

Disponible en www.hormigonyacero.com
Hormigón y Acero, 2025
<https://doi.org/10.33586/hya.2025.4132>

ARTÍCULO EN AVANCE ON LINE

Ensayos no destructivos o moderadamente destructivos para la caracterización de los materiales componentes de la obra de fábrica de ladrillo

Albert Cabané Cañas, Luca Pelà, Pere Roca Fabregat

DOI: <https://doi.org/10.33586/hya.2025.4132>

Para ser publicado en: *Hormigón y Acero*

Por favor, el presente artículo debe ser citado así:

Mora, M.A., Todisco, L. (2025) Ensayos no destructivos o moderadamente destructivos para la caracterización de los materiales componentes de la obra de fábrica de ladrillo, *Hormigón y acero*, <https://doi.org/10.33586/hya.2025.4132>

Este es un archivo PDF de un artículo que ha sido objeto de mejoras propuestas por dos revisores después de la aceptación, como la adición de esta página de portada y metadatos, y el formato para su legibilidad, pero todavía no es la versión definitiva del artículo. Esta versión será sometida a un trabajo editorial adicional, y una revisión más antes de ser publicado en su formato final, pero presentamos esta versión para adelantar su disponibilidad.

En el proceso editorial y de producción posterior pueden producirse pequeñas modificaciones en su contenido.

© 2025 Publicado por CINTER Divulgación Técnica para la Asociación Española de Ingeniería Estructural, ACHE

Ensayos no destructivos o moderadamente destructivos para la caracterización de los materiales componentes de la obra de fábrica de ladrillo

Albert Cabané Cañas
Doctor, investigador, Universitat Politècnica de Catalunya
Doctor, profesor catedrático,
Universitat Politècnica de Catalunya
<https://orcid.org/0000-0002-5858-2563>
albert.cabane@upc.edu

Luca Pelà
Doctor, profesor catedrático,
Universitat Politècnica de Catalunya
<https://orcid.org/0000-0001-7760-8290>
luca.pela@upc.edu

Pere Roca Fabregat
Doctor, profesor catedrático,
Universitat Politècnica de Catalunya
<https://orcid.org/0000-0001-5400-5817>
pere.roca.fabregat@upc.edu

Resumen

Se presenta la aplicación a los componentes de la obra de fábrica (ladrillos y mortero en juntas) de un conjunto de técnicas de ensayo no destructivas (NDT) o moderadamente destructivas (MDT) para la medida experimental in situ de la resistencia a compresión del material. El estudio se orienta principalmente al caso de obra de fábrica histórica de ladrillo macizo y mortero hidráulico de cal, prestándose asimismo cierta atención al mortero de cemento Portland. Las técnicas investigadas comprenden el ensayo penetrométrico (PPT), el ensayo de extracción de tornillo helicoidal (HPT), el esclerómetro (Rebound Hammer, RH), el ensayo velocidad del pulso ultrasónico UPV) y la técnica SonReb, basada en la combinación de estos dos últimos ensayos. Se presta también atención al ensayo de doble embolo (Double Punch Test, DPT) sobre muestras de juntas de mortero a pesar de su carácter más destructivo.

Para las técnicas PPT y HPT se proponen unas correlaciones empíricas, derivadas de la ejecución de un gran número de ensayos, para correlacionar los parámetros medidos (profundidad de penetración y fuerza de extracción respectivamente) con la resistencia a compresión de ladrillos y mortero. Por otra parte, se ha comprobado que el método SonReb, basado en la integración de resultados obtenidos con esclerómetro y ultrasonidos, es aplicable, con ciertas precauciones metodológicas y utilizando una correlación específica, para la estimación de la resistencia a compresión del ladrillo cerámico macizo.

Abstract

The study presents the application of a set of non-destructive testing (NDT) or minor destructive testing (MDT) techniques to masonry components (bricks and mortar joints) for the experimental in-situ measurement of the material's compressive strength. The study focuses primarily on the case of historic masonry construction made of solid brick and lime mortar, with some attention also paid to Portland cement mortar. The techniques investigated include the penetrometer test (PPT), the helical screw pullout test (HPT), the sclerometer (Rebound Hammer, RH), the ultrasonic pulse velocity test (UPV), and the SonReb technique, based on a combination of the latter two tests. Attention is also paid to the double punch test (DPT) on mortar joint samples, despite its more destructive nature.

For the PPT and HPT techniques, empirical correlations derived from a large number of tests are proposed to relate the measured parameters (penetration depth and pullout force, respectively) with the compressive strength of bricks and mortar. Furthermore, the SonReb method, based on the integration of results obtained with sclerometers and ultrasounds, has been shown to be applicable, with certain methodological cautions and using a specific correlation, for the estimation of the compressive strength of solid ceramic bricks.

Palabras clave: Obra de fábrica de ladrillo, ladrillo cerámico macizo, mortero de cal, ensayo no destructivo (NDT), ensayo moderadamente destructivo (MDT), resistencia a compresión, correlación empírica.

1 Introducción

La evaluación resistente de las construcciones existentes requiere disponer de un conocimiento suficiente sobre las propiedades mecánicas de los materiales estructurales que las conforman. Tales propiedades proporcionan un dato de partida fundamental para el desarrollo de los análisis estructurales orientados a verificar el desempeño de las estructuras ante acciones gravitatorias y horizontales de sismo y viento. Asimismo, estos análisis son necesarios para concluir sobre la necesidad y el alcance de posibles intervenciones de refuerzo. Con todo, la caracterización de las propiedades de los materiales en estructuras existentes topa con dificultades importantes. Por una parte, los materiales de tales estructuras, y especialmente de las estructuras antiguas, pueden presentar niveles muy importantes de variabilidad y dispersión, por lo que una caracterización exhaustiva, basada en la toma de muestras, puede resultar inviable debido al gran número de muestras potencialmente necesario. Esta dificultad se agrava cuando además se pretende que las muestras respeten los formatos geométricos estandarizados definidos por normativas vigentes orientadas hacia la construcción de estructuras de nueva planta. La necesidad de limitar el número de muestras y, asimismo, de limitar sus dimensiones geométricas, conduce frecuentemente a preferir el empleo de criterios no estandarizados tanto en lo relativo a la representatividad del número de muestras como en relación a los formatos y tamaños de las muestras. En cualquier caso, estas dificultades pueden resolverse parcialmente mediante el empleo de técnicas de ensayo mecánico en laboratorio, adecuadamente calibradas, aplicables sobre muestras no estándares de pequeñas dimensiones. Alternativamente, es posible aplicar ciertas técnicas de ensayo no destructivo (NDT) o moderadamente destructivo (MDT) que, sin inducir daño o bien causando un daño muy limitado y fácilmente reparable, permiten obtener una estimación suficientemente fiable de las propiedades mecánicas fundamentales. En cualquier caso, las técnicas MDT y NDT pueden combinarse con un uso limitado de ensayos destructivos (DT) en laboratorio sobre muestras. Del uso combinado de técnicas MDT, NDT i DT resulta un enfoque que, gracias a la repetibilidad de los ensayos MDT y NDT, gracias al carácter más directo y fiable de los ensayos DT y gracias a la posible redundancia de las medidas, permite alcanzar un nivel mucho más elevado de fiabilidad y representatividad.

Las dificultades mencionadas en relación a la medición de las propiedades mecánicas de los materiales resultan aún más críticas en el caso de construcciones históricas o patrimoniales construidas de obra de fábrica de ladrillo o piedra. La necesidad de limitar el número de muestras y su tamaño resulta aún más acusada debido a las fuertes restricciones que el respeto hacia los valores culturales y patrimoniales introduce sobre el potencial daño causado por los procedimientos de inspección. Ello puede restringir drásticamente la posibilidad de extraer muestras para ensayo destructivo en laboratorio, siendo necesario recurrir de forma intensiva a las técnicas MDT y NDT.

El Comité Científico Internacional sobre Análisis y Restauración de Estructuras del Patrimonio Arquitectónico de ISCARSAH, perteneciente a la organización internacional ICOMOS (Consejo Internacional de Monumentos y Sitios) y formado por más de 300 expertos procedentes de una multitud de países, aprobó en Septiembre de 2024 un documento sobre análisis y conservación del patrimonio arquitectónico (“Guidelines for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage” [1]) en el que, además de aportar definiciones rigurosas sobre estos tipos de ensayos (DT, NDT y MDT), establece algunas recomendaciones sobre cómo utilizarlos y combinarlos. Según el documento de ICOMOS/ISCARSAH, los ensayos destructivos deben utilizarse de forma estrictamente limitada y controlada. Solo deben realizarse cuando la información necesaria no pueda obtenerse por otros medios o cuando sean indispensables para calibrar los métodos MDT y NDT. Las técnicas DT deben emplearse preferiblemente en zonas poco visibles o con escaso valor patrimonial, minimizando el daño ocasionado y sin debilitar o comprometer la resistencia de los elementos estructurales. Por las mismas razones, el número de muestras debe minimizarse y, en general, restringirse a las partes de la estructura con menor valor patrimonial.

De acuerdo con ICOMOS/ISCARSAH [1], la posible ganancia que un ensayo DT pueda proporcionar en información debe compensar ampliamente el daño y la pérdida de valor patrimonial causado en la estructura. En otras palabras, es preciso que la ganancia en información posibilite realmente una reducción del alcance de la intervención y de su impacto en la autenticidad de la estructura, de forma que esta reducción compense muy ampliamente la alteración causada por el ensayo destructivo. Ciertamente, la experiencia demuestra que intervenciones basadas en un conocimiento deficiente pueden fácilmente ocasionar un elevado impacto negativo en la autenticidad y en el valor patrimonial de la estructura.

El presente estudio relaciona una serie de técnicas de ensayo MDT y NDT aplicadas a los materiales componentes de la fábrica de ladrillo. En particular, se estudia la posibilidad de aplicar tales técnicas al ladrillo macizo cerámico y al mortero (de cal hidráulica o de cemento Portland) de las juntas. Las técnicas investigadas son el ensayo penetrométrico (PPT), el ensayo de extracción de tornillo helicoidal (HPT), el esclerómetro (Rebound Hammer, RH), los ultrasonidos (ensayo velocidad del pulso ultrasónico UPV) y la técnica SonReb, basada en la combinación de estos dos últimos ensayos. A estas técnicas cabe añadir la técnica de ensayo de doble émbolo (Double Punch Test, DPT) que, aunque es estrictamente un ensayo destructivo (DT) por cuanto requiere extraer una muestra de junta de mortero, causa de hecho un daño muy reducido y fácilmente reparable, por lo que podría, bajo ciertas condiciones, clasificarse como MDT.

El conocimiento de la resistencia a compresión de ladrillos y morteros, estimada mediante los ensayos mencionados, posibilita obtener una estimación la resistencia a compresión de la obra de fábrica como material compuesto a partir de expresiones empíricas disponibles que, como en el caso de la fórmula del Eurocódigo 6 [2] y de CTE DB-SE-F [3], permiten calcular este último valor a partir de la resistencia de los componentes (mortero y ladrillo). Por otra parte, los autores han desarrollado técnicas moderadamente destructivas o MDT basadas en la extracción de pequeñas probetas cilíndricas de fábrica compuesta sobre las cuales realizar ensayos a compresión o a corte en laboratorio ([4], [5]).

El presente artículo expone las características y la metodología de empleo de cada una de las técnicas investigadas. Se indican algunas precauciones o consideraciones que es preciso tener en cuenta para optimizar el uso de las técnicas en elementos de obra de fábrica, basadas en la experiencia de los autores. Asimismo, se presentan las correlaciones empíricas que ha sido posible derivar para relacionar la resistencia a compresión del material con el parámetro realmente medido (profundidad de penetración en PPT o fuerza de arranque en HPT). En el caso de las medidas con esclerómetro o ultrasonidos, la estimación de la resistencia a compresión resulta de la integración combinada de las medidas a través de la técnica SonReb.

2 Materiales analizados

La investigación que se presenta se ha centrado en el análisis de la resistencia a compresión de los materiales componentes obra de fábrica de ladrillo, prestando especial atención al caso de la obra de fábrica histórica. Los materiales componentes investigados son los ladrillos cerámicos macizos y los morteros de cal hidráulica o de cemento Portland. Se han investigado ladrillos de distinto tipo, incluyendo ladrillos fabricados por extrusión mecánica y fabricados manualmente, éstos últimos tanto modernos como históricos, extraídos de muros de obra de fábrica existentes. Las juntas de mortero se manufacturaron en el laboratorio o bien se recolectaron de edificios históricos de obra de fábrica.

En el caso de las muestras formadas en laboratorio, éstas fueron extraídas de muros contruidos a propósito y posteriormente desmantelados. Se construyeron dos tipos de muros, combinando ladrillos fabricados por extrusión con mortero de cemento y ladrillos de fabricación manual con mortero de cal hidráulica, estos últimos orientados a representar, en la medida posible, una obra de fábrica de tipo histórico. Se construyeron dos muros de cada tipo. En los artículos de García-Ramonda et al. [6] y Huang et al. [7] puede hallarse más información al respecto. Por otra parte, se examinaron ocho muros de obra de fábrica distintos, pertenecientes a un grupo de siete edificios históricos, con el fin de adquirir ladrillos y juntas de mortero (figura 1). Los edificios investigados incluyen complejos industriales y edificios residenciales. Todos estos edificios fueron contruidos a finales del siglo XIX o a principios del siglo XX.

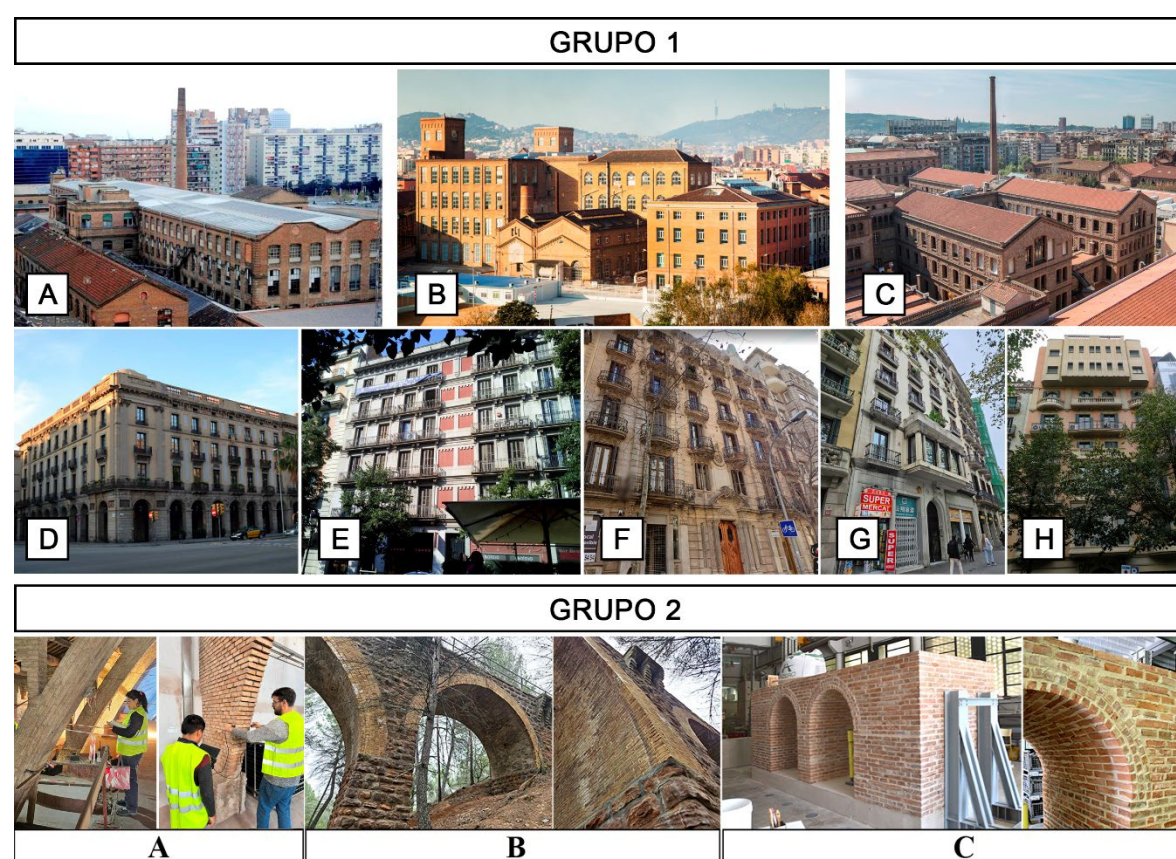


Figura 1 - Casos de estudio considerados en la presente investigación. Primer grupo: edificio industrial de 1878 (a); edificio industrial de 1910-1920 (b); edificio industrial de 1927 (c); edificio residencial de 1840 (d); edificio residencial de 1880 (e); edificio residencial de 1905 (f); edificio residencial de 1910 (g); edificio residencial de 1930 (h). Segundo grupo: bodega construida a principios del siglo XX (A); puente histórico multiarco de Joncadella (B); puente construido en laboratorio (C).

Los morteros producidos en el laboratorio se fabricaron con dos aglomerantes diferentes. En primer lugar, se utilizó un mortero de cal hidráulica premezclado comercial clasificado como M5 según EN 998-2:2018 [8]. Este mortero premezclado se alteró incorporando relleno de piedra caliza para disminuir su resistencia a la compresión, con el objetivo de replicar un mortero histórico de baja resistencia, según el procedimiento propuesto por Segura et al. [9]. En segundo lugar, se utilizó mortero de cemento premezclado disponible en el mercado clasificado como M7.5 según [8].

La resistencia a compresión de los morteros utilizados en la construcción de los muros en laboratorio se evaluó según EN 1015-11:2020 [10] ensayando cubos de $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ fabricados con el mismo material empleado para los muros. Los ensayos de compresión en el mortero de cal hidráulica, realizados de acuerdo con esta normativa, proporcionaron una resistencia a la compresión f_m de 3.54 MPa y 3.47 MPa (respectivamente para cada muro), con un coeficiente de variación del 19.4 % y 20.1 %. A su vez, la resistencia a la compresión del mortero de cemento alcanzo un valor de 7.64 MPa y 5.59 MPa (para cada muro) con un coeficiente de variación del 32.7 % y 8.6 %.

Por otra parte, se han estudiado ladrillos provenientes de un segundo grupo de estructuras de obra de fábrica correspondientes a una bodega histórica formada por varias naves (caso A), un puente multiarco (puente de Joncadella de la línea ferroviaria de Manresa a Súria, caso B) y un modelo experimental de puente de dos arcos recientemente construido en laboratorio (caso C). Las propiedades mecánicas de los ladrillos del puente de Joncadella, así como del puente experimental han sido también medidas en laboratorio mediante ensayos destructivos. Sin embargo, debido a restricciones relacionados con el valor patrimonial, no ha sido posible extraer material sobre el cual aplicar tales ensayos en el primer caso de estudio. Puede hallarse más información sobre los materiales ensayados en los artículos previos de los autores ([11] y [12])

3 Ensayos destructivos en laboratorio

3.1 Procedimientos de ensayo

Los ensayos destructivos realizados para la medida de la resistencia a compresión, realizados sobre probetas o muestras de mortero y muestras de ladrillo, han sido ejecutados en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales de Construcción (LATEM) de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Las muestras de ladrillo se prepararon de acuerdo con los procedimientos especificados en la norma europea EN 772-1:2011+A1:2016 [13]. De los ladrillos enteros se obtuvieron muestras de $100 \times 100 \times 40 \text{ mm}^3$ utilizando una sierra de mesa equipada con chorro de agua. Posteriormente, las muestras se sometieron a un proceso de secado en horno a temperatura constante de $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Se prepararon y analizaron un total de 125 muestras de ladrillo.

Las muestras de junta de mortero se prepararon y ensayaron de acuerdo con los procedimientos especificados en la norma alemana DIN 18555-9:2019-04 [14] y en el documento 778-3R de la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) [15]. Muchas de las muestras extraídas presentaban baja consistencia y cohesión, no siendo factible realizar ensayos en muestras con las dimensiones de $50 \times 50 \text{ mm}^2$ que aconseja la norma alemana. El espesor de las muestras, correspondiente al espesor de la junta, se midió con un calibrador. Las muestras se ensayaron el mismo día de la extracción, sin secado previo, para asegurar un grado de humedad similar al de la pared existente. Se preparó y ensayó un total de 416 muestras de juntas de mortero. Las muestras se ensayaron con émbolos de carga de 20 mm de diámetro. Siguiendo las indicaciones de Pelà et al. [16, 17] y Matysek et al. [18], las muestras se dotaron de una capa de yeso en polvo de 1 mm de espesor, interpuesta entre la muestra y los émbolos, para regularizar las superficies de apoyo y asegurar una carga homogénea. En uno de los edificios industriales investigados fue posible extraer y ensayar en laboratorio muestras cúbicas de $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ de un relleno interior existente en muros de múltiples hojas.

3.2 Resultados obtenidos en ladrillo y mortero

Los ensayos realizados sobre probetas de ladrillo correspondientes a los muros construidos en laboratorio o de ladrillos extraídos del primer grupo de edificios han permitido medir valores de resistencia a compresión media (para los distintos tipos de ladrillos ensayados) dentro del rango de 16.8 MPa a 52.7 MPa, con dispersiones situadas entre 3.5% y 21%. Para los ladrillos modernos confeccionados por extrusión o con molde se han obtenido resistencias medias de 52.7 MPa y 17.4 MPa respectivamente, con dispersiones de 2.4% y 8.6% respectivamente. En los ladrillos provenientes de edificios históricos (primer grupo) se han obtenido resistencias medias situadas entre 16.8 y 35.4 MPa, con dispersiones en el rango de 12% a 23%. El valor de resistencia de 35.4 MPa, correspondiente a un único edificio del siglo XIX, es excepcionalmente alto en comparación con los valores medidos en otros edificios, cuyas resistencias se sitúan normalmente en el rango de 15 a 20 MPa. Una descripción más detallada de los resultados según tipos de ladrillos y edificios puede hallarse en Cabané et al. [11].

En el mortero, la resistencia media medida mediante DPT y calculada de acuerdo con DIN 18555-9:2019-04 [17] varía entre 0.37 N/mm^2 y 13.3 N/mm^2 en función de su procedencia, situándose los valores más frecuentes en el rango de 2 MPa a 4 MPa. Como en el caso de los ladrillos, el artículo de Cabané et al. [11] proporciona una relación detallada de las resistencias obtenidas.

En relación al segundo grupo de estructuras analizadas, la resistencia a compresión media medida experimentalmente en ladrillos del segundo y del tercer caso de estudio alcanzó valores normalizados de 27.7 y 22.6 MPa respectivamente. La resistencia media en probetas de mortero, sólo medida en el tercer caso, alcanzó un valor de 5.7 MPa.

3.3 Comparación de valores de resistencia a compresión en mortero

La campaña experimental en mortero permitió comparar las resistencias a la compresión obtenidas con DPT y en especímenes estándar según EN 1015-11:2020 [10] (figura 2) obtenidas de la misma fase constructiva de un edificio existente. La norma DIN 18555-9:2019-04 [14] y el documento UIC 778-3R [15] proporcionan diferentes criterios para la evaluación de la resistencia a la compresión basada en DPT. Por esta razón, la figura 2 incluye líneas de tendencia correspondientes al uso de las dos normas. La figura 2 también indica la línea de 45° correspondiente a igualdad entre resistencias obtenidas con probetas estandarizadas y con DPT.

Como se puede observar en la figura, los valores de resistencia a la compresión medidos con DPT son mayores que los que se han obtenido mediante el ensayo de probetas estandarizadas. Esta discrepancia se puede atribuir a la variación en el tamaño y las condiciones de fraguado de las muestras de mortero. Es importante notar que las condiciones de fraguado del mortero en probetas cúbicas estandarizadas difieren significativamente de las condiciones que el mortero experimenta en las juntas de los muros. Las muestras estandarizadas se obtuvieron cortando en seco probetas cúbicas de 40 mm de lado obtenidas de masas de mortero de cal extraídos de los muros de piedra irregular. Por el contrario, las juntas de mortero permanecen embebidas en la obra de fábrica, en contacto directo con ladrillos porosos y con una exposición superficial mínima al ambiente circundante.

Debido a que los valores obtenidos con DPT son más representativos de las condiciones físicas y tensionales que caracterizan a las juntas de mortero en muros, en los siguientes apartados éstos han sido considerados como de referencia para su comparación con los ensayos MDT y NDT. Por otra parte, se adopta el criterio de DIN 18555-9:2019-04 [14] para la valoración de los resultados del ensayo DPT debido a que, tal y como muestra la figura 2, da lugar a una mejor correlación con los resultados obtenidos con el ensayo a compresión de probetas estándar.

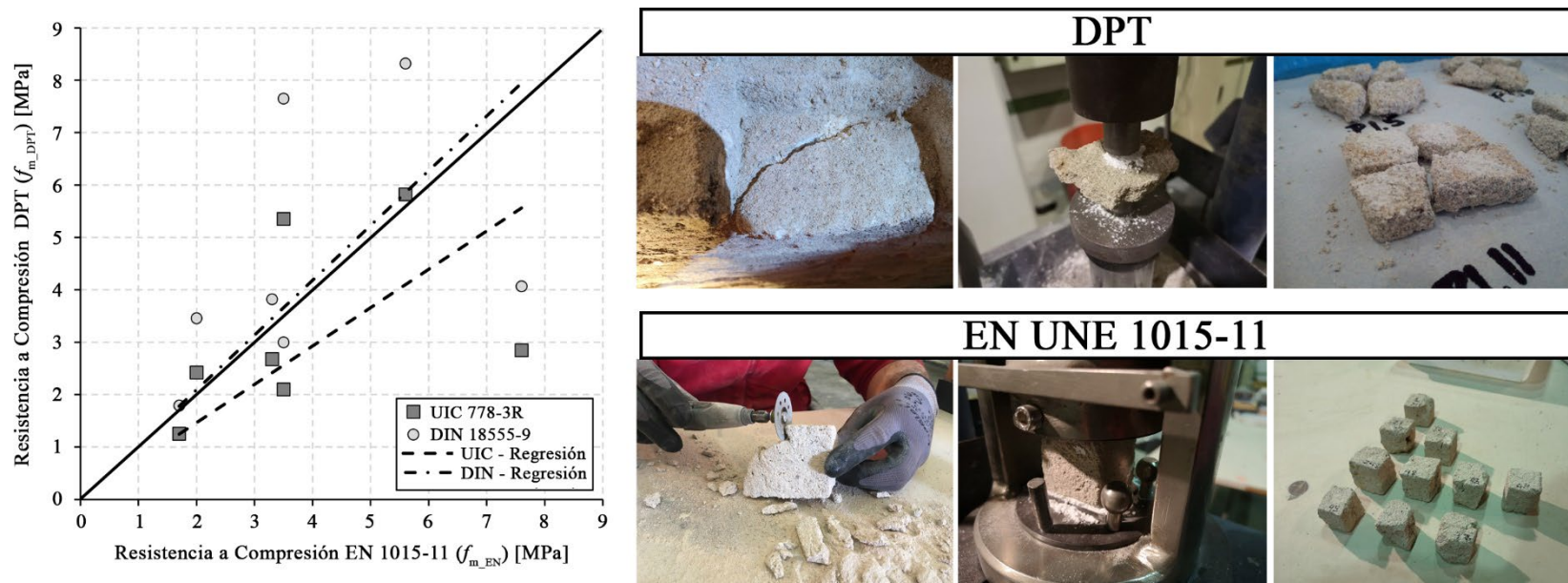


Figura 2 - Regresión lineal que relaciona los valores de resistencia a la compresión de DPT y EN 1015-11:2020 [8] en muestras de mortero. En los ensayos DPT la resistencia a compresión se evalúa según los criterios de las normas DIN 18555-9:2019-04 [12] y el documento UIC 778-3R [15].

Es preciso notar también que las juntas de mortero ensayadas con DPT presentaban espesores muy variables (entre 12 y 17,6 mm). Como indican Pelà et al. [17], la evidencia empírica muestra que existe una relación inversamente proporcional entre la resistencia a la compresión y el espesor de la probeta. Debido al limitado grueso de las muestras, el estado de tensión es multiaxial debido a que el material que envuelve el área cargada introduce un efecto de confinamiento.

4 Técnicas de ensayo no destructivo o moderadamente destructivo investigadas

Como ya se mencionó, las técnicas MDT investigadas incluyen cuatro tipos de ensayos (figura 3), correspondientes al ensayo de penetrómetro (Pin Penetration Test, PPT), ensayo de extracción de tornillo helicoidal (HPT), esclerómetro (Rebound Hammer, RH) e inspección mediante ultrasonidos (ensayo velocidad del pulso ultrasónico, UPV). A ello hay que añadir la técnica SonReb, utilizable en ladrillos, orientada a mejorar la precisión de las medidas de la resistencia a compresión combinando los resultados del esclerómetro con los del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.

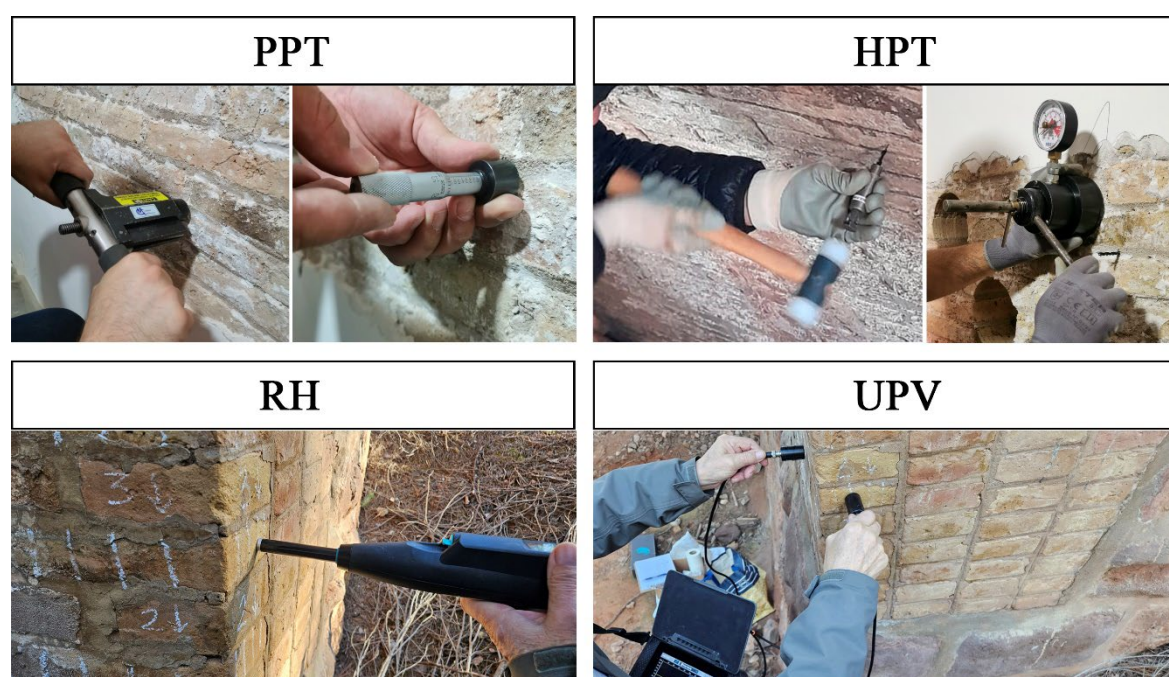


Figura 3 – Principales pasos de las técnicas MDT investigadas: Ensayo de penetrómetro (PPT), Ensayo de extracción de tornillo helicoidal (HPT), Esclerómetro (RH) y el Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (UPV).

En el primer grupo de casos se llevaron a cabo un total de 498 medidas de PPT y 343 de HPT, incluyendo medidas realizadas tanto in situ como en laboratorio. Las 498 medidas de PPT incluyen 151 en ladrillos y 347 en juntas de mortero, mientras que las 343 medidas de HPT incluyen 114 en ladrillos y 229 en juntas de mortero. En el segundo grupo de estructuras se realizaron un total de 50 medidas de HPT en juntas de mortero y 240 de RH más 72 de UPV en ladrillos.

5 Ensayo penetrométrico (PPT)

5.1 Descripción de la técnica de ensayo

El ensayo mediante penetrómetro (Pin Penetration Test, PPT) es un método MDT desarrollado específicamente para evaluar la resistencia a la compresión del hormigón, mortero y ladrillo, siguiendo las recomendaciones de las normas ASTM C803/C803M [19] y BSI 1881-207:1992 [20]. El ensayo puede realizarse mediante un dispositivo fabricado por James Instruments Inc., conocido como Windsor Pin Test System®. El dispositivo puede aplicarse en las superficies expuestas de los ladrillos y de las juntas de mortero con espesor mínimo de 10 mm. Se procede insertando en el dispositivo una aguja de acero de 3 mm de diámetro y con extremo cónico. El dispositivo debe posicionarse de forma perpendicular a la superficie. A continuación, se activa el gatillo mientras se mantiene un contacto firme entre el dispositivo y la superficie. El fabricante de la herramienta indica que el dispositivo tiene suficiente fuerza como para ensayar hormigón con resistencia máxima a la compresión de 46.1 MPa y morteros con una resistencia a la compresión en el rango de 0.8 a 50.7 MPa. Una vez clavada de la aguja, ésta se retira cuidadosamente utilizándose un soplador de aire de bulbo para eliminar cualquier material restante dentro del agujero. Se procede entonces a la lectura de la profundidad de penetración mediante un micrómetro. Dado que el mecanismo de resorte interno puede degradarse con el tiempo debido al uso repetido, se requiere una calibración al inicio de cada campaña. La calibración se realiza disparando contra una placa metálica de referencia.

Los estudios realizados por los autores han demostrado que profundidades de penetración comprendidas entre 6 mm y 11.5 mm pueden correlacionarse de forma fiable con la resistencia a la compresión del mortero. Por otra parte, se confirma que se deben realizar al menos 10 mediciones en diferentes juntas horizontales de mortero para una misma área muestreada.

5.2 Estimación de la resistencia a compresión mediante PPT

La campaña experimental anteriormente descrita ha permitido obtener una correlación entre la profundidad de penetración y la resistencia a la compresión medida a partir ensayos destructivos sobre probetas (figura 4). Se ha aplicado un tratamiento unificado para ladrillos y mortero, hallándose una correlación única para ambos materiales. En la figura 4, los distintos puntos representan la relación entre la resistencia a compresión media (en MPa) y la profundidad de penetración (en mm) para muestras ensayadas in situ, tanto en muros históricos como en los muros construidos en el laboratorio. Las líneas horizontales o verticales asociadas los distintos puntos indican las desviaciones estándar obtenidas.

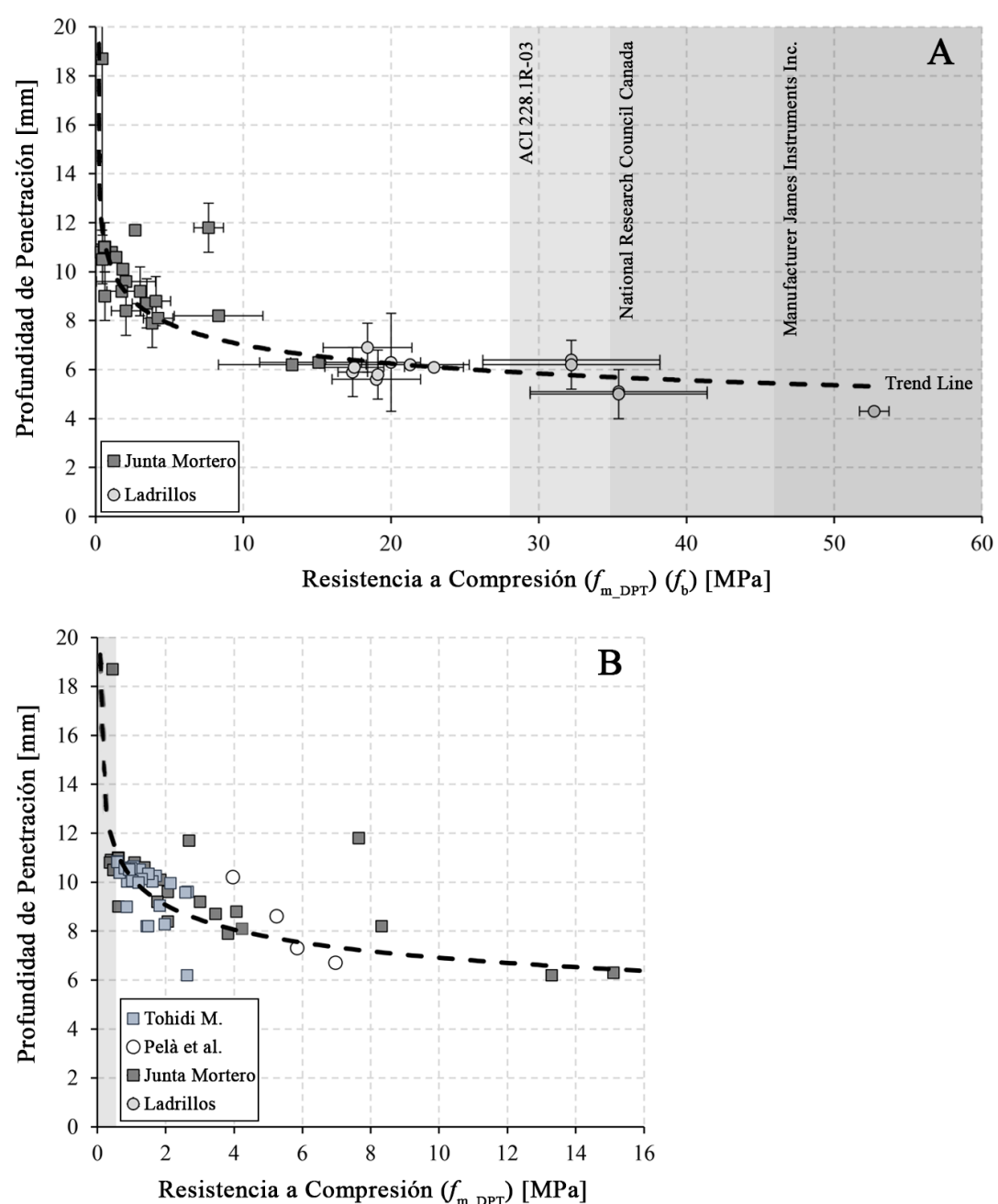


Figura 4 - Correlación empírica entre la resistencia a la compresión y la profundidad de penetración medida con PPT en ladrillos y morteros. (a) Resistencia media experimental, incluyendo barras de desviación y línea de tendencia. Los valores que exceden los límites máximos recomendados se indican mediante sombreado. (b) Gráfico extendido hasta 16 MPa de resistencia DPT, incluyendo datos experimentales adicionales provenientes de la literatura científica disponible [14, 19, 23].

La correlación (figura 4) se ha extendido a los valores más elevados obtenidos (del orden de 52.7 MPa), a pesar de que el fabricante del dispositivo de ensayo recomienda no utilizarlo para materiales con una resistencia superior a 46.1 MPa. Estos valores también exceden el rango máximo de aplicación sugerido por el Consejo Nacional de Investigación de Canadá [21] (con valor límite entre 30 y 40 MPa) y por ACI 228.1R-03 [22] (que establece un límite de 28 MPa). El área que excede estos umbrales se indica en el gráfico mediante un sombreado. Es preciso notar asimismo que de la calibración se ha excluido un valor atípico que presentaba una posición divergente con respecto a los demás valores experimentales.

La correlación puede ajustarse mediante la ecuación (1), resultando un coeficiente de correlación de 0.82, que es mucho mayor que los que se obtendrían si se adoptaran dos curvas de ajuste separadas para mortero y ladrillo (que serían de 0.62 y 0.42 respectivamente). En la ecuación (1), f_c representa la resistencia a la compresión del ladrillo o la resistencia DPT del mortero (en MPa), y d indica la profundidad de penetración en milímetros.

$$f_c = \left(\frac{10.2}{d} \right)^{1/0.17} \quad (1)$$

La figura 4 también muestra que la profundidad de penetración tiende a aumentar bruscamente para valores muy bajos de resistencia a la compresión. Esta tendencia dificulta la medición de valores de resistencia muy bajos con suficiente resolución. Además, para altas resistencias a la compresión, variaciones muy pequeñas en la penetración dan lugar a variaciones elevadas del valor de resistencia estimado. La presente investigación sugiere que, para garantizar su fiabilidad, el método solo debería emplearse, en principio, para penetraciones situadas en el rango de 6.0 mm a 11.5 mm, que corresponden, utilizando la ecuación (1), a resistencias a la compresión comprendidas entre 0.5 MPa y 22.7 MPa, respectivamente.

6 Ensayo de extracción de tornillo helicoidal (HPT)

6.1 Descripción de la técnica de ensayo

El ensayo de extracción de tornillo helicoidal (HPT) es un método moderadamente no destructivo desarrollado para la caracterización in situ de mortero de baja resistencia según las recomendaciones de RILEM TC 127-MS D.9 [24]. Helifix Company UK produce las herramientas necesarias y las hélices utilizadas con el nombre ResiTie ®.

El ensayo requiere, en primer lugar, formar un orificio piloto de pequeño diámetro en las juntas de mortero o en los ladrillos ensayados. Para crear orificios piloto en los ladrillos, se utiliza un taladro de martillo rotatorio equipado con una broca para obra de fábrica. En ambos casos, el orificio perforado tiene una profundidad de 35 mm. Basándose en investigaciones previas sobre morteros de baja resistencia [16, 23, 25], los autores consideran preferible ejecutar un orificio piloto de 3 mm de diámetro en contraste con el diámetro de 4 o 4.5 mm recomendado por Vekey y Ferguson [24, 26, 27]. Por otra parte, se prefiere un orificio piloto de 4 mm de diámetro para los ladrillos, en contraste con los 5 mm especificados por Ferguson et al. [28].

Tras la formación del orificio piloto, se introduce en él un tornillo helicoidal de acero inoxidable de 1/4 pulgada (6.3 mm) de diámetro mediante una herramienta auxiliar. La herramienta se martillea cuidadosamente mientras se mantiene en posición horizontal, lo que provoca que el tornillo helicoidal se inserte en el orificio piloto girando y enroscándose en el material. El proceso continúa hasta que la penetración alcanza una profundidad de 30 mm. Tras de la inserción, el tornillo se extrae mediante una llave de prueba de carga (LTK). La llave coarta la rotación del tornillo durante la extracción, causando el fallo por corte del material ensayado. La carga máxima alcanzada durante el ensayo proporciona la fuerza de extracción. Se utiliza un manómetro integrado en la herramienta para leer la carga de extracción con precisión de lectura de 100 N. Tal y como sugiere Ferguson [26], y tal y como han confirmado BRE [29] y RILEM TC 127-MS D.9 [24], es preciso ejecutar al menos 10 pruebas HPT para ensayar un mismo mortero, siendo este número suficiente para distinguir entre diferentes morteros.

6.2 Estimación de la resistencia a compresión

Para relacionar la resistencia a compresión del material con la fuerza de extracción medida con HPT, Vekey et al. [27] han propuesto una correlación empírica. Debe notarse que, como indica RILEM TC 127-MS D.9 [24] y como también han observado Vekey et al. [30], la correlación entre la fuerza de extracción y la resistencia no es lineal.

Basándose en una interpretación mecánica, Benedetti et al. [25] han propuesto una ecuación para relacionar la resistencia a las tensiones tangenciales (τ_H) causadas en la extracción con la fuerza aplicada (F). Tal relación (ecuación 2) depende de la longitud de empotramiento (L) y el diámetro externo (D_e) de la hélice.

$$\tau_H = \frac{F}{\pi \cdot D_e \cdot L} \quad (2)$$

Existe un número muy limitado de investigaciones previas sobre la aplicación de HPT en muestras de ladrillos y morteros [16, 23, 27, 28, 29, 30]. Los ensayos obtenidos en la presente investigación han permitido obtener una correlación empírica entre la resistencia a la tensión tangencial y la resistencia a compresión de estos materiales (figura 5). Para la determinación de esta correlación también se han tenido en cuenta los resultados experimentales publicados por Vekey [30], Ferguson et al. [28], Ferguson [26], Vekey et al. [27] y Pelà et al. [16, 23]. La figura 5 presenta la relación obtenida entre la resistencia a la compresión media y la resistencia tangencial para muestras ensayadas ya sea dentro de la misma sección de muro (en el caso de edificios existentes) o en especímenes de laboratorio. Los valores se presentan en el gráfico como un punto, que denota el valor medio, junto con una línea que indica la desviación estándar.

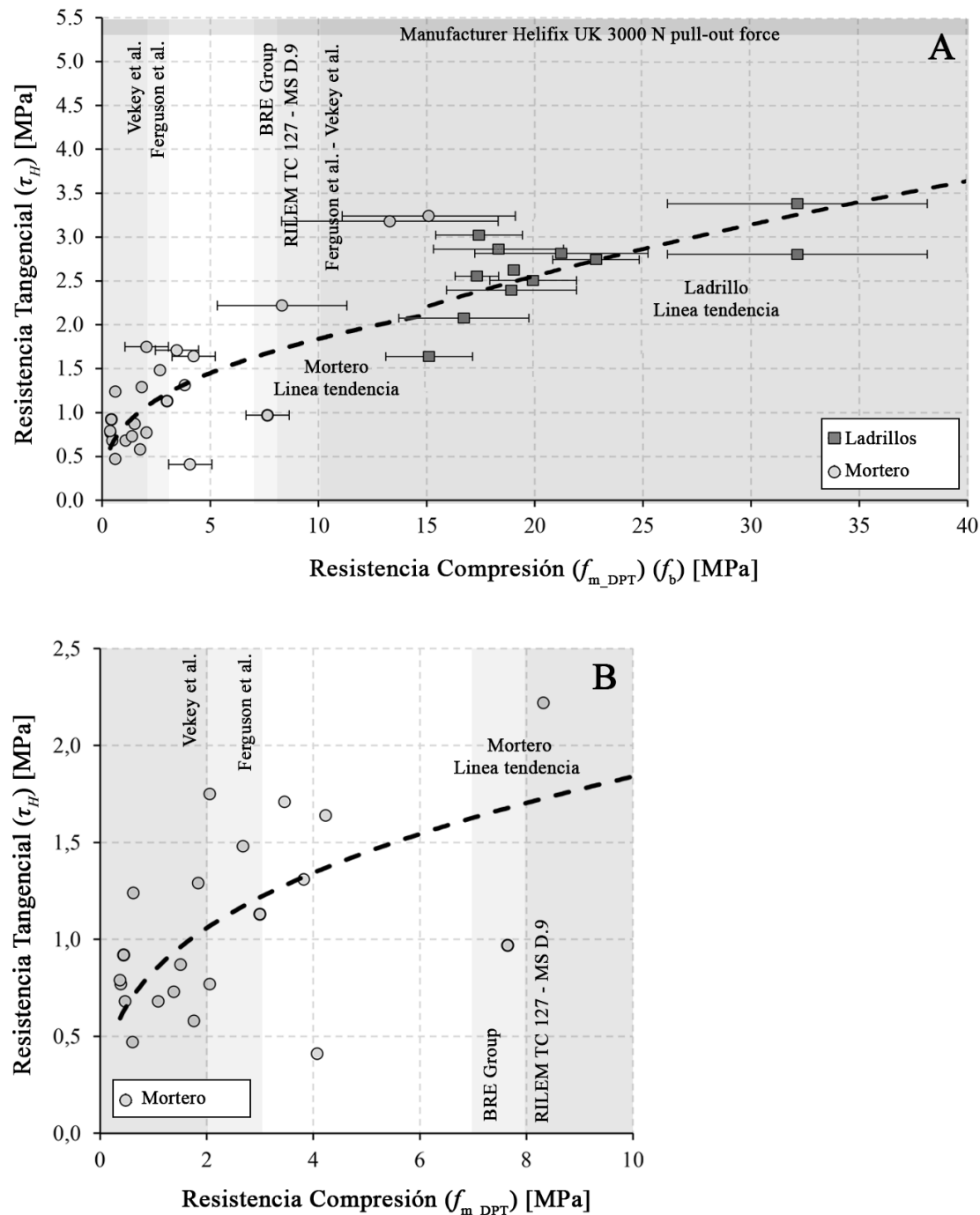


Figura 5 – (a) Correlación empírica entre la resistencia a compresión y la resistencia tangente, tanto para ladrillo como para mortero, derivada del presente programa experimental. (b) Extensión de la correlación hasta resistencia de 10 MPa. El gráfico incluye datos experimentales adicionales extraídos de la literatura científica disponible [14, 19, 26, 27, 28, 30].

En la literatura científica se proponen diferentes rangos óptimos de resistencia a compresión para la aplicación fiable de HPT. Ferguson et al. [28, 29] indican un rango de resistencia de 2 MPa a 10 MPa; Vekey et al. [27] especifican un rango de 3 MPa a 10 MPa; BRE [29] especifica una resistencia máxima de 7 MPa; a su vez, RILEM TC 127-MS D.9 [24] recomienda un valor máximo de 8 MPa. Las áreas que superan los umbrales recomendados se indican en la figura 5 mediante sombreado.

La figura 5 muestra asimismo las líneas de tendencia de potencia que relacionan la resistencia y la resistencia tangencial. De forma similar a lo que se ha comentado para PPT, se propone una curva de ajuste unificada para mortero y ladrillo. La función de ajuste (ecuación 3) presenta un coeficiente de correlación de 0.78. En esta ecuación, f_c indica la resistencia a la compresión del ladrillo o mortero (obtenida en este último caso mediante DPT) y τ_H designa la resistencia tangencial, obtenida mediante la ecuación (2). La figura 5b proporciona una extensión de la correlación para valores superiores de hasta 10 MPa.

$$f_c = \left(\frac{\tau_H}{0.83} \right)^{1/0.37} \quad (3)$$

La mayoría de los datos se ajustan aceptablemente a la línea de tendencia de la Ecuación (3), excepto aquellos relacionados con los bloques de AAC de Ferguson et al. [28] y con los valores de mortero de Ferguson [26] y Vekey et al. [27]. Estos resultados sugieren que, además de la resistencia a la compresión, es posible que otras propiedades del mortero o del ladrillo influyan en las fuerzas de extracción medidas experimentalmente.

7 Esclerómetro (Rebound Hammer, RH)

7.1 Descripción del método

El esclerómetro es una técnica de ampliamente utilizada para estimar la resistencia a la compresión y la dureza superficial del hormigón. Los protocolos estándar se especifican en las normas ASTM C805/C805M [31], EN 12504-2 [32], EN 13791 [33] e ISO 1920-7 [34]. Para el presente estudio se ha empleado dispositivo Silver Schmidt OS8200® tipo N, fabricado por Screening Eagle Technologies. Este dispositivo funciona mediante una masa accionada por resorte que se desplaza a lo largo de una guía y golpea un émbolo de acero, el cual resulta comprimido contra la superficie ensayada. Tras el impacto, se crea una onda de compresión que se propaga a través del émbolo, cuya reflexión provoca el rebote de la masa, de forma que la energía absorbida durante el impacto produce una deformación local de la superficie. El índice de rebote, conocido como valor Q y a menudo denominado coeficiente de restitución, se determina calculando la raíz cuadrada de la relación entre las energías cinéticas previa y posterior al impacto. La energía absorbida por el material durante el impacto puede correlacionarse con sus propiedades de amortiguamiento, que a su vez pueden considerarse relacionadas con la resistencia a la compresión del material.

La posible aplicación del RH a ladrillos cerámicos requiere ciertas precauciones. En el caso de los ladrillos es preciso seleccionar cuidadosamente los puntos de impacto de forma que exista suficiente espesor entre éstos y las superficies del ladrillo. Las normas estipulan unas distancias mínimas a los bordes (25 mm según la norma EN 12504-2) [32] y 50 mm según ASTM C805/C805M [31] e ISO 1920-7 [34]) que no siempre son factible en ladrillos debido sus restricciones dimensionales. La metodología de ensayo que se propone consiste, en primer lugar, en subdividir el canto de cada ladrillo en seis secciones iguales, mientras que la testa puede dividirse en cinco secciones. Con ello se busca mantener una separación mínima de 25 mm entre los puntos de impacto, según lo recomendado por las normas. Para minimizar la influencia de las irregularidades de la superficie en los resultados, éstas se pulen mediante una piedra de amolar suministrada por el fabricante.

Antes de la prueba, los puntos de impacto se marcan sistemáticamente en cada superficie preparada. Posteriormente, el dispositivo Schmidt se posiciona por estimación visual y se mantiene firmemente en una orientación perpendicular con respecto a la superficie. Luego, el émbolo del instrumento se presiona gradualmente contra la superficie asegurando su perpendicularidad. Si el impacto produce un aplastamiento localizado o se produce cerca de un vacío superficial, la medición se considera inválida y se excluye de análisis posteriores. Los resultados finales del ensayo se obtienen calculando la mediana de los valores Q según lo prescrito por la norma EN 12504-2 [32].

7.2 Estimación de la resistencia a compresión

La ecuación (4), proporcionada por el fabricante del dispositivo y correspondiente a la curva del percentil 10° inferior ha sido deducida a partir de datos exhaustivos recopilados a través de diversas investigaciones. El fabricante indica que el dispositivo es capaz de ensayar muestras de hormigón con resistencias a la compresión situadas entre 10 MPa y 100 MPa, correspondientes a valores Q de 22 a 75. Además, la norma EN 13791 [33] proporciona una tabla de referencia que correlaciona la resistencia a la compresión del hormigón con el número de rebote Q en el percentil 10°.

$$f_c = 2,77 \cdot e^{0,048Q} \quad (4)$$

8 Ultrasonidos (velocidad del pulso ultrasónico, UPV)

El ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (UPV) es un método no destructivo comúnmente empleado para evaluar la velocidad de propagación de pulsos de ondas de tensión longitudinales a través del hormigón. El UPV también ha sido aplicado recientemente en los materiales componentes de la obra de fábrica [36, 37]. Los procedimientos estandarizados para los ensayos de UPV se describen en las normas ASTM C597 [39] y EN 12504-4 [38].

Para el presente estudio se ha utilizado el dispositivo Ultrasonic Pundit 200®, fabricado por Proceq Technologies. Este instrumento genera y detecta pulsos ultrasónicos a través de un par de transductores electroacústicos, los cuales comprenden un generador de pulsos y un amplificador receptor. Los transductores utilizados en esta investigación operan a una frecuencia de 250 kHz, la cual corresponde a una longitud de onda de 14.8 mm, que puede considerarse adecuada para materiales con un tamaño máximo de grano de 7 mm. Se garantiza así que la longitud de onda sea menor que el espesor mínimo de la muestra y mayor que el tamaño del grano promedio, cumpliendo así los requisitos fundamentales para una prueba ultrasónica fiable. La prueba UPV mide el tiempo que tarda un pulso ultrasónico en atravesar el material. La velocidad del pulso se calcula dividiendo la longitud del recorrido entre los transductores por el tiempo de recorrido registrado. El adecuado contacto entre los transductores y la superficie del ladrillo requiere la aplicación de un agente de acoplamiento y de una presión firme para minimizar las cavidades superficiales y mejorar la transmisión de la señal. En la presente investigación, todas las pruebas se realizaron siguiendo las recomendaciones de la norma EN 12504-4 [38], la cual recomienda realizar un mínimo de tres mediciones por ladrillo.

En la ejecución de las pruebas puede adoptarse una configuración de transmisión directa, colocando los transductores directamente enfrentados (caso analizado A del grupo 2) o bien de transmisión semidirecta, con un transductor colocado en el canto del ladrillo y el otro

en la testa adyacente (casos B y C del grupo 2). La figura 6 describe el procedimiento. En la presente investigación, las pruebas UPV se realizaron en seis ladrillos diferentes para cada conjunto de posiciones. En el caso A, se tomaron mediciones en tres puntos distribuidos uniformemente a lo largo de cada ladrillo (figura 6a). Para los casos B y C, las pruebas se realizaron en cuatro puntos distribuidos en superficies adyacentes, combinando un punto de medición en el canto con tres puntos en la testa, lo que resulta en tres mediciones combinadas por ladrillo (figura 6b).

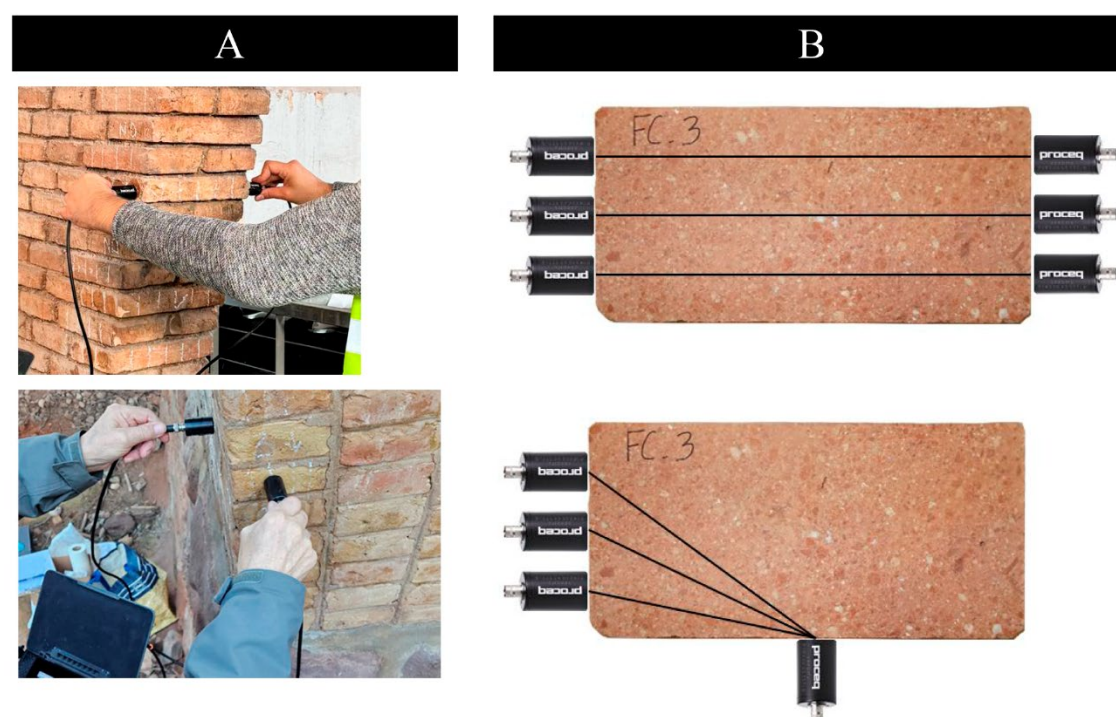


Figura 6 - Procedimiento de prueba directa de UPV a través de la longitud para el caso de estudio A (a) y procedimiento de prueba semidirecta de UPV para los casos de estudio B y C del grupo 2 (b).

A pesar de disponer de una propuesta de correlación, la experiencia de los autores muestra que el UPV resulta poco fiable cuando se utiliza de forma exclusiva para la medida de la resistencia a compresión de los ladrillos cerámicos. Ello puede explicarse debido a la heterogeneidad de estos materiales. Por ello, en la presente investigación, el pulso ultrasónico sólo se ha utilizado en el contexto del método SonReb, combinando sus medidas con las de los ultrasonidos.

9 Ensayo SonReb en ladrillos

9.1 Descripción de la técnica

El método SonReb es una técnica de ensayos no destructivos que combina los ensayos de velocidad de pulso ultrasónico (Ultrasound Pulse Velocity, UPV) y de esclerómetro (Rebound Hammer, RH) con la finalidad de medir la resistencia a compresión del hormigón. Al integrar los resultados de ambos métodos, el ensayo SonReb mejora la fiabilidad de las estimaciones de resistencia, ofreciendo una mayor precisión en comparación con cada ensayo individual. La técnica SonReb ha quedado formalizada en las directrices del Comité RILEM TC 43 CND (1993) [40] para la determinación in situ de la resistencia del hormigón. Estas directrices establecen una correlación general entre la resistencia a la compresión del hormigón, los valores de RH y las mediciones de UPV. Esta relación empírica ayuda a mitigar las incertidumbres introducidas por cada técnica y es especialmente útil cuando no es posible obtener muestras de material en las que ejecutar ensayos destructivos de laboratorio.

9.2 Estimación de la resistencia a compresión

Para obtener una precisión satisfactoria en las predicciones de resistencia es necesario aplicar técnicas específicas de análisis matemático. En este sentido, han sido propuestos diversos métodos. Los modelos comúnmente utilizados incluyen formulaciones tanto lineales (ecuación 5) como no lineales (ecuación 6). En estas ecuaciones, $f_{c,est}$ representa la resistencia a la compresión estimada, RH se refiere al valor Q del martillo de rebote, UPV representa la velocidad del pulso ultrasónico en m/s, y a, b y c son constantes.

$$f_{c,est} = a + b \cdot RH + c \cdot UPV \quad (5)$$

$$f_{c,est} = a \cdot RH^b \cdot UPV^c \quad (6)$$

Es preciso notar que, si bien el método SonReb se ha aplicado y verificado ampliamente para el hormigón, no existen investigaciones previas que hayan evaluado su uso en obra de fábrica y, particularmente, en ladrillos cerámicos. En este sentido, la investigación que se presenta en este artículo constituye una primera exploración de su aplicación a este material.

A partir de estudios experimentales previamente realizados por los autores (Cabané et al. [41]), se propone una correlación lineal (ecuación 7) para estimar la resistencia a compresión de ladrillos cerámicos. Los experimentos previamente realizados han mostrado que esta ecuación proporciona una aproximación fiable para la caracterización mecánica in situ de este tipo de ladrillos. Los coeficientes de la ecuación (7) han

sido determinados mediante análisis de regresión en base a los resultados experimentales obtenidos por los autores previa eliminación de algunos valores considerados anómalos [41].

$$f_{c,est} = a + b \cdot RH + c \cdot UPV = - 55 + 0.68 \cdot RH + 0.02 \cdot UPV \tag{7}$$

A efectos de aplicar el método SonReb, la tabla 1 resume las medianas de los valores Q medidos con la prueba de HR y el UPV en ladrillos. Todos los valores se presentan con su correspondiente coeficiente de variación entre paréntesis. Dada la posible anisotropía de los ladrillos, y según el estudio de Cabané et al. [42], las técnicas han sido siempre aplicadas a lo largo de una única dimensión de ladrillo, correspondiente a su longitud (soga). Las mediciones de HR en los ladrillos se tomaron en el canto o en la testa y las mediciones de UPV se realizaron a lo largo (soga) del ladrillo mediante un procedimiento directo o semidirecto. No se pudieron obtener mediciones de UPV en una cierta zona (designada como zona A.2) del Caso A.

Tabla 1 - Resumen de los valores de resistencia a la compresión de ladrillo estimados mediante el método SonReb y mediante ensayos destructivos a compresión según EN 772-1 [13].

Caso	Resistencia a compression [MPa]		
	SonReb $f_{c,est}$	EN 772-1 [13] f_b	Diferencia
A.1	24.3	28.1	14%
A.2	24.0	27.7	13%
A.3	33.5	38.6	13%
B	22.7	26.3	14%
C	29.1	33.6	13%

La tabla 1 presenta los valores de resistencia a la compresión medida mediante SonReb, determinada con la ecuación (7), y medida mediante ensayo a compresión en laboratorio sobre probetas cúbicas de 40 × 40 × 40 mm³. En este último caso se proporcionan valores normalizados. El valor de resistencia a la compresión normalizada, f_b se ha derivado aplicando dos factores de forma: un factor inicial de 1.65 para correlacionar la probeta de 40 × 40 × 40 mm³ con la muestra estandarizada de 100 × 100 × 40 mm³ (de acuerdo con EN 772-1 [13]), y un segundo factor de 0.7 (también según [13]), para obtener la resistencia a la compresión normalizada, f_b . En ausencia de datos obtenidos con UPV, la resistencia a la compresión estimada de los ladrillos en el caso A.2 se ha determinado utilizando la ecuación (4) con los resultados de la prueba RH. Tal y como muestra la tabla 1, el método SonReb ha funcionado correctamente y ha permitido obtener estimaciones satisfactorias de la resistencia a compresión. Tales estimaciones aproximan correctamente los valores medidos mediante el ensayo destructivo a compresión. Con todo, se observa un error de estimación sistemático del orden del 14%, lo cual puede atribuirse al carácter impreciso de los factores de forma utilizados en la conversión de la resistencia. Ello sugiere la posibilidad de mejorar la estimación de la resistencia normalizada multiplicando la resistencia medida mediante SonReb por un factor del orden de 1.35, lo cual reduciría el error a un 1%, Con todo, esta modificación no dispone por el momento de la suficiente generalidad, por lo que su adopción requiere investigaciones adicionales extendidas a más casos de estudio y a otros tipos de ladrillos.

10 Conclusiones

Se han presentado un conjunto de técnicas de carácter no destructivo o moderadamente destructivo para la estimación de la resistencia a compresión de los materiales componentes de la obra de fábrica. El estudio se ha centrado en la medida de la resistencia en obra fábrica de ladrillo cerámico macizo recibida con mortero de cal o de cemento Portland, prestando especial atención al caso de las fábricas históricas. Las técnicas investigadas han sido el ensayo penetrométrico (PPT), el ensayo de extracción de tornillo helicoidal (HPT), el esclerómetro (Rebound Hammer, RH), el ensayo velocidad del pulso ultrasónico UPV) y la técnica SonReb, basada en la combinación de estos dos últimos ensayos. A pesar de su carácter más destructivo, pues exige extraer muestras de mortero de juntas, también se ha prestado atención al ensayo de doble émbolo (Double Punch Test, DPT), el cual es de gran utilidad para el estudio de fábricas existentes.

Se constata que hasta el momento se ha prestado una atención muy escasa a la aplicación de las técnicas mencionadas a los componentes de la obra de fábrica (ladrillo y mortero), habiendose dedicado casi todo el esfuerzo investigador previo al hormigón. Con todo, y aunque el hormigón presenta características muy disímiles de las del mortero en juntas y los ladrillos, la experiencia previa en este material resulta muy valiosa y permite extraer aspectos metodológicos y formulísticos de alto interés para su posible aplicación a estos materiales. Con todo, la investigación realizada ha permitido derivar protocolos y técnicas, orientados a optimizar y garantizar tanto la ejecución de los ensayos como su postproceso, específicamente aplicables a los componentes de la obra de fábrica.

En el caso de los ensayos PPT y HPT ha sido posible obtener correlaciones empíricas satisfactoriamente significativas para correlacionar los parámetros físicos medidos (profundidad de penetración y fuerza de extracción respectivamente) con la resistencia a compresión de los componentes. En ambos casos ha sido posible obtener una correlación unificada para ladrillo y mortero. Ha sido posible asimismo establecer un rango de uso óptimo, excluyendo rangos de valores de resistencia a compresión excesivamente bajos o altos para los cuales los ensayos pierden fiabilidad o resolución.

Finalmente, se ha comprobado que la técnica SonReb, basada en la combinación de medidas con esclerómetro (RH) y ultrasonidos (UPV) y hasta el momento solo utilizada en hormigón, puede ser asimismo aplicada con éxito para la medida de la resistencia a la compresión de

ladrillos macizos cerámicos. Tal aplicación exige considerar algunas precauciones metodológicas, así como una reformulación de las correlaciones normalmente empleadas para el hormigón.

Entre las distintas técnicas investigadas, el método SonReb es la que se vislumbra como más fiable para estimar la resistencia compresión de ladrillos. Con todo, se considera que la mejor aproximación, y la que ofrece mayor fiabilidad, es la que consiste en combinar distintas técnicas con la finalidad de obtener información redundante y corroborar resultados.

Las técnicas y expresiones matemáticas propuestas han sido calibradas en base a una variedad amplia de casos de estudio caracterizados por rangos extensos de valores de resistencia de mortero y de ladrillo, por lo que en principio se consideran adecuadamente validadas. Con todo, su extensión a otros entornos geográficos (caracterizados por el uso de materiales y/o técnicas constructivas muy distintas) podría requerir una mayor validación extendida a un número mayor de casos de estudio. Por otra parte, no puede descartarse que los factores climáticos (como temperatura y humedad) puedan tener alguna influencia sobre las medidas experimentales, aspecto que debería ser específicamente estudiado.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación obtenida del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno Español, de la Agencia Española de Investigación y de los Fondos Europeos de Desarrollo Regional (ERDF) a través del proyecto PONT3 *Anticipating failure propagation of ageing bridges through a cost-effective interdisciplinary approach*, con número de referencia PID2021-124236OB-C32. Luca Pelà agradece el apoyo recibido del programa de investigación AGAUR - ICREA Acadèmia del Departamento de Investigación y Universidades de la Generalitat de Cataluña.

Los autores han escrito este artículo como un sentido homenaje a los profesores Antonio Marí y Hugo Corres, a quienes consideran maestros de varias generaciones de estudiantes, profesionales e investigadores de la ciencia del hormigón estructural. El tercer autor desea expresar su gran gratitud hacia Antonio Marí por el apoyo recibido a lo largo de su carrera universitaria y por el gran ejemplo que para él ha significado como científico, como maestro y como persona de profunda humanidad.

REFERENCIAS

- [1] ISCARSAH/ICOMOS, Guidelines for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage (2024).
- [2] CEN European Committee for Standardization (2013), EN 1996-1-1:2011+A1:2013 Eurocode 6 - Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures.
- [3] Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-F. Seguridad Estructural. Ministerio de Fomento, Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo, 2019.
- [4] J. Segura, L., Pelà, P. Roca, A. Cabané, Experimental analysis of the size effect on the compressive behaviour of cylindrical samples core-drilled from existing buildings, *Construction and Building Materials*, (2019), 228, 116759. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116759>.
- [5] D. Marastoni, L. Pelà, A. Benedetti, P. Roca, Combining brazilian tests on masonry cores and double punch test for the mechanical characterization of historical mortars, *Construction and Building Materials*, (2016), 112, pp. 112-127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.168>
- [6] L. Garcia-Ramonda, L. Pelà, P. Roca, G. Camata, Experimental cyclic behaviour of shear masonry walls reinforced with single and double layered Steel Reinforced Grout, *Constr. Build. Mater.* 320 (2022) 1–36. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126053>.
- [7] D. Huang, A. Albareda, O. Pons, Experimental and Numerical Study on Unreinforced Brick Masonry Walls Retrofitted with Sprayed Mortar under Uniaxial Compression, *Buildings*. 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/buildings13010122>.
- [8] European Committee for Standardization (CEN), EN 998-2:2018 Specification for mortar for masonry. Part 2: Masonry mortar, (2018).
- [9] J. Segura, D. Aponte, L. Pelà, P. Roca, Influence of recycled limestone filler additions on the mechanical behaviour of commercial premixed hydraulic lime based mortars, *Constr. Build. Mater.* 238 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117722>.
- [10] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-11:2020 Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, (2020).
- [11] A. Cabané, L. Pelà, P. Roca, Laboratory and in-situ mechanical characterization of masonry components by comparing destructive and minor destructive testing techniques, *Construction and Building Materials*, (2024), 41, 134473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134474>
- [12] A. Cabané, L. Pelà, P. Roca, Experimental mechanical characterization of masonry in existing buildings using NDT and MDT techniques. *Proceedings of the 14th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*, 2025.
- [13] European Committee for Standardization (CEN), EN 772-1:2011+A1:2016 Methods of test for Masonry Units - Part 1: Determination of Compressive Strength, (2016).
- [14] Deutsche Norm, DIN 18555-9:2019-04 Testing of mortar containing mineral binders - Part 9: Determining the compressive strength of hardened mortar, (2019).
- [15] Railway Technical Publications (UIC), Leaflet 778-3R: Recommendations for the inspection, assessment and maintenance of masonry arch bridges, (1995).
- [16] L. Pelà, P. Roca, A. Aprile, Combined In-Situ and Laboratory Minor Destructive Testing of Historical Mortars, *Int. J. Archit. Herit.*

- 12 (2018) 334–349. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1323247>.
- [17] L. Pelà, A. Benedetti, D. Marastoni, Interpretation of experimental test on small specimens of historical mortars, in: Jerzy Jasieńko (ed) (Ed.), *Struct. Anal. Hist. Constr.*, Wroclaw, Poland, 2012.
- [18] P. Matysek, S. Seręga, S. Kańka, Determination of the Mortar Strength Using Double Punch Testing, *Procedia Eng.* 193 (2017) 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.192>.
- [19] American Society for Testing and Materials (ASTM), ASTM C803/C803M-18 Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete, (2018). https://doi.org/10.1520/C0803_C0803M-18.
- [20] Standard British (BSI), BS 1881-207:1992 Testing concrete. Recommendations for the assessment of concrete strength by near-to-surface tests, (1992).
- [21] National Research Council Canada, Review of Non-Destructive Test Methods for Assessing Strength, Serviceability and Deterioration in Buildings, (1993).
- [22] ACI 228.1R-03, In-Place Methods to Estimate Concrete Strength Reported, ACI Comm. Reports. (2003) 44.
- [23] L. Pelà, P. Roca, A. Aprile, Comparison of MDT techniques for mechanical characterization of historical masonry, *Struct. Anal. Hist. Constr. Anamn. Diagnosis, Ther. Control. - Proc. 10th Int. Conf. Struct. Anal. Hist. Constr. SAHC 2016.* (2016) 769–775. <https://doi.org/10.1201/9781315616995-104>.
- [24] R.C. de Vekey, RILEM TC 127-MS: Test for masonry materials and structures. MS-D.9 determination of mortar strength by the screw (helix) pull-out method, *Mater. Struct.* 30 (1997) 325–327. <https://doi.org/10.1007/BF02480682>.
- [25] A. Benedetti, M. Tarozzi, Interpretation formulas for in situ characterization of mortar strength, *Constr. Build. Mater.* 242 (2020) 118093. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118093>.
- [26] W.A. Ferguson, Further Data on the Screw Pull-out Test for the In-situ Measurement of the Strength of Some Masonry Materials, *Mason. Int.* 9 (1995) 25–30.
- [27] R.C. de Vekey, M. Sassu, Comparison of non-destructive in-situ mechanical test on masonry mortars: The PNT-G method and the helix method, in: *Proc. 11th Int. Brick Block Mason. Conf., Tongji University, Shanghai, China, 1997:* pp. 376–384. <http://www.hms.civil.uminho.pt/ibmac/1997/376.pdf>.
- [28] W.A. Ferguson, J. Skandamoorthy, The screw pull-out test for the in-situ measurement of the strength of masonry materials, in: *Proc. 10th Int. Brick Block Mason. Conf., Calgary, Canada: Masonry Council of Canada, 1994:* pp. 1257–66.
- [29] BRE Group, Digest421 Measuring the compressive strength of masonry materials: the screw pull-out test, 1997. <https://www.brebookshop.com/details.jsp?id=325216>.
- [30] R.C. de Vekey, In-Situ Tests for Masonry, in: *Proc. 9 Th Int. Brick Block Mason. Conf., Berlin, Germany, 1991:* pp. 620–627.
- [31] ASTM American Society for Testing and Materials (2018), C805/C805M-18 Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete. https://doi.org/10.1520/C0805_C0805M-18.
- [32] CEN European Committee for Standardization (2022), EN 12504-2 Testing concrete in structures - Part 2: Non-destructive testing. Determination of rebound number.
- [33] CEN European Committee for Standardization (2020), EN 13791:2020 Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components.
- [34] ISO International Standard (2004), ISO 1920-7 Testing of concrete - Part 7: Non-destructive test on hardened concrete.
- [35] Proceq, Screening Eagle (n.d.), The Silver Schmidt Reference Curve.
- [36] N. Makoond, L. Pelà, C. Molins (2019), Dynamic elastic properties of brick masonry constituents, *Construction and building Materials* 199, p. 756-770. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.071>
- [37] N. Makoond, A. Cabané, L. Pelà, C. Molins (2020), Relationship between the static and dynamic elastic modulus of brick masonry constituents, *Construction and Building Materials* 259, p. 120386. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120386>
- [38] CEN European Committee for Standardization (2022), EN 12504-4:2022 Testing concrete in structures - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity.
- [39] ASTM American Society for Testing and Materials (2022), C597-22 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. <https://doi.org/10.1520/C0597-22>.
- [40] RILEM TC 43CND (1993), Draft recommendation for in situ concrete strength determination by combined non-destructive methods, *Mater Struct* 26 43–49.
- [41] A. Cabané, T. Seneschal, L. Pelà, P. Roca (2025) Non-Destructive Evaluation of Solid Fired Clay Brick Strength Using the SonReb Method, Under review in *Construction and Building Materials*.
- [42] A. Cabané, L. Pelà, P. Roca (2022) Anisotropy and compressive strength evaluation of solid fired clay bricks by testing small specimens, *Construction and Building Materials* 344 128195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128195>.