienen una vasta experiencia relacionada con el tema y presentaron en 2005 el estado del arte de la investigación en edificios históricos en Italia, señalando las aplicaciones de diferentes técnicas no destructivas para la evaluación estructural. Este estado del arte resume los resultados alcanzados por su equipo de trabajo en relación a la utilidad y aplicabilidad de diferentes procedimientos experimentales, por ejemplo el vinculado al Radar penetrante de tierra para verificar el espesor de muros de mampostería y para identificar el efecto de la humedad por capilaridad presente en muros patrimoniales (Binda et. al, 1994).

Otros centros de referencia en la materia están constituidos por instituciones españolas como el instituto Andaluz del Patrimonio Histórico IAPH de Sevilla y la Universidad de Granada. G. Cultrone, profesor de la segunda institución que ha desarrollado en este sentido estudios de caracterización de los materiales cerámicos cuyos resultados parcialmente pueden leerse en el cuaderno técnico publicado por el IAPH en 2006. (Capítulo Ladrillos, PH Cuadernos, Programa de normalización de estudios previos aplicados a bienes inmuebles, España. 2006).

Dos de las principales preocupaciones que surgen de la bibliografía especializada en este tema tienen relación con el alcance de cada una de las técnicas aplicables para el diagnóstico de las estructuras murarias y con las afectaciones que estas generan en el elemento constructivo analizado. Esto último constituye un aspecto que resulta especialmente relevante dado que en general los bienes a estudiar sustentan valores culturales que no pueden ser vulnerados por campañas experimentales destructivas. Ya en 2001, Bob de Vekey (citado por I. Borrell, Climent Molins, 1996) propuso en este sentido una clasificación de las técnicas en función del grado de alteración provocado en las estructuras, señalando la existencia de 5 niveles: negligible, ligero, medio, significativo y serio (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Clasificación del grado de alteración provocado en las estructuras.

Grado de alteración provocado	Descripción	Ejemplos	Acciones de reparación requeridas	Criterio de aceptación de aplicabilidad
No significativo	Efecto no significativo, visible sólo si es conocido el lugar de aplicación, no visible a simple vista	Marcas de rebote de esclerómetro Manchas de agua Incisiones	Ninguna, Cepillado	En todas las estructuras
Ligero	Visible a distancias cercanas, en general no detectables en una visión global	Huecos de extracción de muestras con extractor de pequeño diámetro Daños de penetrómetros de reducido diámetro	Requiere restituir faltante con mortero adecuado	En todas las estructuras con especial cuidado en edificios patrimoniales, en sectores apreciables por el usuario
Medio	Molesto, puede generar problema de durabilidad local	Extracción de unidades pequeñas, huecos de extracción de muestras de pequeños diámetros con profundidad	Reemplazo de la unidad con morteros especialmente diseñados	En todas las estructuras con especial cuidado en edificios patrimoniales, en sectores apreciables por el usuario
Significativo	Alteración evidente, exige medidas de seguridad si no puede ser reparado inmediatamente (barrera, recubrimiento, etc)	Pequeñas áreas de mampostería removidas, extracción de muestras de diámetros significativos	Reconstrucción con materiales apropiados	Aceptable temporariamente en edificios modernos pero no aceptable para estructuras patrimoniales
Serio	Alteración muy evidente que requiere medidas de seguridad si no puede ser reparado inmediatamente, puede exigir medidas de retransmisión de esfuerzos de la estructura con elementos auxiliares	Grandes áreas de mampostería removidas o ensayos de importancia desarrollados in situ.	Reconstrucción con materiales apropiados	Sólo admisibles en edificios que no están abiertos al público y usuarios

Posteriormente, en la Universidad de Leuven, Bélgica, Schueremans et al., 2002, desarrollaron trabajos de investigación considerando ambos aspectos presentando la Tabla 4.2 donde se indica el carácter de cada una de las técnicas (No destructiva (ND), Semi destructiva (SD) o destructiva (D), su aplicación in situ o en laboratorio y el principio de funcionamiento.

En Alemania, Maierhofer (2008) presenta asimismo un trabajo indicando la combinación de diferentes técnicas no destructivas para la evaluación estructural de estructuras de mampuestos el cual fue presentado en las actas de la International RILEM Conference de ese año.

Tabla 4.2 Relación de técnicas destructivas, semi destructivas y no destructivas.

Technique	D/SD/ND ID/IL	Principle, application, reference
<u>Historic research</u>	ND IS+IL	Information about the geometry of the structure, used materials, loads, strengthening, structural events,...[11]
<u>Visual inspection</u>	ND IS	Is being used in all cases. This still is the cheapest and often also the most efficient, non-destructive test method. Use of additional guidance, e.g.: Damage Atlas and expert system [12]
<u>Photo-grammetry</u>	ND IS	Evolution of large cracks en relative displacements. Is often used for measuring and documenting of damage of structural elements and materials [13]
<u>Electric resistivity</u>	ND IS	Qualitative interpretation of the global condition of masonry (cavities, layering of material,...) Very valuable to check the effectiveness of executed consolidation injection [14,15]
<u>Radiography</u>	ND IS	By radiation of the element by gamma-rays discontinuities that are located deep in the masonry (reinforcement, cavities, trusses,...) can be identified and located. Both sides of the element have to be admissible. Only very powerful apparatus can be used for masonry. Safety precautions have to be taken into consideration [16,17]
<u>Infra-red thermo-graphy</u>	ND IS	Identification of the layering of the structure (e.g.: hidden behind stucco), traces of hidden cavities and discontinuities [16,17]
<u>Magnetic methods</u>	ND IS	Locating of iron elements in thick masonry walls (e.g.: reinforcement bars, connection clamps,...) [16,17]
<u>Radar</u>	ND IS	Receiving of transmitted or reflected electric energy allows to identify different layers, hidden cavities, old foundations, ... [16,17]
<u>Mechanical pulse velocity</u>	ND IS	By the impact, waves of 0.3-5.0 kHz are sent into the material. The wave velocity is a measure for the density and integrity of the material [16,17].
<u>Ultra sonic</u>	ND IS	Only useful for homogeneous materials, like natural stones. In case of heterogeneous materials (masonry) the penetration depth is too small.
<u>Vibration tests</u>	ND IS	Relative stiffness, control of possible progressive damage of the structure in time
<u>Endoscopy</u>	ND/SD IS	Check out of the inner structure of the masonry. Use in drilling holes. Can be combined with photographs or video images [18].
<u>Flat jack</u>	(S)D IS	Quantitative determination of the stress-strain relation of masonry (SD) and possibly also compressive strength (D) [10]
<u>Proof loading</u>	ND IS	Check of the resistance of the structure for the expected loading. Is ND when the loading remains in the elastic area
<u>Permanent Monitoring</u>	IS	Permanent (automatic) data-acquisition of parameters that are of importance for the structural behaviour, such as: high accurate levelling devices (HLS), invarwire measurements,...
Legend: D:Destructive; SD: Semi-Destructive; ND:Non-Destructive IS:In Situ; IL: In Labo. Techniques used in Belgium are underlined		

En el trabajo presentado por Bosiljkov, V. et al. se comienza confirmando que el conocimiento del comportamiento estructural de la mampostería existente requiere un enfoque múltiple, con la correcta aplicación de las metodologías de diagnóstico y evaluación. El autor reafirma la idea de que el comportamiento estructural de la mampostería se puede entender si se conoce la historia de su construcción, su geometría, las características de los materiales constituyentes y las características de la mampostería como material compuesto. Con el fin de obtener todos estos datos se plantea necesaria la realización de un programa eficaz en campo, que implique una combinación de técnicas destructivas, mínimamente destructivas y no destructivas. Además, la eficacia de las metodologías aplicadas para la evaluación de las estructuras de mampostería históricas depende, en gran medida, del tipo de estructura investigada, así como del modelo numérico apropiado para el análisis.

Tras los resultados de los recientes proyectos de la Unión Europea, un amplio conjunto de datos sobre la eficacia de las diferentes técnicas, dependiendo del tipo de problema, se recogieron y analizaron. En este marco, varias estructuras patrimoniales de mampostería, con características diferentes, de Eslovenia (el Castillo Pišce, el Monasterio Cartujo en Ziče, y una casa de piedra

de mampostería, típica de la región Soča Valley) se investigaron por medio de diferentes técnicas y modelaron numéricamente. La conclusión final fue que ninguna técnica es autosuficiente para la solución de un problema particular, por lo que una combinación de diferentes técnicas destructivas, mínimamente destructivas y no destructivas se debe realizar para diagnosticar el estado de las estructuras de mampostería. De todas formas, en el proceso de evaluar una estructura incluso una única técnica de investigación es mejor que nada, puesto que el esfuerzo siempre será recompensado.

Todas estas afirmaciones, han sido de alguna manera recogidas en la normativa internacional publicado por AENOR como norma UNE-EN 41805, “Diagnóstico de edificios históricos” aprobada en 2009 y que en su parte 5: “Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de fábrica”, detalla claramente cómo proceder para la ejecución del estudio patológico incluyendo en reiteradas ocasiones instancias de inspección especial, es decir, actividades de comprobación y ejecución de ensayos para confirmar y evaluar características de los materiales y unidades constructivas. Este documento normativo, respalda la idea de que las técnicas de ensayo, especialmente diseñadas para la realización de los estudios de edificios patrimoniales in situ, han tenido en las últimas décadas un amplio desarrollo por resultar especialmente idóneas por el mínimo impacto generado sobre el elemento estudiado.

Acompañan esta normativa los documentos previos elaborados por la Organización Internacional de Normalización (ISO) a través de su comité técnico TC 179 Masonry y el Laboratorio Internacional RILEM en relación a las técnicas de ensayos experimentales aplicables a estas obras.

Si el campo de la mampostería en su conjunto resulta por demás complejo y diverso, esto deriva entre otros aspectos, como se ha mencionado anteriormente, de la propia diversidad de morteros y ladrillos. Es por ello entonces que es posible referir varios trabajos publicados dedicados especialmente al análisis de alguno de estos materiales.

Si se considera en primer lugar los morteros, entre estos trabajos pueden citarse por ejemplo el de Haach V. et al., quienes estudiaron la aplicación de los ensayos acústicos para la caracterización mecánica de los morteros. Las pruebas acústicas de resonancia aparecieron recientemente como una alternativa no destructiva aplicable para la determinación de las propiedades elásticas con buena precisión y bajo costo. Además, la misma muestra puede ser analizada repetidamente si es necesario, lo que simplifica los procedimientos de laboratorio para el seguimiento a largo plazo.

El trabajo presenta una evaluación experimental del módulo de elasticidad de distintos morteros a través de técnicas convencionales (destructivas) y acústicas (no destructivas), basándose en la norma británica para muros de mampostería. Para ello se realizaron cuatro mezclas de mortero variando las proporciones de cemento, cal y agua y se confeccionaron una serie de especímenes cilíndricos de 50 mm de diámetro y 100 mm de largo. Las muestras fueron sometidas a compresión uniaxial, lo que permitió la determinación del módulo de elasticidad estático, y a pruebas acústicas, realizadas antes de las destructivas, lo que permitió caracterizar el módulo de elasticidad dinámico. Las conclusiones fueron básicamente dos: por un lado, se obtuvo una muy buena correlación entre módulos de elasticidad dinámicos y estáticos, de manera que el segundo puede estimarse fácilmente a partir del primero; y por otra parte, el módulo elástico dinámico presenta una mejor correlación con la resistencia a la compresión que el módulo de elasticidad estático.

Otra referencia de interés la constituye el trabajo presentado por Luque et al., donde se controló la carbonatación comparando morteros de cal en pasta y cal en polvo. El objetivo principal de este estudio fue determinar cuál de los morteros, hechos con cal en polvo o pasta, presenta tasas más elevadas de carbonatación (o endurecimiento) en distintos periodos de tiempo. El proceso de carbonatación en los morteros se registró periódicamente (a los 30 días, 4 meses, 8 meses y 12 meses) mediante el uso de diferentes técnicas analíticas: análisis de Difracción de Rayos X (DRX) y termo-gravimetría.

Mediante la técnica de análisis de DRX se llegó a conocer la composición mineralógica de los morteros y, por lo tanto, conocer cuál de las fases minerales que comprende el ciclo de la cal (CaO ; calcita, CaCO_3 ; o portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) predomina en cada periodo de tiempo establecido. De los resultados obtenidos con esta técnica se dedujo que el mortero en el que más rápido y en mayor proporción se produjo la reacción del hidróxido de calcio a carbonato de calcio (fraguado de la cal) es uno de los elaborados con cal apagada en polvo; observándose que a los 12 meses ya alcanza un 60 a 70 % de la carbonatación. En el resto de los morteros que se estudiaron, para el mismo intervalo de tiempo, apenas se supera el 25 %.

Con la técnica de termo-gravimetría el principal dato que se ha valorado ha sido la pérdida de materia (en peso) que se produce en los morteros de cal en el intervalo de temperatura comprendido entre 25 y 1000°C. El primer dato significativo se produce en torno a los 100° C con la pérdida del agua de amasado; otro valor revelador entre los 400 y 550° es debido a la pérdida del agua estructural de la portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$; y el tercero entre los 750 y 900° con la pérdida del anhídrido carbónico, CO_2 , de la calcita, CaCO_3 . Por lo tanto, se pudo conocer, al igual que con la técnica de análisis de DRX, el estado de carbonatación de los morteros para cada período de tiempo programado. Lo mismo que se dedujo a partir de los resultados obtenidos mediante DRX se observó mediante la técnica de termo-gravimetría. Esto es que uno de los morteros elaborados con cal apagada en polvo (el mismo del caso anterior) es el que mayor porcentaje de CO_2 contiene, siendo el que alcanza una mayor tasa de carbonatación en un año.

Una vez concluidos los ensayos en el período de tiempo establecido se constató que las técnicas empleadas son bastante resolutivas, demostrándose claramente cómo se va produciendo la carbonatación en el interior de los morteros y su forma progresiva a medida que va pasando el tiempo. Además, este trabajo demostró que la cal en polvo puede dar tasas de carbonatación comparables e incluso más altas a las de la cal en pasta tradicional. Esto puede explicarse por una composición óptima de la materia prima y por un proceso de fabricación de la cal en polvo muy controlado. La velocidad de carbonatación es un parámetro favorable en la evaluación de la calidad de un mortero de cal pero no el único. Finalmente, en este estudio se remarcó que el proceso de carbonatación en ninguno de los morteros se ha completado en un año.

Si se toman en cuenta los avances relativos a mampuestos, surgen como referencias en España entre otros, los trabajos de G. Cultrone y P. López Arce y P. López Sánchez dedicados al estudio de ladrillos históricos. Más allá de los resultados particulares de sus estudios es interesante recalcar que los avances resultan aún escasos en cuanto al estudio de las características físicas y mecánicas del material cuando se obtienen a través de técnicas no destructivas; así como en correlaciones con la dinámica de las fases minerales del ladrillo según su temperatura de cocción, aspecto crucial para el diagnóstico y la producción de piezas de restitución en obras de restauración.

4.1.2. Antecedentes regionales y nacionales

Todos estos aportes internacionales han tenido lógicamente repercusión en la región, de manera que es posible también referir publicaciones como la de Alcocer en México, quien en el marco de programas estatales de rehabilitación de viviendas, presenta una revisión exhaustiva de las técnicas disponibles para el diagnóstico de estructuras en mampostería cerámica y discute su aplicabilidad. La Tabla 4.3 resume sus conclusiones al respecto.

Tabla 4.3 Aplicabilidad de métodos de evaluación y ensayos in situ

Condición	Método de prueba																		
	Inspección visual	Martillo de rebote	Extracción	Barrenado	Penetración	Ensayos a corte	Corazones	Adherencia mortero-pieza	Gatos planos	Velocidad de pulso	Impacto eco	Magnético	Radiografías	Termografía infrarroja	Microondas	Resistencia de la mampostería	Potencial de corrosión	Petrografía	Pruebas de carga
Resistencia de las piezas																X			
Resistencia en el plano		X	X		X	X	X	X	X	X	X								X
Uniformidad en el plano	X	X	X	X	X			X	X										
Deformabilidad en el plano								X											X
Nivel de esfuerzos en el plano								X											
Localización de grietas	X								X	X		X							
Movimiento de grietas	X																		
Desempeño ante carga																			X
Tamaño de barra, localización y recubrimiento											X	X	X						
Localización de anclas											X	X	X						
Vacios en mortero fluido	X								X	X		X	X						
Vacios en la mampostería	X								X	X		X	X						
Corrosión del acero de refuerzo	X													X		X			
Problemas de durabilidad	X								X	X				X				X	

En nuestro país, desde el ámbito académico, en la Facultad de Ingeniería se desarrolló un grupo que estudió las propiedades de la mampostería nacional creando un documento con recomendaciones (IET). Rodríguez G. et al. (1995) presentaron en relación a ladrillos, estudios sobre la influencia del método de encabezado de mampostería en los valores de ensayo obtenido. Más recientemente han surgido nuevas iniciativas dirigidas a la formación de especialistas en el área de intervención y al desarrollo de trabajos de investigación. Efectivamente, desde el año 2009 la Facultad de Arquitectura de la Universidad de la República viene desarrollando el curso de Diplomado en Intervención en el Patrimonio arquitectónico y paralelamente, en materia de investigación han sido desarrollados, entre otros, los siguientes proyectos:

- Compresión de probetas de mampuestos cerámicos reforzadas con fibra de vidrio (Facultad de Arquitectura, 2004).
- Intervención estructural en obras de reciclaje (Facultad de Arquitectura, 2002).
- Evaluación estructural de construcciones existentes de mampostería cerámica portante, (Facultad de Arquitectura, 2008).
- Patrimonio en color ladrillo. Mampostería Cerámica de Valor patrimonial Montevideo, siglo XIX en Montevideo. Tecnología, reconocimiento y preservación. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño. Argentina. 2011.

Es asimismo destacable el trabajo llevado adelante por Gea et al. (2013), en el cual se utilizó el geo-radar para verificar la efectividad de un método aplicado para deshumidificar una iglesia con alto valor patrimonial en Salta, República Argentina.

4.1.3. Revisión bibliográfica y relevamiento sobre la configuración habitual de las estructuras murarias aplicadas en edificios patrimoniales nacionales y sus patologías frecuentes

El estudio de las características de los muros estructurales que forman parte de los edificios patrimoniales debe necesariamente ser abordado a través del estudio de la historiografía nacional, los tratados de construcción que se presume puedan haber sido empleados como referencia por los técnicos responsables de los diferentes edificios y el relevamiento directo de obras y de sus respectivos permisos de construcción.

Entre las referencias bibliográficas puede citarse al arquitecto Juan Guiria que en su libro la arquitectura en el Uruguay, de 1955, para el caso de Montevideo indica la existencia de una cierta regla general de construcción a partir de la cual, los muros de carga se construían de 60 centímetros de espesor y conforman las fachadas y los muros inmediatos paralelos a estas, así como los muros paralelos a las medianeras. Este espesor significaba el empleo de un ladrillo dispuesto de soga y otro a tizón para completar el espesor total. La Figura 4.1 muestra como estos espesores se reducían en las plantas altas a 40 centímetros en muchos casos y señala el aparejo visto desde el interior y exterior de un muro de fachada correspondiente al edificio residencial ubicado en Pérez Castellano 1301, Ciudad Vieja de Montevideo.

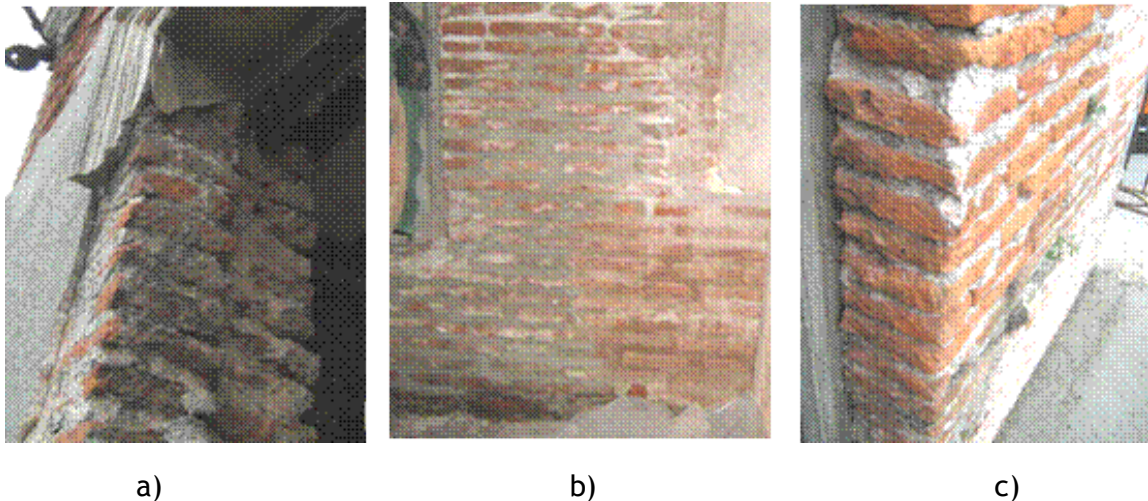


Figura 4.1: Muro de carga de fachada Vivienda en Perez Castellano 1301: a) Jamba fachada P. Alta, b) Paramento interior fachada P. Baja, c) Paramento exterior P. Alta

El relevamiento realizado en el marco del presente proyecto ha demostrado que también es posible encontrar espesores mayores a los indicados por Guiria, tal como en el caso de la residencia que actualmente ocupa la embajada francesa en Montevideo (originalmente casa de Félix Buxareo) con fachadas de 80 centímetros de espesor, que se obtienen al disponer un mínimo de dos ladrillos a tizón en cada hilada. Esta variación de espesores se confirma también en otros edificios no residenciales, como Capilla de Calera de las Huérfanas cuyos detalles se incluyen en el capítulo 3.1.4.

Como es lógico, todos los muros portantes, deben a pesar de su rol resistente oficiar de cerramientos de los espacios interiores de los edificios y en calidad de tales deben permitir la conectividad entre locales. Esta condición introduce en ellos la dificultad de abrir vanos y resolver la descarga de los sectores de muro sin continuidad por la presencia de los huecos. Para ello se incorpora en los edificios históricos un dintel, en general resueltos con los propios mampuestos, conformando perfiles de diferentes geometrías.

En este sentido puede leerse en los diferentes tratadistas diversas soluciones para la ejecución de estos dinteles de acuerdo a su perfil. En el caso de dinteles horizontales los mismos eran

resueltos incorporando un “cargadero”, pieza especialmente dispuesta en el plano horizontal, por lo general en madera, que trasladaba las cargas hacia sus extremos y que se insertaba en profundidad en los sectores del muro lateral. En el caso de dinteles de frente curvo (con sección transversal horizontal o abocinada), la técnica aplicada introducía el arco, confiando en la distribución de los esfuerzos de compresión desde la clave hasta la base para trasladar la carga del muro hacia los laterales del vano. En cuanto a las jambas de los vanos, la tradición constructiva proponía resolver estos elementos en forma abocinada (abriendo un ángulo mayor a 90° respecto al plano del paramento), para lo cual los mampuestos eran cortados según el ángulo deseado o bien dispuestos según la dirección buscada, completando con mampuestos partidos los vacíos que generaba esta disposición irregular. La Figura 4.2 muestra las soluciones constructivas de dintel y jambas propuestas por Juan de Villanueva en su tratado El Arte de la Albañilería de 1827 y que se han podido detectar en casos nacionales.

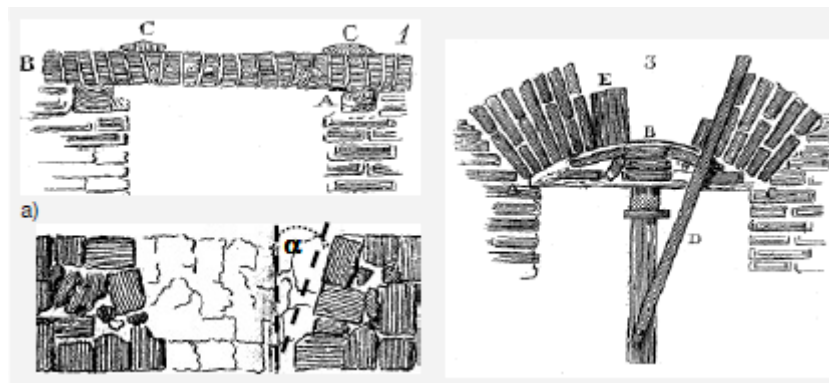


Figura 4.2: Soluciones constructivas de dintel y jambas

Para cada una de estas variantes formales se define una forma particular de disponer los mampuestos cerámicos, empleando las mismas piezas utilizadas en el resto del muro sin confeccionar piezas especiales, salvo casos excepcionales. Esto significa que el ajuste dimensional necesario para respetar la directriz del dintel, era confiado a la junta de mortero cuyo espesor resulta por tanto variable. Implica a su vez, una diferencia sustancial con la mampostería en piedra donde es habitual tallar piezas conformadas de acuerdo a los ángulos definidos por su posición en el dintel.

Algunos de los aparejos más utilizados en Montevideo, en los que se emplearon los ladrillos cerámicos tradicionales, corresponden al tipo de dintel horizontal con ladrillos a sardinel, en espina de pez o “en bolsón”. Otros dinteles en arco se resolvieron con arcos de medio punto, ojivales, escazanos, de herradura y de carpanel. Un punto adicional a resolver se concentra en el arranque de estos dinteles, que deben proporcionar el asiento suficiente a las piezas que definen la disposición del conjunto (Figura 4.3)

Las imágenes de las Figuras 4.4 y 4.5 muestran la resolución de muros y dinteles del edificio Atarazana de Montevideo, Monumento histórico nacional ubicado en la ciudad vieja de Montevideo y los vanos en arranque de bóveda de la Capilla de Calera de las Huérfanas. En ambos edificios se han constatados varias de las precisiones realizadas tanto por Giuria como por Villanueva.

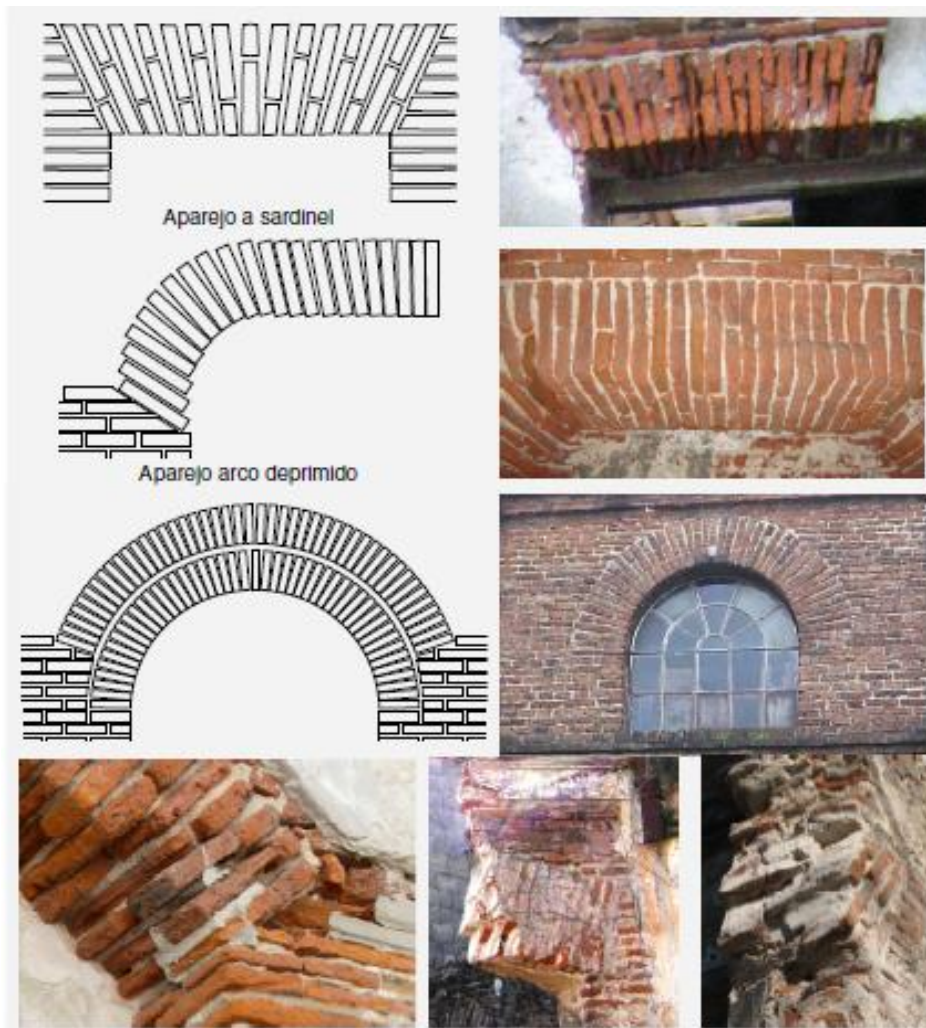


Figura 4.3: Diferentes tipos de dinteles.



Figura 4.4: Muros y dinteles del edificio Atarazana de Montevideo.



Figura 4.5: Detalle de vanos en arranque de bóveda de la Capilla Calera de las Huérfanas (se observan las jambas abocinadas y los dinteles en arco).

De los estudios previos consultados y a partir del relevamiento realizado en este proyecto se puede afirmar que a lo largo del siglo XIX, los criterios estructurales y formales de los diferentes componentes constructivos se mantuvieron prácticamente inalterados, reproduciendo soluciones para cimientos, muros, tabiques y azoteas según reglas prácticas ampliamente difundidas.

En relación a las patologías frecuentes en estructuras murarias, cuando se atienden los aspectos estructurales deben ser consideradas en primer lugar las patologías que afectan su desempeño mecánico, relacionadas por ejemplo con la ocurrencia o acción de esfuerzos excesivos, cargas imprevistas por accidentes o alteraciones y déficits en el dimensionado original de los elementos. Complementariamente deben considerarse lesiones que afectan propiedades físicas y químicas de los materiales (alterando su cohesión interna o su estabilidad volumétrica y formal por ejemplo), por cuanto estas en el transcurso del tiempo y en la medida en que se generalizan podrían afectar también el comportamiento mecánico estructural.

La norma UNE-EN 41805 referida al diagnóstico de edificios históricos, aborda este tema agrupando las patologías más frecuentes que afectan las estructuras murarias en cerámica en patologías de los materiales y patologías de las unidades estructurales. Estas últimas incluyen las que se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Patologías de unidades estructurales.

Patología	tipo	Localización frecuente
Colapso		
Movimientos y deformaciones en muros	Desplome	Muros, total o parcialmente.
	Rotación	
	Abombamiento	
	Alabeo	
Fisuras y grietas en muros		Encuentros de muros, sectores centrales
Desprendimiento de sectores de muro		Hojas de muros en sectores centrales con falta de arriostramiento
Descuelgue de dovelas de arcos y bóvedas		Intradós de arcos y bóvedas
Desprendimiento de piezas de arcos y bóvedas		En clave de arcos y bóvedas
Asientos de arcos y bóvedas		Arranques y riñones
Fisuras y grietas intradós/extradós de arcos y bóvedas		
Desprendimientos de piezas en salientes y voladizos		
Humedades	Capilares	Zonas inferiores en contacto con el terreno
	Por infiltración	
	Por condensación	
	Accidentales	Zonas escasamente ventiladas

A partir del trabajo de relevamiento de edificios históricos de valor patrimonial nacionales, han podido detectarse todas estas patologías. La Figura 4.6 por ejemplo muestra la presencia de deformación en un muro perteneciente a los restos del Monumento Calera de las Huérfanas, a punto de colapso, el desprendimiento de piezas cerámicas de la bóveda del coro y del dintel del acceso principal de la Capilla del mismo monumento y el resultado del colapso de la bóveda de esta capilla, que expuso a la cabeza de los muros a la acción de los agentes ambientales durante muchas décadas.

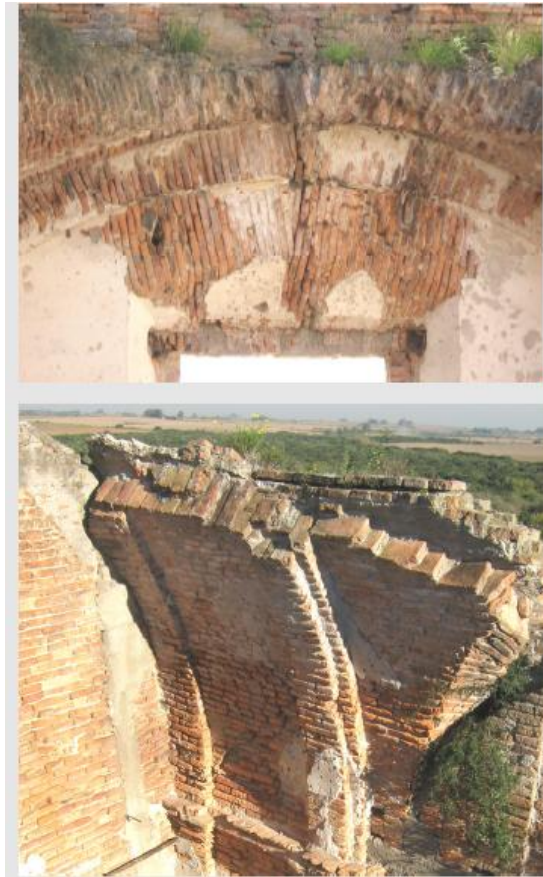


Figura 4.6. Muro perteneciente al edificio de Calera de las Huérfanas.

4.1.4. Síntesis de la revisión bibliográfica y de antecedentes

De lo antes expuesto puede afirmarse que la defensa y puesta en valor de los atributos patrimoniales de estructuras murarias requiere implementar acciones de evaluación y recuperación fuertemente comprometidas con las características tecnológicas inherentes a cada bien, implicando por esto, el conocimiento profundo de sus estructuras.

Existe consenso entre los principales investigadores e instituciones abocadas al análisis de la temática que una metodología general de evaluación para estructuras en mampostería cerámica debe basarse en la determinación conjunta e integrada de su constitución material, sus propiedades físicas y mecánicas y sus cualidades de durabilidad. Esto conduce a la determinación de la composición mineralógica y textura de sus materiales, la resistencia a compresión, resistencia al cizallamiento, módulo de elasticidad, grado de cohesión interna y homogeneidad y porosidad, permeabilidad y absorción al agua entre otras propiedades.

Los métodos aplicables para realizar esta evaluación deben considerar, tal como lo consigna la normativa internacional y las cartas internacionales relativas al patrimonio arquitectónico, instancias de inspección especial, es decir, actividades de comprobación y ejecución de ensayos para confirmar y evaluar características de los materiales y las unidades constructivas.

Esto explica claramente el por qué las técnicas auxiliares, especialmente diseñadas para la realización de los estudios de edificios patrimoniales, han tenido en las últimas décadas un amplio desarrollo, vinculado con el diseño de procedimientos experimentales aplicables in situ con el mínimo impacto posible.

Estas técnicas, conocidas como no destructivas (NDT) o mínimamente destructivas (MDT), superan a las convencionales en dos aspectos fundamentales: las muestras de ensayo conservan las condiciones de servicio originales sin sufrir alteraciones significativas y se reducen las afectaciones que provoca la extracción de muestras en el edificio. El grado de aceptación de la técnica debe ser determinado por sus prestaciones así como por las garantías de no alterar la estabilidad del elemento y de no provocar daños estéticos irreversibles.

Así consideradas, las NDT y MDT constituyen herramientas auxiliares relevantes para el diagnóstico, que aplicadas de forma conjunta contribuyen al conocimiento del estado general del edificio, de la homogeneidad de los materiales y unidades, de las propiedades físicas y mecánicas relevantes de las estructuras y de la localización y extensión de los daños. Cabe mencionar que en particular, en relación a las propiedades mecánicas, son aún escasas las técnicas de precisión in situ para determinar resistencia, deformación y rigidez. Su validación en cuanto a efectividad, representa uno de los principales objetivos en los diferentes proyectos de investigación recientemente realizados o en ejecución en Europa, como son: ITER (Isotopic technologies applied to the analysis of ancient roman mortars), DIAS (Integrated tools for in situ characterization of effectiveness and durability of conservation techniques in historic structures), DEMOTEC (Development of an environmental monitoring system for cultural heritage through European cooperation accompanying measure) y SAMCO (European Network for Structural Assessment Monitoring and Control).

4.2. Resultados experimentales

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos de la ejecución de los diferentes ensayos aplicados a las diversas probetas elaboradas en laboratorio con el objetivo de simular situaciones reales que pueden encontrarse en edificios históricos en pie.

4.2.1. Características dimensionales y físicas

4.2.1.1. Dimensiones

Las características geométricas de los mampuestos LAC, LAP e históricos extraídos del edificio Asilo Larrañaga (LAA), se presentan en la Tabla 4.5, donde se indican sus dimensiones básicas (longitud, ancho y altura en mm), de acuerdo a lo establecido en la norma UNE 772-16 sobre una muestra de 6 mampuestos de cada tipo.

Tabla 4.5a. Características geométricas de los mampuestos (mm)

Ladrillo	Longitud	Ancho	Altura
LAC 1	232	121	54
LAC 2	235	115	53
LAC 3	240	123	51
LAC 4	238	120	53
LAC 5	235	119	52
LAC 6	232	114	53
Prom	235,3	118,7	52,7

Tabla 4.5a (cont.) Características geométricas de los mampuestos (mm)

Ladrillo	Longitud	Ancho	Altura
LAP 1	217,5	113,3	54,3
LAP 2	224,0	113,2	55,5
LAP 3	211,5	110,7	54,2
LAP 4	218,5	109,9	53,2
LAP 5	220,0	112,4	53,9
LAP 6	215,0	110,9	56,8
Prom	217,8	111,7	54,6

Ladrillo	Longitud	Ancho	Altura
LAA 1	316	154	50
LAA 2	324	164	43
LAA 3	315	159	44
LAA 4	326	157	44
LAA 5	311	160	47
LAA 6	314	158	43
Prom	317,7	158,7	45,2

Tabla 4.5b. Características geométricas de los mampuestos (mm)

		LAC		LAP		LAA	
		Longitud media diagonal (mm)	Desviación máxima (mm)	Longitud media diagonal (mm)	Desviación máxima (mm)	Longitud media diagonal (mm)	Desviación máxima (mm)
Probeta 1	Cara 1	241	7,2	259	7,1	340	14,7
	Cara 2	247	5,7	256	0,9	339	9,1
Probeta 2	Cara 1	248	5,0	253	3,1	---	---
	Cara 2	248	8,4	255	1,9	---	---
Probeta 3	Cara 1	243	7,5	264	4,3	353	5,6
	Cara 2	247	6,3	261	7,5	347	18,4
Probeta 4	Cara 1	242	6,6	264	4,7	351	18,5
	Cara 2	246	5,4	258	3,6	348	4,3
Probeta 5	Cara 1	242	5,8	250	4,6	344	8,4
	Cara 2	250	7,5	262	4,4	347	14,1
Probeta 6	Cara 1	242	4,4	255	5,6	342	6,5
	Cara 2	242	9,5	255	5,3	359	4,0

4.2.1.2. Densidad

Los valores de densidad de ladrillos, determinados de acuerdo a la norma IRAM 12593, se presentan en la Tabla 4.6. Por otra parte, en la Figura 4.7 se muestra una fotografía del procedimiento de medición de densidad de los mampuestos.

Tabla 4.6. Densidad de los mampuestos (g/cm^3)

Densidad	LAC	LAP	LAA
Probeta 1	1,27	1,36	1,37
Probeta 2	1,27	1,34	1,37
Probeta 3	1,36	1,33	1,46
Probeta 4	1,35	1,36	1,42
Probeta 5		1,37	1,42
Probeta 6		1,39	
Prom	1,31	1,36	1,41



Figura 4.7. Medidas de densidad de ladrillos.

4.2.2. Desempeño de los materiales respecto al contenido y pasaje de agua

4.2.2.1. Tasa inicial de absorción

La Figura 4.8 muestra la ejecución del ensayo de tasa inicial de absorción de ladrillos en estado natural, cuyos resultados se indican en la Tabla 4.7.



Figura 4.8. Ensayo de tasa inicial de absorción de ladrillos.

Tabla 4.7. Tasa inicial de absorción (kg/m². min)

	LAC	LAP	LAA
Probeta 1	6,18	4,02	3,08
Probeta 2	6,83	3,5	4,95
Probeta 3	8,36	2,75	6,49
Probeta 4	6,73	1,76	5,49
Probeta 5	7,28	1,76	5,49
Probeta 6	5,83	2,02	3,02
Prom	6,86	3,02	4,24

Posteriormente y como se comentó en el capítulo 4 fueron empleados ladrillos LAC y LAP y Ladrillos antiguos extraídos del edificio Hospital Maciel (LAM) para determinar la efectividad de un producto hidrorrepelente a través del ensayo de tasa inicial de absorción, sobre una muestra de seis ladrillos (en el caso de LAC y LAP) y tres ladrillos antiguos. Los resultados alcanzados como media de los resultados individuales se expresan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Tasa inicial de absorción (kg/m². min) para ladrillos tratados con hidrorrepelente

	LAC	LAP	LAM
Tasa inicial de absorción	0,04	0,03	1

4.2.2.2. Absorción

Los valores de absorción alcanzados por los ladrillos en estado natural y los tratados con hidrorrepelente se indican en las Tablas 4.9 y 4.10. Por otra parte, en la Figura 4.9 se muestra una fotografía del ensayo de absorción de los mampuestos.

Tabla 4.9. Absorción de ladrillos en estado natural

	LAC	LAP	LAA
Probeta 1	23	24,10	27
Probeta 2	22	25,44	26
Probeta 3	26	26,08	25
Probeta 4	26	22,21	23
Probeta 5	23	22,82	27
Probeta 6	21	20,52	26
Prom	23,5	23,4	25,7

Tabla 4.10. Absorción (%) para ladrillos tratados con hidrorrepelente

	LAC	LAP	LAA
Absorción	17,0	14,1	20,0



Figura 4.9. Ensayo de absorción de ladrillos.

4.2.2.3. Permeabilidad

Los resultados obtenidos en el ensayo de permeabilidad sobre las probetas designadas como muretes simples, se indican en la Tabla 4.11 (ver Figura 4.10). La letra C corresponde a muros confeccionados con ladrillos colorados y la P a elaborados con ladrillos plateados. El números 2 indica que fue tratada una sola de las caras del muro con el producto hidrorrepelente.

Tabla 4.11. Tiempo (s) necesario para el descenso de la columna de agua en los tubos Karsten, muretes 2

Inmersión		Inicial (sin inmersión)		10 segundos		45 segundos		5 minutos	
Descenso de agua	cm ³	Cara expuesta	Cara tratada	Cara expuesta	Cara tratada	Cara expuesta	Cara tratada	Cara expuesta	Cara tratada
Murete 2C	3	36	Sin desc.	38,18	Sin desc	41,72	Sin desc	74,03	Sin desc
	4	50		56,83		59,9		98,1	
	5	68		75,7		78,9		130,38	
Murete 2P	3	242,17	Sin desc	332,99	Sin desc	374,16	Sin desc	992,89	Sin desc
	4	332,48		470,41		505,59		1289	
	5	422,08		569,33		639,5		1499	



Figura 4.10. Ensayo de permeabilidad sobre murete.

4.2.2.4. Resistividad eléctrica

Los valores obtenidos de resistividad eléctrica para los ladrillos se incluyen en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12. Resistividad eléctrica (kohm.cm) con relación al valor relativo de Absorción (%)

Inmersión	10 segundos		45 segundos		5 minutos	
	Resistividad	Abs	Resistividad	Abs	Resistividad	Abs
LP tratado	No arroja resultados	0,45	No arroja resultados	0,85	No arroja resultados	2,72
LP	341	4,1	196	5,8	29	9,4
LC tratado	No arroja resultados	0,41	No arroja resultados	0,98	No arroja resultados	2,25
LC	132,5	7,19	60,25	15,94	40,25	18,81

Por su parte, los resultados alcanzados en los muretes simples se indican en la Tabla 4.13, donde se designan con la letra P a los muretes simples de ladrillos plateados y con la letra C a los muretes simples de ladrillos colorados. El número 2 corresponde a muretes que fueron tratados con hidropelente en una sola de las caras, el número 3 corresponde a muretes totalmente tratados con el producto hidropelente y el 4 a muretes sin ningún tratamiento.

Tabla 4.13. Resistividad eléctrica (kohm.cm) con relación al valor relativo de Absorción (%)

Prob	Inmersión 10 segundos			Inmersión 45 segundos			Inmersión 5 minutos		
	Cara exp	Cara tratada	Abs	Cara exp	Cara tratada	Abs	Cara exp	Cara tratada	Abs
2P	No arroja resultados		0,81	220	Sin resultado	1,98	48	Sin resultado	6,16
2C	125	Sin resultado	2,42	122	Sin resultado	4,75	16	Sin resultado	11,62
	Cara 1	Cara 2	Abs	Cara 1	Cara 2	Abs	Cara 1	Cara 2	Abs
3P	No arroja resultados		0,74	No arroja resultados		1,87	No arroja resultados		5,74
3C	No arroja resultados		1,63	No arroja resultados		4,17	642	No arroja res	10,95
	Cara 1	Cara 2	Abs	Cara 1	Cara 2	Abs	Cara 1	Cara 2	Abs
4P	51	122	3,44	27	42	7,46	26	28	12,03
4C	136	167	4,84	22	30	10,6	13	17	17,54



Figura 4.11. Medidas de resistividad eléctrica sobre murete.

4.2.2.5. Constante dieléctrica determinada con geo-radar

De la fase de calibración del geo-radar sobre los diferentes ladrillos LAC y LAP se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 4.12, donde se observa la relación lineal entre el contenido de humedad y la raíz cuadrada de la constante dieléctrica para distintos tipos de ladrillos.

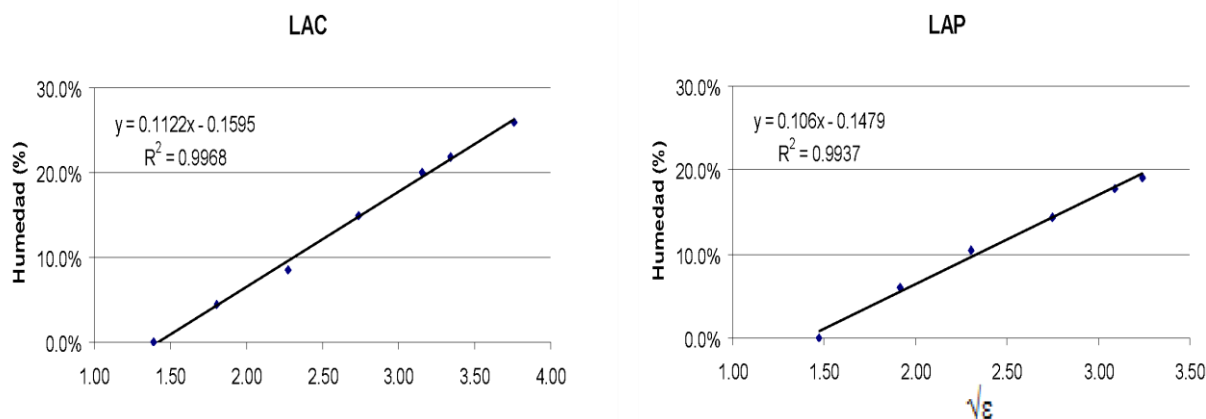


Figura 4.12. Calibración del geo-radar con humedad para ladrillos LAC y LAP.

En la Figura 4.13 se presentan los resultados de la calibración del geo-radar sobre los diferentes ladrillos LAM y LAA. Nuevamente se observa la gran relación lineal que existe entre el contenido de humedad y la raíz cuadrada de la constante dieléctrica.

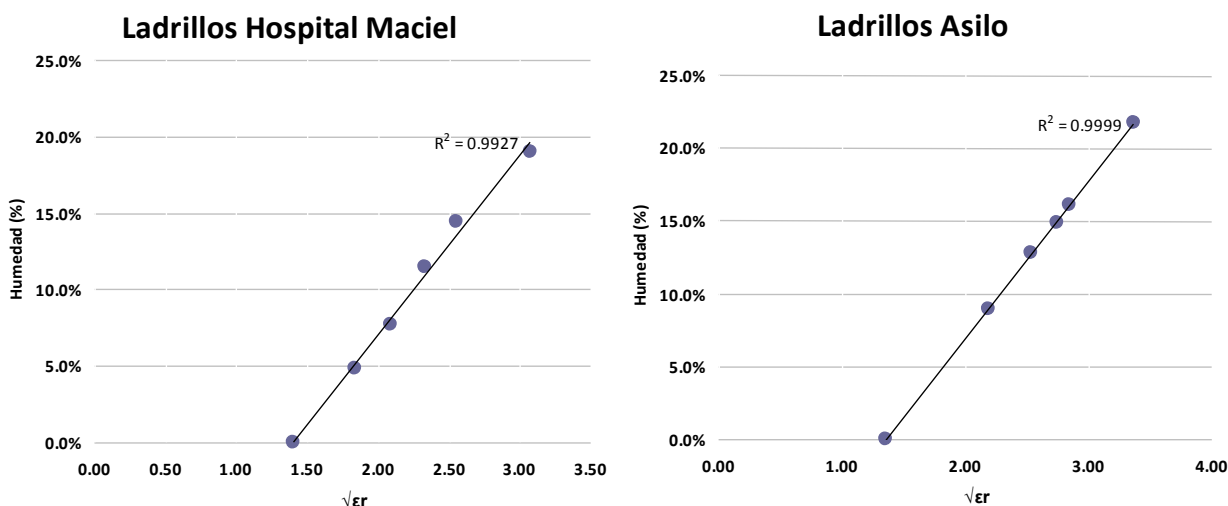


Figura 4.13. Calibración del geo-radar con humedad para ladrillos LAM y LAA.

Los resultados sobre los muretes simples arrojaron los valores que se muestran en la Tabla 4.14, que representan los resultados de la variación en porcentaje de contenido de agua y la raíz cuadrada de la constante dieléctrica, obtenida a partir del método aplicado, para los distintos muretes y tiempos de inmersión.

Tabla 4.14. Valores en porcentaje de incremento del contenido de agua, de la raíz de la constante dieléctrica obtenida a partir del método y del valor relativo de la raíz de constante dieléctrica.

Muro simple	Magnitud	Tiempo de inmersión			
		0 s	10 s	45 s	5 min
2C	Δh	0,00%	2,42%	4,75%	11,62%
	$\sqrt{\epsilon}$	1,94	2,15	2,47	2,80
	$\Delta \sqrt{\epsilon}$	0,00	0,22	0,54	0,86
3C	Δh	0,00%	1,63%	4,17%	10,95%
	$\sqrt{\epsilon}$	1,77	1,99	2,10	2,74
	$\Delta \sqrt{\epsilon}$	0,00	0,22	0,32	0,97

Tabla 4.14 (cont.) Valores en porcentaje de incremento del contenido de agua, de la raíz de la constante dieléctrica obtenida a partir del método y del valor relativo de la raíz de constante dieléctrica.

Muro simple	Magnitud	Tiempo de inmersión			
		0 s	10 s	45 s	5 min
4C	Δh	0,00%	4,84%	10,68%	17,54%
	$\sqrt{\epsilon}$	1,99	2,20	2,74	3,44
	$\Delta\sqrt{\epsilon}$	0,00	0,22	0,75	1,45
2P	Δh	0,00%	0,81%	1,98%	6,16%
	$\sqrt{\epsilon}$	1,88	1,93	2,05	2,84
	$\Delta\sqrt{\epsilon}$	0,00	0,06	0,17	0,97
3P	Δh	0,00%	0,74%	1,87%	5,74%
	$\sqrt{\epsilon}$	2,05	2,10	2,22	2,84
	$\Delta\sqrt{\epsilon}$	0,00	0,06	0,17	0,80
4P	Δh	0,00%	3,44%	7,45%	12,03%
	$\sqrt{\epsilon}$	2,05	2,33	2,90	3,52
	$\Delta\sqrt{\epsilon}$	0,00	0,28	0,85	1,48

En la Figura 4.14 se muestran los ensayos realizados con el geo-radar para la determinación de la constante dieléctrica de las probetas.

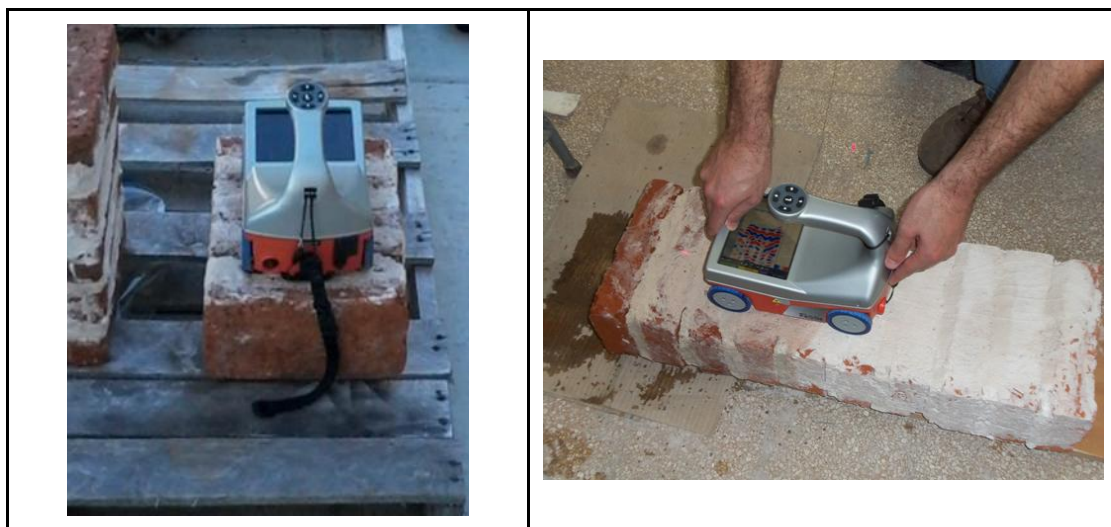


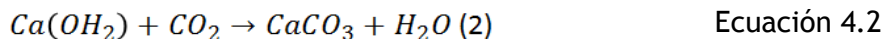
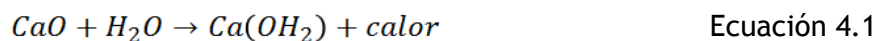
Figura 4.14. Ensayo con geo-radar sobre diferentes probetas.

En cuanto a la obtención de la constante dieléctrica, se pudo determinar la correlación existente entre los valores humedad de los ladrillos patrimoniales de Asilo y del Hospital Maciel, la cual permitió predecir el contenido de humedad con elevada precisión.

4.2.3. Características de microestructura

4.2.3.1. Difracción de Rayos X (DRX)

En las siguientes ecuaciones se representan las reacciones químicas que se producen en el ciclo de la cal.



Es conocido el ciclo de obtención de la cal que se muestra en la Figura 4.15. A partir de la caliza (calcita primaria: CaCO_3), y debido a la cocción, se obtiene óxido de calcio: CaO (conocida como cal viva) liberándose dióxido de carbono, constituyendo un proceso químico metaestable. El CaO se rehidrata con agua obteniéndose hidróxido de calcio (Ecuación 4.1). Este proceso se conoce comúnmente como el apagado de la cal, formándose la portlandita (Ca(OH)_2) que es utilizada en la construcción y/o transformada en mortero mezclando agua y arena. En la Ecuación 4.2, al entrar la portlandita en contacto con el dióxido de carbono atmosférico, se forma la calcita de origen secundario y de fase estable (carbonato de calcio). El agua se evapora y el gas carbónico del aire ambiente se fija en el mortero recomponiendo exactamente la caliza de origen. En el momento de su uso, el mortero de cal empieza su carbonatación o fraguado.

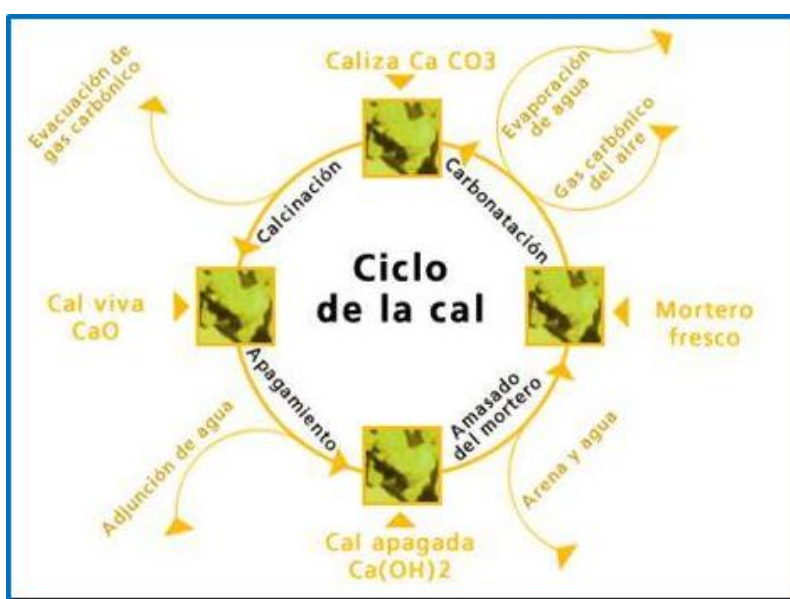


Figura 4.15. Ciclo de la cal (<http://www.socli.fr/ES/La+cal/De+la+piedra+a+la+piedra/>).

Con la técnica de DRX se realiza una identificación cualitativa de los diferentes compuestos químicos que componen el mortero, como agregados y aglomerante. Principalmente se identifica la presencia de cuarzo, calcita y portlandita en los morteros.

Se estudió en primera instancia la cal comercial, así como los diferentes morteros, el histórico del Asilo así como de los preparados en el Laboratorio.

Estudio de la cal

La Figura 4.16 muestra un DRX de una cal comercial tal cual fue recibida. El patrón de difracción muestra la presencia de la fase mayoritaria constitutiva de la cal: hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) y en menor proporción carbonato de calcio (CaCO_3). La presencia del carbonato de calcio indica que aún en la cal comercial, ese proceso de carbonatación ya ha tenido lugar. Se observa también la presencia de restos de óxido de calcio (CaO), de un proceso de apagado no totalmente completo.

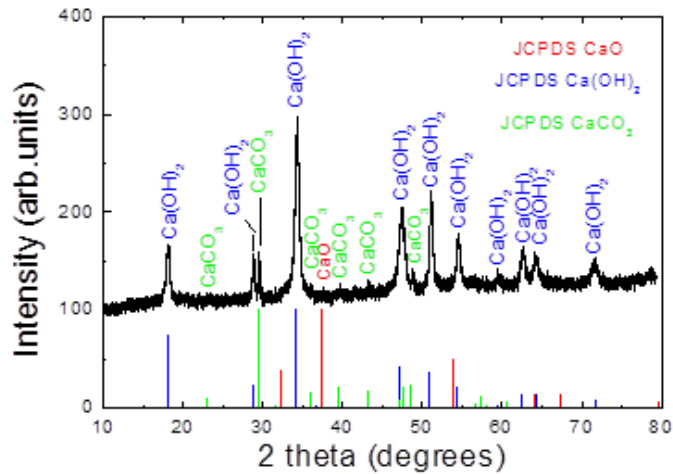


Figura 4.16. Patrón de difracción de rayos-X para una muestra de cal comercial. En la parte inferior del gráfico se grafican los patrones JCPDS para las fases allí indicadas.

Estudio de los morteros históricos Asilo

La Figura 4.17 muestra un patrón de difracción de una muestra de mortero extraída del propio Asilo. Se observan picos de difracción correspondientes principalmente al carbonato de calcio y al cuarzo (SiO₂). La presencia del SiO₂ se debe a que este se encuentra como fase mayoritaria en la arena. En dicha figura se incluye y se muestra el patrón de difracción JCPDS correspondiente al hidróxido de calcio, a los efectos de hacer notar la ausencia de los picos de difracción correspondientes a este compuesto. Lo último indicando una total carbonatación de la cal inicial.

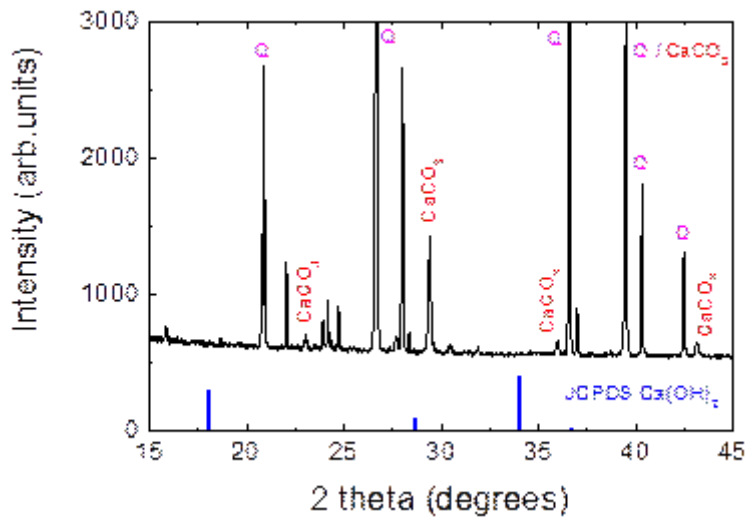


Figura 4.17. Patrón de difracción de rayos-X para una muestra de mortero extraída del Asilo. Se grafica en la parte inferior el patrón JCPDS para el hidróxido de calcio. Los picos indicados con una "Q" corresponden al cuarzo.

Estudio de los morteros preparados en laboratorio y expuestos a la atmósfera

La Figura 4.18 representa el patrón de difracción correspondiente a una muestra de mortero con una composición a/c de 0.80 preparada en el Laboratorio, análisis efectuado al cabo de 28 días. Allí se observa la presencia además del cuarzo y feldspatos, del hidróxido de calcio y en muy baja proporción la presencia de carbonato de calcio. Un estudio similar se realizó para las otras muestras de composiciones a/c 0.85 y 0.90. Los patrones de difracción arrojaron resultados similares.

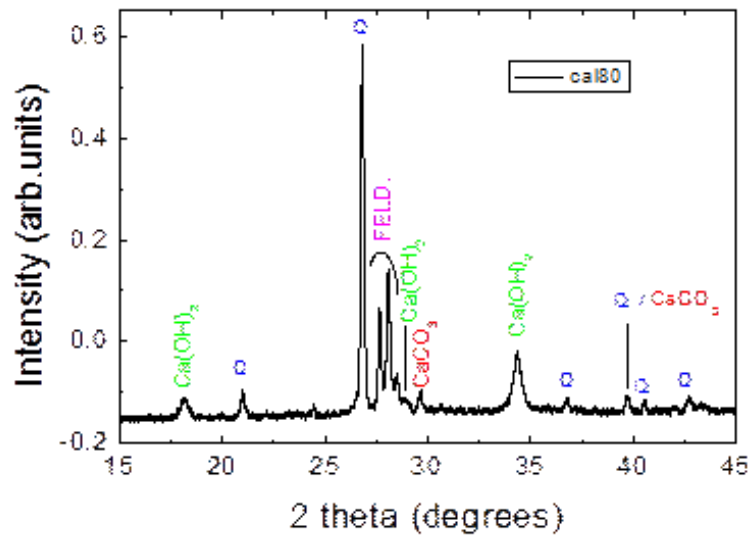


Figura 4.18. Patrón de difracción de rayos-X para una muestra de mortero preparada en el laboratorio. Composición a/c=0.80. Los picos marcados con una “Q” corresponden a la fase cuarzo, y los picos indicados con “FELD” a feldespatos.

Ese mismo tipo de análisis se llevó a cabo sobre cada una de las muestras para las tres composiciones a/c bajo estudio (0.80, 0.85 y 0.90), luego de estar expuestas a la intemperie por un largo período.

A vía de ejemplo la Figura 4.19 muestra la superposición de los patrones de difracción correspondientes a la muestra de composición a/c=0.85, a los 28 días y luego de estar expuesta 70 días a la intemperie. Se puede apreciar un aumento significativo de la intensidad de uno de los picos de difracción correspondiente a la fase carbonato de calcio (CaCO_3) en la muestra a los 70 días indicando un proceso de carbonatación importante y disminuyendo la presencia de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2).

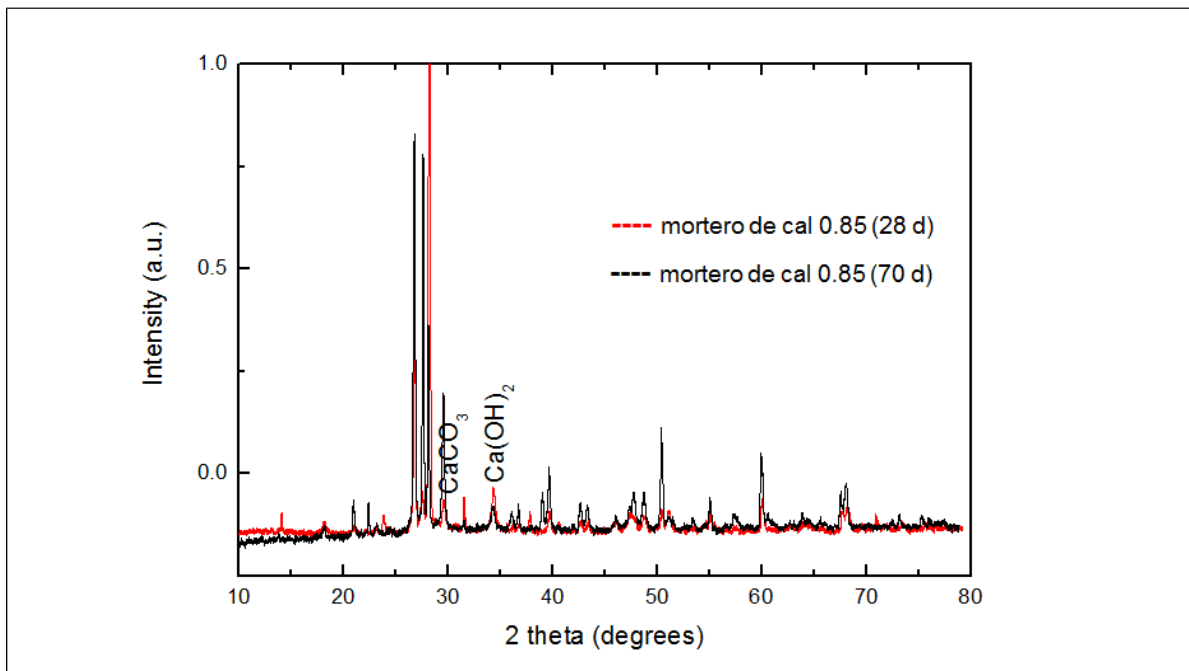


Figura 4.19. Comparación de los patrones de difracción de rayos-X para una muestra de mortero preparada en el laboratorio de dosificación a/c de 0.85, luego de estar expuesta 28 y 70 días a la intemperie.

A los efectos de cuantificar ese proceso de carbonatación a los largo del tiempo, la Figura 4.20 muestra la relación de intensidades del pico más intenso correspondiente a la fase carbonato de calcio respecto al pico más intenso correspondiente a la fase hidróxido de calcio, en función del tiempo de exposición a la atmósfera. Esa relación nos da aproximadamente la proporción de dichas fases en la muestra en cuestión.

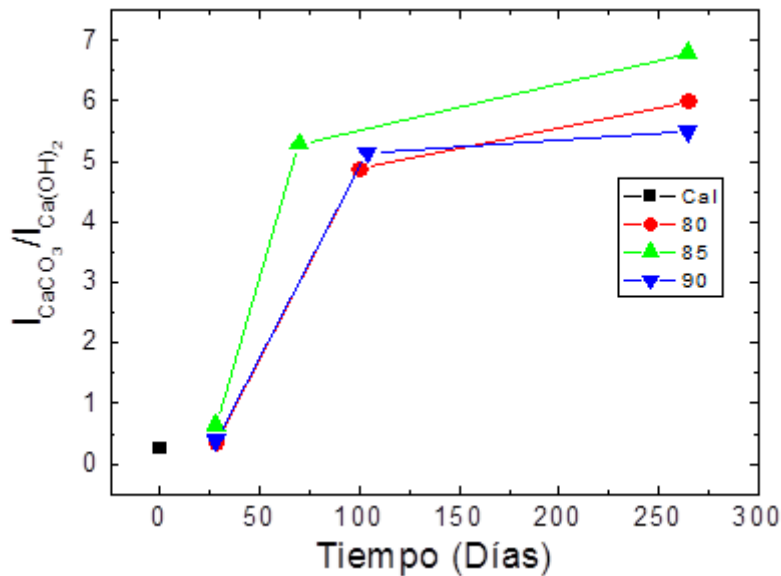


Figura 4.20. Relación de intensidades del pico de difracción más significativo correspondiente al carbonato de calcio respecto al pico más significativo correspondiente a la fase hidróxido de calcio en función del tiempo de exposición a la atmósfera, para la cal, y las dosificaciones a/c: 0.80, 0.85 y 0.90.

Se observa, como era de esperar, un aumento del contenido de carbonato de calcio en detrimento del hidróxido de calcio en todas las muestra a medida que el tiempo de exposición a la atmósfera aumenta, se llega a una especie de saturación a los 265 días.

Se estudiaron también las fases presentes en juntas de morteros con las tres relaciones a/c en estudio, expuestos en un muro durante 265 días, extrayendo muestras desde el interior y exterior del mismo. En base a los respectivos patrones de difracción de rayos-X, se obtuvieron las relaciones de intensidades del pico de difracción más significativo correspondiente al carbonato de calcio respecto al pico más significativo correspondiente a la fase hidróxido de calcio, tanto para las muestras sacadas del interior del muro como para aquellas extraídas de la parte exterior del mismo. Esos datos son expuestos en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15. Relaciones de intensidades del pico de difracción más significativo correspondiente al carbonato de calcio respecto al pico más significativo correspondiente a la fase hidróxido de calcio, para las muestras sacadas del interior y del exterior del muro. Tiempo de exposición a la atmósfera 265 días.

Zona donde fue extraída la muestra	Composición del mortero (a/c)		
	0.80	0.85	0.90
Interior	0.5	0.7	2.4
Exterior	6.0	6.8	5.5

El proceso de carbonatación ha sido muy superior en la parte externa del muro respecto a la parte interna. Evidentemente a medida que nos movemos hacia el interior del muro la penetración del CO₂ va disminuyendo, y por ende el grado de carbonatación.

4.2.3.2. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La existencia de una progresiva carbonatación de los morteros, puede provocar presencia de poros, grietas o fracturas en la estructura microscópica de las muestras. La presencia de poros constituye un parámetro que incide en la durabilidad y en la resistencia de los morteros. De ahí la importancia de los estudios y análisis de morfologías, tamaños de granos, etc., que se realizan con esta técnica de microscopía electrónica de barrido (Bermúdez, 2012).

Composición del mortero de Asilo

Aunque no se pueda cuantificar proporciones de los elementos mineralógicos de los morteros usados en el Edificio de Asilo, sí puede verificarse la presencia de dichos elementos, como se muestra en la Figura 4.21. Se muestran las fotos tomadas de Microscopía Electrónica de Barrido, con resoluciones de 100, 50, 10 y 5 micras, observándose la presencia de calcio, carbono, sílice y oxígeno en proporciones destacables, indicando que los elementos constituyentes de estos morteros son carbonato de calcio y arena. Por el tiempo que ha pasado desde la construcción de los mismos, se muestra la presencia de otros elementos presentes en el medio ambiente, como sodio, aluminio y magnesio (elemento que se encuentra de manera abundante en el agua de mar), entre otros (Tabla 4.16).

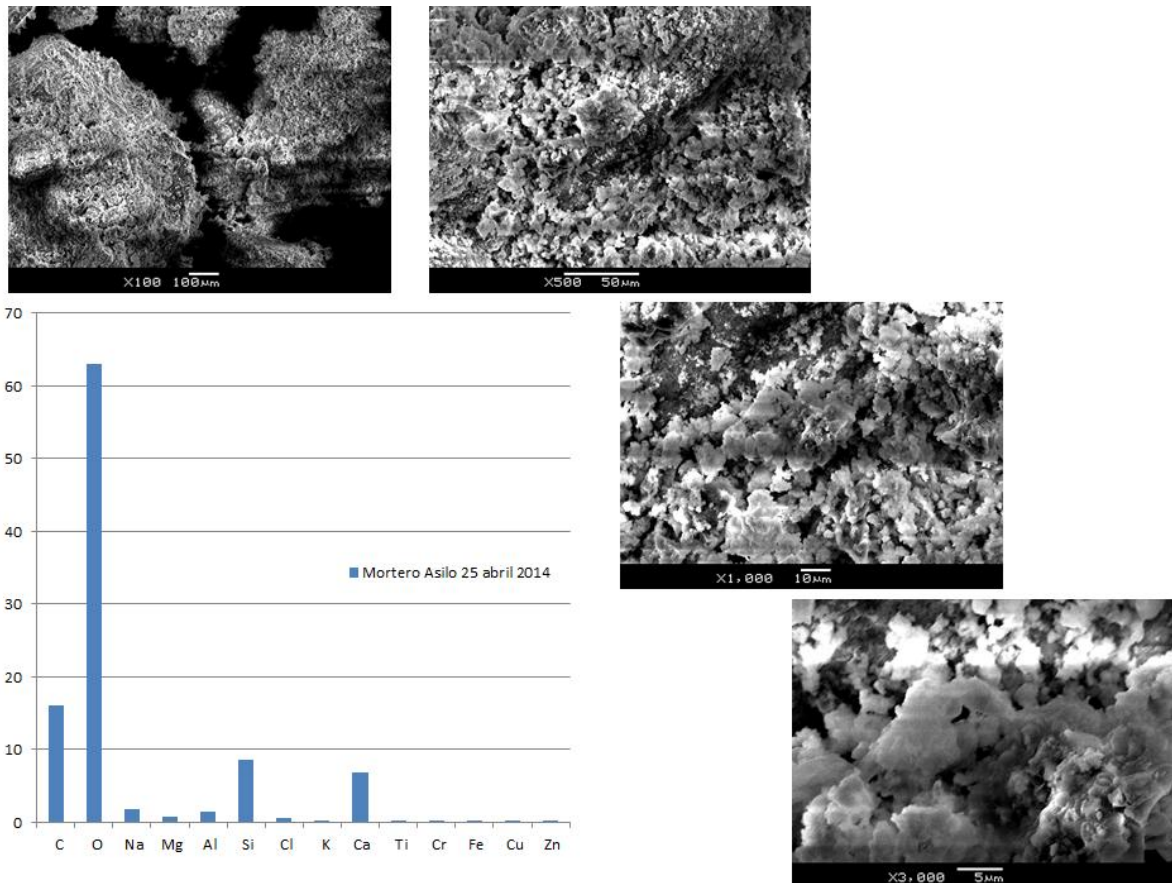


Figura 4.21: Composición de los elementos químicos de muestra de mortero de Asilo y fotografías tomadas con la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (Resoluciones de 100, 50, 10 y 5 μm)

Tabla 4.16. Composición elemental de mortero de Asilo

Elementos	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Fe	Cu	Zn	Total
Atom %	15,98	63,02	1,87	0,72	1,36	8,50	0,62	0,20	6,79	0,06	0,07	0,29	0,19	0,11	100,00

En la Figura 4.22 puede observarse, con una resolución de 10 micras, la morfología redondeada de los polvos de carbonato de calcio que rodean a los cristales de cuarzo, que presentaron los 3 tipos de morteros (con dosificaciones de 0.80; 0.85 y 0.90) a los 30 y 180 días. Antes del proceso de carbonatación se observa una aglomeración de los cristales de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

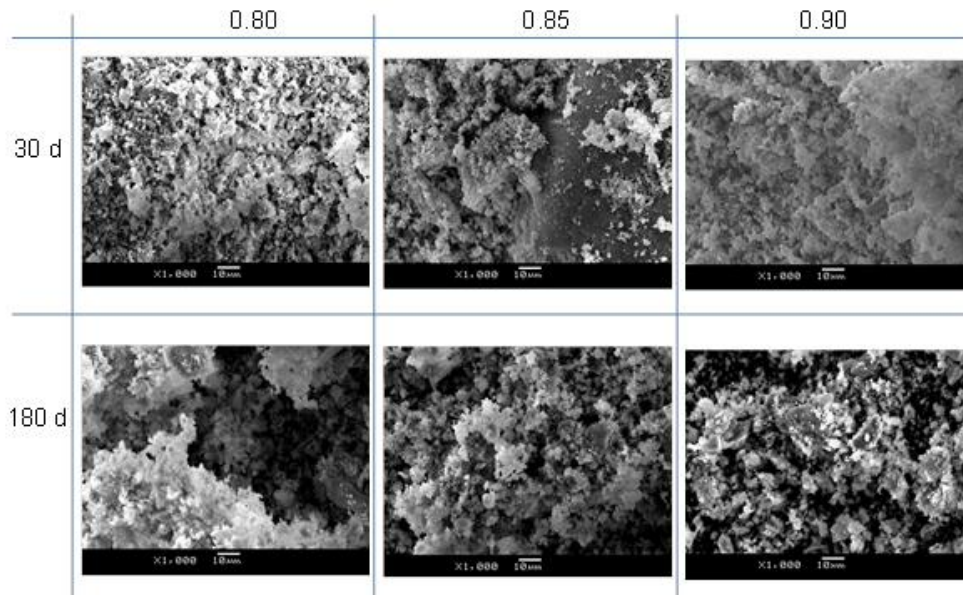


Figura 4.22. Morteros a los 30 y 180 días, con diferentes relaciones de a/c: 0.80, 0.85 y 0.90 (Resolución 10 μm)

En la Figura 4.23 la resolución es de 5 micras. Durante la evolución temporal, las muestras se van carbonatando, el hidróxido de calcio se transforma nuevamente en calcita (secundaria) en contacto con el dióxido de carbono ambiente.

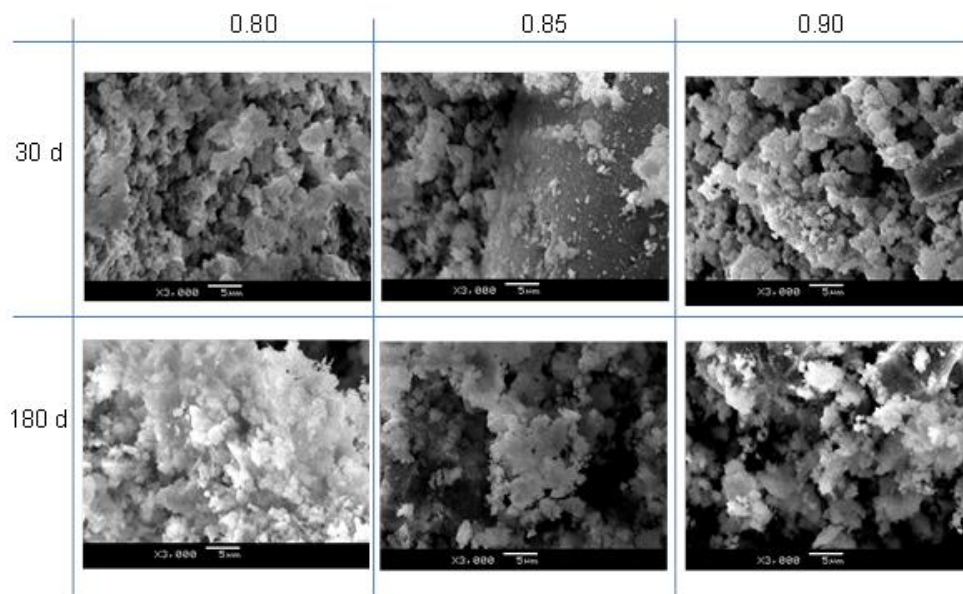


Figura 4.23. Morteros a la misma edad con diferentes relaciones de a/c 0.80, 0.85 y 0.90 (Resolución 5 μm)

Se observa claramente que las estructuras no son laminares, sino agrupados en “racimos”, característicos de los carbonatos de calcio mostrando relativa porosidad.

En las siguientes figuras se muestran los espectros obtenidos con EDS (espectroscopia de energía dispersiva), a una resolución de 100 micras, para el análisis mineralógico en diferentes zonas

dentro de las fotos de los morteros, identificando el estado de los cristales de silicio (de arena) y cómo se distribuyen/adhieren los polvos de carbonato de calcio sobre ellos.

En la Figura 4.24 se muestran los espectros de los elementos contenidos en las zonas P1 y P2 de la foto. En la primera zona se observa nítidamente un grano irregular propio de la arena y en la segunda zona granos redondeados correspondientes al carbonato de calcio.

EDS: 21 de noviembre 2014

Mortero 0.80

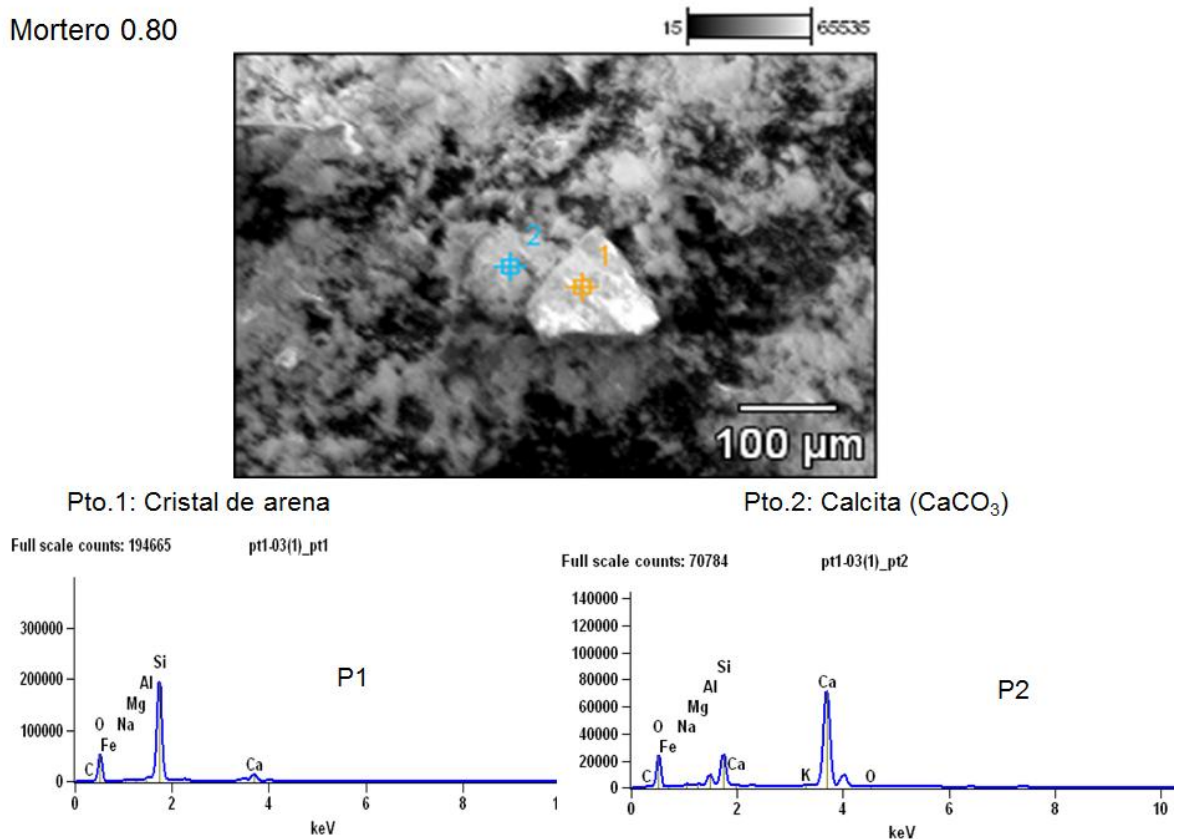


Figura 4.24. Muestra de mortero de 0.80 después de 1 año (478 días).

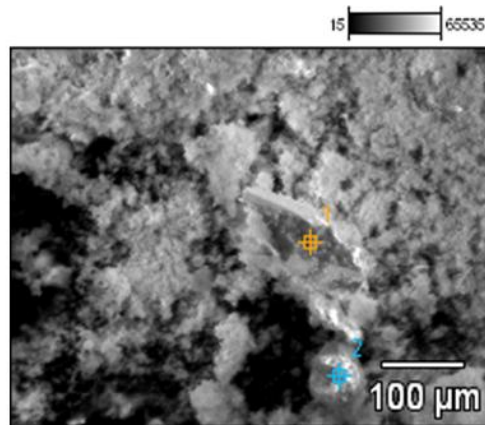
Nuevamente se observa la morfología irregular de los cristales de arena, en el punto P1 de la Figura 4.25, con calcio en su superficie. En la zona 2 el cristal de arena es rodeado por el carbonato de calcio.

La Figura 4.26 corresponde a la muestra de dosificación de a/c: 0.90 (tiene mayor proporción de agua), a la misma resolución que las anteriores: 100 micras. Se observa que, en la zona P2 hay presencia de arena, aunque no se distingan los bordes irregulares del cristal. En la zona P3 se detecta la presencia de carbonato de calcio sin detección suficiente de silicio.

En la Figura 4.27 se realiza una comparación, para distinguir las diferencias microestructurales de muestras de morteros de las 3 dosificaciones, que formaban parte de los morteros de juntas de una tripleta. Se seleccionaron muestras del interior y del exterior de la junta, estando en contacto esta última con el medio ambiente durante 265 días. Se trabajó con una resolución de 200 micras.

EDS: 21 de noviembre 2014

Mortero 0.85



Pto.1: Cristal de arena

Pto.2: Cristal de arena y calcio

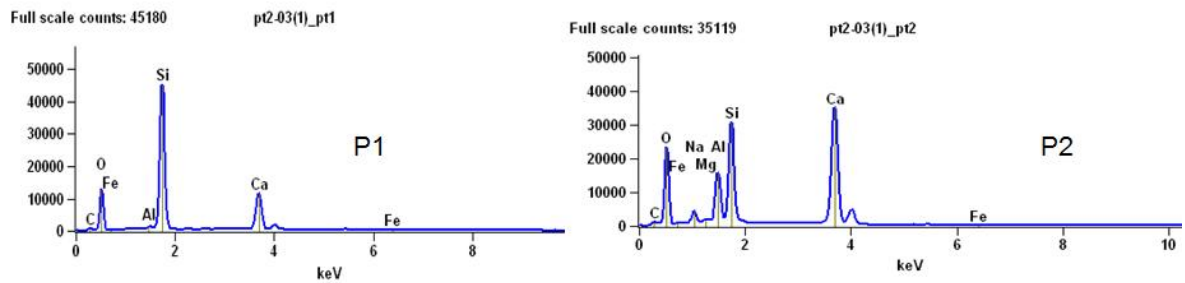
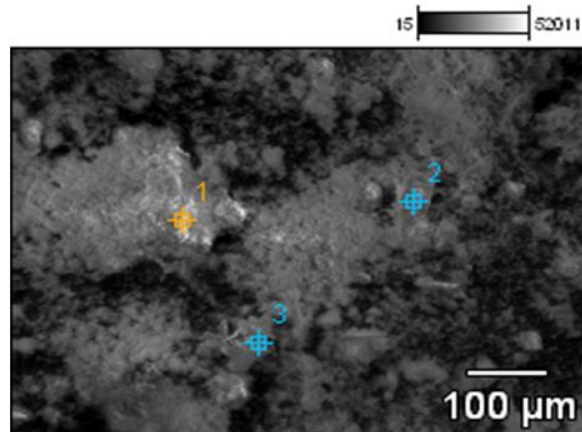


Figura 4.25. Muestra de mortero 0.85 Después de 1 año (478 días)

EDS: 12 de diciembre 2014

Mortero 0.90



Pto.2: Cristal de arena

Pto.3: Calcita (CaCO_3)

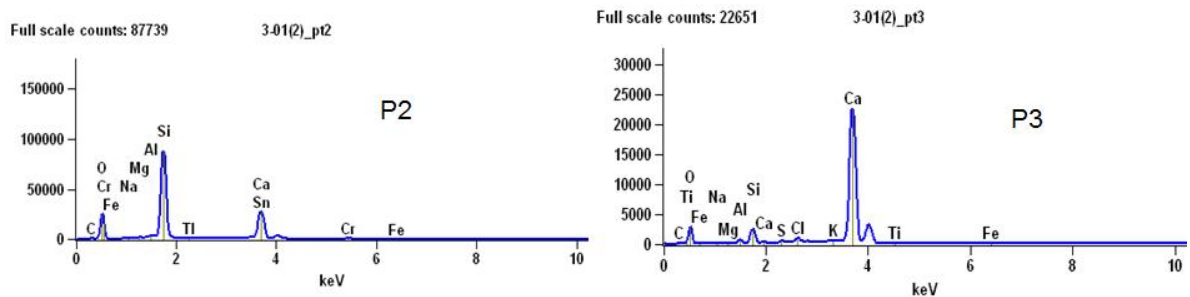


Figura 4.26. Muestra de mortero 0.90 Después de 1 año (478 días)

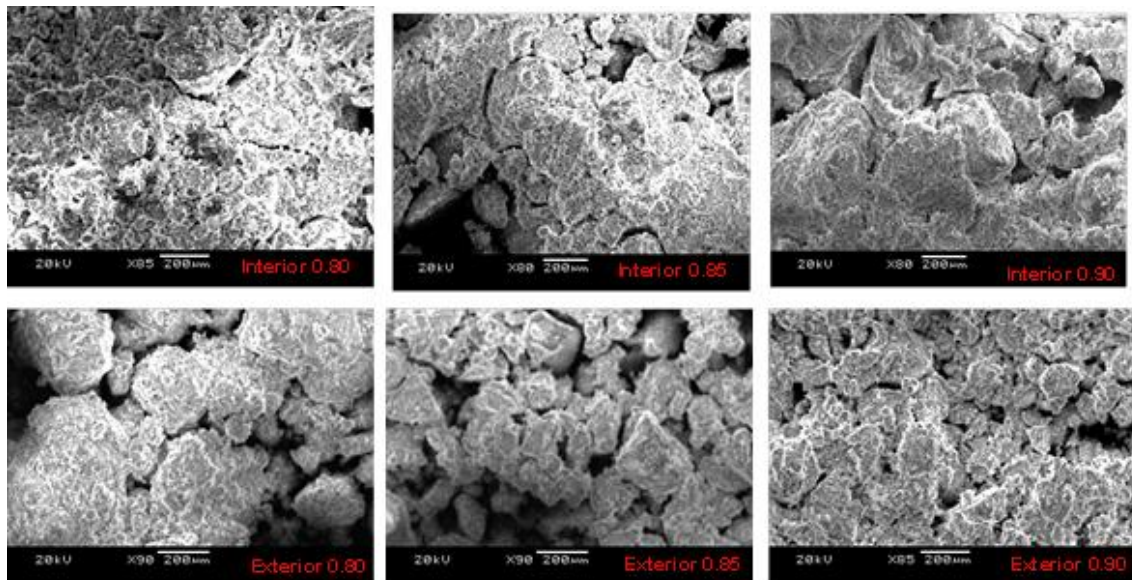


Figura 4.27. Comparación de morteros de diferentes dosificaciones, del interior de tripletas y expuestas al exterior (265 días).

En las siguientes figuras se presentan los espectros microestructurales pero esta vez con una resolución de 100 micras, a los efectos de detectar los polvos de carbonato de calcio mejor adheridos a los cristales de silicio, así como la porosidad en las muestras.

En la Figura 4.28, correspondiente a la muestra con dosificación a/c: 0.80, se observa perfectamente el mayor tamaño de poros en la muestra correspondiente al mortero exterior en relación con la muestra del mortero interior. En el caso del mortero interior se analizan 3 zonas y en el caso del mortero exterior 4.

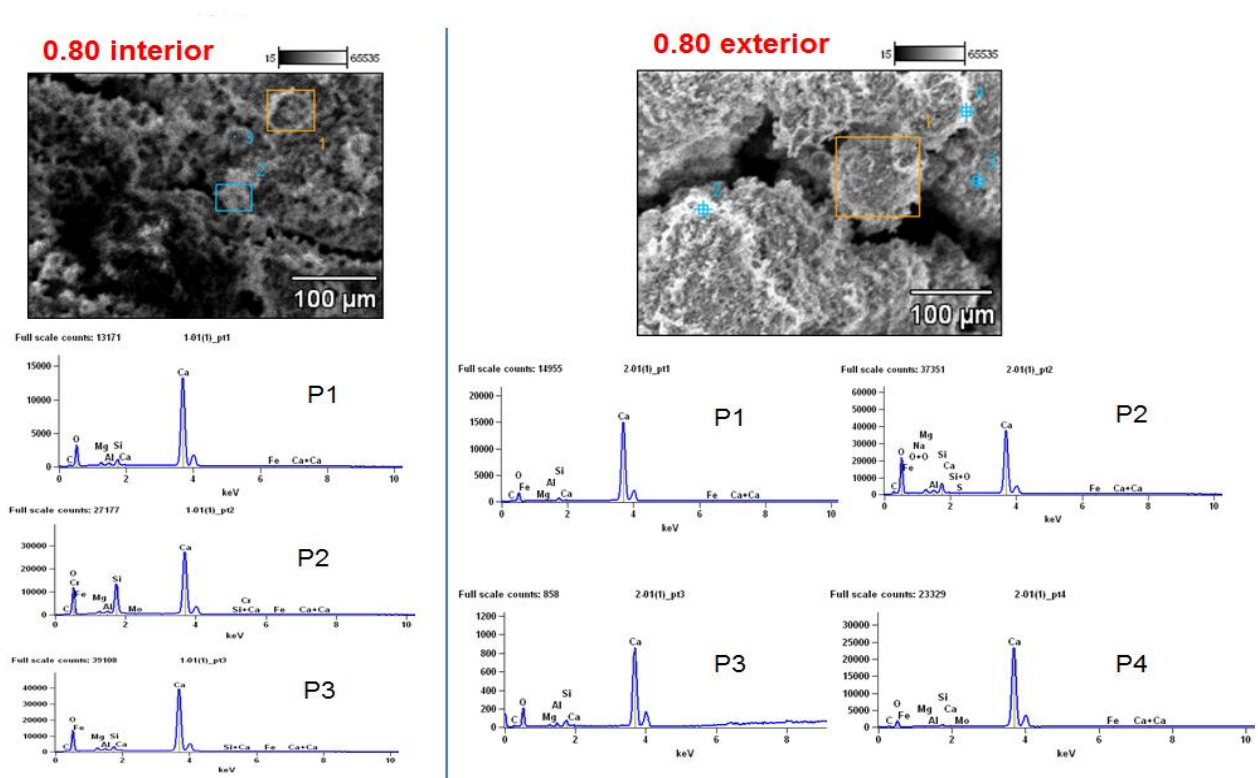


Figura 4.28. Espectroscopia micro estructural zonal Mortero 0.80 interior y exterior, con resolución de 100 micras (8 meses aproximadamente).

La Figura 4.29, corresponde a los morteros con dosificación a/c: 0.85, analizándose la composición elemental en 3 zonas de mortero interior y exterior. Nuevamente se presenta mayor cantidad de poros en la muestra exterior expuesta al medio ambiente, con mayor velocidad en el proceso de carbonatación. En la Figura 4.30 se presenta la espectroscopia de los morteros con dosificación a/c: 0.90 para las muestras del interior y exterior. La zona de presencia de poros más acentuados corresponde al mortero exterior.

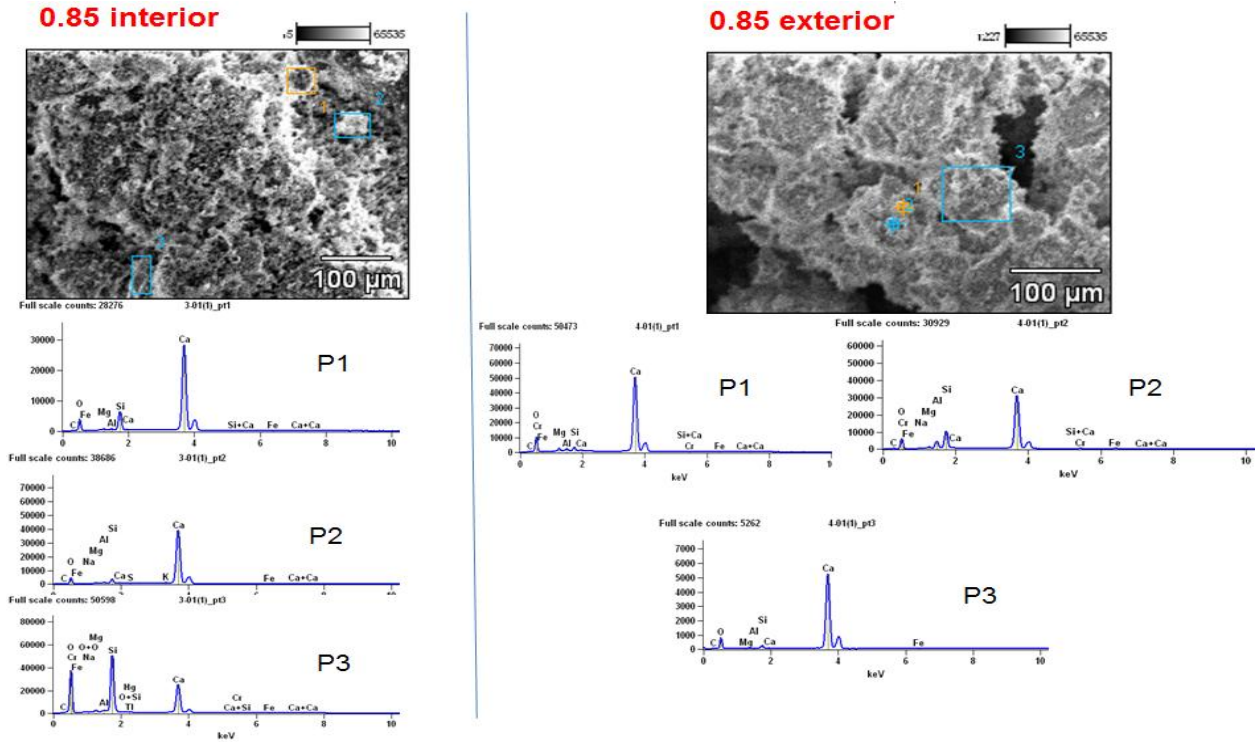


Figura 4.29. Espectroscopia micro estructural zonal Mortero 0.85 interior y exterior, con resolución de 100 micras. (8 meses aproximadamente)

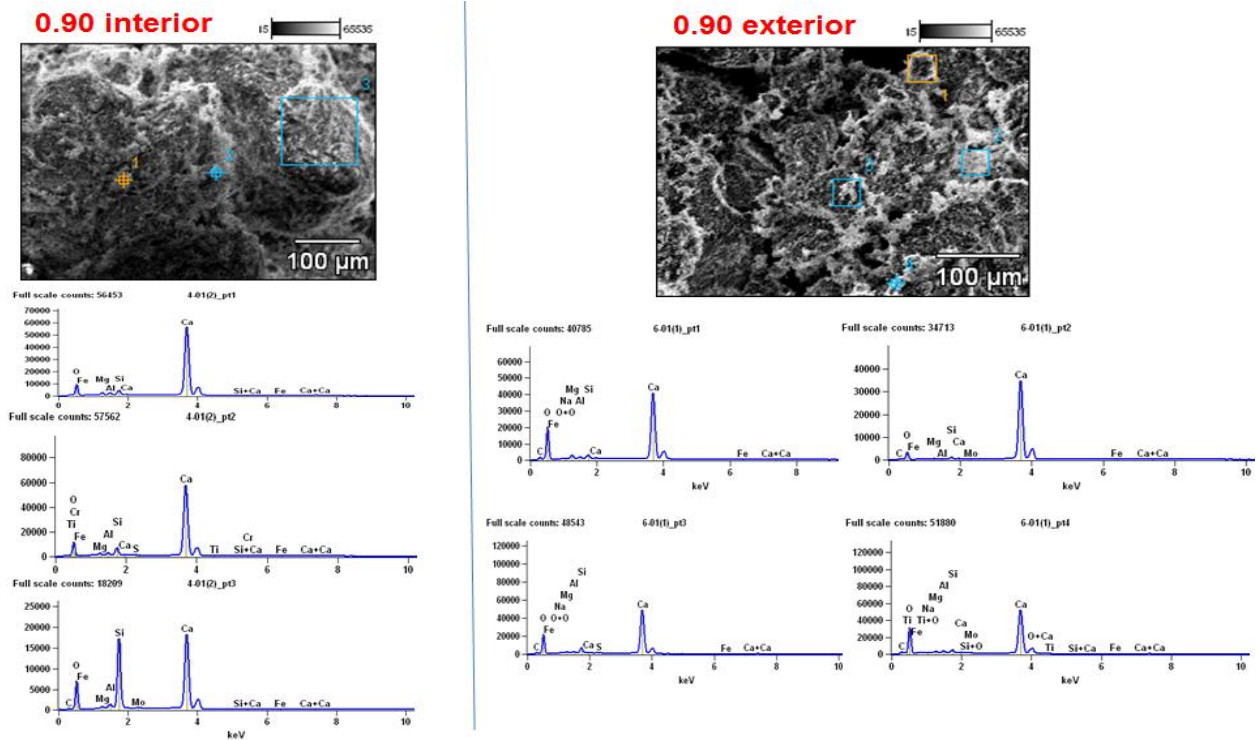


Figura 4.30. Espectroscopia micro estructural zonal Mortero 0.90 interior y exterior, con resolución de 100 micras (8 meses aproximadamente)

Esta técnica de microscopía electrónica de barrido, permitió realizar un seguimiento cualitativo y controlado en el tiempo de los procesos fundamentales de transformación que experimentó la cal, como aglomerante usado en estos morteros.

4.2.4. Características mecánicas mediante técnicas destructivas

4.2.4.1. Resistencia a compresión y tracción por flexión

Los resultados de los ensayos a compresión y tracción por flexión de ladrillos se indican en las Tablas 4.17 y 4.18.

Tabla 4.17. Resistencia a compresión de ladrillos (MPa)

	LAC	LAP	LAA
Probeta 1	5,88	10,56	8,75
Probeta 2	8,14	10,08	9,32
Probeta 3	4,41	11,19	13,11
Probeta 4	4,15	9,60	12,53
Probeta 5	4,84	11,24	9,81
Probeta 6	9,48	8,59	13,43
Prom	6,15	10,21	11,16

Tabla 4.18. Resistencia a tracción por flexión de ladrillos ft (MPa)

	LAC	LAP	LAA
Probeta 1	0,744	2,084	1,433
Probeta 2	0,680	2,342	1,392
Probeta 3	0,780	3,013	0,887
Probeta 4	0,339	1,828	
Probeta 5	0,632	1,903	
Probeta 6	1,755	1,909	
Probeta 7	0,616	1,961	
Probeta 8	0,566	2,214	
Probeta 9	0,806	1,147	
Probeta 10	0,279	1,406	
Prom	0,720	1,981	1,237

Los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos destructivos sobre morteros endurecidos se incluyen en la Tabla 4.19. La Figura 4.31 muestra el ensayo realizado.

Tabla 4.19. Resistencia a compresión f_c (MPa) y a tracción por flexión f_t (MPa) de morteros

Agua/cal	f_c 28 d.	f_c 270 d.	f_t 28 d.	f_t 270d.
0,80	0,87	2,40	0,46	0,48
0,85	0,54	2,38	Sin determinar	0,36
0,90	0,48	1,98	0,30	0,26

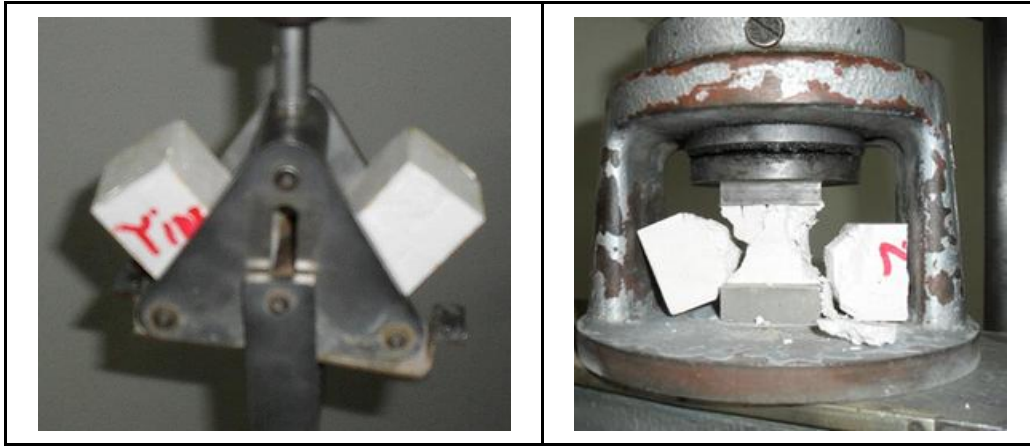


Figura 4.31. Ensayos mecánicos destructivos sobre morteros.

En las probetas dobles ejecutadas con morteros de arena y cal reforzada con 1/20 parte de cemento se determinó la resistencia a compresión obteniendo los resultados de la Tabla 4.20. La Figura 4.32 muestra el ensayo realizado.

Tabla 4.20. Resistencia a compresión en probetas dobles f_c (MPa) a 42 días de edad

Probeta	f_c (MPa)
A	2,46
B	2,41
C	2,38
D	2,77
E	2,91
F	2,59
Prom	2,59



Figura 4.32. Ensayo mecánico destructivo sobre probeta doble.

Fue determinada la resistencia a compresión de los muros a 270 días de edad, obteniendo los valores que se indican en la Tabla 4.21.

Tabla 4.21. Resistencia a compresión de muros a 270 días de edad (MPa)

Mortero	0,8	0,85	0,9
Probeta 1	4,00	3,47	3,83
Probeta 2	3,47	4,32	3,63
Probeta 3	3,29	4,41	4,21
Prom	3,59	4,07	3,89
Coefficiente de variación	8,4%	10,46%	6,3%

4.2.4.2. Resistencia a cortante y resistencia al corte por compresión diagonal

La resistencia a cortante de cada probeta fue determinada sometiénolas a las condiciones de ensayo detalladas en el punto 3.2.4. Los resultados de ensayo se muestran en la Tabla 4.22 donde se indica el nivel de precompresión correspondiente.

Tabla 4.22. Resistencia a cortante f_{voi} (MPa) en tripletas a 270 días de edad

Mortero	0,8		0,85		0,9	
Precompresión	Carga de rotura (N)	f_{voi} (MPa)	Carga de rotura (N)	f_{voi} (MPa)	Carga de rotura (N)	f_{voi} (MPa)
0,2 MPa	20678	0,37	24108	0,43	19404	0,35
0,6 MPa	35280	0,63	31850	0,57	38906	0,69
1,0 MPa	42140	0,75	46060	0,82	39592	0,70

El tipo de fallo correspondiente a cada uno de los ensayos se muestra en la Tabla 7.23 y se representan en la Figura 4.33.

Tabla 4.23. Resistencia a cortante tipo de fallo en ambas juntas

0,8	0,85	0,9
Fallo B/ fallo B	Fallo B/ fallo D	Fallo B /fallo B
Fallo B/ fallo B	Fallo B/ fallo B	Fallo A/ fallo D
Fallo B/ fallo D	Fallo B/ fallo B	Fallo A/ fallo A



a) b) c)

Figura 4.33. a) Fallo B/fallo D, b) Fallo A/ fallo A, c) Fallo B/fallo B.

Por otra parte fue evaluada la resistencia a corte por compresión diagonal en probetas tipo muro (Figura 4.34) de dimensiones aproximadas de 40 por 45 cm de lado y 11 cm de espesor elaboradas con mortero de relación agua/cal 0,85. Dicha evaluación arrojó los resultados que se aprecian en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24: Resistencia a corte en muros a 270 días de edad

	Carga de rotura (N)	Tau (MPa)
Probeta 1	15495	0,238
Probeta 2	20447	0,315
Probeta 3	25396	0,380
Prom		0,311

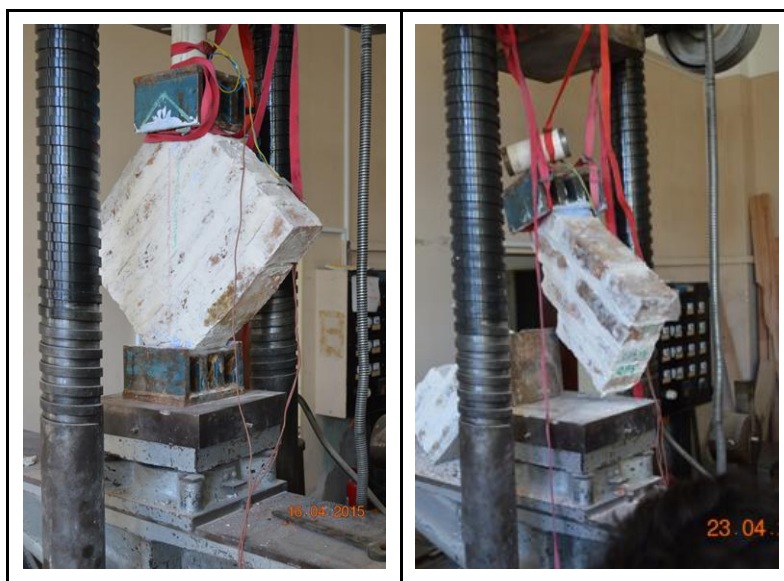


Figura 4.34: Resistencia a corte por compresión diagonal.

4.2.5. Características mecánicas mediante técnicas no destructivas

4.2.5.1. Ultrasonido

Previo al ensayo de corte con precompresión, las tripletas fueron ensayadas con ultrasonido para caracterizar el estado de la junta mediante la amplitud del primer máximo. En la Tabla 4.25 se presentan los datos obtenidos.

Tabla 4.25. Valores de ultrasonido promedio aplicado a las tripletas ensayadas a corte

Tripletas	Amplitud (mV)
0,8	10.7
0,85	9.9
0,9	4.3

4.2.5.2. Resonancia de Morteros

La Tabla 4.26 muestra los resultados promedio de 3 prismas para cada tipo de mortero con relación agua/cal 0,8 0,85 y 0,9. El módulo de elasticidad dinámico transversal y longitudinal se obtuvo siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C-215.

Tabla 4.26. Resultados promedio de resonancia en prismas de morteros distintos

a/c	ρ (g/cm ³)	f_T (Hz)	E_T (GPa)	f_L (Hz)	E_L (GPa)
0,8	1,77	2163,5	3,26	4839	4,26
0,85	1,71	2202,33	3,24	5014	4,39
0,9	1,68	2115,67	2,95	4793	3,96

4.2.5.3. Resistencia a penetración y dureza superficial

La Figura 4.35 muestra la ejecución y huella resultante de la ejecución de los ensayos sobre ladrillos. La muestra para cada tipo de ladrillo fue de seis ejemplares. Los valores de número de rebote y profundidad de penetración corresponden a la media de cuatro determinaciones en los seis ejemplares de cada clase (Tabla 4.27).

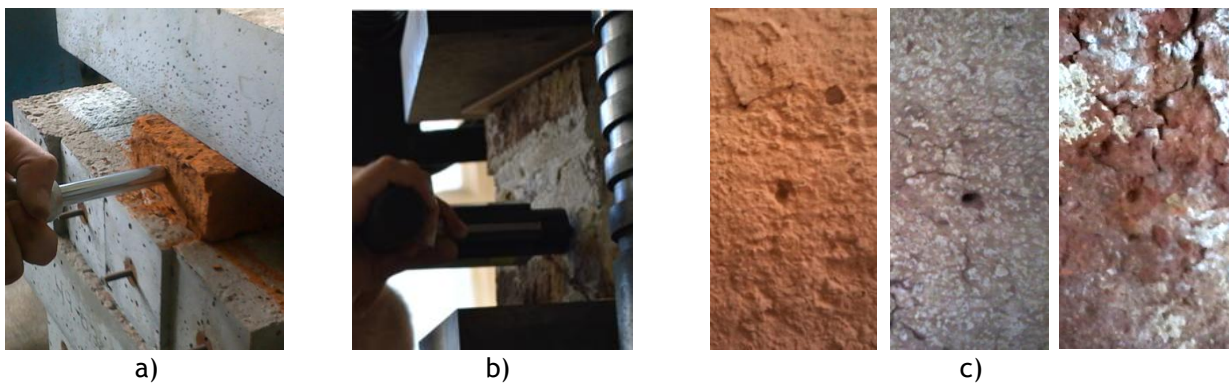


Figura 4.35. a) Ensayo de esclerometría; b) Ensayo de resistencia a la penetración; c) Huella dejada en ladrillos LAC, LAP y LAA.

Tabla 4.27. Dureza superficial y Resistencia a la penetración de ladrillos.

Ensayo	LAC	LAP	LAA
Número de rebote Esclerómetro	16	27	28
Profundidad de penetración (mm) Resistencia a la penetración	7,05	4,04	4,57

En morteros, los resultados de penetración se presentan en la Tabla 4.28, obtenidos del ensayo de probetas dobles a 42 días de edad. Los resultados de la Tabla 4.29 resultan de la media de tres determinaciones a 150 días de edad en tripletas. En ambos casos las probetas fueron sometidas a una restricción de movimiento, aplicando para ello una mínima carga en la cara superior. La Figura 4.36 muestra la huella dejada en el mortero.

Tabla 4.28. Resistencia a la penetración en morteros a 42 días de edad

Probeta doble	Profundidad de penetración en mm
A	>10,8
B	>10,8
C	>10,8
D	>10,8
E	>10,8
F	>10,8

Tabla 4.29. Dureza superficial y Resistencia a la penetración de morteros de junta en probetas denominadas tripletas a la edad de 150 días

Ensayo	0,8	0,85	0,9
Número de rebote Esclerómetro	15	14	13,5
Profundidad de penetración (mm) Resistencia a la penetración	>10,8	>10,8	>10,8

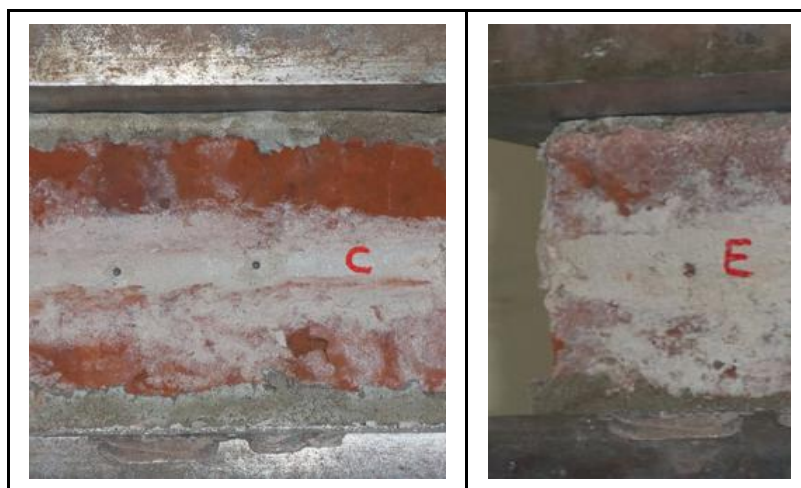


Figura 4.36: Huella del ensayo de resistencia a la penetración en mortero.

En la Figura 4.37 se muestran los ensayos de resistencia a la penetración y dureza superficial aplicados a tripletas.



Figura 4.37. a) Ensayo de resistencia a la penetración; b) Ensayo de dureza superficial sobre probetas denominadas tripletas.

Tanto dureza superficial como resistencia a la penetración ensayada en las probetas tipo muro arrojaron los valores que se observan en la Tabla 4.30 para una edad de 270 días.

Tabla 4.30. Dureza superficial y resistencia a la penetración en morteros de junta en probetas denominadas muros a la edad de 270 días

Ensayo	0,8	0,85	0,9
Número de rebote Esclerómetro	15	15	13
Profundidad de penetración (mm) Resistencia a la penetración	10,3	10,3	10,8

4.3. Análisis de resultados experimentales

4.3.1. Mampuestos

4.3.1.1. Dimensiones y densidad

Las dimensiones de los mampuestos históricos son diferentes a las de los mampuestos actuales (tanto plateados como colorados). Como se observa en la Tabla 4.5, su longitud y ancho es aproximadamente un 40% mayor mientras que su altura es ligeramente menor al 15%. Las dimensiones de los mampuestos históricos tienen una mayor dispersión. A su vez, se observa que los ladrillos patrimoniales presentan una forma menos regular que los ladrillos actuales, dadas sus características de planeidad y dimensiones de las caras.

La densidad de los mampuestos históricos es levemente superior a la de los mampuestos actuales ensayados, tal como se observa en la Tabla 4.6, si bien las diferencias son relativamente pequeñas, entre el 4 y 8% respecto a los ladrillos plateados y colorados respectivamente.

4.3.1.2. Propiedades relativas al contenido y pasaje de agua

Con respecto a las propiedades relativas al contenido y pasaje de agua se observa que los ensayos de absorción, mostradas en la Tabla 4.9, para las tres clases de ladrillos analizados muestran resultados muy próximos. Ello es consecuencia que los mismos tienen una matriz de poros muy similar, capaz de alcanzar valores de absorción prácticamente idénticos y representativos de este tipo de material de construcción, si se tienen en cuenta valores tomados de la bibliografía y los resultados de los ensayos realizados sobre piezas recientes e históricas.

En cambio la tasa inicial de absorción, presentada en la Tabla 4.7, muestra resultados significativamente diferentes. Los ladrillos colorados LAC demostraron poseer la mayor capacidad de absorción por capilares, alcanzando valores que superan el doble de los valores de los ladrillos plateados y equivalen a 1,6 veces el valor de los ladrillos antiguos. Ello deja en evidencia que los diferentes ladrillos a nivel de superficie poseen una matriz capilar diferente. Los resultados muestran que las propiedades de los ladrillos históricos se encuentran entre las de los de los ladrillos colorados y plateados, pero más próximos a las de los ladrillos plateados, que son los que tienen menor tasa inicial de absorción.

En relación a los efectos de los hidropelentes utilizados, a partir de los datos de la Tabla 4.8 se puede mencionar que en los mampuestos antiguos se produce una importante reducción de la tasa inicial de absorción, pero que esta disminución es claramente menor que la que se produce cuando los mismos hidropelentes son aplicados sobre los mampuestos actuales. En cambio sobre la absorción, los efectos de los hidropelentes reducen los valores alcanzados pero en una cantidad mucho menor y no se observan diferencias importantes entre la reducción que se produce en los mampuestos históricos en relación con los actuales. Esto último puede constatarse al observar los valores de la Tabla 4.10. En la Figura 4.38 se muestra la variación entre los distintos mampuestos (tratados y no tratados con hidropelente) de la tasa inicial de absorción, mientras que en la Figura 4.39 se presenta la variación de la absorción.

Lo anteriormente comentado, así como las gráficas de la Figuras 4.38 y 4.39, permiten afirmar que el tratamiento hidropelente fue efectivo, tanto para los ladrillos actuales como para los patrimoniales. Sin embargo, se observa que en los ladrillos patrimoniales la efectividad es significativamente menor que en los ladrillos actuales. Esto puede deberse a que, en el caso de los ladrillos patrimoniales, el tratamiento fue aplicado luego de haber sido utilizados y asentados con mortero de cal.

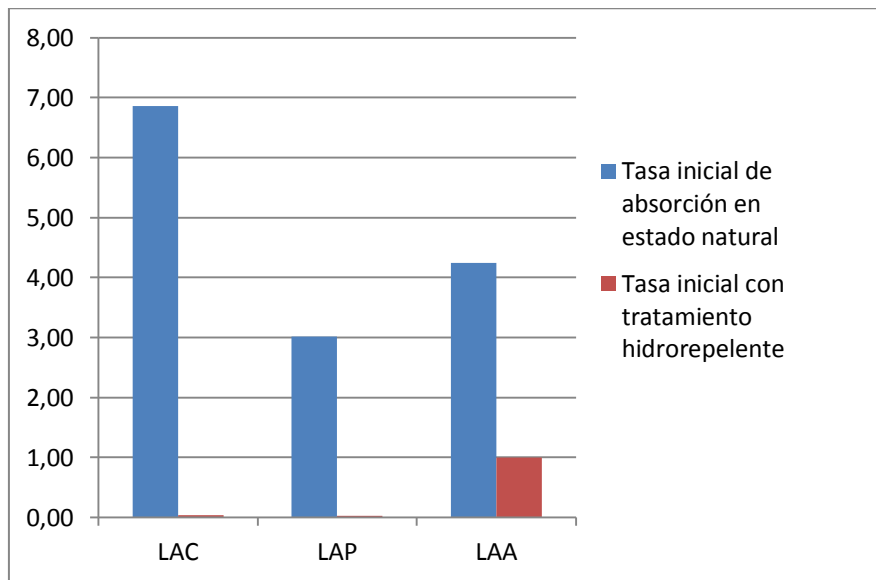


Figura 4.38. Tasa inicial de absorción para distintos ladrillos (kg/m².min)

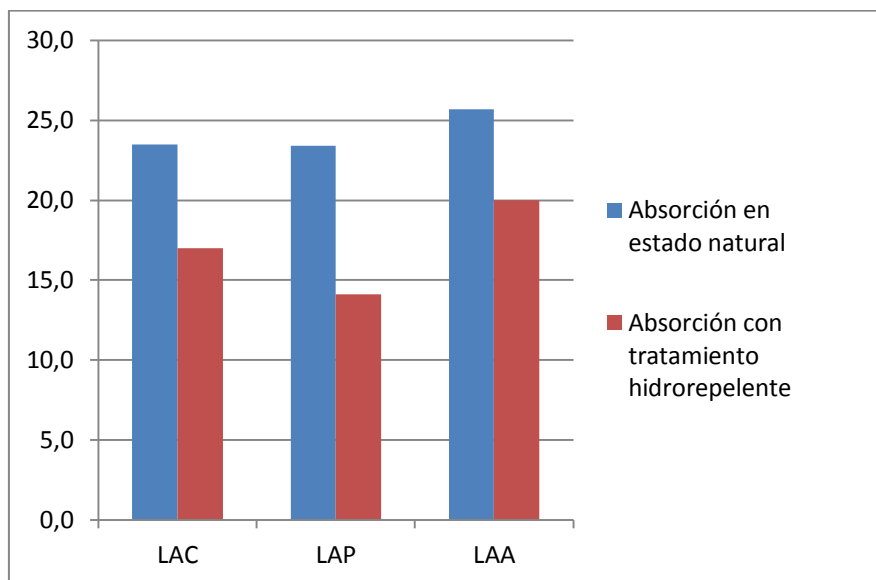


Figura 4.39. Absorción para distintos ladrillos (%)

4.3.1.3. Propiedades mecánicas y técnicas no destructivas

En relación a las propiedades mecánicas se puede señalar, tal como se observa en la Tabla 4.17, que los ladrillos históricos presentan una resistencia a compresión mucho mayor (del orden de 80%) que los ladrillos colorados y levemente superior (del orden del 9%) a la de los ladrillos plateados. En cambio en la resistencia a tracción obtenida por flexión, mostrada en la Tabla 4.18 los ladrillos históricos muestran resultados intermedios entre los ladrillos LAC y LAP.

Por su parte los resultados de dureza superficial muestran también una mayor dureza para los ladrillos antiguos y los plateados, los cuales alcanzan valores prácticamente equivalentes en el ensayo, mientras que los ladrillos colorados alcanzan valores de número de rebote del orden del 58% del máximo valor obtenido que es el de los ladrillos antiguos. Complementariamente, los ensayos de resistencia a la penetración utilizando el equipo Windsor Pin permiten observar que la mayor resistencia corresponde a los ladrillos plateados, seguidos de cerca por los antiguos (LAA). La menor resistencia la presentan los LAC. Estos resultados fueron presentados en la Tabla 4.27.

Adoptando como valor patrón el valor alcanzado en todos los ensayos por los ladrillos antiguos (Asilo Larrañaga u Hospital Maciel), en la Figura 4.40 se puede observar la correspondencia que existe entre las determinaciones de resistencia a compresión, tracción por flexión, dureza superficial e índice de penetración (considerando a éste como la parte del micrómetro que no penetra en mm).

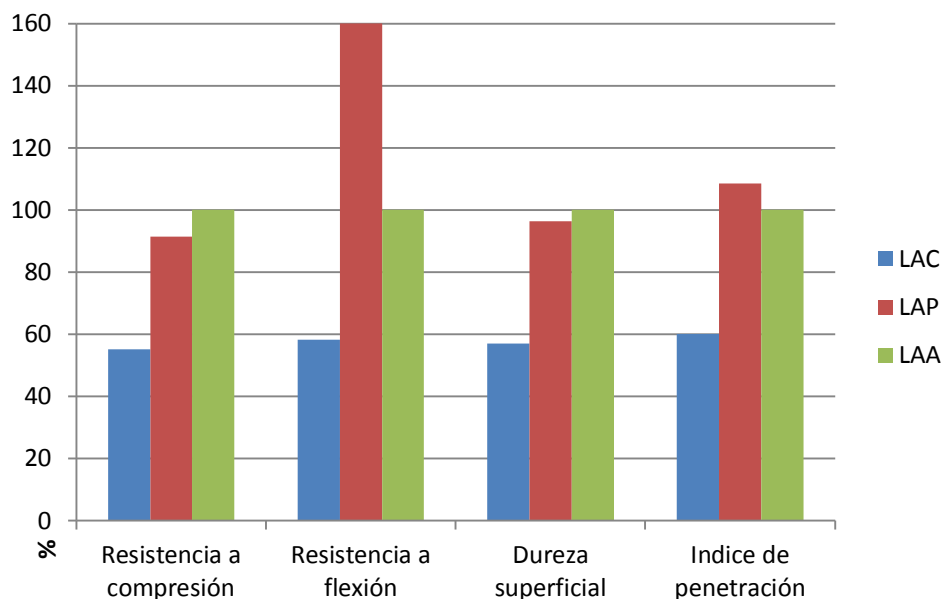


Figura 4.40. Correspondencia entre las determinaciones de resistencia a compresión, a tracción, dureza superficial y resistencia a penetración en ladrillos

4.3.2. Morteros

4.3.2.1. Microestructura

Con la aplicación de la técnica de Difracción de Rayos X, para el análisis microestructural de las muestras analizadas, se identificaron los picos de difracción en mortero perteneciente al Edificio Asilo, correspondientes principalmente al carbonato de calcio (CaCO_3) y al cuarzo (SiO_2). En general, los patrones de difracción de las muestras de morteros con diferentes dosificaciones de a/c, arrojaron las fases cristalinas presentes en cada uno de ellos, verificando agregados y aglomerante usados en la fabricación de los mismos.

Según los análisis realizados a las muestras extraídas de los morteros con diferentes dosificaciones, pudo observarse la presencia importante de la portlandita (Ca(OH)_2) y pequeñas dosis de calcita (CaCO_3) a edades tempranas. En la evolución temporal de las muestras pudo verificarse el proceso de carbonatación en las mismas al constatar el aumento de la calcita en detrimento de la portlandita, llegándose a cierto nivel de saturación a los 265 días.

Con este ensayo también se identificaron diferencias importantes en las muestras correspondientes a morteros de juntas del interior y del exterior de probetas, mostrando que el proceso de carbonatación fue muy superior en estas últimas al estar en contacto con el medio ambiente.

Con la Microscopía electrónica de barrido se pudo verificar la composición mineralógica de mortero patrimonial del Edificio Asilo, mostrando la presencia de calcio, carbono, silicio y oxígeno en proporciones destacables, indicando que los elementos constituyentes de estos morteros son principalmente carbonato de calcio y arena.

Así mismo se relevaron los elementos presentes en las muestras de los morteros provenientes de las probetas que se analizaron con esta técnica. Los espectros obtenidos a partir de la espectroscopía de energía dispersiva, permitieron realizar el análisis mineralógico a nivel zonal, con diferentes resoluciones, identificando el estado de los cristales de silicio (de arena) y cómo se distribuyen/adhieren los polvos de carbonato de calcio sobre ellos. Se verificó la morfología redondeada y con forma de racimo, característicos de los cristales de carbonato de calcio. De la comparación entre muestras de juntas de morteros tomadas de zona interior y zona exterior de probetas pudo observarse la presencia de mayor cantidad de grietas y un aumento de la porosidad en las que estaban expuestas al ambiente exterior, donde el proceso de carbonatación fue mucho mayor que en el interior. La menor existencia de poros hace que las partículas de carbonato de calcio ayuden a mejorar la impermeabilidad del material hacia el interior preservándolos de los agentes atmosféricos como el CO₂ y el H₂O.

4.3.2.2. Propiedades mecánicas y ensayos no destructivos

En cuanto a los ensayos mecánicos realizados a probetas de mortero realizadas a los 28 días, en la Tabla 4.19 se observa que es mayor la resistencia a compresión de los morteros con agua/cal 0.8, seguidas por la resistencia de las probetas de 0.85 y finalmente la menor resistencia fue la de las probetas con relación agua /cal 0.9. A los 270 días se muestra que la resistencia a compresión entre los morteros 0.8 y 0.85 tiende a igualarse, siendo en ambos casos aproximadamente mayor en un 20% que la resistencia a compresión de los morteros con relación agua/cal 0.9. Por lo que la relación entre las resistencias de los morteros 0.8 y 0.9, pasa de ser un 82% mayor a los 28 días a ser solamente un 20% mayor en 270 días. En la Figura 4.41 se observa como a los 270 los tres tipos de mortero tienen menor diferencia de resistencias en términos porcentuales.

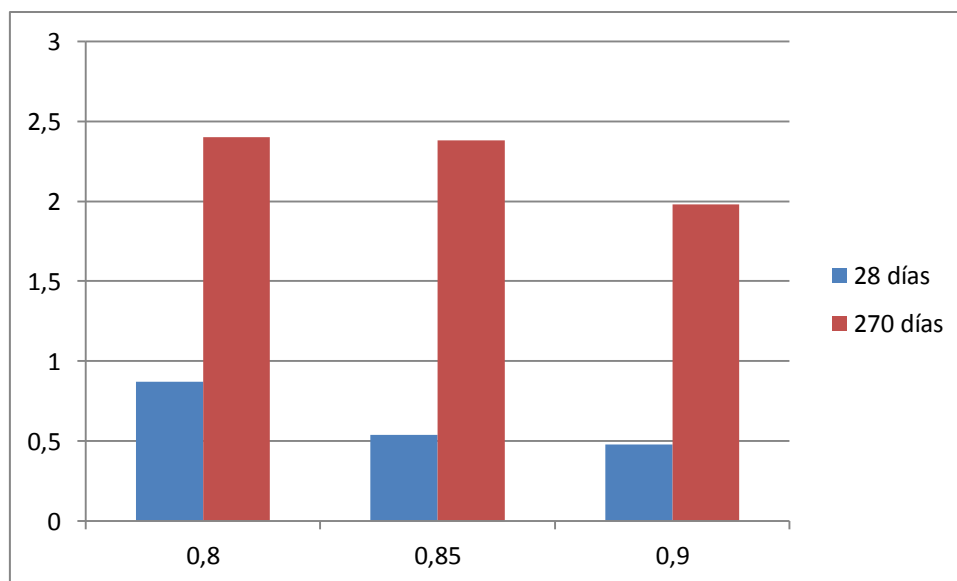


Figura 4.41. Resistencia a compresión de los morteros (MPa) a los 28 y 270 días.

Los resultados de las técnicas no destructivas analizadas, presentados en la Tabla 4.30, muestran en valores promedio que las técnicas de resistencia a la penetración y dureza superficial permiten diferenciar entre los morteros con relación agua/cal 0,8 y 0,85 de los morteros realizados con relación agua/cal igual a 0,9. No se observan diferencias de significación entre los morteros con relación agua/cal 0,8 y 0,85.

En cuanto a los valores de ultrasonido aplicados a las tripletas, utilizando la amplitud del primer máximo es posible con valores promedio distinguir entre las tripletas elaboradas con morteros 0,8 y 0,85 de las tripletas elaboradas con morteros con relación agua/cal 0,9. Estos resultados fueron presentados en la Tabla 4.25.

Similar escenario se presentó con los valores obtenidos con las técnicas de resonancia, presentados en la Tabla 4.26, los módulos de elasticidad obtenidos para los morteros 0,8 y 0,85 son mayores a los valores obtenidos de los morteros con relación agua/cal 0,9. Sin embargo, nuevamente no se observan diferencias significativas en los valores obtenidos de los morteros con relaciones 0,8 y 0,85.

En la Figura 4.42 se presentan gráficamente los valores de resistencia a compresión, amplitud de ultrasonido, módulo obtenido por resonancia, número de rebote del ensayo de dureza superficial e índice de penetración obtenido a partir del Windsor Pin. Los valores fueron normalizados en función del valor máximo de cada parámetro medido.

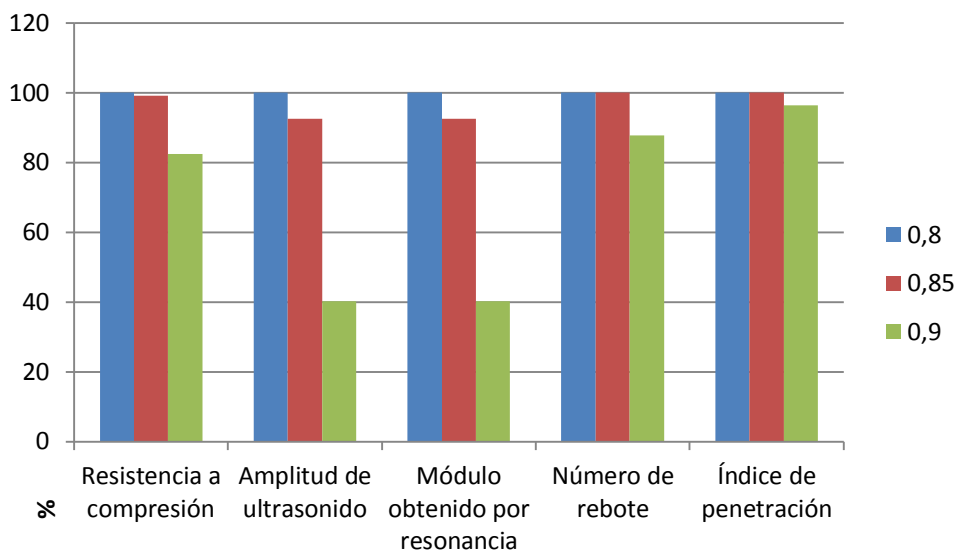


Figura 4.42. Correspondencia entre las determinaciones de resistencia a compresión, amplitud de ultrasonido, módulo de elasticidad determinado por resonancia, dureza superficial y resistencia a penetración en morteros con distinta relación agua/cal

La Figura 4.42 se observa que las diferentes técnicas no destructivas utilizadas muestran similar comportamiento que los resultados obtenidos de los ensayos destructivos para los morteros con relación agua/cal igual a 0.8 y 0.85, los cuales son mayores que los resultados de los morteros con relación agua/cal 0.9.

4.3.3. Muros

4.3.3.1. Propiedades relativas al contenido de humedad

En relación a las medidas de resistividad eléctrica y constante dieléctrica para determinar el contenido de humedad, a partir de las Tablas 4.12 y 4.13 se observa que la técnica de resistividad eléctrica es sensible a niveles de humedad superiores a los niveles que son posibles de detectar con el geo-radar, por lo que el geo-radar es más sensible a pequeños cambios de humedad. A su vez, el resistímetro es sensible a humedad superficial, mientras que el geo-radar es capaz de medir cambios en todo el espesor de los muros.

La técnica de geo-radar utilizada para determinación de la humedad mostró resultados muy cercanos entre los valores de humedad real y los obtenidos por el modelo calibrado en laboratorio, como se muestra en la Figura 4.43, donde la línea unidad $x=y$ es representada en azul. Este resultado obtenido en ladrillos patrimoniales fue lo que se utilizó para la verificación de la humedad en los muros de la Aduana de Oribe.

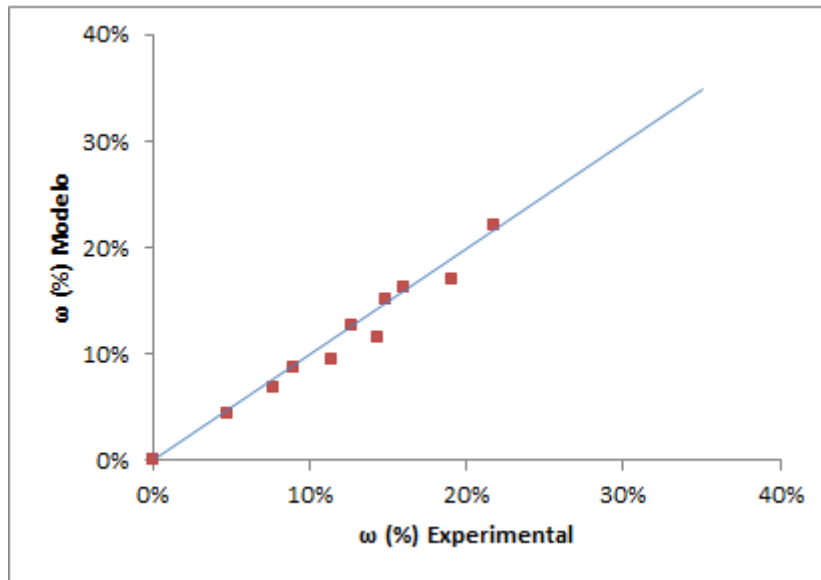


Figura 4.43. Correspondencia entre las determinaciones de humedad experimental (%) vs la humedad obtenida por el modelo mediante el geo-radar (%)

Por otra parte, los datos presentados en la Tabla 4.44 son graficados en la Figura 4.13. Se diferencia el comportamiento de los ladrillos LAC y LAP por los diferentes coeficientes angulares de las rectas que aproximan los datos experimentales.

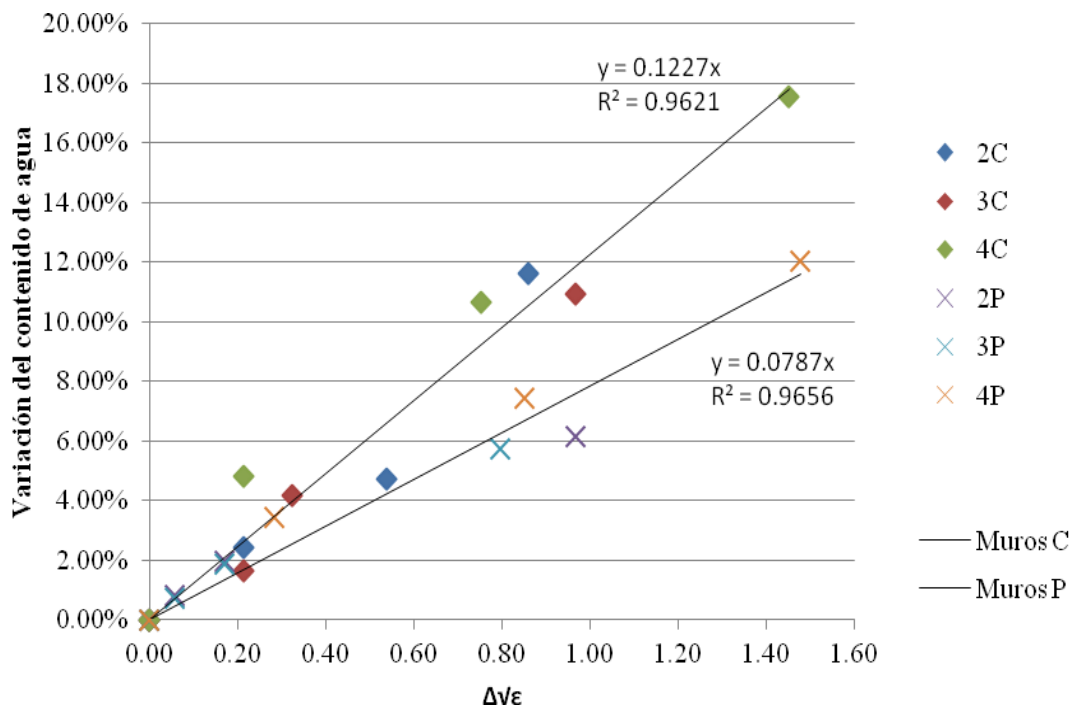


Figura 4.44. Variación del contenido de agua en función de la variación de la raíz cuadrada de la constante dieléctrica para los distintos muretes.

La termografía infrarroja se presenta como un buen complemento en la detección de humedades mediante geo-radar, ya que permite obtener resultados de zonas con potenciales problemas de humedad. El estudio de dichas zonas debe ser complementado con geo-radar para verificar que el problema no sea un cambio en las propiedades superficiales.

4.3.3.2. Propiedades mecánicas y ensayos no destructivos

En cuanto a los resultados presentados en la Tabla 4.21 se observa que la resistencia a la compresión en muros elaborados con morteros con relación agua/cal 0.8, 0.85 y 0.9 muestran que los muros elaborados con morteros 0.85 y 0.9, tienen en promedio una resistencia a la compresión cercana al 10% mayor que la resistencia obtenida por los muros elaborados con morteros con relación agua/cal igual a 0.8. Demostrando que la resistencia a la compresión de los muros no está determinada solamente por la resistencia a la compresión de los morteros. De hecho el espesor de la junta es una variable importante en el análisis, como lo son la trabajabilidad del mortero, la humedad de los ladrillos, entre otras.

De acuerdo con las recomendaciones del Eurocódigo 6 (UNE-EN 1996-1), la resistencia a compresión puede determinarse a partir de la Ecuación 4.3.

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Donde:

- K es una constante que para ladrillos macizos vale 0,55.
- f_b es la resistencia a compresión de los ladrillos, en N/mm².
- f_m es la resistencia a compresión del mortero, en N/mm².

La resistencia a compresión media de los ladrillos LAP resultó 10,2 MPa, mientras que la resistencia a compresión de los morteros varía entre 1,98 a 2,40 MPa. Sustituyendo se obtienen valores de resistencia de los muros de entre 3,43 y 3,63 MPa. De la Tabla 4.21, se obtienen valores en el rango de 3,59 a 4,07 MPa.

De estos resultados se observa que los valores experimentales se corresponden con los valores recomendados en la normativa para los materiales analizados. Por otra parte, se hace notar que la resistencia del mortero es un parámetro que tiene menor influencia en la resistencia del muro que la resistencia de los ladrillos. De esta forma, con una estimación aproximada de la resistencia a compresión del mortero mediante técnicas no destructivas y con la resistencia a compresión de los ladrillos es posible obtener una razonable estimación de la resistencia a compresión del muro.

En cuanto a la resistencia al corte se observó que los valores obtenidos para los diferentes tipos de mortero mostraron valores similares para los diferentes niveles de precompresión. La Figura 4.45 muestra los resultados obtenidos. Los resultados de resistencia a corte sin precompresión, obtenidos como la ordenada en el origen de la línea de tendencia para cada relación agua/cal presentan valores de 0.314, 0.298 y 0.318 para relaciones agua/cal de 0,8, 0,85 y 0,9 respectivamente, como se presenta en la Figura 4.46. En cuanto al coeficiente de rugosidad o fricción presenta valores de 0.488, 0.475 y 0.438 para relaciones agua/cal de 0,8, 0,85 y 0,9.

Con respecto a los muros que se rompieron a corte sin precompresión, se obtuvieron valores de resistencia al corte sin precompresión del mismo orden que los valores obtenidos en las tripletas. El valor de resistencia al corte promedio fue de 0.311 MPa.

Los valores antes presentados son consistentes con los valores presentados en el Eurocódigo 6 (UNE-EN 1996-1) y en las recomendaciones del IET.

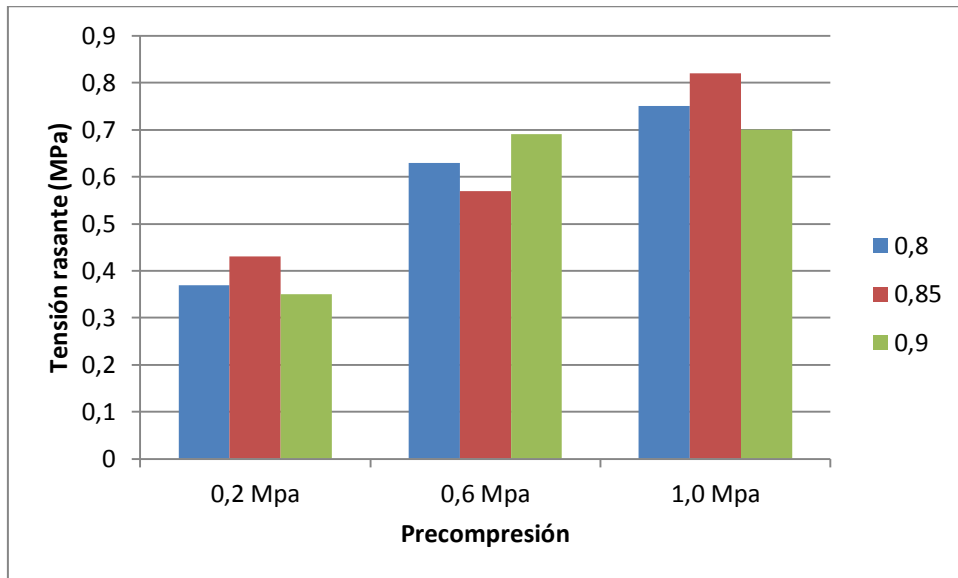


Figura 4.45. Resistencia a corte para diferentes niveles de precompresión en tripletas

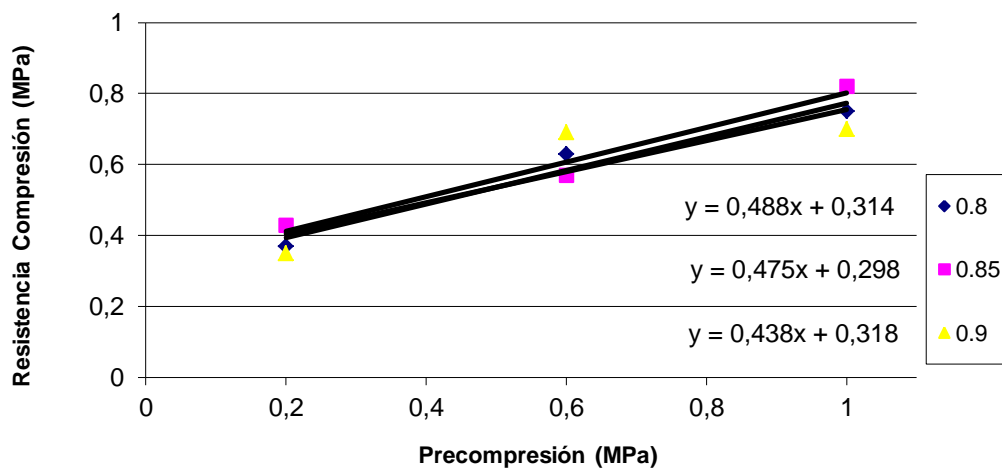


Figura 4.46. Resistencia a corte para diferentes niveles de precompresión en tripletas con ajuste lineal a los datos experimentales

5) Indique las conclusiones a las que ha arribado.

En este punto se presentan las conclusiones finales del Proyecto. En primer lugar, cumpliendo con el objetivo principal y el tercer objetivo particular del trabajo, se establece una recomendación de metodología de inspección basada en técnicas no destructivas para la evaluación y control de los sistemas murarios estructurales en mampostería cerámica. En segundo lugar se presentan las conclusiones y los comentarios finales del Proyecto.

5.1. Metodología de inspección

De acuerdo a lo planteado en el objetivo principal y en el tercer objetivo particular del proyecto, se presenta una serie de recomendaciones basadas en técnicas no destructivas para la evaluación y el control de sistemas murarios de mampostería cerámica.

Habiendo estudiado el alcance y las limitaciones de las técnicas no destructivos presentadas en los puntos anteriores, se plantea un protocolo con recomendaciones para generar una metodología de inspección que permita orientar en futuras intervenciones que se planifiquen realizar en estructuras murarias del patrimonio arquitectónico.

1. Estudio de recaudos gráficos y antecedentes de intervención en la edificación.

La información previa puede obtenerse por dos caminos diferentes: por información verbal o escrita. En el primer caso es recomendable la redacción de un resumen de cada reunión que se tenga con el peticionario y el posterior envío para asegurarse que se ha recogido correctamente la información. En el segundo caso, son de particular interés los cálculos, planos y la información sobre los datos geotécnicos.

2. Antecedentes de edificaciones de similares características.

La época de construcción de la estructura muraria, la ubicación donde se realizó la obra y los materiales que se utilizaron, entre otras características, permiten obtener información de la estructura particular a partir de los antecedentes de edificaciones similares. En este punto es fundamental la experiencia del grupo que realiza la inspección de la estructura.

3. Inspección visual y relevamiento geométrico.

Debido a su bajo costo y al alto potencial de obtención de información, la inspección visual es una etapa fundamental e inevitable en el proceso de inspección de una estructura. En este punto puede ser de gran utilidad la inspección remota mediante equipos especiales como drones o sondas de diferentes diámetros y diferentes longitudes, según la aplicación. Nuevamente, en este punto es primordial el conocimiento del inspector, particularmente de los mecanismos de falla de los sistemas murarios y de las patologías asociadas.

4. Utilización de técnicas no destructivas para la identificación primaria de zonas de la edificación con propiedades diferentes (cámara infrarroja).

Mediante la aplicación de una cámara termográfica es posible detectar con rapidez y una adecuada precisión zonas en los sistemas murarios con diferentes propiedades térmicas, específicamente humedad. A su vez, la técnica es sensible a otras características que pueden ser de mucha utilidad conocer, como discontinuidades en los materiales utilizados y posteriores reparaciones, anomalías y cavidades producidas por vacíos, fracturas, ductos o tuberías, fallas en el aislamiento térmico del edificio.

5. Determinación de espesores de muros y detección de zonas con diferentes niveles de humedad mediante la utilización de Geo-Radar.

Luego de la utilización de la cámara infrarroja y de la identificación de las zonas con potenciales problemas de humedad, la aplicación del Geo-Radar permite la cuantificación con una buena precisión del contenido de humedad. La técnica además permite la determinación del espesor de los muros, la caracterización de muros de varias capas (por ejemplo: paredes dobles) y la identificación de barras de acero usadas como refuerzo.

6. Evaluación de la calidad de los mampuestos y del mortero de las juntas mediante resistencia a la penetración.

La medición de la resistencia a penetración realizada mediante Windsor Pin permite la evaluación objetiva de la calidad de los mampuestos y del mortero de las juntas. Esta técnica no debe utilizarse para obtener la resistencia de los materiales sino una indicación de la calidad y de diferencias entre distintas zonas.

7. Utilización de esclerómetro de rebote de bajo impacto para determinación de zonas con propiedades mecánicas diferentes.

La utilización de un esclerómetro de baja energía es complementaria la evaluación de los materiales mediante la resistencia a la penetración. A partir de su aplicación se pueden detectar grandes variaciones en la uniformidad de la mampostería, por ejemplo, por defectos constructivos.

8. Realización de ensayos dinámicos con acelerómetros para determinar huecos y continuidad entre elementos constructivos.

Los ensayos dinámicos, por transmisión de ondas de tensión, son eficaces para investigar la continuidad de los elementos (por ejemplo: estado de conexión entre paredes dobles), determinar la existencia de vacíos e incluso determinar el nivel de daño de la mampostería. Estos ensayos realizados de forma periódica permiten detectar cambios en las propiedades de los materiales en el tiempo, por lo que es posible detectar en forma temprana patologías o incorrecto funcionamiento de sistemas estructurales.

9. Recolección o extracción de mampuestos para ensayos destructivos y no destructivos.

Ya sea porque se encuentren sueltos en el sitio o porque se extraigan algunos, con los mampuestos se pueden determinar las dimensiones, la densidad, la absorción, la permeabilidad, así como ajustar las técnicas de resistividad y Geo-Radar para aplicar con mayor precisión en campo. A su vez, con los mampuestos se pueden realizar ensayos destructivos en prensa para determinar la resistencia a compresión que resulta determinante en la resistencia a compresión de la mampostería en su conjunto.

10. Extracción de muestras de mortero para realización de difracción de RX y microscopía electrónica de barrido.

La extracción de muestras de mortero para realización de difracción de RX y microscopía electrónica de barrido es útil para determinar la composición química, el nivel de carbonatación, así como la presencia de contaminantes. A su vez, es posible la caracterización de poros, grietas o fracturas en la estructura microscópica de las muestras.

11. Monitoreo Estructural

En los casos que se considere necesario, es posible realizar un monitoreo continuo de la estructura. De esta forma se pueden detectar los efectos causados por el deterioro de los materiales y por las acciones. Los instrumentos que se pueden utilizar son acelerómetros, inclinómetros, termocuplas, LVDTs, entre otros.

12. Conclusiones y recomendaciones

Realizadas las etapas anteriores, se deben establecer las conclusiones y recomendaciones. En este caso es fundamental establecer con claridad las causas de las patologías, su trascendencia y evolución previsible, la influencia en la seguridad, funcionalidad y durabilidad de la construcción y la necesidad o no de refuerzos o tratamientos en función del nivel de riesgo y confort para la utilización de la construcción.

5.2. Conclusiones y comentarios finales

Es importante destacar en primer lugar que se desarrollaron todas las etapas previstas en el proyecto. Como primera conclusión, se puede afirmar que se alcanzó el objetivo general del proyecto, el cual planteaba el desarrollo de una metodología basada en técnicas no destructivas aplicables a la evaluación y el control de estructuras murarias patrimoniales. En el punto 4.3 se presenta el análisis de resultados con comentarios que son aplicables al desarrollo de una metodología de intervención en edificaciones murarias. Los resultados han mostrado que algunas técnicas resultan más aptas que otras para el estudio de idénticas propiedades y que es posible establecer combinaciones de técnicas complementarias para estudiar integralmente la estructura. En el punto 5.1 se presentan recomendaciones sobre una posible metodología de inspección, donde se establecen las técnicas no destructivas que pueden ser aplicadas y los resultados que se pueden obtener en cada caso.

En cuanto a los objetivos particulares, el primero de los objetivos establecido en el proyecto fue alcanzado; este buscaba establecer las prestaciones y alcance de las diferentes técnicas no destructivas aplicables a sistemas murarios patrimoniales. En los capítulos 3.2, 4.2 y 4.3 se presentan los puntos que sustentan la concreción de dicho objetivo. En el punto 3.2 del presente documento se presenta una introducción general a las técnicas no destructivas utilizadas durante el proyecto y la aplicación de dichas técnicas a estructuras murarias patrimoniales, junto con los alcances y limitaciones. Finalmente en los puntos 4.2 y 4.3 se presentan los resultados y el análisis de los resultados respectivamente.

En relación al segundo objetivo particular del proyecto, relativo al análisis y la correlación de los resultados obtenidos con las técnicas no destructivas y destructivas se desprende del estudio que es posible, mediante técnicas no destructivas, caracterizar las propiedades de los materiales componentes y de los muros de estructuras murarias patrimoniales. En el capítulo 4.3 se presentan las correlaciones entre las técnicas destructivas y no destructivas y se comentan los alcances de cada técnica no destructiva empleada. Asimismo, se analizan los casos en que las técnicas son útiles como indicadores cualitativos de las diferentes propiedades y los que son útiles como indicadores cuantitativos.

Resulta de interés recalcar la necesidad de contar con un equipo multidisciplinar para abordar el estudio y caracterización de materiales de construcción donde prevalece la aplicación de técnicas no destructivas, lo que requiere del ajuste de métodos, alcances e incluso terminología aplicadas en cada una de las etapas de experimentación y análisis desde las diferentes disciplinas. Se puede afirmar que el proyecto constituye una muy buena experiencia en este sentido, y que de alguna manera ha sentado las bases para la conformación de un equipo especializado en la temática.

6) Adjunte publicaciones, ponencias y otros materiales de difusión generadas en el marco del proyecto.

6.1. Publicaciones realizadas en el marco del proyecto

“Diagnóstico del estado de muros de mampostería en edificación patrimonial de finales del siglo XIX mediante la aplicación de ensayos no destructivos”

Autores: Cetrangolo, Gonzalo; Morquio, Atilio; Aulet, Alina; Spalvier, Agustín.

REHABEND 2014, Santander, España. Abril de 2014. Congreso Latinoamericano sobre Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio.

“Capilla jesuítica Calera de las huérfanas. Consideraciones sobre el estado actual de conservación y proyecciones futuras”

Autores: Geymonat, Jacqueline; Mussio, Gianella; Romay, Carola; Sabalsagaray, Stela.

REHABEND 2014, Santander, España. Abril de 2014. Congreso Latinoamericano sobre Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio.

“Caracterización de morteros de elevación de muros mediante técnicas destructivas y no destructivas”

Autores: Sabalsagaray, Stela; Romay, Carola.

XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Montevideo, Uruguay. Noviembre 2014.

“Cuantificación del contenido de humedad en materiales de construcción con radar penetrante de tierra”

Autores: Cetrangolo, Gonzalo; Domenech, Leandro; Fiori, Lucia; Aulet, Alina; Morquio, Atilio.

XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Montevideo, Uruguay. Noviembre 2014.

“Caracterización de materiales del patrimonio arquitectónico del Uruguay”

Autores: Sabalsagaray, Stela; Romay, Carola.

CONPAT 2015. XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construcao, Lisboa, Portugal.

“Cuantificación del contenido de humedad en ladrillos utilizando radar penetrante de tierra”

Autores: Cetrangolo, Gonzalo; Domenech, Leandro; Fiori, Lucia; Moltini, Gonzalo; Aulet, Alina; Morquio, Atilio.

CONPAT 2015. XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construcao, Lisboa, Portugal.

“Evaluación de la utilidad de diferentes técnicas no destructivas con el objetivo de determinar el contenido de humedad en materiales tradicionales del patrimonio arquitectónico del Uruguay”

Autores: Cetrangolo, Gonzalo; Domenech, Leandro; Morquio, Atilio; Mussio, Gianella; Romay, Carola.

CINPAR 2015. XI Congreso internacional sobre patología y recuperación de estructuras, São Leopoldo, Brasil.

6.2. Publicaciones en estado de preparación

“Caracterización física y mecánica de morteros de toma aplicables en la conservación de sistemas constructivos tradicionales del Uruguay”

Autores: Sabalsagaray, Stela; Romay, Carola.

REHABEND 2016, Burgos, España, 2016. Congreso Latinoamericano sobre Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio.

“Estudios morfológicos y físico-mecánicos de morteros del patrimonio arquitectónico y de laboratorio de diferentes composiciones”

Autores: Aulet, Alina; Cetrangolo, Gonzalo; Domenech, Leandro; Romay, Carola; Dalchiele, Enrique; Morquio, Atilio.

REHABEND 2016, Burgos, España, 2016. Congreso Latinoamericano sobre Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio.

“Ensayos no destructivos aplicados a la detección de humedades en estructuras murarias patrimoniales”

Autores: Cetrangolo, Gonzalo; Domenech, Leandro; Aulet, Alina; Morquio, Atilio.

REHABEND 2016, Burgos, España, 2016. Congreso Latinoamericano sobre Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio.

“Incidencia de los tratamientos hidrórepelentes en la durabilidad y resistencia mecánica en materiales cerámicos del patrimonio arquitectónico del Uruguay”.

Autoras: Mussio, Gianella; Romay, Carola; Mussio, Graciela; Gepp, Magdalena.

COIBRECOA 2015. 4º Congreso Iberoamericano y XII Jornada técnica de restauración y conservación del patrimonio. LEMIT, La Plata, Argentina. Octubre de 2015.

6.3. Ponencias

“Morteros de nuestro patrimonio arquitectónico - Un acercamiento a sus características físicas y mecánicas”.

Autores: Romay, Carola; Mussio, Gianella; Sabalsagaray, Stela; Gepp, Magdalena; Mussio, Graciela; Domenech, Leandro; Cetrangolo, Gonzalo; Aulet, Alina; Dalchiele, Enrique; Raimonda, Pablo; Morquio, Atilio.

Congreso sobre Inspección, Evaluación e Integridad de equipos industriales. Ciudad de Rivera, Uruguay. Octubre 2013.

“Cuantificación del contenido de humedad en materiales de construcción utilizando radar penetrante de tierra”.

Autores: Cetrangolo, Gonzalo; Domenech, Leandro; Fiori, Lucia; Moltini, Gonzalo; Aulet, Alina; Morquio, Atilio.

Conferencia invitada, a nombre de AENDUR y la UdelaR. 10o. Congreso de Mantenimiento, Gestión de Activos y Confiabilidad, Montevideo. Noviembre 2014.

6.4. Actividades de difusión

“Estudio de morteros de arena y cal en obras patrimoniales”.

Autores: Cetrangolo, Gonzalo; Morquio, Atilio; Aulet, Alina; Sabalsagaray, Stela; Romay, C.

Ingeniería DeMuestra, octubre de 2013.

“Morteros de nuestro patrimonio arquitectónico”.

Autores: Cetrangolo, Gonzalo; Aulet, Alina; Morquio, Atilio; Domenech, Leandro; Dalchiele, Enrique.

Ingeniería DeMuestra, octubre de 2013.

“Caracterización de morteros de elevación de muros mediante técnicas destructivas y no destructivas”.

Autores: Sabalsagaray, Stela; Romay, Carola.

Ingeniería DeMuestra, octubre de 2014.

“Detección de humedad en paredes de ladrillo en forma no destructiva”.

Autores: Domenech, Leandro; Moltini, Gonzalo; Fiori, Lucía; Cetrangolo, Gonzalo; Aulet, Alina; Morquio, Atilio.

Ingeniería DeMuestra, octubre de 2014.

7) Otras consideraciones y/o recomendaciones que usted considere pertinente realizar.

Participaron en el Proyecto:

Alina Aulet, Gonzalo Cetrangolo, Carlos Collacce, Enrique Dalchiele, Leandro Domenech, Magdalena Gepp, Gonzalo Moltini, Atilio Morquio, Gianella Mussio, Graciela Mussio, Pablo Raimonda, Carola Romay, Stela Sabalsagaray.

Colaboraron en el Proyecto:

Lucia Fiori, Laura Hernandez, Martín Severi.

Agradecimientos:

A la Comisión del Patrimonio Cultural de la Nación.

A la Comisión Sectorial de Investigación de la Universidad de la República, a la Dirección General de Arquitectura de la Universidad de la República.

A los Ing. Agrimensores Tornini y Gavirondo por el modelo digital de Calera de las Huérfanas.

A la Arqueóloga Jacqueline Geymonat por documento fotográfico histórico de Calera de las Huérfanas.

Al Dr. Alejandro Márquez del Departamento de Microscopía de Facultad de Ciencias.

8) El proyecto desarrollado:

1) ¿Tiene previsto continuar?

A través del trabajo de Tesis de Doctorado en Arquitectura planteado por la docente Carola Romay en Facultad de Arquitectura, relativo a la conservación de envolventes en ladrillo visto, está previsto aplicar la metodología desarrollada en el presente proyecto para efectuar tareas de diagnóstico cualitativo y cuantitativo. Se prevé trabajar sobre edificios patrimoniales o de alto reconocimiento arquitectónico en Montevideo, determinando en ellas su resistencia a la penetración, dureza superficial y contenido de humedad entre otras propiedades.

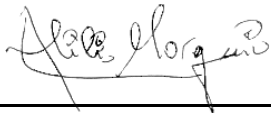
Complementariamente se prevé caracterizar mampuestos de diferente origen en laboratorio de manera de conformar una base de datos que permita seleccionar mampuestos de restitución para obras que requieren restauración y evaluar su respuesta frente a diferentes productos de consolidación.

2) ¿Cuáles serán sus futuras etapas?

Las etapas a cumplir en relación a la Tesis doctoral abarcan un plazo previsto de 2 años y responden al siguiente detalle:

- Análisis de antecedentes sobre origen y calidad de los materiales empleados en los edificios seleccionados como muestra de estudio.
- Caracterización in situ y en laboratorio del estado de conservación.
- Evaluación de métodos de consolidación
- Determinación de parámetros para la fabricación de piezas de restitución.

Autorizo a la CSIC a publicar en su página web los contenidos del presente informe de investigación del cual soy responsable.

FIRMA DEL/DE LA RESPONSABLE	
ACLARACIÓN	Prof. Dr. Atilio Morquio
FECHA	30-8-2015

Anexo 1: Referencias bibliográficas.

A1.1. Referencias bibliográficas citadas

ACI 228 (2007). "In-place methods to estimate concrete strength," Report ACI 228.1R-2007, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ACI 228 (2007). "Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures," Report ACI 228.2R-2007, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

Adami, Chryssi Elpida y Vintzileou, Elizabeth. Interventions to historic masonries: Investigation of the bond mechanism between stones or bricks and grouts. Materials and Structures. Ed. Springer. Heidelberg, Alemania. 2008. Páginas 255-267.

AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). Eurocódigo 6, Proyecto de estructuras de fábrica. Parte 1-1: Reglas generales para edificios, reglas para fábrica y fábrica armada. España. AENOR. 2006.

AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11: Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería de hormigón, hormigón celular curado en autoclave, piedra artificial y piedra natural, y de la tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería. UNE EN 772-11. Madrid: AENOR. 2011.

AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 16: Determinación de las dimensiones. UNE-EN 772-16. Madrid: AENOR. 2011.

AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 20: Determinación de la planeidad de las caras de piezas para fábrica de albañilería. UNE-EN 772-20. Madrid: AENOR. 2001.

AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 20: Determinación de la planeidad de las caras de piezas para fábrica de albañilería. UNE-EN 772-20:2001/A1. AENOR. 2001

AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). Diagnóstico de edificios. Parte 1: Generalidades. Parte 3: Estudios constructivos y patológicos. Parte 5: Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de fábrica. UNE-EN 41805. Madrid. AENOR. 2009.

AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión. Parte 3: Determinación de la resistencia inicial a cortante. UNE-EN 1052. Madrid. AENOR. 2009.

AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). Ladrillos de arcilla cocida. Determinación de la absorción de agua. UNE 67027. Madrid. AENOR. 1984.

AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de heladicidad. UNE 67028. Madrid. AENOR. 1997.

AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de eflorescencia. UNE 67029. Madrid. AENOR. 1995.

AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). Productos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de expansión por humedad. UNE 67036. Madrid. AENOR. 1999.

- Alcocer, S. M. Rehabilitación de estructuras de mampostería. Manual para edificación en Mampostería para vivienda, capítulo 11. CONAFOVI. México. 2003.
- ASTM. In situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flat jack measurements . ASTM C 1196. EUA. ASTM. 2009.
- ASTM. In situ measurement of Masonry Deformability Properties using flat jack method. ASTM C 1197. EUA. ASTM. 2009.
- ASTM. Standard Test Methods for In Situ Measurement of Masonry Mortar Joint Shear Strength Index. ASTM C 1531. EUA. ASTM. 2009.
- ASTM. Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. ASTM C215. EUA. ASTM. 2009.
- ASTM. Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete. ASTM C 805. EUA. ASTM. 2009.
- ASTM. Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete. ASTM C803. EUA. ASTM. 2009.
- ASTM. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ASTM C597. EUA. ASTM. 2009.
- Ayuso, Antonio Rolando. La influencia de la construcción por muros en el proyecto arquitectónico a través de su evolución histórica. En: Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Ed. A. de las Casas, S. Huerta, E. Rabasa, Instituto Juan de Herrera, CEHOPU. Madrid. 1996. Páginas 449-459.
- Bermúdez, J.D.C “Caracterización físico-química y mineralógica de morteros de cal empleados en puentes históricos de arco de ladrillo en la región del alto Cauca (Colombia)” Tesis de Maestría en Ciencias Físicas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física y Química. Manizales. (2012).
- Binda, L.; Colla, C. and Forde, M.C. (1994). Identification of moisture capillarity in masonry using digital impulse radar. *Construction and Building Materials*, 8, N°2, 1994. Páginas 101-107.
- Binda, Luigia y Saisi, Antonella. State of the Art of Research on Historic Structures in Italy. *Progress in Structural Engineering and Materials*. Volume 7, Issue 2, 2005. Italia. Páginas 71-85.
- L. Binda, G. Cardani, A. Saisi. Classification of structures and masonries for the adequate choice of repair. En: Actas del International RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry. Países Bajos. 2005. Páginas 20-34.
- Borrell, Climent Molins. Un model per l'analisi del comportament resistant de construccions de maçoneria. Director: Pere Roca Fabregat. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. España. 1996. 266 p.
- Bosiljkov, V. ...[et al.]. An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures. *Journal of Cultural Heritage* 11. Eslovenia. 2010. Páginas 239 a 249. Elsevier
- Bungey, J.; Millard, S.; Grantham, M. *Testing of Concrete in Structures*, 4th edición. Taylor & Francis. EUA. 2006.
- Cultrone, Giuseppe. Masonries deterioration. Petrographic and physical characterization of combination of building materials. Departamento de mineralogía y petrología, Universidad de Granada. España. [En línea]. <<http://www.mariecurie.org/annals>>.

Cultrone, Giuseppe. Estudio mineralógico- petrográfico y físico-mecánico de ladrillos macizos para su aplicación en intervenciones del patrimonio histórico. Director: Torre Lopez y otros. Tesis de Doctorado. Departamento de mineralogía y petrología, Universidad de Granada. España. 2001. 251p.

Cultrone, Giuseppe [et al.]. Evaluación de la durabilidad de ladrillos mediante técnicas destructivas (TD) y no destructivas (TND). *Materiales de Construcción*. Vol 53, N° 269. Ed. CSIC. España. 2003. Páginas 41-59.

Cultrone, Giuseppe y Sebastián, Eduardo. Los materiales cerámicos en el patrimonio arquitectónico. En: Cuadernos Técnicos. Metodología de diagnóstico y evaluación de tratamiento para la conservación de los edificios históricos, Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Ed. Consejería de Cultura. España. 2003. Páginas 48-57.

Elhakam, A.; Elmoaty, A. Reliability of using nondestructive tests to estimate compressive strength of building stones and bricks. *Egipto: Alexandria Engineering Journal - Elsevier*. 2012.

S. Gea, R. Quinteros, L. Nallim “Control del proceso de deshumidificación de muros con georradar. Un edificio patrimonial como caso de estudio”. *Revista ALCONPAT*, Vol 4 Num. 1- Enero - Pág 77 - 86, Abril 2014.

Giuria, Juan. La Arquitectura en el Uruguay. Tomo I. Época Colonial. Ed. Facultad de Arquitectura, Universidad de la República. Uruguay. 1955.

Haach, V.; Carrazedo, R.; Oliveira, L.; Corrêa, M. Application of acoustic test to mechanical characterization of masonry mortars. *NDT&E International* 59. Escuela de Ingeniería de San Carlos, Universidad de San Pablo. Elsevier. Brasil. 2013. Páginas 18-24.

H. M. Jol *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. 2008 Elsevier, Amsterdam.

Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería UdelaR. Recomendaciones para la construcción en Mampostería Estructural en Uruguay, parte I: mampostería simple. Primera Versión. Ed. Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo. 1998.

INN (Instituto Nacional de Normalización) Morteros - Parte 1: Requisitos generales. NCh 2256/1. Chile. 2013

IRAM (Instituto argentino de Normalización y Certificación). Ladrillos y bloques cerámicos para muros y tabiques. Método de ensayo de la densidad, del volumen total y del volumen macizo. IRAM 12593. Argentina. 2004.

ISO. (International Organization for Standardization). General principles on reliability for structures. ISO 2394. ISO. 1998.

ISO (International Organization for Standardization). Bases for design of structures - Assessment of existing structures. ISO 13822. ISO. 2001.

Junta de Andalucía. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Programa de normalización de estudios previos aplicados a bienes inmuebles. Ed. Consejería de Cultura. España. 2006.

López-Arce, Paula. Caracterización de ladrillos históricos. digital.csic.es/bitstream/10261/46792/.../Curso_Geomateriales_75_84.pdf. Madrid.

López-Arce, Paula. Ladrillos de edificios históricos de Toledo: caracterización, origen de las materias primas y aplicaciones para su conservación y restauración. Directores: García Guiea,

J. y Lunar Hernández R. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. Madrid. 2011.

López Sánchez, P. Patología, técnicas de intervención y limpieza de fábricas de ladrillo. Monografía 6. Ed. INTEMAC. España. 2003.

A. Luque, E. Sebastián , M. J. de la Torre, G. Cultrone , E. Ruiz y M. Urosevic. Estudio comparado de morteros de cal en pasta y cal en polvo: Control de la carbonatación. Departamento de Geología de la Universidad de Jaén y Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada. En XXVI Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía. Oviedo. España. 2006.

McCann, D.; Forde, M. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. NDT&E International 34 Universidad de Edimburgo. Escocia. Elsevier. 2001. Páginas 71 a 84.

Maierhofer, Christiane. Combination of non destructive testing methods for the assessment of Masonry Structures. En: Actas de la International RILEM Conference, setiembre 2008. Italia. 2008.

Malhotra V.M. y Carino N.J., Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, 2003. CRC Press Second Edition.

Rodríguez, Gemma y Taroco, Nelly. Resistencia a la compresión de ladrillos cerámicos macizos determinada según diferentes métodos de ensayo. En: Actas de las XXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Argentina. 1995.

Schueremans, L ...[et al.]. Continuous Assessment of Historic Structures - A State of the Art of applied Research and Practice in Belgium. Ed. Department of Civil Engineering. Bélgica. 2002. 18 p.

Schuller, M. Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures. In-Situ Evaluation of Historic Wood and Masonry Structures. EUA: NFS/RILEM Workshop. 2006

Schuller, M.P. Non destructive testing and damage assessment of masonry structures. NSF/RILEM Workshop. En: Actas del congreso In situ Evaluation of Historic Wood and Masonry Structures. 2006. República Checa.2006.

Suprenant, B.; Schuller, M. Nondestructive Evaluation & Testing of Masonry Structures. Hanley-Wood. EUA.1994.

SWISS STANDARD. Concrete Structures - Supplementary Specifications. Annex E: On Site Air Permeability, according to the Torrent method. SIA 262. SWISS STANDARD. Zurich. 2003.

UNIT (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas). Resistencia a compresión del ladrillo. UNIT 127. UNIT. Montevideo.1958.

UNIT (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas). Hormigón endurecido. Evaluación de la dureza superficial mediante el esclerómetro de resorte. UNIT-NM 78. UNIT. Montevideo.1998

Villanueva, Juan de Arte de la albañilería. En: www.gilbert.aq.upm.es/sedhc/biblioteca_digital, Sociedad Española de historia de la construcción. Madrid. 1827.

A1.2. Otras referencias bibliográficas consultadas

Alarcón E. Los avances experimentados en el marco de la investigación en la modelización y el análisis del comportamiento de sistemas constructivos. Informes de la Construcción, Vol 57, N° 499-500. Madrid. 2005. Páginas 67-76.

- Alejandre, F. J. y Villegas, R. Estudio de la alterabilidad y efecto de tratamientos de conservación para los ladrillos de la portada de la iglesia de Santa María de Jesús (Sevilla). En: *Materiales de Construcción*, Vol. 59, No 293. Madrid. 2009.
- Almendra Roque, Joao C. y Lourenco, Paulo B. Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria. *Materiais e Técnicas de conservação e de reabilitação*. En: *Actas del 3º Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios*. Lisboa. 2003. Páginas 907-916.
- Almendra Roque, João Carlos. Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria. Director: Paulo Lourenço. Tesis de Maestría. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil. Universidade do Minho. Portugal. 2002. 337p.
- Alonso Durá, Adolfo. Introducción a las estructuras de edificación. Tomo I. Ed. Universidad politécnica de Valencia. España. 2005.
- Alvarez de Buergo Ballester, Mónica y Gonzáles Limón, Teresa. Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos. Ed. Col·legi d'aparelladors y arquitectes tècnics de Barcelona. España. 1997.
- Arede, Antonio y Costa, Aníbal. Inspeção e diagnóstico estrutural de construções históricas. Algunas contribuições da FEUP. Portugal. [En línea]. < <http://hdl.handle.net/10216/67577>>.
- Calderini, Chiara. Un modello costitutivo per la muratura: formulazione ed implementazione per l'analisi di strutture complesse. Director: Sergio Lagomarsino. Tesis de Doctorado. Università degli studi di Genova, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica. Italia. 2004. 221 p.
- Casinello, Fernando. Los amigos del ladrillo. Instituto técnico de la construcción y del cemento. Ed. CSIC. España. 1960.
- Castellanos, Alfredo R. Historia del desarrollo edilicio y urbanístico de Montevideo 1829-1914. Ed. Junta Departamental de Montevideo. Montevideo. 1971.
- Castellanos, Alfredo R. Montevideo del siglo XIX. Colección Nuestra Tierra. Tomo 3. Editorial Nuestra Tierra. Montevideo. 1971.
- Coscollano Rodríguez, José. Restauración y Rehabilitación de edificios. Ed. Paraninfo. España. 2003.
- Domedè, Nathalie C. Mechanical behaviour of ancient masonry. *Materials and Structures* 42. Ed. Springer, Alemania. 2009. Páginas 123-133.
- Gallegos, Héctor y Casabonne, Carlos. Albañilería estructural: diseño y cálculo de muros. 3ª Edición. Editorial Fondo editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Perú. 2006.
- Gilboa, Felicia; Chamlian, Haroutun; Rodríguez Gemma. Estudio preliminar de las unidades de albañilería producidas en Uruguay para uso en estructuras corrientes, análisis estadístico. En: *Actas del 5th. Int. Seminar on Structural Masonry for Developing Countries*. Brasil. 1994.
- Iglesias Martínez, María Cruz. Análisis de la variación de la composición de los morteros utilizados en los muros de fábrica tradicionales: la compatibilidad de los morteros tradicionales de cal y la incompatibilidad de los morteros de cemento en el funcionamiento constructivo y estructural de los muros de fábrica tradicionales. En: *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Ed. A. de las Casas, S. Huerta, E. Rabasa, Instituto Juan de Herrera, CEHOPU. Madrid. 1996. Páginas 271-276.

INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica) Normas argentinas para construcciones sismorresistentes, parte 3, construcciones en mampostería. INPRES-CIRSOC 103. INPRES-CIRSOC. Argentina. 1991

INN (Instituto Nacional de Normalización) Morteros - Parte 1: Requisitos generales. NCh 2256/1. Chile. 2013.

Lewicki, Bohdan. Evaluación de Estructuras de muros resistentes. Informes de la Construcción Vol 40, Nº 388. España. 1988. Páginas 73-78.

Lijdens, A. y Villegas, L. Aspectos del diseño de muros portantes de fábrica simple según diferentes normas: excentricidades, reducción de la capacidad portante e hipótesis de carga a considerar. Revista de obras públicas, nº 3337, año 141. España. 1994. Páginas 43-53.

López, J.; Oñate E. y Oller, S. Cálculo del comportamiento de la mampostería mediante elementos finitos. CINME, Centro Internacional de Métodos numéricos en Ingeniería, Barcelona, España. 1998.

Loureiro Pagaimo, Filipe Alexandre. Caracterização morfológica e mecânica de alvenarias antigas. Caso de estudo da vila histórica de Tentúgal. Director: Paulo José Brandão Barbosa Lourenço. Tesis de Maestría. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra. Coimbra. 2004. 129 p.

Lozano Apolo, G. y Lozano Martínez, A. Curso Técnicas de Intervención en el patrimonio arquitectónico. Tomo II. Reestructuración de edificios de muros de fábrica. Editorial Alonzo. España. 1995.

Ministerio de Vivienda España. Código técnica de la edificación. Documento Básico de Seguridad estructural - Fábricas DBSE-F. España. 2006.

Monjo Carrió, Juan. Tratado de Rehabilitación, tomo II. Metodología de la restauración y la rehabilitación. Editorial Munilla - Lería. España. 1999.

Monjo Carrió, Juan. Tratado de Rehabilitación, tomo III Patología y técnicas de intervención: elementos estructurales. Editorial Munilla - Lería. España. 1999.

Moreno, Carlos. De las Viejas Tapias y ladrillos. Eds. Centro para la Conservación del patrimonio urbano y Rural, SIP FADU UBA. Instituto Argentino de investigaciones de historia de la Arquitectura y el Urbanismo, Junta de Estudios históricos de Cañuelas Buenos Aires. 1995.

Ontiveros Ortega, Esther. Morteros. PH Cuadernos. Junta de Andalucía. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Programa de normalización de estudios previos aplicados a bienes inmuebles. España. 2006.

Prone, P.A. Degradaciones físico - químicas en mampuestos afectados por ciclos alternados de humedad capilar. En: Actas del VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción, X Congreso de Control de calidad en la construcción. CONPAT 2005. Vol II: Patología de la Construcción. Ed. CONPAT 2005. Paraguay. 2005. Páginas VI25-VI32.

Rieger, P. Christiano. Elementos de toda la Architectura Civil. En: www.gilbert.aq.upm.es/sedhc/biblioteca_digital, Sociedad Española de historia de la construcción. Madrid. 1763.

Rincón J. y Romero, M. Prevención y eliminación de eflorescencias en la restauración de ladrillos de construcción. Materiales de Construcción, Vol. 51, Nº 261. Ed. CSIC. España. 2001.

Rücker, W. F08a. Guideline for the Assessment of Existing Structures. Federal Institute of Materials Research and Testing (BAM), Division VII.2 Buildings and Structures Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, Alemania. 2006

Russo, Cristóforo. Le lesioni dei fabbricati (sintomi - cause - effetti - rimedi). Séptima edición. Ed. Unione tipográfica - editrice torinese. Torino. 1950.

SWISS STANDARD. Concrete Structures - Supplementary Specifications. Annex E: On Site Air Permeability, according to the Torrent method. SIA 262. SWISS STANDARD. Zurich. 2003.


Tiscornia, Roberto. Fenómenos degresivos en edificios. Ed. Área de Patología. Instituto de la Construcción. Facultad de Arquitectura, Universidad de la República. Montevideo. 1996.

Valluzzi, Maria Rosa. On the vulnerability of historical masonry structures: analysis and mitigation. Em: Materials and Structures. Vol 40, N° 7. Ed. Springer, Heidelberg. Alemania. 2007. Páginas 723-743.

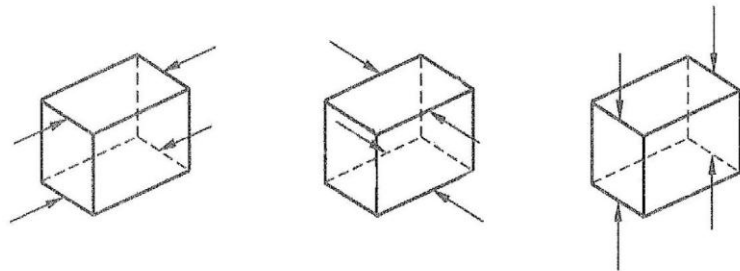
Zevi, Luca (director científico). Il Manuale del Restauro Architettonico. Progetto Comunicazione - Roma. Ed. Mancosi. Versión CD-ROM. Italia.

Anexo 2: Formularios para registro de datos y resultados.

Formulario A.1. Formulario FO.001/02 para registro de datos y resultados.


	METODOS DE ENSAYO	FO.001/02
	Piezas de fábrica de albañilería Dimensiones – Procedimiento a)	Página 1 de 1 Preparado por: G. Mussio Aprobado por:

Fecha recepción piezas		Muestreo	<input type="checkbox"/> Lote por pilas
Fecha de ensayo		Dispositivo de medición:	<input type="checkbox"/> Lote por palets

						
Probeta	Longitud mm	Media mm (aprox: 1mm)	Ancho mm	Media mm (aprox: 0,1mm)	Altura mm	Media mm (aprox: 0,1mm)

Nombre del Responsable:		Firma:	
-------------------------	--	--------	--

Formulario A.2. Formulario FO.002/02 para registro de datos y resultados.

	METODOS DE ENSAYO	FO.002/02
	Piezas de fábrica de albañilería Planeidad caras	Página 1 de 1 Preparado por: G. Mussio Aprobado por:

Fecha recepción piezas		Muestreo	<input type="checkbox"/> Lote por pilas
Fecha de ensayo		Dispositivos de medición:	<input type="checkbox"/> Lote por palets

Probeta	Cara	Diag	Long. Diagonal mm (aprox 1mm)	Long. Media (aprox 1mm)	Desviación maxima mm (aprox 0,1mm)	Desviación media maxima mm (aprox 0,1mm)
	1	D1				
		D2				
	2	D1				
		D2				
	1	D1				
		D2				
	2	D1				
		D2				
	1	D1				
		D2				
	2	D1				
		D2				
	1	D1				
		D2				
	2	D1				
		D2				
	1	D1				
		D2				
	2	D1				
		D2				

Nombre del Responsable:		Firma:	
--------------------------------	--	---------------	--

Formulario A.3. Formulario FO.003/01 para registro de datos y resultados.

	METODOS DE ENSAYO	FO.003/01
	Piezas de fábrica de albañilería Tasa de Absorción Inicial	Página 1 de 1 Preparado por: G. Mussio Aprobado por:

Fecha recepción piezas		Muestreo	<input type="checkbox"/> Lote por pilas
			<input type="checkbox"/> Lote por palets
Fecha de ensayo		Dispositivos de medición:	
		Estufa	
		Balanza	
		Cronómetro	

Probeta	Secado a 105°C ± 5°C			Masa constante m _{seco,s} (g)	Masa después de la inmersión m _{so,s} (g)	Tasa inicial absorción Aprox 0,1 kg/(m ² .min)
	Fecha:	c/24h Hora:	Masa (g)			

Nombre del Responsable:		Firma:	
--------------------------------	--	---------------	--

ISBN: 978-9974-0-1373-5



9 789974 013735