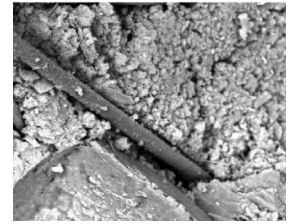


Influencia de la adición de fibras en las propiedades de los morteros de cal hidráulica



Influence of addition of fibres on properties of the hydraulic lime mortars



Arturo Bustos-García¹, Esther Moreno-Fernández², Francisco González-Yunta¹, Alfonso Cobo-Escamilla¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior Edificación. Dpto. de Tecnología de la Edificación. Avenida de Juan de Herrera, 6 – 28040.

² Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Dpto. de Construcción y Tecnología arquitectónica. Avenida de Juan de Herrera, 4 – 28040 Madrid.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8495> | Recibido: 15/06/2017 • Evaluado: 16/06/2017 • Aceptado: 26/12/2017

ABSTRACT

- The influence of carbon and basalt fibres addition on hydraulic lime mortars mechanical properties and durability has been studied. The objective is to evaluate the possible use in restoration of architectural heritage, as an alternative to Portland cement because of the pathological processes that the latter causes. To assess the effect, the obtained results have been compared with two reference mortars: hydraulic lime with no additions and basalt fibres. The amount of fibres to be incorporated is questioned in the first phase. The tests performed show that the incorporation of 1% of fibres (volume) in the mortars, improves their behaviour under bending and compression loads. Additionally, the fibres increase the ductility of the reinforced mortar, almost doubling the effect that causes the addition of basalt fibres. Finally, the durability studies show the increase in ductility caused by the addition of carbon fibres, despite the logic decrease experienced after the ageing tests.
- **Keywords:** Hydraulic lime, mortar, carbon fibre, basalt fibre, ductility, durability.

RESUMEN

Se investigó la influencia de la adición de fibras de carbono sobre las propiedades mecánicas y la durabilidad de los morteros de cal hidráulica natural. El objetivo es valorar la posibilidad de su empleo en trabajos de restauración de bienes patrimoniales, como alternativa al cemento Portland por los procesos patológicos que este último provoca. Para valorar su efecto, se han comparado los resultados obtenidos con dos morteros de referencia: de cal hidráulica sin adiciones y con fibras de basalto. En una primera fase se cuestiona la cantidad de fibras que se deben incorporar. Los ensayos realizados muestran que la incorporación del 1% de fibras (volumen) en los morteros mejora su comportamiento bajo cargas de flexión y de compresión. Adicionalmente, las fibras aumentan la ductilidad del mortero reforzado, llegando casi a doblar el efecto que provoca la adición de fibras de basalto. Por último, los estudios de durabilidad ponen de manifiesto el aumento de la ductilidad causado por la adición de fibras de carbono, a pesar de la lógica disminución experimentada tras los ensayos de envejecimiento.

Palabras clave: Cal hidráulica, mortero, fibra de carbono, fibra de basalto, ductilidad, durabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

Durante el siglo XX se han utilizado con frecuencia morteros de cemento portland, originándose la aparición de lesiones en los edificios por problemas de incompatibilidad con los materiales existentes. Esto es debido a sus altas resistencias mecánicas, formación de eflorescencias por el alto contenido de sales solubles, baja permeabilidad al vapor de agua, mayor coeficiente de expansión térmica que la mampostería base, etc. [1]. Por todo ello, ha ido aumentando el interés en el empleo de morteros de cal (aérea o hidráulica) para la restauración de monumentos históricos debido a su alta compatibilidad con las fábricas originales [2]. Esta circunstancia se refleja en diferentes procesos: compatibilidad química, física y estructural [3].

En este contexto, los morteros de cal hidráulica representan una alternativa interesante ya que combinan las ventajas de la cal aérea y del cemento, siendo más permeables que éstos y con una retención de agua menor, al tiempo que poseen unas mayores resistencias a edades tempranas y un fraguado más rápido que la cal aérea. Además, reducen el riesgo de incompatibilidades [4].

El principal inconveniente de los morteros de cal hidráulica es su alta retracción plástica, una menor resistencia y un comportamiento frágil [5]. La escasa capacidad de deformación puede suponer un problema en determinadas situaciones (sismo, por ejemplo). La adición de fibras a la matriz aumenta la capacidad de absorción de energía del material, lo que se traduce en un aumento de la ductilidad y de la resistencia a la fisuración, aumentando –por tanto– la integridad del elemento antes del colapso [6].

Hay estudios referentes a morteros de cal hidráulica con adición de fibras de vidrio y de basalto [5-7]. Sin embargo, la fibra de carbono no ha sido estudiada como refuerzo de morteros de cal hidráulica a pesar de su excelente comportamiento en su uso en morteros de cemento [8].

La adición de fibras trae como consecuencia un aumento del aire ocluido y un cambio en la estructura porosa del mortero endurecido [9]. Este aumento de la porosidad puede afectar a la durabilidad de los morteros, ya que muchos mecanismos de degradación actúan en función del caudal de agua que atraviesa el mortero y controlan la velocidad de entrada de humedad que puede contener sustancias químicas agresivas o degradarlos por estrés térmico [10].

Con estos antecedentes, se establece como objetivo principal de este estudio, investigar el efecto de la incorporación de fibras de carbono como refuerzo de morteros de cal hidráulica. A efectos comparativos, se fabricaron morteros sin adiciones y con fibras

de basalto. En una primera fase se analizan las características mecánicas de los morteros con tres porcentajes de fibras (0.66%, 1% y 1.33%), al tratarse de los más comunes en la bibliografía. En la segunda fase, y a partir de los datos obtenidos, se realizan ensayos de durabilidad a los morteros de cal hidráulica con fibras de carbono (1%), ya que son los que presentaron mejores resultados.

2. ESTUDIO EXPERIMENTAL

2.1. MATERIALES

Para el desarrollo del trabajo experimental se ha utilizado cal hidráulica natural NHL 5 de Saint-Astier, arena silícea y dos tipos de fibras: carbono y basalto (Mapei); sus características técnicas se muestran en la Tabla 1. También se añadió a la mezcla un aditivo reductor de agua (Glenium Sky 604).

Todos los morteros se han fabricado mezclando 490 kg/m³ de cal hidráulica, 1470 kg/m³ de arena silícea y un 0,183% de agua con respecto a la fracción sólida de la mezcla. Se adicionó un 0,66%, 1% y 1,33% de fibras sobre el volumen total de mortero, mientras que se añadió un 0,4%, 0,8% y 1% de plastificante sobre la masa de la cal hidráulica, respectivamente.

Designación de los morteros: *MCa-R*, mortero de cal de referencia, *MCa-FC-x*, mortero de cal con fibra de carbono y *MCa-FB-x*, mortero de cal con fibra de basalto, siendo x el porcentaje de fibra añadido.

	F. Carbono (FC)	F. Basalto (FB)
Longitud (mm)	12	12
Densidad (g/cm³)	1,79	2,75
Diámetro medio (µm)	7	14
Módulo de elasticidad (GPa)	230	91
Resistencia a tracción (GPa)	4,2 a 4,5	3,8 a 4,1
Elongación hasta fractura (%)	2,1	1,8

Tabla 1: Tamaño y propiedades físicas y mecánicas de las fibras de carbono y basalto

2.2. PROGRAMA DE ENSAYOS

En la una primera fase se fabricaron 21 probetas para determinar el porcentaje de fibras idóneo; en una segunda fase, 36 probetas (con 1% fibras) se sometieron a ensayos de durabilidad. Se fabricaron tres probetas prismáticas (40x40x160 mm³) para cada dosificación, según la Norma EN 196-1 [11] con la particularidad de premezclar manualmente las fibras con el agua durante 30 segundos antes de añadir la cal hidráulica. Las probetas se curaron en cámara húmeda a una temperatura de 20 °C y una humedad relativa de 95% durante 28 días. Las probetas ensayadas a 120 días se curaron al aire después de los 28 días.

Designación	Consistencia (mm)	Densidad en fresco (kg/m³)	Densidad endurecido (kg/m³)	Aire ocluido (%)	Coefficiente de absorción de agua (kg/(m² *min ^{0.5}))
MCa-R	195	2110	1970	3.1	2.00
MCa-FC-0.66	155	2050	1900	5.3	1.83
MCa-FC-1	145	2000	1860	6.0	1.77
MCa-FC-1.33	140	1960	1830	6.9	1.71
MCa-FB-0.66	155	2050	1920	5.1	1.69
MCa-FB-1	145	2020	1900	6.1	1.61
MCa-FB-1.33	140	2000	1860	6.9	1.53

Tabla 2: Propiedades físicas de los morteros de cal hidráulica con adición de fibras

2.3. TÉCNICAS DE ENSAYO

2.3.1. Ensayos físicos

Se determinaron como propiedades físicas: consistencia, densidad aparente (en estado fresco y endurecido), contenido de aire ocluido y absorción de agua por inmersión [12-15].

2.3.2. Ensayos mecánicos

La caracterización mecánica se realizó de acuerdo con la Norma EN 1015-11 [16]. El equipo utilizado fue de Ibertest MIB-60/AM. La velocidad de carga fue de 0,4 mm/min en el ensayo de flexión y de 1 mm/min en el de compresión. El control de la deformación se llevó a cabo mediante el software de la máquina.

Para cuantificar la ductilidad, a partir del ensayo a flexión, se han determinado: la densidad de energía de deformación hasta la fractura, *R*; la densidad de energía hasta un desplazamiento de 1/150 la distancia entre apoyos, *T_f*; la densidad de energía hasta un 95% de la carga máxima, *T_{fu}* y el índice de tenacidad *I₃₀* (*T_f*/*T_{fu}*) [17].

2.3.3. Ensayos de durabilidad

Se determinó la resistencia a la helada [18], a la cristalización de sales [19] y al choque térmico [20]. El deterioro de las probetas de mortero ensayadas se comprueba mediante la pérdida de masa (disponible como material suplementario) y la determinación de las propiedades mecánicas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. PROPIEDADES FÍSICAS

Las propiedades físicas de los morteros se muestran en la Tabla 2. El aumento en la cantidad de fibras adicionadas supone un descenso de la consistencia lo que repercute en la trabajabilidad de los morteros [9]. Del mismo modo, debido al aumento de aire ocluido en la mezcla, la adición de fibras provoca un descenso de la densidad, tanto en estado fresco como endurecido, ya que las fibras favorecen la formación de microcavidades en la zona de transición interfacial entre la pasta y las fibras [7]. A pesar del aumento del volumen de poros nocivos (tamaño superior a 100 µm) por adición de fibras, la absorción de agua desciende en morteros con fibras [5]. Esto es debido a que las fibras previenen la aparición de microfisuras en las primeras edades que favorecen el tránsito de agua a través del mortero [21].

3.2. RESISTENCIAS MECÁNICAS

Las resistencias a flexión y compresión de los distintos morteros a 28 y a 120 días se muestran en la Fig. 1. La *R_f* aumenta un 59%, 99% y 86% cuando se adicionan 0,66%, 1% y 1,33% de fibras de carbono, respectivamente, mientras que, si las fibras son

de basalto, el aumento de R_f es de 66%, 89% y 76%. En cuanto a la R_c , la adición de fibras de carbono en porcentajes del 0,66%, 1% y 1,33% supone un aumento de las resistencias en un 21%, 32% y 32% cuando se ensayan a 28 días y en un 15%, 24% y 23% a 120 días. Las fibras de basalto mejoran R_c en un 32%, 45% y 38% a 28 días y en un 20%, 31% y 23% a 120 días.

El incremento de las resistencias a flexión concuerda con los trabajos de otros autores [7]; en el aumento de la resistencia a compresión, hay datos contradictorios en la bibliografía y quedan explicitados por los comentarios de Santarelli et al. [5] en cuanto a la dispersión obtenida por variables como la matriz o el tipo de fibra empleado.

Los valores de R_f son superiores en los morteros con fibras de carbono, como consecuencia de las características de las fibras: la relación de aspecto está directamente relacionada con el diámetro de la fibra, es decir, para un mismo porcentaje, la cantidad de

fibras de carbono es superior a las de basalto y por lo tanto habrá más fibras para reforzar la sección flexionada [22]. No obstante, el mayor número de fibras de carbono adicionadas supone un mortero menos denso, con una menor R_c . El descenso de las resistencias a flexión y compresión con adiciones superiores al 1% son debidas a la dificultad de dispersión de las fibras cuando se adicionan grandes cantidades [8].

3.3. TENACIDAD A FLEXIÓN

El comportamiento típico a flexión de los morteros de cal hidráulica con fibras puede dividirse en 4 etapas, Fig.2. Hasta alcanzar una tensión aproximadamente la mitad de la alcanzada en el ensayo, el comportamiento es lineal (etapa I). A partir de este punto, la probeta pierde rigidez debido a la microfisuración (etapa II). Una vez alcanzado la resistencia máxima, el efecto de cosido de las fibras impide la rotura frágil (etapas III y IV). En la tercera etapa, las resistencias residuales caen rápidamente para luego estabilizarse e ir descendiendo lentamente hasta que se produce el colapso (etapa IV). Así pues, mientras que los morteros sin fibras presentan una rotura frágil, la ductilidad a flexión se incrementa con el contenido de fibras hasta un 1% mostrando para contenidos del 1.33% resultados inferiores.

En la Tabla 3 aparecen reflejados los parámetros que indican la ductilidad de los morteros. La adición de fibras de carbono en porcentajes del 0,66%, 1% y 1,33% supone un aumento de la T_f y la T_{fu} en un 3095% y 6971%, 3561% y 12073% y 3556% y 6725% respectivamente. Mientras que la adición de fibras de basalto supone una mejora de la T_f y la T_{fu} en un 3043% y 4302%, 3466% y 5981% y 3013% y 3605% para los porcentajes citados anteriormente. La mejora del comportamiento post-fisuración de

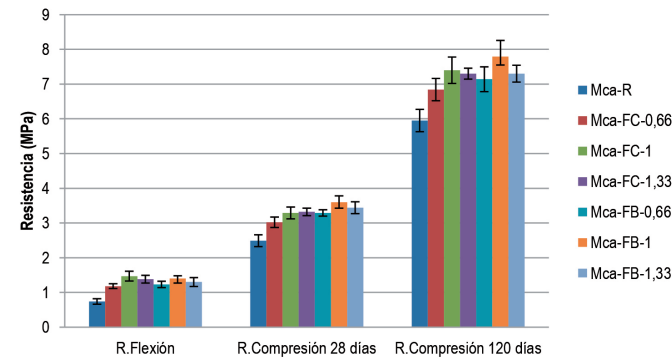


Fig. 1: Resistencias mecánicas de los morteros. (Barras de error: desviaciones estándar)

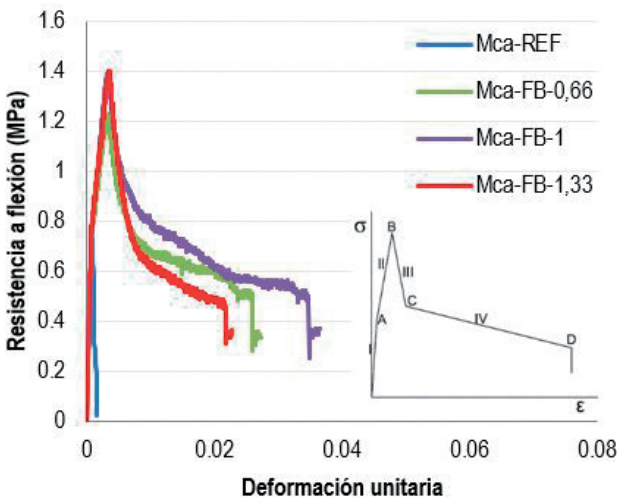
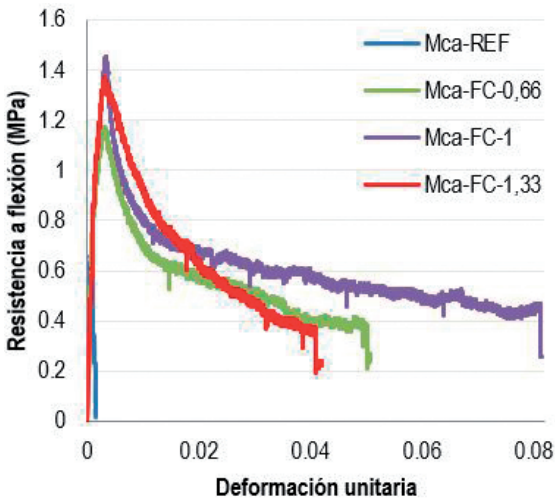


Fig. 2: Comportamiento a flexión de los morteros de cal hidráulica. (Izda.: FC. Dcha.: FB)

Designación	R (MPa)		T_f (MPa)		T_r (MPa)		I_{30}
Mca-R	0.0004	(0.0001)	0.0004	(0.0001)	0.0004	(0.0001)	1.00
Mca-FC-0,66	0.0026	(0.0008)	0.0131	(0.0039)	0.0290	(0.0102)	11.01
Mca-FC-1	0.0032	(0.0008)	0.0150	(0.0053)	0.0499	(0.0175)	15.49
Mca-FC-1.33	0.0030	(0.0008)	0.0150	(0.0045)	0.0280	(0.0098)	9.36
Mca-FB-0,66	0.0031	(0.0009)	0.0129	(0.0039)	0.0180	(0.0054)	5.84
Mca-FB-1	0.0031	(0.0008)	0.0146	(0.0044)	0.0249	(0.0087)	7.95
Mca-FB-1.33	0.0034	(0.0012)	0.0128	(0.0038)	0.0151	(0.0053)	4.41

*(Paréntesis: desviación estándar).

Tabla 3: Parámetros de ductilidad a flexión de los morteros de cal hidráulica

morteros de cal hidráulica por adición de fibras ha sido publicada por diversos autores [5-7].

Estos datos ponen de manifiesto el mejor comportamiento de los morteros adicionados con fibras de carbono mejorando, de media, en un 18% la T_f y en un 90% la T_{fu} con respecto a los morteros adicionados con fibras de basalto. El índice de tenacidad I_{30} refleja claramente la mejora de la ductilidad cuando se le añaden fibras al mortero de cal hidráulica, mostrando las de carbono un índice cerca del doble a las de basalto.

La Fig.3 muestra una micrografía (BSE a 1000 aumentos) de la superficie de fractura del mortero de cal hidráulica con fibras (1%). Se observa como las fibras tienen cierta cantidad de pasta de cal adherida sobre su superficie, lo que indica una excelente unión entre la pasta de cal hidráulica y las fibras y un eficaz mecanismo de transferencia de carga [5,7]. La fractura se produce a través de la extracción o deslizamiento de las fibras, efecto conocido como *pull-out*, mecanismo que favorece el aumento de la ductilidad [23]. (Más información en material suplementario).

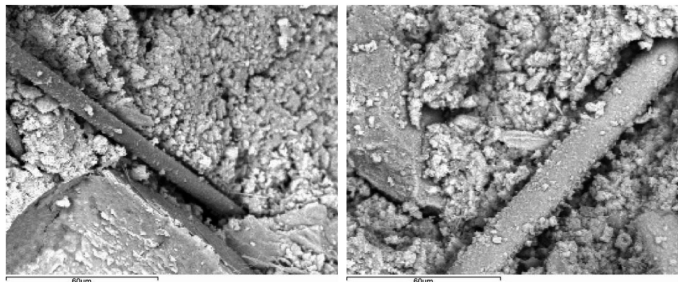


Fig. 3: BSE a 1000 aumentos de los morteros de cal hidráulica con 1% de fibras. (Izda.: FC. Dcha.: FB)

3.4. ESTUDIO DE DURABILIDAD

El porcentaje de fibra de carbono que mejora en mayor medida la ductilidad de los morteros es el 1%. Por ello, se utilizó esta dosificación para el estudio de durabilidad a través de ensayos de envejecimiento acelerado.

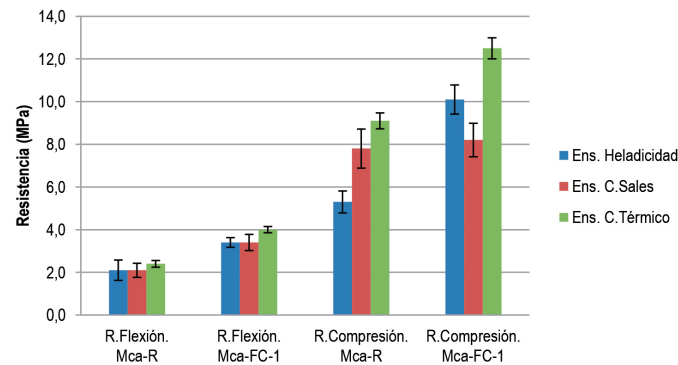


Fig. 4: Resistencias mecánicas tras los ensayos de envejecimiento acelerado. (Barras de error indican las desviaciones estándar)

3.4.1. Resistencia a flexión y compresión

En la Fig.4 se muestran las resistencias a flexión y compresión de los morteros.

Comparando los resultados de resistencias mecánicas de las probetas antes y después de los ensayos de durabilidad (Fig. 1 y 4), se observa que la antigüedad del mortero y el diferente ambiente de curado a las que las probetas estaban expuestas durante los ensayos de durabilidad, han tenido mayor influencia en el resultado de mejora del comportamiento mecánico, que la disminución de resistencias por el deterioro del material producido por los ensayos.

En todos los ensayos, las probetas se sumergen en agua a 20°C durante una parte del ciclo. Es conocido que el proceso de curado en agua de los morteros de base cementicia acelera el desarrollo de resistencias mecánicas [24]. En morteros de cal aérea [25] se ha comprobado que con dicho curado se obtienen valores de resistencia superiores (más del doble) que las que han sido curadas al aire. Por tanto, es de suponer, que los morteros de cal hidráulica, un material puente entre ambos siga la misma tendencia.

No obstante, atendiendo exclusivamente los resultados de la Fig. 4, las resistencias a flexión y compresión de los morteros con fibras de carbono son superiores a las obtenidas en morteros sin reforzar en un 227% y 91% después de los ensayos de heladicidad, en un 62% y un 5% después de los ensayos de cristalización de sales y en un 67% y 37% después de los ciclos de choque térmico. Centrándonos en estos porcentajes de mejora, se puede afirmar que los morteros con fibras tienen un mejor comportamiento frente a la heladicidad y al choque térmico que los morteros sin adicionar, mientras que la cristalización de sales anula casi el efecto de la adición de fibras en su comportamiento a compresión.

3.4.2. Tenacidad a flexión

La Tabla 4 muestra los distintos parámetros de ductilidad de los morteros. Los índices de ductilidad I_{30} reflejan claramente la pérdida de ductilidad de los morteros con fibras después de los ensayos de envejecimiento acelerado, reduciéndose en un 72% tras el ensayo de heladicidad, en un 77% tras el de cristalización de sales y en un 78% tras el ensayo del choque térmico si los comparamos con el obtenido a 28 días.

Aunque la ductilidad de los morteros con adición de fibras de carbono se vea afectada por los ensayos de durabilidad, su comportamiento sigue siendo superior a la de los morteros sin fibras. Así pues, los valores de T_f y de T_{fu} de los morteros de cal hidráulica con fibras son superiores en un 2552% y 3501% sobre los morteros sin reforzar después del ensayo de heladicidad, en un 572% y 845% después del ensayo de cristalización de sales y en un 543% y en un 585% después de someterlos a choque térmico.

Los diagramas de tensión-deformación a compresión tras los diversos ensayos realizados, y su análisis y posterior discusión aparecen como material suplementario disponible en la web.

Designación	R (MPa)		T_f (MPa)		T_{fu} (MPa)		I_{30}
Mca-R-Heladicidad	0.0013	(0.0003)	0.0013	(0.0004)	0.00135	(0.0004)	1.00
Mca-R-Sales	0.0048	(0.0013)	0.0048	(0.0013)	0.0048	(0.0013)	1.00
Mca-R-Térmico	0.0045	(0.0014)	0.0045	(0.0010)	0.0045	(0.0014)	1.00
Mca-FC-1-Heladicidad	0.0113	(0.0031)	0.0358	(0.0097)	0.0486	(0.0131)	4.32
Mca-FC-1-Sales	0.0129	(0.0035)	0.0320	(0.0086)	0.0450	(0.0122)	3.48
Mca-FC-1-Térmico	0.0091	(0.0028)	0.0292	(0.0079)	0.0311	(0.0072)	3.43

*(Paréntesis: desviación estándar).
Tabla 4: Parámetros de ductilidad a flexión de los morteros de cal hidráulica

4. CONCLUSIONES

Los resultados del estudio confirman que la adición de fibras de carbono y basalto afectan significativamente al comportamiento y propiedades de los morteros de cal hidráulica. Se han podido extraer las siguientes conclusiones:

La adición de fibras disminuye considerablemente la consistencia de los morteros. Asimismo, el aumento progresivo de fibras en las pastas provoca un aumento del aire ocluido y, por lo tanto, una reducción de la densidad aparente.

Los valores de resistencia a flexión y compresión aumentan de forma progresiva según aumenta el contenido de fibras hasta llegar al 1% donde se obtienen los mejores resultados, dando los morteros con adiciones del 1.33% valores similares o inferiores. De media, los valores de resistencia a flexión son un 3.5% superiores en morteros con fibras de carbono sobre los que llevan fibra de basalto, mientras que las resistencias a compresión son un 24.6% inferiores.

El aumento de los valores de densidad de energía, según se va acrecentando los porcentajes de adición de fibras, ponen de manifiesto el aumento de la ductilidad de estos morteros. Los valores de tenacidad a flexión últimos llegan a ser un 12073% (fibras de carbono) y un 5981% (fibras de basalto) superiores a los morteros de cal hidráulica de referencia, cuando el porcentaje de fibras añadidas es del 1%. Esta mejora del comportamiento post-fisuración se debe a la excelente unión entre la matriz de cal hidráulica y las fibras como indican las micrografías.

Tras los ensayos de durabilidad, los índices de tenacidad I_{30} reflejan una pérdida de ductilidad en torno al 75% en morteros con fibras después de ser sometidas a ensayos de envejecimiento acelerado, no obstante, siguen siendo considerablemente más dúctiles que los morteros sin fibras.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M.J. Mosquera, B. Silva, B. Prieto, E. Ruiz-Herrera. Addition of cement to lime-based mortars: effect on pore structure and vapor transport. *Cem Concr Res*, 36 (2006), pp. 1635–1642. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.041>
- [2] J. Lanás, J.I. Alvarez. Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. *Cem. Concr. Res.*, 33 2003, pp. 1867–1876. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00210-2)
- [3] A. Arizzi, H. Viles, G. Cultrone. Experimental testing of the durability of lime-based mortars used for rendering historic buildings. *Constr. Build. Mater.*, 28 (2012), pp. 807–818. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.059>
- [4] P. Maravelaki-Kalaitzaki. Hydraulic lime mortars with siloxane for waterproofing historic masonry. *Cem. Concr. Res.*, 37 (2007), pp. 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.007>
- [5] Santarelli, M. L., Sbardella, F., Zueni, M., Tirillò, J., & Sarasini, F. Basalt fiber reinforced natural hydraulic lime mortars: A potential bio-based material for restoration. *Materials & Design*, 2014, 63, 398–406. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.041>
- [6] Asprone, D., Cadoni, E., Iucolano, F., & Prota, A. Analysis of the strain-rate behavior of a basalt fiber reinforced natural hydraulic mortar. *Cem and Conc Comp*, 2014, 2–58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.06.009>
- [7] Iucolano F, Liguori B, Colella C. Fibre-reinforced lime-based mortars: a possible resource for ancient masonry restoration. *Constr Build Mater* 2013;38:785–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.050>
- [8] Shu, X., Graham, R. K., Huang, B., & Burdette, E. G. Hybrid effects of carbon fibers on mechanical properties of Portland cement mortar. *Materials&Design*, 2015, 65, 1222–1228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.015>
- [9] Jiang C, Fan K, Wu F, Chen D. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Mater Des* 2014;58:187e93. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.056>
- [10] Tam, C. M., Tam, V. W., & Ng, K. M. Assessing drying shrinkage and

water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong. *Constr&Build Mat*, 2012, 26(1), 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.006>

- [11] EN 196-1. Methods of testing cement – part 1: Determination of strength. European Committee for Standardization; 2005.
- [12] EN 1015-3. Methods of Test for mortar for masonry. Part 3. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). European Committee for Standardization; 2007.
- [13] EN 1015-10. Methods of test for mortar for masonry – Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar. European Committee for Standardization; 2000.
- [14] EN 1015-7. Methods of test for mortar for masonry – Part 7: Determination of air content of fresh mortar. European Committee for Standardization; 1999.
- [15] EN 1015-18. Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. European Committee for Standardization; 2003.
- [16] EN 1015-11/A1. Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. European Committee for Standardization; 2007.
- [17] UNE 83510. Concrete with fibers. Determination of the index of tenacity and strength with the first crack. Spanish Association for Standardisation and Certification; 2004.
- [18] UNE EN 12371. Natural stone test methods. Determination of frost resistance
- [19] UNE EN 12370. Natural stone test methods. Determination of resistance to salt crystallisation, 1999.
- [20] UNE EN 14066. Natural stone test methods – Determination of resistance to ageing by thermal shock, 2013.
- [21] Pereira-de-Oliveira, L. A., Castro-Gomes, J. P., & Nepomuceno, M. C. Effect of acrylic fibres geometry on physical, mechanical and durability properties of cement mortars. *Constr & Build Mat*, 2012, 27(1), 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.061>
- [22] Baeza, F. J., Galao, O., Zornoza, E., & Garcés, P. Effect of aspect ratio on strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement composites. *Materials&Design*, 2013, 51, 1085–1094. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.010>
- [23] Silva FJ, Thaumaturgo C. Fibre reinforcement and fracture response in geopolymeric mortars. *Fatigue Fract Eng Mater Struct* 2003;26:167–72. <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2003.00625.x>
- [24] Rojas, M. F., & Sanchez, D. R. M. The effect of high curing temperature on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement matrices at 60 °C. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(5), 643–649. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01040-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01040-2)
- [25] Aguilar, A. S. Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico. Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid, 2005.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Cátedra Proiescon su colaboración en la financiación de este trabajo y al laboratorio de Materiales de Construcción de la ETSEM (UPM).