

CÓDIGO 1.7.31

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE LOS MORTEROS DE CAL UTILIZADOS EN LA REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS HISTÓRICOS POR MEDIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Boffill, Y.¹, Blanco, H.¹, Lombillo, I.¹, Villegas, L.¹, Thomas, C.²

1: Grupo GTED-UC
Universidad de Cantabria

yosbel.boffill@unican.es, gted@unican.es, web: www.gted.unican.es

2: LADICIM-UC

Universidad de Cantabria,

carlos.thomas@unican.es, web: www.ladicim.unican.es

PALABRAS CLAVE: Morteros de cal, cales aéreas, áridos, carbonatación, velocidad ultrasónica, penetrometría.

RESUMEN

El conocimiento de las propiedades mecánicas y la resistencia de las estructuras de fábrica son esenciales en muchas de las intervenciones en edificios históricos. Éstas pueden ser evaluadas de diferentes maneras, una de ellas, mediante el uso de fórmulas empíricas o fenomenológicas en donde es necesario conocer ciertas propiedades mecánicas de los componentes de la fábrica. En el caso del mortero, debido al pequeño espesor que presentan, es muy complejo obtener muestras representativas, siendo complicado, por ausencia de información, obtener una caracterización mecánica del mismo y, por ende, dichas características suelen suponerse con las incertidumbres que ello conlleva.

El objetivo del presente estudio es contribuir a la caracterización mecánica de los morteros de cal de edificios históricos mediante el empleo de correlaciones con parámetros obtenidos de ensayos no destructivos. Para ello, fueron confeccionados 8 tipos de morteros utilizando una tipología de cal (CL90S) y diferentes proporciones de conglomerante:árido (1:1, 1:2, 1:3 y 1:5). Además, se emplearon dos tipos de áridos, piedra caliza y silícea. Se realizaron más de 200 probetas prismáticas de 40x40x160mm. Las muestras se ensayaron de forma destructiva (flexión y compresión) a 28, 91 y 180 días de curado y de una manera no destructiva (ultrasonido y penetrometría). Adicionalmente, se analizó la influencia del progreso de carbonatación en estos morteros.

1. INTRODUCCIÓN

Las construcciones antiguas, entendiendo como tales las construidas mediante muros portantes de fábrica, representan una importante parte del patrimonio construido existente. Debido a su valor e importancia histórica, muchos de estos inmuebles son catalogados como monumentos históricos. En el marco de la restauración, la compatibilidad entre los antiguos y nuevos morteros es imprescindible. De ahí, que la caracterización de los morteros históricos sea una de las principales preocupaciones en el ámbito del patrimonio histórico, y entre sus objetivos está el evaluar, entre otros, el estado de conservación de los materiales componentes, sus características químicas, físicas y mecánicas. A todo ello se suma el gran interés en la relación entre el conglomerante y el árido a fin de poder planificar adecuadamente las obras de conservación.

Investigaciones realizadas en este ámbito por Valek y Bartos [1], aluden que el contenido de agua, tipo de cal y tipo de árido que se empleen en la confección de un mortero, así como su forma de preparar, pueden afectar sus prestaciones. Algunas de estas variables influyen en la velocidad de carbonatación del mortero, y por ende en la rapidez con que incrementa su resistencia. Estos autores también refieren la importancia de conocer la resistencia de los morteros con el transcurso de los años. Los morteros de cal desarrollan su resistencia muy lentamente, y el proceso puede continuar durante un importante número de años. En este sentido, las resistencias últimas pueden llegar a ser mucho más altas que las obtenidas a los 28 días, edad en la que los morteros son ensayados en cumplimiento de la norma actualmente vigente (UNE EN 459:2011 [2]). Por ello, la resistencia a compresión (y por lo tanto resistencia a la flexión) de un mortero en, por ejemplo, cinco años, es mucho más interesante e importante, que la alcanzada a los 28 días.

Lanas et al. [3,4] se centraron en conocer la influencia del tiempo de curado, la relación conglomerante-árido y la porosidad, sobre morteros elaborados con cal aérea hidratada en polvo (CL90). Para ello, emplearon 4 tipos de áridos de los cuales, dos eran de origen silíceo y los dos restantes de origen cálcico. Todos los materiales fueron caracterizados química y mineralógicamente, y las relaciones en volumen en el estudio variaron en torno a 1:3, relación más citada en la literatura, confeccionándose 5 tipos de proporciones: 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 y 1:5. Las mezclas se prepararon utilizando la cantidad de agua necesaria para obtener una consistencia normal y buena trabajabilidad, para lo que la relación agua/conglomerante osciló entre 0.5 (dosificaciones 1:1) y 1.2 (dosificaciones 1:5).

Otros estudios [5-7] se han centrado en caracterizar en detalle, mineralógica, química, física y mecánicamente, los morteros originales y los de reparación, con objeto de diseñar morteros de restauración compatibles al material base, lo que permite la estimación de las proporciones conglomerante/árido del mismo.

Por otra parte, algunos trabajos han manifestado [3] que el aumento de la porosidad en morteros de cal aérea permite un mayor acceso al dióxido de carbono atmosférico (CO_2), que promueve la carbonatación, y por ende el incremento de la resistencia a la compresión. Por contra, Schafer y Hilsdorf [8] afirman que la resistencia a la compresión de los morteros de cal aumenta con la disminución de la porosidad. Si bien su estudio arroja que ello es cierto para morteros de cal hidráulica, los datos presentados para morteros de cal aérea no parecen apoyar esta afirmación. Estos resultados fueron confirmados posteriormente por Winnefield y Böttger [9], donde llama la atención cómo los resultados de resistencia a compresión y relación agua/conglomerante de cal aérea (CL90-S) se exponen separados de los de cal hidráulica natural (NHL 2 y 5) y de la dosificación de cemento/cal aérea (LPC & LSC).

Por otra parte, el conocimiento de las propiedades mecánicas y resistencia de las estructuras de fábrica es fundamental en muchas de las intervenciones desarrolladas en edificios históricos. Ésta puede valorarse mediante diferentes procedimientos, desde técnicas ligeramente destructivas [10] hasta el empleo de fórmulas empíricas o fenomenológicas en las que habitualmente es necesario conocer determinadas propiedades mecánicas de las piezas y del mortero que conforman la estructura de fábrica en cuestión [11]. En el caso de las piezas, la obtención de dichas características mecánicas no suele revestir gran complejidad, habitualmente se obtienen a partir de testigos extraídos de la estructura. Sin embargo, en el mortero, debido a los pequeños espesores movilizados, es muy complejo obtener muestras representativas, y por ende, obtener una caracterización mecánica del mismo. Ello trae como consecuencia que dichas características suelen suponerse con las incertidumbres que ello conlleva.

En este sentido, y con la finalidad de disponer de metodologías alternativas para evaluar las propiedades mecánicas y resistencia de las estructuras de fábrica, el presente trabajo tiene por objeto caracterizar mecánicamente los morteros de cal de construcciones históricas mediante el empleo de correlaciones de parámetros obtenidos de ensayos destructivos (ED) y no destructivos (END).

Los END son ampliamente empleados para la caracterización mecánica de los materiales en edificios de alto valor histórico, de cara a dañar el mínimo posible el patrimonio. De éstos, la velocidad ultrasónica ha sido ampliamente utilizada como una medida de la resistencia a la compresión, basándose generalmente en relaciones empíricas entre la resistencia y los parámetros no destructivos [12-14]. Otra de las variables que se encuentra ligada a la resistencia es el avance de la carbonatación. Por ello, cualquier estudio debe tener en cuenta dicho aspecto, ya que los resultados cuantitativos pueden variar de acuerdo a la profundidad de la superficie en la que se toma una muestra. A pesar de la amplia gama de métodos disponibles para medir este parámetro [15], el método tradicional empleado para detectar este proceso es rociar una superficie de ruptura fresca de mortero con fenoltaleína. Asociado a este ensayo, un fenómeno que se observa ocasionalmente en morteros de cal es la presencia de patrones de Liesegang, que consiste en una precipitación auto-organizada cuasi-periódica de un producto poco soluble a raíz de un movimiento del frente de reacción [16,17]. En otras palabras, como el frente de carbonatación avanza a través del mortero, bajo ciertas circunstancias el producto de carbonatación será más concentrado en algunas distancias de la superficie que en otras.

Otro de los END empleados en las estructuras de fábrica, y en particular en la caracterización de morteros, son las técnicas penetrométricas [18-21]. Esta técnica ha sido diseñada para determinar la energía consumida en la perforación de un agujero patrón, y correlacionarla con la resistencia a compresión del material.

Por lo antes referido, el presente artículo tiene por objeto analizar y evaluar en el tiempo las características físico-mecánicas de diferentes tipos de morteros de cal empleados en edificaciones históricas mediante ensayos destructivos y no destructivos. Para ello, se ha empleado una tipología de cal aérea (CL-90-S PL), combinada con dos tipos de áridos distintos, uno de naturaleza caliza y otro silíceo. Ambas arenas han sido obtenidas de canteras locales, de tal forma que en una fase posterior del estudio puedan alcanzarse correlaciones con morteros de edificaciones históricas de la región de Cantabria, España.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

El estudio se llevó a cabo para dos tipologías de morteros de cal. Éstos se elaboraron con cal aérea CL90-S PL como material conglomerante, y dos tipos de áridos de la región de Cantabria, España. El primero de ellos de origen cálcico AF-T-0/2-C [22,23] (arena manufacturada) y el segundo de origen silíceo AF-R-0/2-S [22,23] (arena arija de obtención natural). En consecuencia, dos combinaciones fueron planteadas: cal aérea y arena cálcica (CA-C), y cal aérea y arena silícea (CA-S). En la Tabla 1 se indica la densidad de las materias primas empleadas.

Tabla 1. Características de la cal y los áridos utilizados para las mezclas de mortero

Propiedades	Cal Hidratada Seca	Arena Cálcica (0-2 mm)	Arena Silícea (0-2 mm)
Densidad	2.25	2.74	2.65

2.2 Tipos y cantidades de muestras

Las muestras de mortero fueron confeccionadas en probetas prismáticas de dimensiones 40x40x160mm. Se estableció la cantidad en peso que debía emplearse a partir de dosificaciones en volumen seleccionadas de investigaciones recientes y literatura de referencia [3,4]. La dosificación en cada caso se indicó con dos números, el primero refleja las partes en volumen del conglomerante y el segundo las partes del árido (conglomerante:árido). Con objeto de considerar la mayor variabilidad de dicho parámetro, se seleccionaron cuatro dosificaciones: 1:1, 1:2, 1:3 y 1:5. Teniendo en cuenta estas variables, se confeccionaron 8 tipos de morteros.

Conjuntamente a los parámetros antes mencionados, se seleccionaron diferentes etapas para el estudio de los morteros. La investigación está planificada para dos años (730 días), aunque el presente artículo únicamente hace mención a los resultados alcanzados hasta el momento, 6 meses (182 días). Cabe referir, que dentro del período de estudio se seleccionaron cinco fases correspondientes a 28, 91, 182, 365 y 730 días, los cuales permitirán estudiar el comportamiento de los morteros en sus diferentes etapas de curado, período en el que se desarrollan sus mayores transformaciones. Los períodos de análisis se plantearon a partir de investigaciones consultadas previamente [24], lo cual posibilita a su vez establecer comparaciones.

Se elaboraron un total de 227 probetas para la presente parte de la investigación (182 días). De éstas 108 correspondieron a la combinación CA-C y 119 a la tipología CA-S, distribuidas entre las dosificaciones seleccionadas.

2.3 Preparación de las muestras

La elaboración de las muestras se llevó a cabo siguiendo el procedimiento de amasado recogido en la norma UNE-EN 196-1 [25]. Una vez finalizado, se procedía a determinar la consistencia del mortero en estado fresco a través de la mesa de sacudidas, siguiendo las pautas de la UNE-EN 1015-3 [26].

Las pastas de mortero fueron obtenidas empleando la cantidad de agua requerida para alcanzar una consistencia normal y buena trabajabilidad, determinado a través del ensayo de la mesa de sacudidas. Se seleccionaba la dosificación que cumpliera los requerimientos establecidos por la norma para ello (UNE EN 459-2 [27]), la cual establece un valor de 165 ± 3 mm para cales hidratadas (CL90-S).

Las condiciones de conservación y curado en el laboratorio, una vez desmoldadas las muestras, correspondieron a una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa de $65\% \pm 5\%$, según recoge la norma UNE EN 1015-11 [28]. Asimismo, una vez las muestras alcanzaban una dureza suficiente, eran separadas de las baldas colocándose sobre listones de madera con objeto de permitir una ventilación lo más uniforme posible por todas las superficies de las mismas. Con ello se pretendía garantizar que la carbonatación se desarrollase por igual en todas las caras.

2.4 Ensayos de laboratorio

2.4.1 Análisis mineralógico de los áridos

Previo a la caracterización granulométrica de los áridos, se procedió a seleccionar las muestras más representativas, para lo cual se empleó la norma ASTM C 702 [29]. Se seleccionó el procedimiento A de división de muestras, el cual emplea un divisor mecánico. Por su parte, para la determinación de las curvas granulométricas y módulo granulométrico de los áridos, se aplicó la norma de ensayo UNE-EN 933-1 [30] y UNE-EN 933-2 [31], utilizándose el método de tamizado en vía seca. Para ello, se realizó un análisis granulométrico sobre la muestra completa utilizando la serie de tamices referida en la norma ASTM C144.

2.4.2 Propiedades mecánicas

2.4.2.1 Ensayos destructivos (ED): flexión y compresión

Los ensayos de flexión y compresión se desarrollaron empleando una Prensa WYKEHAM FARRANCE con una capacidad de carga de 5 toneladas. Se dispuso de dos células de carga, una de 0.5kN para los ensayos de flexión y otra de 50kN para los ensayos de compresión (Figura 1). Éstas a su vez se encontraban conectadas a un equipo adquisidor de datos acoplado a un ordenador.

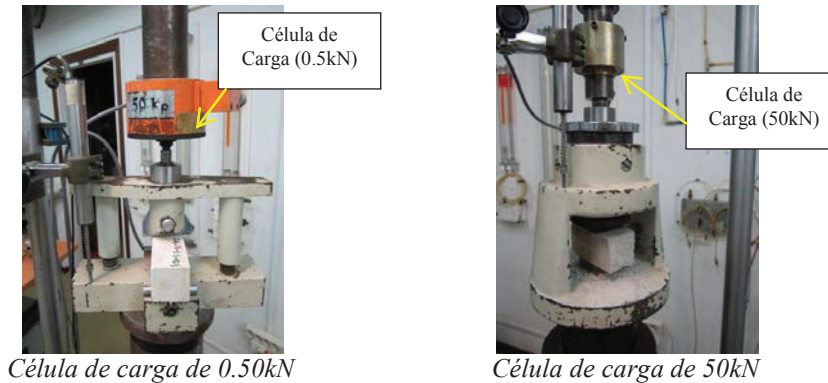


Figura 1. Células de carga empleadas en la realización de los ensayos

La resistencia a flexión del mortero se determinó aplicando la norma UNE-EN 1015-11 [32] y al igual que el resto, se llevó a cabo en las muestras de mortero en cada período de análisis (28, 91 y 182 días). Los ensayos se realizaron sobre un mínimo de 3 tres probetas, con objeto de disponer de resultados representativos. Las dos mitades resultantes eran reservadas, una para los ensayos de compresión y la otra para los ensayos no destructivos (ultrasonidos, profundidad de carbonatación y penetrometría). Tanto para los ensayos de flexión y compresión, la carga se aplicaba sin aceleraciones bruscas, a una velocidad uniforme entre 10N/s y 50N/s, de tal modo que la rotura se produjese entre los 30s y 90s de iniciado el ensayo. Una vez alcanzado este instante, se registraba la carga máxima aplicada.

2.4.2.2 Ensayos no destructivos (END)

Previo a la realización de cualquier ensayo, se registraban las dimensiones reales de las probetas mediante un calibre digital. Además, y con objeto de conocer con mayor exactitud su geometría, se midió la sección transversal en cada una de las dos mitades resultado del ensayo de flexión.

El ensayo de velocidad de pulso ultrasónico se llevó a cabo con objeto de obtener información acerca de la calidad y homogeneidad de los morteros. El mismo se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12504-4 [33], empleando un equipo TDAS_16 marca BOVIAR para la adquisición de las señales ultrasónicas, a través del software TDAS_SOFT. Los ensayos se desarrollaron en cada una de las probetas, colocándose los transductores en caras opuestas perpendiculares a la longitud de 160mm (método directo). Fue empleado un transmisor de 55kHz, y previo al inicio de los ensayos, se procedió a la calibración del equipo de ultrasonido. Adicionalmente, con objeto de garantizar un buen acoplamiento acústico entre los medios, se empleó gel acoplante.

La profundidad de carbonatación se determinó aplicando la metodología de la norma UNE112011 [34]. Se llevó a cabo con objeto de conocer la evolución del proceso de carbonatación de los morteros. Cada ensayo se realizó inmediatamente después que las probetas eran ensayadas a flexión, sobre el área de fractura en la parte empleada para la realización de los ensayos no destructivos. En cada caso, se determinó el área carbonatada, así como las profundidades máximas y mínimas de carbonatación.

El ensayo penetrométrico se realizó con el penetrómetro portátil PNT-G. El mismo consta de un taladro portátil y una unidad electrónica, determinando la energía absorbida al realizar un orificio sobre el material, en este caso mortero. En cada una de las muestras se realizaron 16 perforaciones, cuatro en cada cara de la probeta. Ello permitió que las medidas fueran procesadas estadísticamente. El procedimiento estadístico establecido en el presente estudio correspondió al recogido en el manual del equipo [35], metodología que a su vez ha sido empleada en un gran número de investigaciones [18,20,36,37]. Ésta establece que en una serie de un número pequeño de medidas, una o varias de ellas pueden ser incorrectas, como consecuencia de errores sistemáticos, pudiendo apartarse notablemente de las demás.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización mineralógica de los áridos

La Figura 2a muestra la distribución granulométrica resultante del ensayo realizado a la arena de origen cálcico (Árido 1: Candesa), arrojando que dicho árido es un material con una buena granulometría. Por su parte, la arena de origen silíceo (Árido 2: Arijá) ha resultado ser un material con una mala distribución granulométrica. Adicionalmente, los resultados reflejaron que la arena rodada de origen silíceo (Arijá), a pesar de presentar una mala distribución granulométrica, llega a encontrarse dentro del uso granulométrico que recogía en su momento la BS1200:1976 para arenas recomendadas en morteros. Sin embargo, la arena triturada de origen cálcico, siendo una arena con buena granulometría, no llega a cumplir ninguno de los usos plateados por dicha norma, ni su posterior edición de 1984 (Figura 2a). Además, referir que ninguna de las dos arenas llegan a cumplir los límites recogidos por la ASTM C-144 para su uso en morteros. No obstante, es de señalar que la arena de origen cálcico (Árido 1) es la que más próxima se encuentra, en este caso, al límite inferior (Figura 2b).

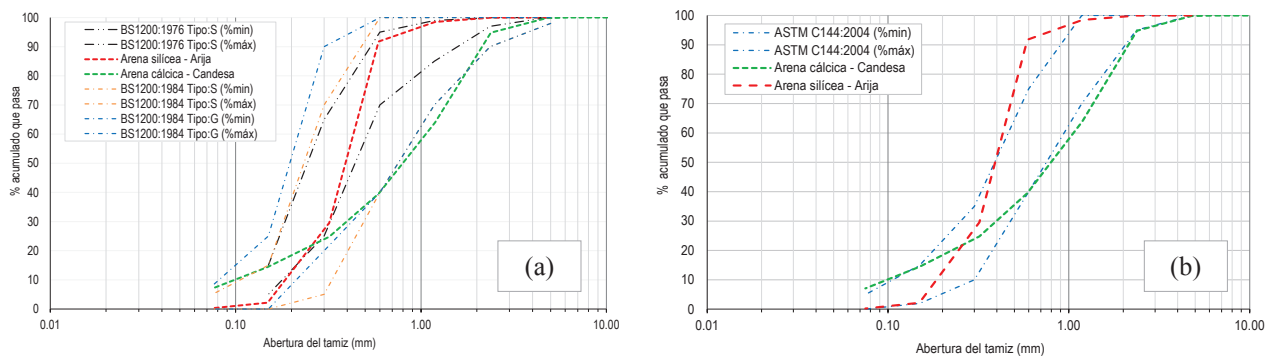


Figura 2. Granulometría de las arenas estudiadas entre los límites de clasificación planteados por la norma BS 1200:1976 y BS 1200:1984 (a) y la ASTM C144:2004 (b)

3.2 Caracterización mecánica de los morteros

3.2.1 Resistencia a flexión y compresión

La Figura 3a muestra los resultados de resistencia a flexión para las cuatro dosificaciones estudiadas (1:1, 1:2, 1:3 y 1:5) de las muestras **CA-C**, y para los tres períodos de análisis (28, 91 y 182 días). Como puede apreciarse, en cada caso los valores de resistencia se incrementaron con el transcurso del tiempo. Sin embargo, de manera poco usual, se alcanzaron resistencias superiores para dosificaciones con mayores proporciones de árido. No obstante, señalar que el valor máximo se registró para la dosificación 1:3 en torno a 1.10MPa a los 182 días de confeccionada la muestra. Por su parte, los valores de resistencia a compresión registrados para esta constitución de mortero se mantuvieron también crecientes a lo largo del período de estudio. El mayor valor fue registrado por la dosificación 1:3 con 2.99MPa a los 182 días, mientras que el menor valor identificado en dicho instante de análisis correspondió a la dosificación 1:1 con una resistencia de 1.48MPa. Por su parte, la dosificación 1:5 alcanzó los mayores valores de resistencia respecto al resto a los 91 días de curado, aunque posterior a dicho instante, su incremento fue poco significativo.

Los resultados arrojados de los ensayos de resistencia a flexión y compresión de las muestras confeccionadas con cal aérea y árido silíceo (**CA-S**) se muestran en la gráfica de la Figura 3b. En este caso, no se aprecia un comportamiento lógico creciente o decreciente según las diferentes dosificaciones, al registrarse las mayores resistencias por la dosificación 1:2 seguidas de la 1:3. Las máximas resistencias a flexión se alcanzaron a los 182 días con valores de 0.81MPa (dosif. 1:2) y 0.68MPa (dosif. 1:3), y en consecuencia las mayores resistencias a compresión, 1.56MPa (dosif. 1:2) y 1.11MPa (dosif. 1:3).

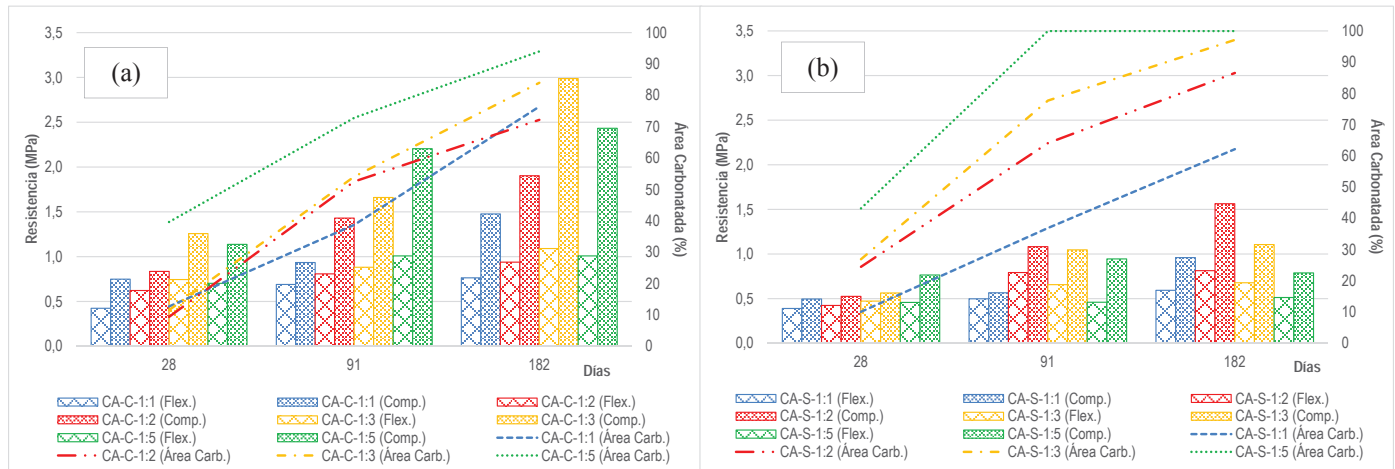


Figura 3. Resultados de los ensayos a flexión, compresión y por ciento de área carbonatada.
(a) Para los morteros elaborados con arena cálcica (CA-C). (b) Para las muestras conformadas con arena silícea (CA-S).

3.2.2 Área carbonatada de las muestras

Las áreas carbonatadas resultantes (indicadas en porcentaje) para cada una de las muestras y períodos de ensayo se muestran en la Figura 3 (a) y (b). Se observa de manera clara como los morteros de dosificación 1:5 (para ambos tipos de arenas) carbonataron mucho más rápido que el resto. En su defecto, las muestras elaboradas con dosificación 1:1 presentaron un avance de carbonatación más lento. Ello podría ser consecuencia que al existir una mayor presencia de áridos en la muestra, ésta sea más porosa, y facilitara la entrada del CO_2 de la atmósfera [38-40].

A este respecto, la Figura 4 recoge la evolución de dicho parámetro para las dos combinaciones de conglomerante:árido (CA-C y CA-S) y dosificación 1:5. Se puede apreciar como el área carbonatada es mayor para los morteros elaborados con árido de origen silíceo que sus homólogos conformados con árido cálcico. De éstas, las muestras CA-S estuvieron carbonatadas a los 91 días de confeccionadas, mientras que este proceso no se desarrolló totalmente hasta los 182 días en los morteros CA-C. Ello puede ser debido a que al ser el árido silíceo un material con una mala distribución granulométrica trae consigo la existencia de una relación de vacíos más elevada respecto a los calizos, los cuales presentan una mejor distribución granulométrica, y por ende menor porosidad.

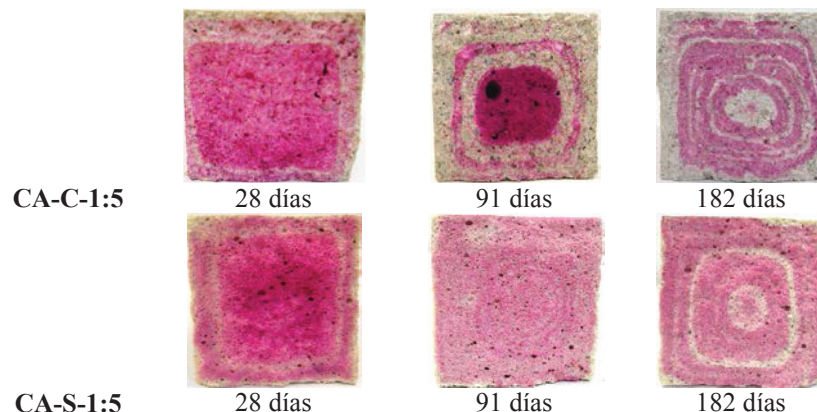


Figura 4. Avance de la carbonatación en los morteros de cal (Presencia de patrones de Liesegang)

3.2.3 Velocidad ultrasónica del mortero

Las velocidades ultrasónicas alcanzadas para los diferentes tipos de morteros estudiados se recogen en la Figura 5. En la Figura 5a pueden apreciarse los resultados obtenidos para las cuatro dosificaciones de las muestras CA-C. De éstas, las dosificaciones 1:1 y 1:2 no superaron en ningún momento del período analizado los 2000m/s, mientras que las dosificaciones 1:3 y 1:5 registraron velocidades de 2093 y 2253m/s respectivamente a los 182 días.

Por su parte, las muestras CA-S (Figura 5b) presentaron un comportamiento más homogéneo entre dosificaciones. Las mayores velocidades registradas a los 28 días resultó ser la dosificación 1:3 (1573m/s), mientras que a los 182 días de curadas las probetas, el incremento se detectó más en la dosificación 1:2 (1736m/s).

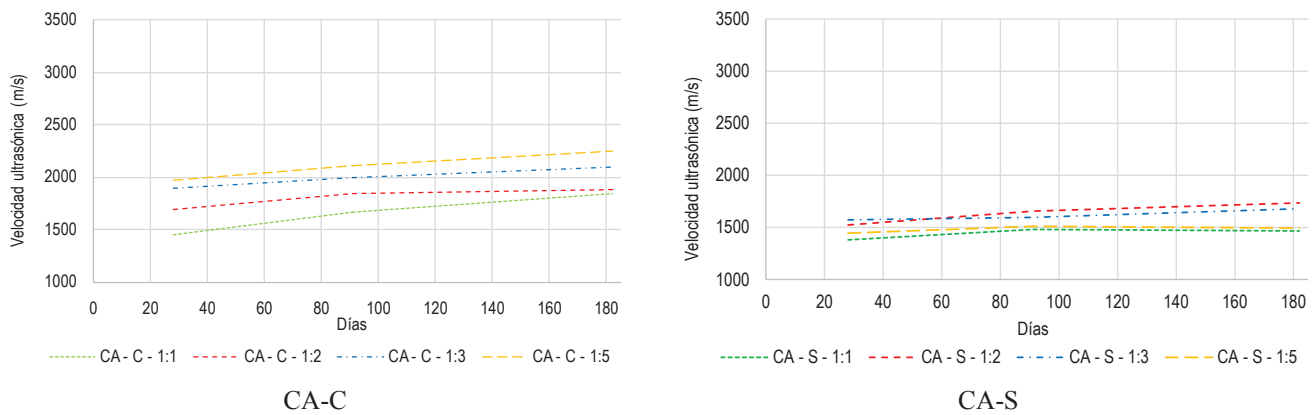


Figura 5. Velocidades ultrasónicas obtenidas en las muestras CA-C y CA-S

3.2.4 Índice penetrométrico

Los ensayos no destructivos de penetrometría se llevaron a cabo con un PNT-G [35]. El equipo dispone de una barrena de 4mm de diámetro, y se realizan orificios de profundidad máxima 5mm (orificio patrón). Los resultados alcanzados se recogen a través de las gráficas de la Figura 6.

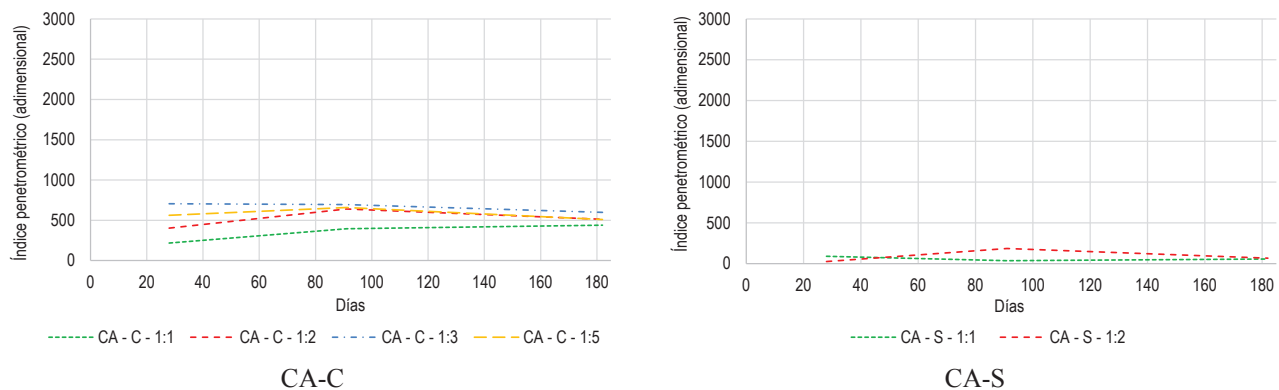


Figura 6. Índices de penetración obtenidos en los ensayos de penetrometría

3.3 Relaciones entre EDs y ENDs

3.3.1 Relación entre resistencia a compresión y velocidad ultrasónica

Una vez planteados los resultados de los ensayos, se llevan a cabo en el presente apartado las posibles correlaciones entre la resistencia a compresión y las velocidades ultrasónicas. En el estudio, los resultados se analizaron utilizando el método de los mínimos cuadrados de regresión. Las curvas de aproximación de ajuste estudiadas fueron: Lineal ($y = ax + b$), logarítmica ($y = a + \ln x$), exponencial ($y = ae^x$) y potencial ($y = ax^b$), determinándose las ecuaciones de aproximación y su coeficiente de correlación para cada una de las curvas obtenidas.

Como puede observarse en la Figura 7, las muestras (CA-C y CA-S) presentan una correlación lineal bastante marcada entre ambos parámetros (R_c y V_u). La V_u se incrementó con el aumento de R_c en todas las dosificaciones de conglomerante y árido. Asimismo, teniendo en cuenta todas las medias de los ensayos de R_c y los resultados obtenidos de V_u para cada una de las tipologías de muestras (CA-C y CA-S) para sus diferentes dosificaciones de conglomerante, se encontraron las siguientes ecuaciones generales (1) y (2) que relacionan estos dos parámetros (R_c y V_u), respectivamente:

$$R_{c(CA-C)} = 0.0026V_u - 3.3471 \quad (1)$$

$$R_{c(CA-S)} = 0.0023V_u - 2.7021 \quad (2)$$

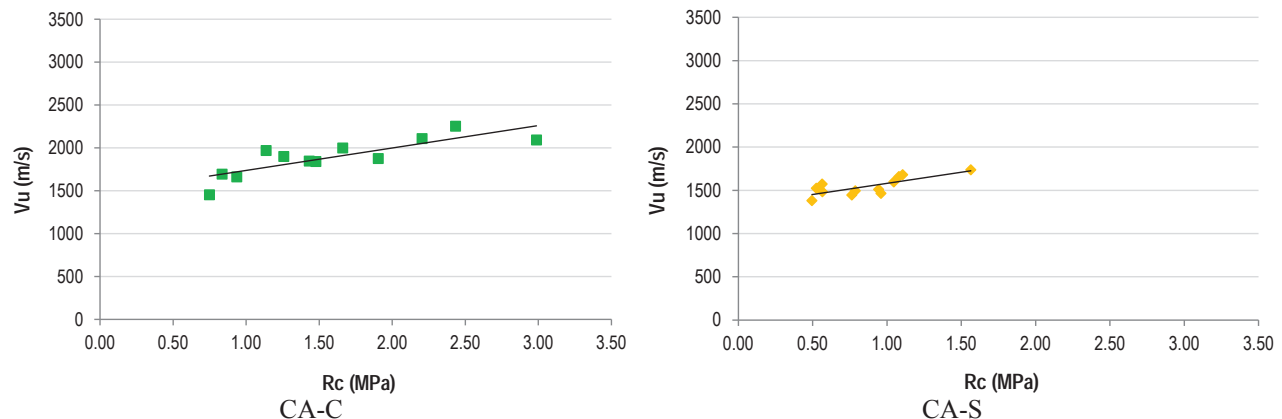


Figura 7. Correlación entre la resistencia a compresión (R_c) y la velocidad ultrasónica (V_u)

Los coeficientes de correlación (r) fueron 0.83 y 0.77 para las Eqs. (1) y (2), respectivamente. Como se muestra en las gráficas, los coeficientes en ambas ecuaciones fueron buenos, pero éstos no indican necesariamente la bondad de ajuste de las ecuaciones. Por lo tanto, la validación de las mismas se comprobó mediante las pruebas estadísticas t y F . El significado de los valores r puede ser determinado por la prueba de t , comparando el valor de t -calculado con el valor t -tabulado utilizando la hipótesis nula. La importancia de las regresiones se determinó por análisis de varianza (prueba F). En estas pruebas, se eligió un nivel de 95% de confianza. Es bien sabido que si los valores de t y F alcanzados son mayores que los valores t y F tabulados, se rechaza la hipótesis nula [41]. En este sentido, los valores de t y F obtenidos (4.640 y 21.53 para CA-C; 3.850 y 14.83 para CA-S) fueron mayores que los valores de t y F tabulados (2.228 y 4.96), lo que indica la validez de estas ecuaciones. Por consiguiente, estos modelos lineales pueden utilizarse de forma fiable para estimar valores de la resistencia a compresión, R_c , a partir de los datos de la velocidad ultrasónica.

3.3.2 Relación entre resistencia a compresión e índice penetrométrico

Se estableció una comparativa entre los resultados alcanzados en los ED a compresión y los valores de índice penetrométrico (IP), los cuales se aprecian en la Figura 8. Se incluye además en las gráficas la curva de ajuste de Gucci ($R_c = (IP + 22)/134$) [36], que plantea una relación de estos dos parámetros para morteros con resistencias a compresión inferiores a los 4MPa.

Es de señalar, que las muestras de mortero conformadas con cal aérea y arena silíceo (CA-S) presentaron una textura porosa. Ello trajo consigo, que al emplear el PNT-G con una barrena de 4mm y profundidad del agujero de 5mm, muchas de las lecturas recogidas durante la realización de los ensayos, para dosificaciones de 1:3 y 1:5, dieran valores de IP de 0. Por su parte, los morteros CA-C registraron valores más acordes con el incremento de la resistencia a compresión, aunque existe una gran variabilidad entre los resultados alcanzados, en línea con lo obtenido por otros autores [42].

Además, para el caso de los morteros con árido cálcico, los resultados obtenidos en la presente investigación presentaron un comportamiento bastante diferenciado de los valores de resistencia a compresión alcanzados a través de la correlación de Gucci. Como consecuencia, la hipótesis defendida por Gucci y Barsotti [36] en la que refieren que para morteros débiles (resistencia a la compresión menor de 4MPa), el tamaño del grano de la arena tiene poca influencia sobre la medición, a la luz de los resultados obtenidos, no sería del todo acertada, al menos para el empleo de morteros de cal aérea y áridos calizos.

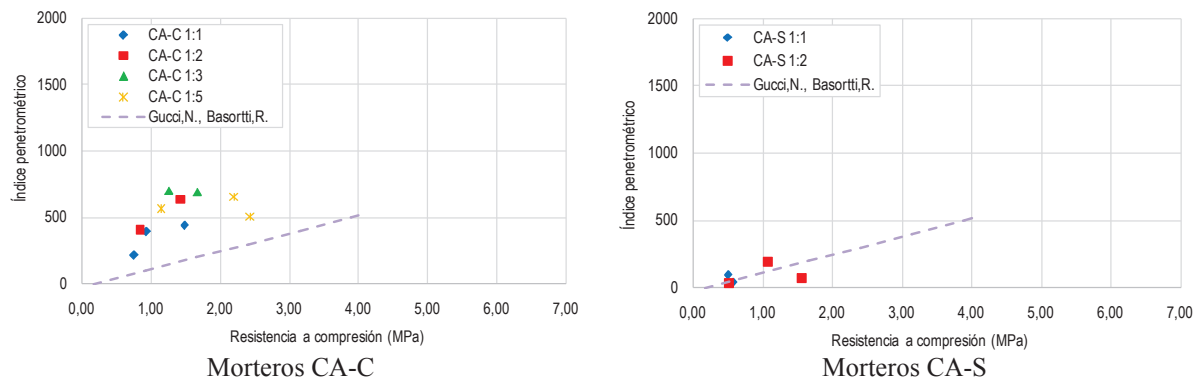


Figura 8. Correlación entre la resistencia a compresión (R_c) y el índice penetrométrico (IP)

4. CONCLUSIONES

Al comprobar las arenas utilizadas en el estudio dentro de varios usos granulométricos establecidos por normas antiguas de arenas recomendadas para morteros, resulta que la arena rodada empleada de origen silíceo, a pesar de ser una arena con una mala distribución granulométrica, se localiza dentro de la franja de uso granulométrico de la norma BS1200:1976, recomendando su empleo para morteros. Sin embargo, la arena triturada de origen cálcico, a pesar de ser un árido con una buena granulometría, no llega a cumplir ninguno de los usos plateados por la BS1200:1976, ni su posterior edición de 1984.

Como era de esperar, los morteros CA-C registraron incrementos de resistencia con el paso del tiempo. No obstante, destacar que los mayores valores de resistencias a flexión y compresión no fueron registrados por las relaciones de conglomerante:árido menores. Es decir, las dosificaciones 1:1 (1.48MPa) y 1:2 (1.90MPa) presentaron resistencias a compresión por debajo de las dosificaciones 1:3 (2.99MPa) y 1:5 (2.43MPa). El valor máximo para esta combinación de materiales, fue registrado para la dosificación 1:3 a los 182 días, a diferencia de los resultados alcanzados por Lanás et al. [3] en los que a mayor proporción de cal en la dosificación de mortero se alcanzaban resistencias superiores. No obstante, señalar que en dicho estudio la autora empleó cal CL90 en polvo, mientras que la utilizada en nuestro caso correspondió a la CL90-S en pasta.

Referente al avance de la carbonatación de los morteros CA-C, las dosificaciones 1:3 y 1:5 llegaron a alcanzar el 100% del volumen carbonatado para el período de análisis (182 días), obteniéndose gran parte de la resistencia del material. Por su parte, las muestras con dosificaciones 1:1 y 1:2, al presentar mayor contenido de conglomerante, requirieron mayor tiempo quedando aún por carbonatar aproximadamente $\frac{1}{4}$ de su área transversal en ambos casos. Ello puede ser consecuencia que a mayor presencia de áridos en la muestra, ésta es más porosa, lo cual facilita la entrada del CO₂ de la atmósfera.

Por su parte, las resistencias a flexión y compresión de los morteros CA-S no arrojaron un comportamiento lógico creciente o decreciente, al obtenerse las mayores resistencias por la dosificación 1:2 seguidas de la 1:3.

Los resultados de los ensayos de ultrasonido apuntan a que a mayor velocidad ultrasónica se alcanza mayor resistencia del material (reflejando una correlación netamente lineal). Puede apreciarse en el presente trabajo, como los resultados obtenidos de velocidades ultrasónicas se encuentran claramente asociados con el incremento de la resistencia a compresión. Asimismo señalar, que las mayores velocidades ultrasónicas se alcanzaron para los morteros elaborados con arena caliza. Adicionalmente, se proponen dos ecuaciones que permiten relacionar la velocidad ultrasónica y la resistencia del mortero a compresión, teniendo en cuenta la tipología de árido presente en la muestra (CA-C o CA-S). No obstante, es de señalar que estas ecuaciones necesitarían de una campaña experimental más intensa para poder establecer su idoneidad de forma más fundamentada.

El índice penetrométrico determinado en las muestras elaboradas con cales aéreas (CA-C y CA-S), no siguió un comportamiento análogo al mostrado por la resistencia mecánica. Ello puede asociarse tanto al nivel superficial de poros presente en estos tipos de morteros, como a la baja resistencia que poseen respecto a los morteros conformados con cal hidráulica. Igualmente, del análisis de las resistencias a compresión obtenidas experimentalmente y los valores de índice penetrométrico, no se detectó un ajuste a la curva planteada por Gucci para morteros con resistencias a compresión inferiores a los 4Mpa.

Finalmente, el desarrollo del presente estudio demuestra la variabilidad experimentada por determinadas propiedades de los morteros de cal, entre éstas su resistencia a compresión, circunstancia que influye en la adecuada elección de morteros de reparación compatibles con los existentes, uno de los factores a tener en cuenta en un proceso de intervención.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Valek, J., Bartos, P.J.M.. Influences affecting compressive strength of modern non-hydraulic lime mortars used in masonry conservation. In: C.A.BREBBIA, ed., Structural Studies, Repairs, and Maintenance of historical buildings. Advances in Architecture Series VII: 13, 571-580. (2001)
- [2] UNE-EN 459-1. Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. (2011)
- [3] Lanas, J., Alvarez-Galindo, J.I. Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. Cement and Concrete Research, 33 (11), 1867-1876. doi:10.1016/S0008-8846(03)00210-2. (2003)
- [4] Lanas, J., Pérez Bernal, J.L., Bello, M.A., Alvarez Galindo, J.I. Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. Cement and Concrete Research, 34 (12), 2191-2201. doi:10.1016/j.cemconres.2004.02.005. (2004)
- [5] Lanas, J. , Sirera, R., Alvarez, J.I. Study of the mechanical behavior of masonry repair lime-based mortars cured and exposed under different conditions. Cement and Concrete Research 36. 961-970. (2006)
- [6] Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., Kilikoglou, V. Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. Cement and Concrete Research, 35 (8), 1577-1586. (2005)

- [7] Rampazzi, L., Pozzi, A., Sansonetti, A., Toniolo, L., Giussani, B. A chemometric approach to the characterisation of historical mortars. *Cement and Concrete Research*, 36 (6), 1108-1114. (2006)
- [8] Schafer, J., Hilsdorf, H.K. Ancient and new lime mortars - the correlation between their composition structure and properties. In: M.J. THIEL ed., *Conservation of Stone and other Materials*, London: E. & F.N. Spon, 605-612. (1993)
- [9] Winnefeld, F., Böttger, K.G. How clayey fines in aggregates influence the properties of lime mortars. *Materials and Structures*, 39 (4), 433-443. (2006). doi:10.1617/s11527-005-9023-6.
- [10] Lombillo I., Thomas C., Villegas L., Fernández-Álvarez J.P., Norambuena-Contreras J. "Mechanical characterization of rubble stone masonry walls using non and minor destructive tests". *Construction & Building Materials* 43 (2013) 266-277.
- [11] Martínez J.L., Martín-Caro J.A., León J. Comportamiento mecánico de la obra de fábrica. Monografías sobre el análisis estructural de construcciones históricas de fábrica. Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, 91 páginas. (2001).
- [12] Tharmaratnam, K., & Tan, B. S. Attenuation of ultrasonic pulse in cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 20 (3), 335-345. (1990).
- [13] Ercikdi, B., Yilmaz, T., & Külekci, G. Strength and ultrasonic properties of cemented paste backfill. *Ultrasonics*, 54 (1), 195-204. (2014).
- [14] Maierhofer, C., Voigt, T., Sun, Z., & Shah, S. P. Comparison of ultrasonic wave reflection method and maturity method in evaluating early-age compressive strength of mortar. *Cement and Concrete Composites*, 28 (4), 307-316. (2006).
- [15] Lawrence, R.M.H. A critical review of techniques used for the assessment of carbonation in lime mortars. *Proceedings of the 2005 International Building Lime Symposium*. Florida. Washington DC: National Lime Association, 9-11. (2005).
- [16] Elert, K., Rodriguez-Navarro, C., Pardo, E.S., Hansen, E., Cazalla, O. Lime Mortars for the Conservation of Historic Buildings. *Studies in Conservation*, 47 (1), 62-75. (2002).
- [17] Rodríguez Navarro, C., Ruiz Agudo, E., Ortega-Huertas, M., Hansen, E. Nanostructure and irreversible colloidal behavior of $\text{Ca}(\text{OH})_2$: implications in cultural heritage conservation. *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*, 21 (24), 10948-57. (2005). doi:10.1021/la051338f.
- [18] Gucci, N., Sassu, M., Rossi, P. P., Pulcini, A. Comparison of non-destructive in situ techniques for vertical load strength assessment in masonry walls, 349-356. (1995). doi:10.2495/STR950392.
- [19] Benedetti, A., Mangoni, E. NDT evaluation of ancient masonry properties by means of splitting tests on cores with diametric mortar layer. *RILEM Symposium on On Site Assessment of Concrete, Masonry and Timber Structures - SACoMaTiS 2008*. RILEM Publications SARL, 431-440. (2008). ISBN: 978-2-35158-075-2.
- [20] Binda, L. RILEM Recommendation MDT. D.1 - Indirect determination of the surface strength of unweathered hydraulic cement mortar by the drill energy method. *Materials and Structures*. Vol. 37, 485-487. (2004)
- [21] Gucci, N., Cei, Ch., De Falco, A., Sassu, M. Un'esperienza applicativa sull'uso del penetrometro PNT-G nelle costruzioni in muratura: l'edificio TREMA per caratterizzazioni sismiche nel laboratorio ENEA - Casaccia. *UNITÀ DI RICERCA. PISA*. (2006)
- [22] UNE-EN 13139. Áridos para morteros. AENOR. (2003)
- [23] UNE-EN 13139/AC. Áridos para morteros. AENOR. (2004)
- [24] Lawrence, R., A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars. Thesis (Doctor of Philosophy (PhD)). University of Bath. (2006)
- [25] UNE-EN 196-1. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas. AENOR. (2005)
- [26] UNE-EN 1015-3. Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). (2000)
- [27] UNE-EN 459-2. Cales para construcción. Parte 2: Métodos de ensayo. AENOR. (1995)

- [28] UNE-EN 1015-11. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido. AENOR. (2007)
- [29] ASTM C 702. Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. (1998)
- [30] UNE-EN 993 - 1. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1. Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. AENOR. (1996)
- [31] UNE-EN 933-2. Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. AENOR. (1996)
- [32] UNE-EN 1015-11. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido. AENOR. (2007).
- [33] UNE-EN 12504-4. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos. AENOR. (2006).
- [34] UNE 112011. Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio. AENOR. (2011)
- [35] Ditta PIZZI FRANCO. Penetrometro PNT-G.
http://www.pizzi-instruments.it/modules/Prodotti/cataloghi/89_ca_PNT-G_0801.pdf (12/02/2014)
- [36] Gucci, N., Barsotti, R. A non-destructive technique for the determination of mortar load capacity in situ. *Materials and Structures*, 28 (5), 276-283. (1995). doi:10.1007/BF02473262.
- [37] Venuat, M., Papadakis, M. Control y ensayos cementos mortero. (1975). ISBN: 84-314-0029-3.
- [38] Henry, A., Donald Stewart, J. Mortars, Plasters and Renders. Practical building conservation series. English Heritage. Ashgate Publishing, Ltd. (2011). ISBN: 0754645592, 9780754645597.
- [39] West, G., Fookes, P.G., Lay, J., Sims, I., Smith, M.R., Collis, L. Aggregates: Sand, Gravel and Crushed Rock Aggregates for Construction Purposes (Geological Society Engineering Geology Special Pub. No.17) (p. 360). Geological Society of London. (2001).
- [40] Stefanidou, M., & Papayianni, I. The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, 27 (9-10), 914-919. (2005). doi:10.1016/j.cemconcomp.2005.05.001
- [41] Levine, D.M., Ramsey, P.P., Smidt, R.K.. *Applied Statistics for Engineers and Scientists*, first ed., Prentice-Hall Publishing, New Jersey, America. (2011)
- [42] Benedetti, A.; Pelà, L. Experimental characterization of mortar by testing on small specimens. A: IB2MaC: International Brick and Block Masonry Conference. 15th IB2MaC: developing the future of masonry. Florianópolis: IB2MaC, 1-10. (2012).