

V Jornada "Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio"

PREPARACIÓN Y ENSAYOS DE MORTEROS DE CAL DE NUEVA FACTURA PARA SU EMPLEO EN RESTAURACIÓN DEL PATRIMONIO

Lanas, J., Alvarez, J.I.

Departamento de Química y Edafología, Facultad de Ciencias, Universidad de Navarra, c/Irunlarrea s/n, 31080 Pamplona – España – 00 34 948 425600 – jalvarez@unav.es

RESUMEN

Dada la similitud de propiedades, a la hora de la restauración de obras del Patrimonio Edificado, es sensata la utilización del mortero de cal más afín al de la propia construcción. La pérdida de conocimientos, debida al desuso, del mortero de cal ha impulsado este trabajo, en el que se analizan las modificaciones de composición durante el fraguado y la evolución de propiedades fisicoquímicas y mecánicas en morteros de nueva factura preparados con cal aérea. Se ha analizado en cada caso la influencia de diversos factores, como son el tiempo de curado, la dosificación conglomerante-árido, las características del árido y la porosidad del mortero. En general, los áridos calizos ofrecieron mejores resultados que los silíceos, aunque el comportamiento es fuertemente dependiente de su granulometría. La porosidad es mayor a mayores cantidades de conglomerante, lo que, en el caso de la cal, permite su mejor carbonatación al favorecer la difusión del CO₂ en el mortero. La dosificación más adecuada de las testadas fue la 1:1, y se realizaron ensayos de durabilidad con esta dosificación para morteros de cal aérea e hidráulica: estos últimos resultaron ser mejores materiales para soportar alteraciones climáticas y por contaminación por SO₂.

1. ANTECEDENTES

A lo largo del último siglo el concepto de Patrimonio ha experimentado una notable evolución en la que, en líneas generales, se ha pasado de una valoración exclusivamente artística o histórica de los bienes patrimoniales, a una visión mucho más amplia en la que se recogen otros aspectos igualmente importantes para nuestra sociedad, como son los que se refieren a los valores antropológicos, etnológicos, científico-tecnológicos, etc., dando lugar a lo que hoy conocemos por "Patrimonio Cultural" (Convención sobre la protección del Patrimonio Cultural y Natural de la UNESCO).

La restauración/conservación del Patrimonio Arquitectónico, dentro del legado del Patrimonio Histórico español ha adquirido una importancia indudable en el contexto de la sociedad española en las últimas décadas. De acuerdo a los objetivos y criterios de la Convención de UNESCO de 1972, el objetivo primordial de la Defensa del Patrimonio Cultural es conservar y entregar a las generaciones siguientes en el mejor, más estable y auténtico estado posible, los testimonios materiales de la cultura que han llegado hasta nuestro tiempo, sin impedir o condicionar negativamente su lectura o interpretación, sin

añadidos o supresiones que distorsionen los significados culturales de la herencia recibida y de la que sólo somos administradores responsables.

También merecen una reflexión las ventajas, no sólo desde los puntos de vista de conservación del legado histórico, cuya importancia e interés ya han quedado expuestos antes, sino desde un punto de vista económico, para todas las instituciones (Gobierno Central, Gobiernos Autonómicos, etc.) encargadas de la subvención de las obras de restauración, pues en no pocos casos ciertas obras emprendidas con morteros de cemento Portland tuvieron consecuencias nefastas en pocos años que obligaron a reinvertir cantidades mayores en un nuevo proceso de restauración e incluso de rehabilitación de los daños ocasionados por tan inapropiados trabajos previos. Parece que el empleo de materiales adecuados para la restauración, debidamente conocidas sus propiedades y los mecanismos de cambio en sus procesos fisicoquímicos, además de la afectación global al conjunto de la obra - objetivos perseguidos en este trabajo de investigación - resultan, más bien, una necesidad imperiosa.

2. EL MORTERO DE CEMENTO: PROBLEMÁTICA DE SU EMPLEO

El masivo uso del cemento Portland para restauración en este tipo de construcciones se ha debido principalmente al relativamente limitado conocimiento que se tiene sobre las distintas propiedades y acciones de los morteros de cal. El cemento ha centrado una parte muy importante de las investigaciones que sobre materiales de construcción ha realizado la comunidad científica. Y, además, se convirtió durante mucho tiempo en el material de referencia para ser usado en la práctica totalidad de los procesos constructivos, incluyendo las intervenciones para la restauración de obras monumentales. De hecho, existen numerosos y recientes casos de intervenciones en las que se ha utilizado el cemento, provocando cuantiosos daños a la construcción antigua debido a la incompatibilidad existente entre los materiales antiguos y el cemento empleado [1-3].

Son varios los factores que han contribuido a la infrautilización de los morteros de cal a favor de los de cemento: i) el gran empleo del cemento Portland en la industria de la construcción para todo tipo de obras, lo cual ha hecho que sea mucho más fácil adquirir un cemento, sea del tipo que sea, que una determinada cal; ii) las bajas resistencias atribuidas a los morteros de cal; iii) el largo período que requiere este tipo de morteros para endurecer; y iv) la ausencia de estudios rigurosos sobre sus características y propiedades.

Frente a estas teóricas ventajas, el cemento, debido a la incompatibilidad anteriormente mencionada, presenta muchas más desventajas en su utilización para trabajos de restauración/rehabilitación, convirtiéndolo en un material muy poco aconsejable debido a: i) su alto contenido en sales: el cemento es un producto mucho más agresivo que la cal y puede acabar atacando y afectando de forma negativa a la piedra o los distintos mampuestos antiguos, que en numerosos casos suelen estar bastante alterados y/o deteriorados por el paso del tiempo; ii) la expansión que sufren los morteros de cemento, ya que su utilización puede deteriorar más la obra que se intenta restaurar que lo que lo estaba al inicio de dicha restauración; iii) las altas resistencias que puede ofrecer: este hecho plantea serios inconvenientes al aportar demasiada rigidez a las mamposterías antiguas, evitando y restringiendo la movilidad y deformabilidad característica de estas fábricas, lo que puede acarrear fisuraciones que ponen en riesgo la estabilidad estructural [4].

3. VENTAJAS DEL MORTERO DE CAL

Recientemente, se ha destacado en la literatura especializada la necesidad de utilizar morteros de cal en procesos de restauración de obras monumentales de interés histórico-artístico [1]. De hecho, centros internacionales como ICOMOS o ICCROM dedicados a la restauración del Patrimonio, han recomendado el uso de estos morteros de restauración o de rejuntado (“*repair mortars*”) basados fundamentalmente en la cal debido a su similitud en composición y propiedades con los originales [5-6].

Desde finales del siglo XX viene siendo cada vez menos habitual el empleo de los morteros de cemento en restauración de estructuras antiguas. La sustitución de este tipo de morteros en favor del, cada vez mayor, empleo del mortero de cal puede justificarse y avalarse con varios argumentos. Numerosos de estos argumentos coinciden con algunos de los problemas asociados a la utilización del cemento Portland clásico:

- i) La cantidad de sales solubles aportada por el mortero de cal es mucho menor que la del cemento Portland. Esto evita daños importantes en el sistema conjunto piedra/mortero originados por ciclos de cristalización y/o hidratación [1].
- ii) Los morteros de cal son más compatibles con los métodos de edificación y materiales antiguos desde los puntos de vista químico, estructural y mecánico [7].
- iii) Unido a esto, y ya referido en el apartado anterior, se encontraría la compatibilidad tecnológica con los materiales antiguos, mayor en los morteros de cal que en los basados en cemento (con elevadas proporciones de conglomerante y de resistencia a la compresión) [8].
- iv) Los morteros de rejuntado de cal son capaces de mantener durante más tiempo la estabilidad estructural de un edificio, pues en el caso de que se originen fracturas en el mortero, éstas pueden subsanarse mediante un proceso de auto-sellado (relacionado con ciclos de disolución/reprecipitación de la calcita) [1,8].

Junto a estos argumentos, y en favor del uso de morteros de rejuntado de cal, pueden esgrimirse razones históricas, que sostendrían como principio la mínima intervención sobre obras patrimoniales (conservación preventiva) o, en caso de necesidad, la utilización de materiales y técnicas de construcción análogos a los empleados en la edificación original, buscando siempre la salvaguarda de los valores intrínsecos y extrínsecos propios de la obra integrante del Patrimonio Histórico [6].

Por razones semejantes, cabría hablar asimismo de ventajas estéticas en el uso de este tipo de morteros en procesos de restauración/rehabilitación.

4. REQUISITOS

Prácticamente existen normas nacionales, europeas o internacionales para la totalidad de materiales constructivos. Dichas normas detallan desde la definición y clasificación de los distintos materiales hasta los requisitos que deben cumplir, pasando por métodos de análisis y/o ensayos de los mismos, etc. Para el caso concreto de los morteros (y hormigones)

existen numerosas normas (normas UNE comité 83) pero prácticamente todas ellas están enfocadas a los morteros de cemento pues son los más utilizados en la construcción actual [9-11]. En cuanto a las normas referentes a los conglomerantes (normas UNE comité 80), al igual que las de los morteros, están prácticamente enfocadas en su totalidad al cemento, con pequeñas excepciones de normas que únicamente se refieren a la cal [12-13] o normas de cementos que son aplicables a cales [14-17].

Pese a la normativa existente y a los requisitos que quedan detallados en dichas normas, existen otros requisitos, muchos de ellos de sentido común, y que debe cumplir toda unidad de construcción. Centrará este análisis la restauración de mampostados, dado que la fábrica de sillería, al plastificar el conglomerante, por el pequeño espesor de las juntas, ofrece menos problemas mecánicos relativos al mortero, y comparte otros aspectos con las mamposterías. Algunas de las propiedades físicas y mecánicas de las unidades de mampostería que son relevantes para su uso en la construcción de fábricas son: el color, la textura superficial, el peso, la absorción y estructura porosa, la conductividad térmica, los cambios térmicos y de humedad, la resistencia al fuego y las resistencias a tensión y compresión [4].

Respecto a las propiedades mecánicas de las unidades de mampostería, la más importante es la resistencia a compresión, la cual, además de tener una relevancia directa sobre la resistencia de la fábrica, sirve como un indicativo general de las características de dichas unidades. El mortero es una de estas unidades de mampostería y aunque sólo representa el 7% del volumen total de la mampostería, su influencia sobre la fábrica final es mucho mayor que lo que esta proporción indica. El mortero debe cumplir ciertas propiedades antes del fraguado: en particular, es de especial importancia su trabajabilidad. El mortero endurecido tiene que ser suficientemente resistente y debe desarrollar una adecuada adhesión a las demás unidades de mampostería. También debe endurecer sin sufrir una excesiva retracción que podría reducir la resistencia de la mampostería por penetración del agua de lluvia o incluso causando el agrietamiento de las unidades. También debería ser capaz de acomodar sin agrietarse ciertos grados del movimiento. Los movimientos como resultado de la aplicación de una tensión o carga, cambios de humedad o temperatura, reacciones químicas, etc. se dan en todos los materiales de la mampostería. Estos efectos, así como los movimientos debidos al asentamiento de la fábrica, pueden conducir a agrietamientos del muro, si no son absorbidos en cierto grado. Los movimientos debidos a cargas producidas por tensiones o sobrepesos en la mampostería, los cuales son significantes en construcciones con diversos pisos, pueden darse, o bien inmediatamente a la aplicación de la carga (deformación elástica) o tras un período de tiempo (deslizamiento).

Cuanto más resistente es el mortero menos capaz es de acomodar los movimientos por lo que no es admisible usar mezclas más resistentes que lo que es necesario para satisfacer los requerimientos estructurales. Una resistencia a compresión de 2-5 N/mm² es adecuada para la mayoría de las estructuras [4].

Como ya se ha dicho anteriormente, uno de los requisitos que debe cumplir un mortero cuando está en estado fresco es el que forme una mezcla trabajable, que tenga una consistencia suave y plástica, que pueda ser fácilmente extendido con ayuda de una paleta y se adhiera fácilmente a las superficies verticales. El empleo de áridos finos, al igual que el empleo de cal como conglomerante, realza la trabajabilidad, así como los agentes incluidores de aire (aditivos) y el empleo de cantidades adecuadas de agua de amasado. La cal suministra plasticidad y capacidad de retención de agua en la mezcla mientras los aditivos (plastificantes) proporcionan resistencias a heladicidad.

5. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MORTEROS DE RESTAURACIÓN DE CAL CÁLCICA

5.1. Objetivos

Los objetivos de este trabajo han sido, en ensayos a largo plazo, analizar los factores que afectan al comportamiento mecánico de morteros de cal cálcica aérea:

- i) Tiempo de curado: evaluándose las características y propiedades de los materiales preparados a 3, 7, 28, 91, 182 y 365 días.
- ii) Dosificación conglomerante:árido (B/Ag, binder:aggregate): a través del estudio de mezclas (1:1), (1:2), (1:3), (1:4) y (1:5) en volumen.
- iii) Características del árido (naturaleza, forma y distribución del tamaño de partícula): mediante la preparación y estudio de probetas de ensayo con cuatro áridos distintos, los silico-calcáreos (Ag-1 y Ag-2) y los calizos (Ag-3 y Ag-4) (Tabla 1 y Figura 1) de diferentes formas y granulometrías.

Tabla 1. Resultados de difracción de rayos X en áridos.

| ÁRIDOS | Calcita (CaCO ₃) ICDD 05-0586 | α-Quartz (SiO ₂) ICDD 85-798 |
|--------|---|--|
| Ag-1 | * c | ** b |
| Ag-2 | * | ** |
| Ag-3 | *** a | T ^d |
| Ag-4 | *** | T |

^a >90% ^b 50-90% ^c 10-50% ^d Traces (<5%)

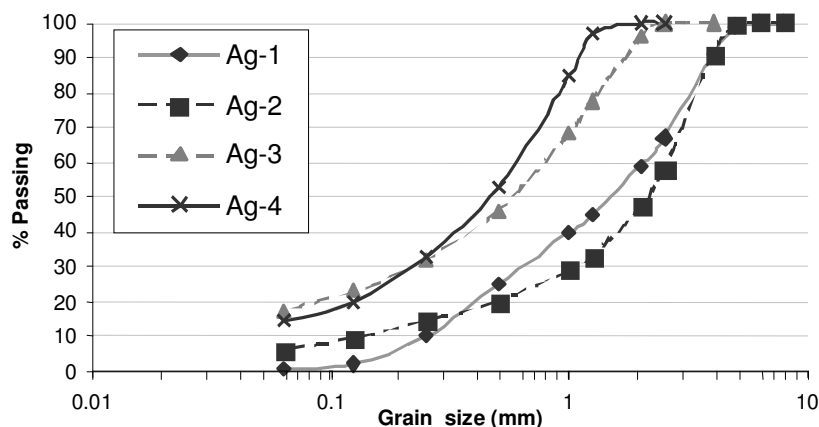


Figura 1. Distribución del tamaño de grano en áridos.

5.2. Cales y proporciones empleadas

En el desarrollo de este trabajo se han utilizado dos calas aéreas, Ecobat® y Estavol® (calas A y B respectivamente) (Tablas 2 y 3), así como los áridos definidos en los objetivos, cuyas características quedan recogidas (Fig. 1 y Tabla 1), en las dosificaciones descritas cuyas equivalencias en peso se resumen en la Tabla 4.

Tabla 2. Análisis de los componentes de las calas aéreas cálcicas.

| Cal | I.L. (%) | SiO ₂ (%) | CaO (%) | MgO (%) | R ₂ O ₃ (%) | SO ₃ (%) | Na ₂ O (%) | K ₂ O (%) |
|-----------------------------|-------------|-------------------------|------------|------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Cal A (Ecobat®) | 25.25 | 1.03 | 68.53 | 3.29 | 0.89 | 1.37 | 0.09 | 0.05 |
| Cal B (Estavol®) | 25.46 | 0.71 | 68.26 | 3.55 | 0.55 | 0.96 | 0.07 | 0.04 |

Tabla 3. Resultados de difracción de rayos X en calas.

| Cal | Portlandita (Ca(OH) ₂) ICDD 44- 1481 | Calcita (CaCO ₃) ICDD 05- 0586 |
|-------|---|---|
| Cal A | *** ^a | S ^b |
| Cal B | *** | S |

^a >90%
^b (5-10%)

Tabla 4. Equivalencias en las proporciones volumen/peso

| Proporción en volumen | Material | Volumen (L) | Peso (g) | Proporción en peso |
|-----------------------|----------|----------------|-------------|--------------------|
| 1:1 | Cal | 2.00 | 800 | 1:3.75 |
| | Árido | 2.00 | 3000 | |
| 1:2 | Cal | 1.33 | 533.33 | 1:7.5 |
| | Árido | 2.67 | 4000 | |
| 1:3 | Cal | 1.00 | 400 | 1:11.25 |
| | Árido | 3.00 | 4500 | |
| 1:4 | Cal | 0.80 | 320 | 1:15 |
| | Árido | 3.20 | 4800 | |
| 1:5 | Cal | 0.67 | 266.67 | 1:18.75 |
| | Árido | 3.33 | 5000 | |

5.3. Influencia del tiempo de curado

Se conoce que los morteros calizos endurecen a través de dos mecanismos: a edades tempranas se pierde el exceso de agua del material dándose el fenómeno de retracción del mismo. Casi de manera simultánea, comienza el proceso de carbonatación de portlandita hasta calcita. Este proceso puede involucrar varios años hasta alcanzar la total carbonatación del mortero [18].

Los resultados muestran que, tras 1 año de curado, cierta cantidad de portlandita permanece sin carbonatar en todas las probetas ensayadas. Igualmente se ha determinado un importante incremento de las resistencias a compresión y a flexión entre los 28 y 365 días de curado, independientemente del árido y de la dosificación del mortero para morteros de cal A (Fig. 2). Este incremento ha sido especialmente relevante para las dosificaciones elevadas de conglomerante (1:1) y (1:2), y este hecho se ha relacionado con el contenido en Ca(OH)_2 de los materiales, susceptible de carbonatar, aumentando sus resistencias mecánicas.

Se ha establecido que estos morteros precisan períodos largos de tiempo para exhibir prestaciones mecánicas de interés. Esto motivó la inclusión, en los ensayos con probetas de cal B, de un día de ensayo a medio plazo (182 días) (Figura 3), con el fin de conocer la evolución de los morteros. En los resultados puede apreciarse un aumento muy destacado de las resistencias entre 182 y 365 días para las dosificaciones (1:1), mientras que se advierte una ligera disminución para aquellas (1:2) a (1:5). Se ha postulado como hipótesis que la presencia de cierta cantidad de portlandita no carbonatada contribuiría favorablemente a las resistencias mecánicas, a través de su cristalización, que ocurre con una disminución de la porosidad del material [19].

Las edades tempranas de evaluación no ofrecen resultados concluyentes al estar fuertemente influidas por el contenido de agua remanente. En todo caso, el grado de carbonatación de los morteros a 28 días es insuficiente.

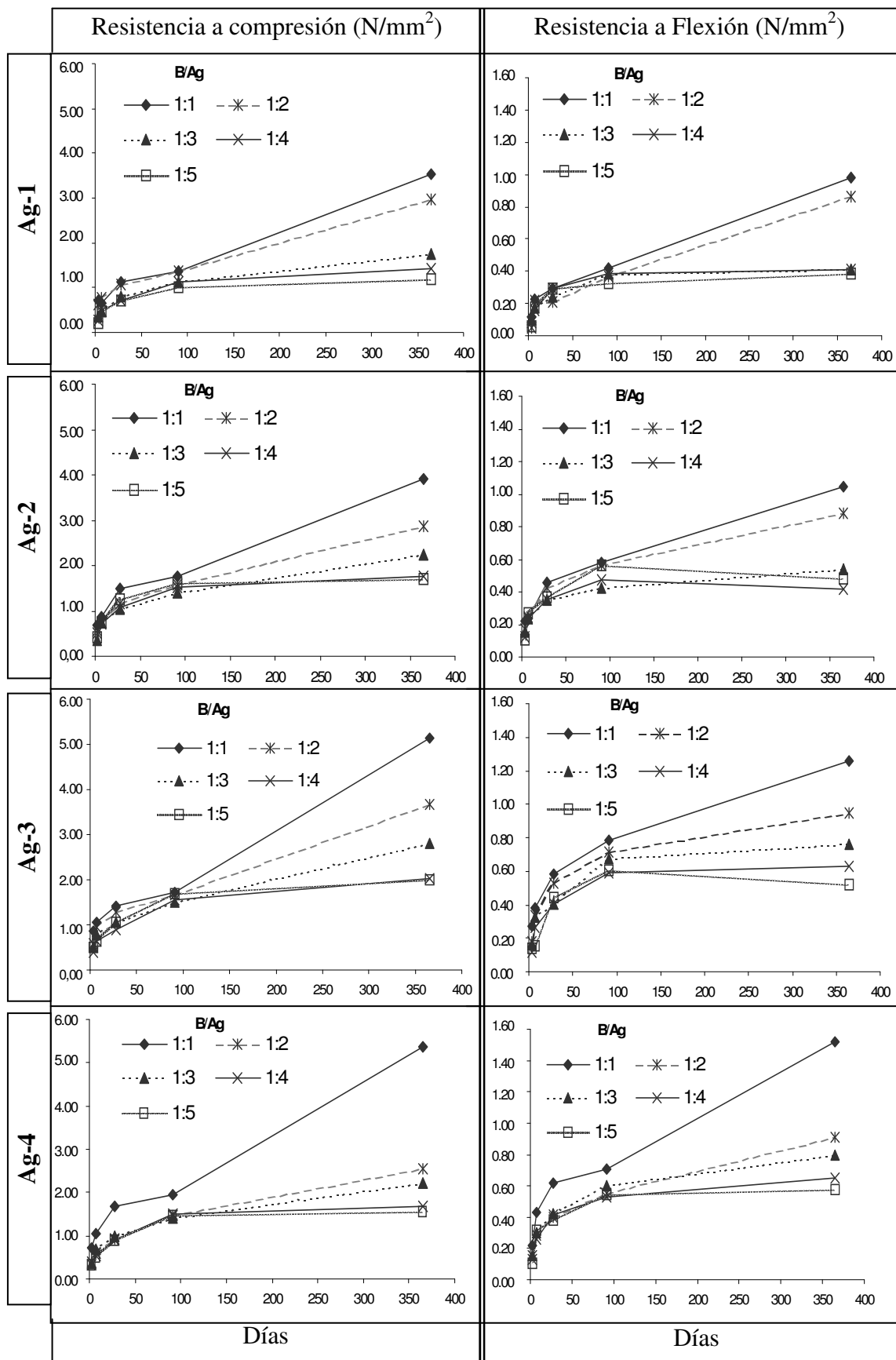


Figura 2. Resistencias para los morteros de cal A con distintos áridos.

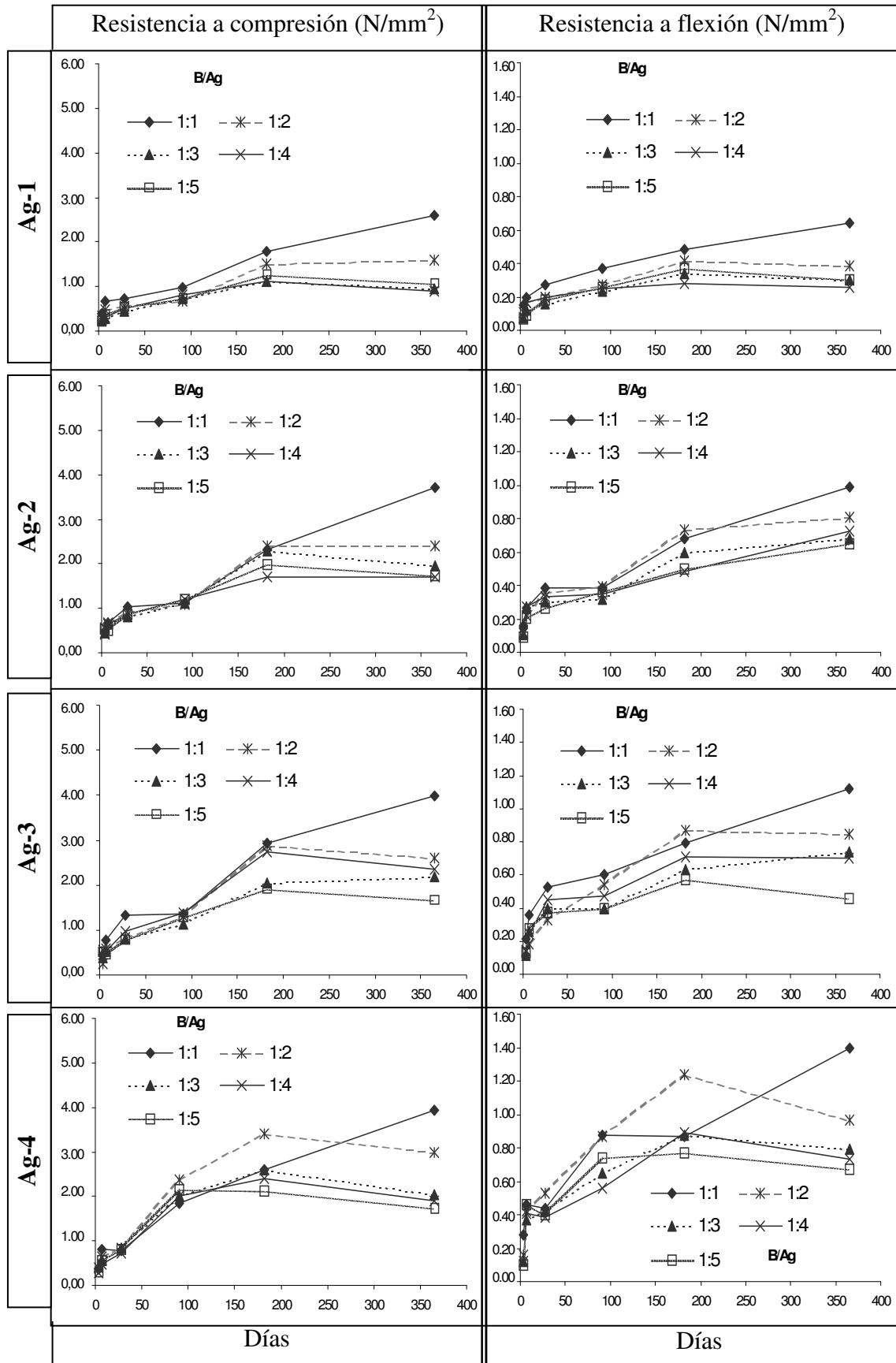


Figura 3. Resistencias para los morteros de cal B con distintos áridos.

5.4. Influencia de la proporción conglomerante: árido (B/Ag)

Ya se ha señalado que la dosificación (1:1) presentó las mejores prestaciones mecánicas. Un descenso de la proporción de conglomerante ha supuesto, en general, una disminución de las resistencias. Esos hechos contradicen, en parte, referencias anteriores que presentaban las dosificaciones (1:3) como las más adecuadas, sin riesgo de fisuras por retracción [20-22]. No se han advertido fisuras macro ni microscópicas en las probetas de dosificación (1:1).

La manifestación de mejores propiedades mecánicas a mayor cantidad de conglomerante coincide con los estudios sobre morteros de cemento [23]. Sin embargo, mientras que en éstos pueden relacionarse los incrementos de resistencia con la disminución de porosidad, en los morteros de cal aérea sucede lo contrario, un aumento de la porosidad a mayor dosificación de conglomerante. No obstante, se ha establecido un límite para la dosificación de cal en (2:1) en volumen (Fig. 4). Más allá de esta cantidad se ha apreciado una brusca disminución de la resistencia a compresión y fisuraciones en el material, relacionadas con el incremento de la porosidad y la ausencia de árido. Esto muestra concordancia con trabajos previos que indican la imprescindible presencia del árido para garantizar un trabajo mecánico conjunto [24]. De lo contrario, una fracción de cal actuará como relleno (filler) en lugar de como conglomerante.

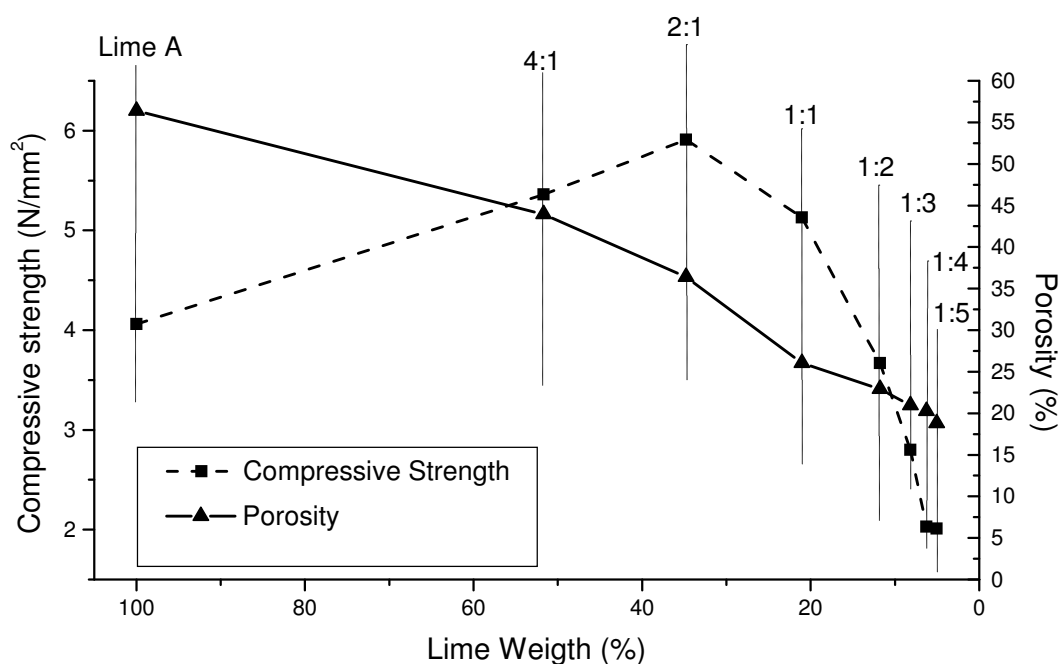


Figura 4. Porosidad y resistencia a compresión vs. porcentaje de cal en morteros de cal A con el árido Ag-3 tras 365 días de curado. Las proporciones cal: árido (B/Ag) se expresan sobre los puntos.

5.5. Influencia de las características del árido

Se ha determinado que la distribución granulométrica del árido es la característica más relevante a efectos de propiedades mecánicas. En concreto, los áridos sin fracciones de elevadas dimensiones (Ag-3 y Ag-4) ofrecieron el mejor comportamiento. Este hecho ya ha sido mencionado en trabajos previos [3,25], así como la influencia de la naturaleza del árido. Los áridos calizos han generado las mayores resistencias, y este hecho, además de por su mejor granulometría, se ha justificado por:

- i) la ausencia de discontinuidades árido-matriz conglomerante en las interfases [26],
- ii) el crecimiento sintaxial durante la formación de la calcita a través de puntos de nucleación suministrados por el árido (de idéntica naturaleza), que aumentan la resistencia mecánica reforzando la interfase [18,27].

Finalmente, la forma de los granos del árido ha sido también considerada, observándose cómo los áridos con formas angulares (procedentes de machaqueo) han permitido obtener estructuras compactas con mejores resistencias, frente a aquellas con formas redondeadas (cantos rodados) [18].

5.6. Influencia de la porosidad

Se ha mencionado que los morteros con mayor contenido en cal aérea muestran mayores valores de porosidad. Sus mejores prestaciones mecánicas pueden estar relacionadas con los siguientes hechos:

- i) obtención de una estructura más continua, con menor número de interfases árido-conglomerante;
- ii) incremento de la porosidad con el mayor contenido en cal, que conduce a dos comportamientos opuestos en lo que respecta a la resistencia mecánica:
 - un incremento de huecos conlleva a una reducción de resistencias, y
 - un incremento en la tasa de carbonatación mejorará las resistencias [28-29].

Ambos factores presentan el límite de la dosificación (2:1), a partir de la cual el exceso en el número de huecos origina una disminución drástica de las resistencias. Mediante porosimetría de intrusión de mercurio se ha establecido (Fig. 5) que los morteros de cal aérea han mostrado poros de tamaño medio y grande (0,3-100 μm), estableciéndose también diferentes distribuciones de tamaño de poro entre áridos de distinta naturaleza.

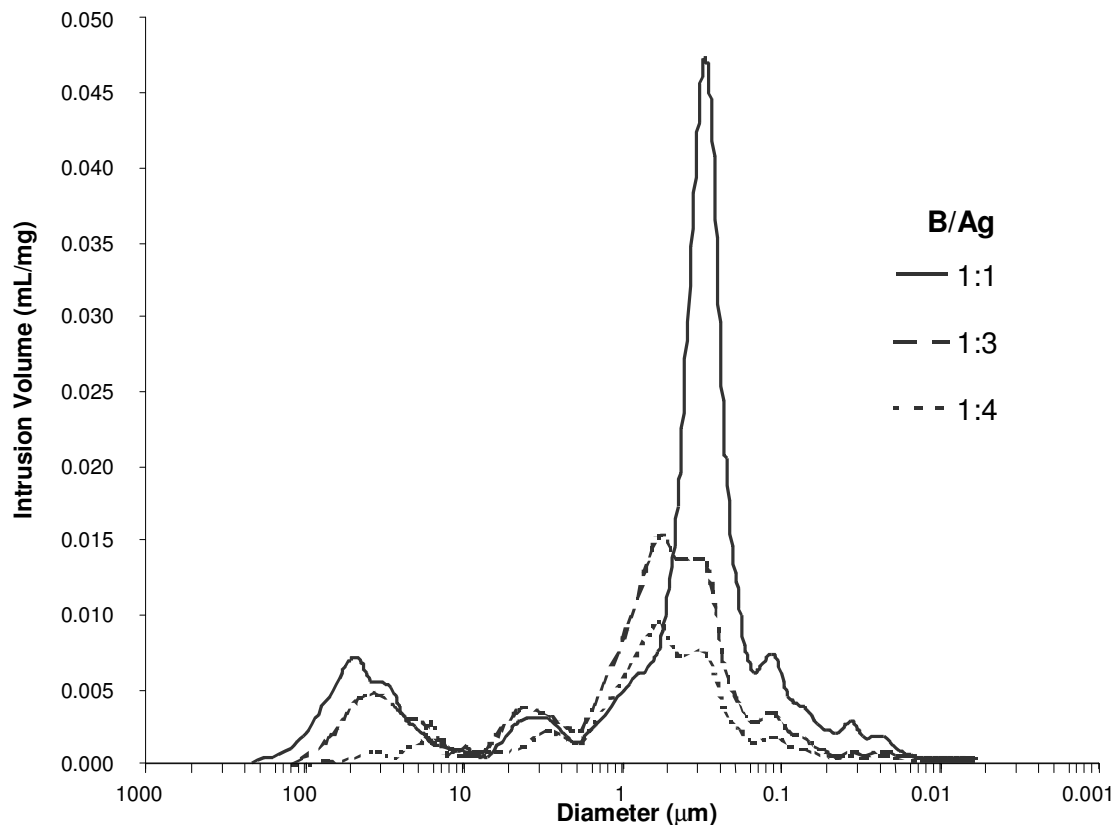


Figura 5. Distribución del tamaño de poro (diámetro del mismo) en la cal B con el árido Ag-2 en morteros ensayados tras 365 días de curado.

6. CONCLUSIONES

En función del tiempo de curado, se advierte un incremento entre 28 y 365 días de más de dos veces en el valor de la resistencia a compresión. El período para mostrar la máxima resistencia depende de la dosificación, incluso morteros con escasa cantidad de cal muestran un ligero descenso en las resistencias cuando el tiempo de curado es elevado.

La mayor cantidad de cal en la mezcla supone un aumento de resistencia, con un límite establecido en proporciones más altas que 2:1 cal/árido en volumen, correlacionado con el aumento en los poros de mayor tamaño en el material.

Se ha comprobado la notable influencia en estos morteros de las características del árido. Son mejores los áridos de formas anfractuosas, por su mejor compactación. También los áridos calizos son mejores, dado que pueden producirse fenómenos de crecimiento sintaxial de la calcita que refuerzan la interfase.

Las resistencias de estos materiales son más que suficientes para emprender procesos de restauración: únicamente deben planificarse los trabajos a tiempos más largos para permitir a los materiales ofrecer sus prestaciones mecánicas.

7. REFERENCIAS

- [1] Rodríguez-Navarro, C., Hansen, E., Ginell, W.S., Calcium hydroxide cristal evolution upon aging of lime putty, *J. Am. Cera. Soc.* 81 (11) (1998) 3032-3034.
- [2] Martín, A. Ensayos y experiencias de alteración en la conservación de obras de piedra de interés histórico-artístico. Ed. Centro de Estudios Ramón Areces, Madrid, 1990.
- [3] Degryse, P. Elsen, J. Waelkens, M. Study of ancient mortars from Salassos (Turkey) in view of their conservaton, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 1457-1563.
- [4] Hendry, A.W. Masonry walls: materials and construction, *Constr. Build. Mater.* 15 (2001) 323-330.
- [5] Venice Charter, International Charter for the conservation and restoration of monuments and sites, Venice, 1964, http://www.icomos.org/docs/venice_charter.html.
- [6] Conclusions of the symposium "mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings", Rome, *Mater. Struct.* 23 (1990) 235.
- [7] Martínez-Ramírez, S. Puertas, F. Blanco-Varela, M.T. Thompson, G.E. Almendros, P. Behavior of repair lime mortars by wet deposition process, *Cem. Concr. Res.* 28 (2) (1998) 221-229.
- [8] Winnefeld, F. Knöfel, D. Investigation on historical mortars with microscopic methods, *Proc. of the 18th International Conference on Cement Microscopy*, Houston, Texas, April 21-25, 1996, 171-184.
- [9] UNE 83-200, Aditivos para hormigones, pastas u morteros. Clasificación y definiciones, 1984.
- [10] UNE 83-800, Morteros de albañilería. Definiciones y especificaciones, 1994.
- [11] Norma Básica de la Edificación. NBE FL-90 Muros resistentes de fábrica de ladrillo
- [12] UNE-ENV 459-1, Cales para construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad, 1996.
- [13] UNE-ENV 459-2, Cales para construcción. Parte 2: Métodos de ensayo, 1994.
- [14] UNE-EN 196-1, Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas, 1996.
- [15] UNE-EN 196-2, Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos, 1996.
- [16] UNE-EN 196-3, Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen, 1996.
- [17] UNE-EN 196-5, Métodos de ensayo de cementos. Parte 5: Ensayo de puzolanicidad para cementos puzolánicos, 1996.
- [18] Cazalla, O. Morteros de cal. Aplicación en el patrimonio histórico, Unpublished PhD thesis (in Spanish), Universidad de Granada, Granada, 2002.
- [19] Moropoulou, A. Biscontin, G. Bakolas, A. Bisbikou, K. Technology and behavior of rubble masonry mortars, *Constr. Build. Mater.* 11 (2) (1997) 119-129.
- [20] Cazalla, O. Rodríguez-Navarro, C. Sebastian, E. Cultrone, G. Aging of lime putty: effects on traditional lime mortar carbonation, *J. Am. Ceram. Soc.* 83 (5) (2000) 1070-1076.
- [21] Moropoulou, A. Cakmak, A.S. Biscontin, G. Bakolas, A. Zendri, E. Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia, *Constr. Build. Mater.* 16 (2002) 543-552.
- [22] Guía práctica de la cal y el estuco, Editorial de los Oficios, Leon, 1998.
- [23] Mosquera, M.J. Benitez, D. Perry, S.H. Pore structure in mortars applied on restoration. Effect on properties relevant to decay of granite buildings, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 1883-1888.
- [24] Pellicer, D. El hormigón armado en la construcción arquitectónica, Editorial Bellisco, Madrid, 1989.
- [25] Baronio, G. Binda, L. Lombardi, N. The role of brick pebbles and dust in conglomerantes based on hidrated lime and crushed bricks, *Constr. Build. Mater.* 11 (1997), 33-40.
- [26] Gleize, P.J.P. Müller, A. Roman, H.R. Microstructural investigation of a silica fume-cement-lime mortar, *Cement Concrete Comp.* 25 (2) (2003) 171-175.
- [27] Heikal, M. El-Didamony, M.H. Morsy, M.S. Limestone-filled pozzolanic cement, *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 1827-1834.
- [28] Mira, P. Papadakis, V.G. Tsimas, S. Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 683-689.
- [29] Moorehead, D.R. Cementation by the carbonation of Hydrated Lime, *Cem. Concr. Res.* 16 (1986) 700-708.