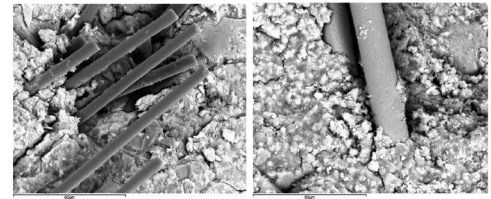


Influencia de la geometría de la probeta sobre las características mecánicas de morteros de cemento con adición de fibras



Influence of the specimen's geometry on the mechanical characteristics of cement mortars with addition of fibres



Arturo Bustos-García¹, Esther Moreno-Fernández², Francisco González-Yunta¹ y María-de-las-Nieves González-García¹

Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior Edificación¹ y Escuela Técnica Superior de Arquitectura². Avenida de Juan de Herrera, 6 - 28040 Madrid (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9016> | Recibido: 29/10/2018 • Inicio Evaluación: 20/11/2018 • Aceptado: 19/02/2019

ABSTRACT

• The influence of the specimen's geometry on the mechanical properties of cement mortars with addition of carbon and basalt fibers has been studied. The first phase focused on the influence of the different amount of fibers on the mechanical properties of mortars. The tests showed that the addition of a 1% of fibers on the mortars significantly improved their energy absorption capacity. In the second phase, eight different specimen geometries were tested: four by flexural tests and four by compressive tests. The analysis of the results showed the influence of the specimen's geometry on the mechanical characteristics of mortars with fibers.

It was observed that the maximum strength resisted by the specimen decreased at the time its dimensions increased, producing a "size effect". On the other hand, the strengths' decrease is more progressive in specimens with a wide/tall bigger ratio, being this a decisive parameter in the amount of absorbed energy before the collapse takes place.

• **Keywords:** Cement mortars, ductility, energy absorption, carbon fibres, basalt fibres.

RESUMEN

Se investigó la influencia de la geometría de la probeta sobre las propiedades mecánicas de los morteros de cemento con adición de fibras de carbono y basalto. En una primera fase se estudió la influencia de distintas cantidades de fibras en las características mecánicas de los morteros. Los ensayos mostraron que la incorporación del 1% de fibras en los morteros mejora en mayor medida la capacidad de absorción de energía bajo cargas de flexión y compresión. En una segunda fase, se ensayaron ocho geometrías distintas de probetas, cuatro a flexión y cuatro a compresión. El análisis de los resultados puso de manifiesto la influencia de la geometría de la probeta en las características mecánicas de los morteros con fibras. Se observó como la tensión máxima que resiste una probeta disminuye a medida que aumentan sus dimensiones, mostrándose un "efecto tamaño". Por otro lado, la caída de resistencias es más suave en probetas con mayor relación ancho/canto, siendo éste un parámetro determinante en la cantidad de energía absorbida antes de producirse el colapso.

Palabras clave: Morteros de cemento, ductilidad, absorción de energía, fibras de carbono, fibras de basalto.

1. INTRODUCCIÓN

Los compuestos de base cementicia son los materiales más utilizados en construcción, debido a sus excelentes propiedades

y a que estas pueden modificarse para satisfacer necesidades específicas en una amplia variedad de aplicaciones, variando las proporciones de los componentes básicos o mediante el uso de aditivos y adiciones [1,2].

Las fibras de carbono y basalto se han utilizado para mejorar la ductilidad de estos materiales, ya que aumentan su resistencia ante la propagación de fisuras, mejorando su capacidad de absorción de energía y de deformación, y mostrando un comportamiento postfisuración mejorado [3-7]. No obstante, la cantidad de fibras que pueden incorporarse en una mezcla está limitada por la formación de bolas (enredo de las fibras), que afecta negativamente su trabajabilidad [8]. Además, tienden a aumentar el contenido de aire de la mezcla, lo que repercute negativamente en las resistencias mecánicas [9,10].

Zhao et. al. [3] obtuvieron resultados de absorción de energía entre un 40% y un 83% superiores con la adición de fibras de basalto, mientras que Kizilkanat et al [4] publicaron aumentos significativos de la tenacidad a la fractura con dosificaciones superiores al 0,25%. Fenu et. al. [5] reportaron aumentos cercanos al 50% con la adición del 5% de fibras de basalto. Graham et. al. [6] informaron del incremento de la tenacidad a la fractura en un 59%, 94% y 125%, cuando se adicionaban fracciones de 0,5%, 1% y 1,5% de fibras de carbono. Mientras que Nguyen et. al. [7] comunicaron aumentos de la tenacidad a la fractura, llegando a valores de absorción de energía un 600% superiores.

Estos autores utilizan diferentes geometrías de probeta en función de la normativa aplicada. Estas investigaciones no profundizan en el estudio del proceso de fisuración ni en su relación con la geometría de los especímenes. No obstante, es ampliamente conocido el efecto de la forma y el tamaño de la probeta en la resistencia a compresión, existiendo diferentes expresiones para relacionar la carga máxima entre diversas geometrías [11-13]. Del Viso et al. [14] afirma que la geometría de la probeta influye en la resistencia, tipo de rotura y comportamiento postfisuración a compresión de los morteros.

Con estos antecedentes, se establece como objetivo de este estudio, investigar la influencia de la geometría de la probeta en las propiedades mecánicas, especialmente en la ductilidad, de morteros con adición de fibras de carbono y basalto. En una primera fase se analizan morteros con adición de tres porcentajes de fibras (0,66%, 1% y 1,33%) utilizando las probetas que marca la normativa. En la segunda fase, y a partir de los datos de ductilidad obtenidos, se estudia la influencia de la geometría de la probeta, utilizando ocho tipos distintos de probetas, cuatro a flexión y cuatro a compresión.

2. ESTUDIO EXPERIMENTAL

2.1. MATERIALES

Para el desarrollo del trabajo experimental se ha utilizado un cemento Portland CEM IV/B 32,5 N, arena silícea y dos tipos de fibras: carbono y basalto (suministradas por la compañía 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 conglomerante, 1470 kg/m³ de agregado y una relación agua/cemento de 0,65. Se adicionó un 0,66%, 1% y 1,33% de fibras sobre el volumen total de mortero, añadiendo un 0,4% de aditivo sobre la masa de cemento, para el porcentaje de adición de fibras del 0,66%, un 0,8% para el 1% y un 1% para el 1,33%.

Designación de los morteros: **MC-R**, mortero de cemento de referencia, **MC-FC-x**, mortero de cemento con fibras de carbono y **MC-FB-x**, mortero de cemento con fibras de basalto, siendo x el porcentaje de fibras añadido.

2.2. PROGRAMA DE PROBETAS

La fase experimental se organizó en dos fases. En la primera fase se determinó que porcentaje mejoraba en mayor medida la ductilidad de mortero con fibras. Para ello se elaboraron series de tres probetas prismáticas de 160x40x40 mm para cada mortero siguiendo lo especificado en la norma EN 196-1 [15].

	F. Carbono (FC)	F. Basalto (FB)
Longitud (mm)	12	12
Densidad (g/cm ³)	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

En una segunda fase, se estudió la influencia de la geometría de las probetas con el porcentaje de fibras que mejores resultados ofrecía (1%). En ensayos a flexión, para cada una de las dosificaciones de morteros planteadas, se ensayaron series de tres probetas de diferentes dimensiones: 160x40x40 mm, la designada por la normativa; 500x50x50 mm y 500x100x30 mm, para estudiar la influencia de la esbeltez de la probeta en la capacidad de absorción del mortero; y 600x100x150 mm, para valorar el factor de escala. Las distintas probetas ensayadas a compresión, así como el proceso de fabricación de las probetas se muestra como material suplementario disponible en la web.

2.3. TÉCNICAS EXPERIMENTALES

La caracterización mecánica se llevó a cabo con un equipo Ibertest modelo MIB-60/AM, adaptando la norma EN 1015-11 [16]. La resistencia a flexión se determinó mediante el ensayo de tres puntos, con una distancia entre apoyos de 2/3 la longitud de la probeta y una velocidad de carga de 0,4 mm/min. Mientras que el ensayo a compresión se realizó en cada una de las dos mitades semiprismáticas resultantes del ensayo a flexión, aplicando una velocidad de carga de 1 mm/min. El control de la deformación se llevó a cabo mediante el software de la máquina.

A partir del ensayo a flexión, se determinaron los siguientes parámetros: energía absorbida hasta la fractura, G_{fr} ; energía absorbida hasta un desplazamiento de 1/150 la distancia entre apoyos, $G_{fr/150}$; energía absorbida hasta un 95% de la tensión máxima, G_{95} ; y el índice de tenacidad último $I_u (G_{fr}/G_{fu})$ [17]. (Más información sobre la realización de los ensayos a compresión disponible como material suplementario).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. RESISTENCIAS MECÁNICAS

En la Tabla 2 se muestran las características de los morteros de cemento estudiados. El uso de altos porcentajes de fibras dificulta su correcta dispersión, lo que trae consigo un descenso de la trabajabilidad y un aumento del contenido de aire ocluido en las mezclas, lo que supone un mortero menos compacto [18]. Este descenso de la compacidad provoca una caída de las resistencias a flexión en un 7%, 15% y 26% cuando se adiciona fibras de carbono y en un 7%, 11% y 22% si son de basalto, para los porcentajes adicionados del 0,66%, 1% y 1,33 respectivamente [4-7, 19].

Para los porcentajes de adición citados anteriormente, la resistencia a compresión disminuye en un 15%, 17% y 19% cuando se adiciona fibras de carbono y en un 10%, 12% y 18%, si son de basalto. Este comportamiento es frecuente en materiales de base cementicia reforzados con fibras debido a que a menos que el contenido de fibras sea muy bajo (inferior al 0.35% en volumen), las fibras de la mezcla no son tan efectivas como los agregados para resistir las compresiones [5, 7, 19].

3.2. DUCTILIDAD A FLEXIÓN

Analizando las curvas de tensión-desplazamiento a flexión de los morteros de cemento, Fig.1, se observa un comportamiento lineal, hasta llegar al punto que corresponde a la tensión de primera fisura; luego la curva se mueve buscando un máximo en otro punto más elevado denominado tensión última de rotura. Alcanzado este punto, las resistencias residuales caen rápidamente para luego estabilizarse e ir descendiendo lentamente hasta que se

Designación	Ecurrimiento (mm)	Aire ocluido (%)	Resistencia a flexión (MPa)		Resistencia a compresión (MPa)	
MC-R	190	2,4	6,90	(0,38)	23,63	(0,56)
MC-FC-0,66	160	8,6	6,44	(0,17)	20,03	(0,98)
MC-FC-1	150	9,5	5,86	(0,19)	19,72	(0,95)
MC-FC-1,33	140	12,5	5,11	(0,17)	19,10	(0,51)
MC-FB-0,66	160	7,6	6,42	(0,37)	21,23	(1,09)
MC-FB-1	150	9,6	6,12	(0,47)	20,82	(0,99)
MC-FB-1,33	150	13,1	5,38	(0,83)	19,36	(0,93)

*(Entre paréntesis se muestra la desviación estándar).

Tabla 2: Características de los morteros estudiados

produce el colapso. Esto se debe al efecto de cosido de las fibras, que impiden la rotura frágil gracias al esfuerzo compuesto que se produce. El comportamiento postfisuración difiere en función del tipo y porcentaje de fibras añadidas.

Así pues, mientras que los morteros sin fibras, una vez alcanza la tensión de primera fisura, llegan a la máxima tensión y ocurre la rotura, presentando una rotura frágil, la ductilidad a flexión de los morteros se incrementa con la adición de fibras, mostrando los mejores resultados con contenidos del 1%.

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 $G_{fl/150}$ y la G_{fu} en un 151% y 205%, 258% y 533% y 172% y 245% respectivamente. Mientras que la adición de fibras de basalto supone una mejora de la $G_{fl/150}$ y la G_{fu} en un 59% y 64%, 141% y 190% y 92% y 112% para los porcentajes citados anteriormente. Comparando ambas fibras, los morteros con fibras de carbono presentan, de media, valores de $G_{fl/150}$ y G_{fu} un 49% y un 84% superiores sobre los morteros con fibras de basalto.

La mejora de la capacidad de absorción de energía de los morteros de cemento por adición de fibras ha sido publicada por diversos autores [4-7, 18, 19] y puede explicarse analizando las microfotografías (BSE a 1000 aumentos) de la superficie de fractura

de los morteros de cemento con fibras (Fig.2). Se observa como las fibras están parcialmente recubiertas por los productos de reacción resultantes de la interacción entre las fibras y la matriz cementicia. Esto indica que el cemento tiene una buena unión a las fibras y se produce un eficiente mecanismo de transferencia de carga (observaciones similares para fibras de carbono y basalto se encuentran en [7] y [5,20] respectivamente). Como consecuencia, es necesaria una mayor cantidad de energía para que se produzca la extracción de la fibra, favoreciendo el aumento de la ductilidad.

El análisis de la ductilidad a compresión de los morteros con distintas cantidades de fibras adicionadas aparece como material suplementario disponible en la web.

3.3. EFECTO DE LA FORMA Y EL TAMAÑO DE LA PROBETA EN LAS RESISTENCIAS MECÁNICAS

En la Tabla 4 se muestran las resistencias mecánicas de los morteros para cada tipo de probeta ensayada. De media, la inclusión de fibras supone una pérdida de resistencias a flexión de los morteros con fibras respecto a la referencia, del 17% en probetas de 500x50x50 mm, del 13% en probetas de 500x100x30 mm y del 17% para probetas de 600x100x150 mm. Mientras que la resistencia a compresión disminuye un 16% cuando se ensayan probetas de 40x40x160 mm, un 12% para probetas de 100x100x100 mm y un 13 para probetas de Ø100x200 mm.

Comparando las resistencias a flexión de los morteros con fibras de carbono en la probeta prismática de 160x40x40 mm –la designada por la normativa– con las resistencias obtenidas cuando se ensayan las otras geometrías de probetas planteadas, se observa, un descenso de las resistencias en un 9% cuando se ensayan probetas de 500x50x50 mm, en un 10% cuando se ensayan probetas de 500x100x30 mm y en un 16% cuando se ensayan probetas de 600x100x150 mm. Mientras que en morteros con fibras de

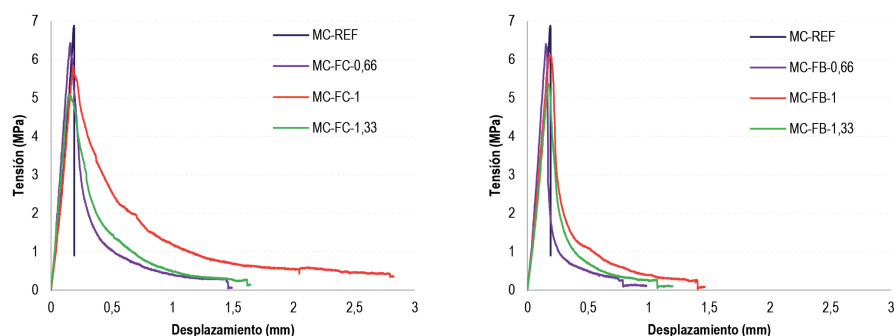


Fig. 1: Comportamiento a flexión de los morteros de cemento. (Izda.: FC. Dcha.: FB)

Designación	G_{fr} (N/mm)		δ_{max} (mm)	$G_{fl/150}$ (N/mm)		G_{fu} (N/mm)		δ_u (mm)	I_u
MC-R	0,595	(0,012)	0,195	0,595	(0,018)	0,595	(0,018)	0,195	1,0
MC-FC-0,66	0,510	(0,020)	0,152	1,494	(0,120)	1,813	(0,163)	1,442	3,6
MC-FC-1	0,522	(0,037)	0,175	2,130	(0,170)	3,770	(0,113)	2,816	7,2
MC-FC-1,33	0,439	(0,009)	0,157	1,616	(0,032)	2,054	(0,041)	1,618	4,7
MC-FB-0,66	0,473	(0,014)	0,146	0,944	(0,076)	0,978	(0,049)	0,781	2,1
MC-FB-1	0,633	(0,032)	0,186	1,433	(0,103)	1,725	(0,035)	1,393	2,7
MC-FB-1,33	0,493	(0,039)	0,165	1,142	(0,023)	1,263	(0,114)	1,060	2,6

*(Entre paréntesis se muestra la desviación estándar).

Tabla 3: Parámetros de ductilidad a flexión de los morteros de cemento

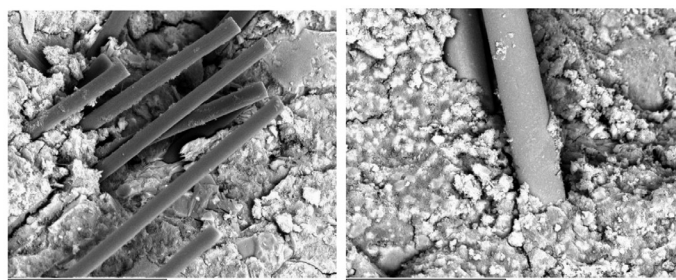


Fig. 2: BSE a 1000 aumentos de los morteros de cemento con 1% de fibras. (Izda.: FC. Dcha.: FB)

basalto este descenso es del 11%, 13% y 18% para las geometrías mencionadas anteriormente.

Esto es debido al denominado "efecto tamaño", propio de materiales cuasi-frágiles, por el cual la resistencia, asociada clásicamente a una tensión de comparación, deja de ser una propiedad intrínseca del material, para pasar a depender del tamaño de la probeta (proceso de fractura) [21]. En consecuencia, la tensión "media" que resiste una probeta disminuye a medida que aumenta su tamaño.

Comparando las resistencias a compresión de los morteros con fibras de carbono y basalto en la probeta cubica de 40 mm –la

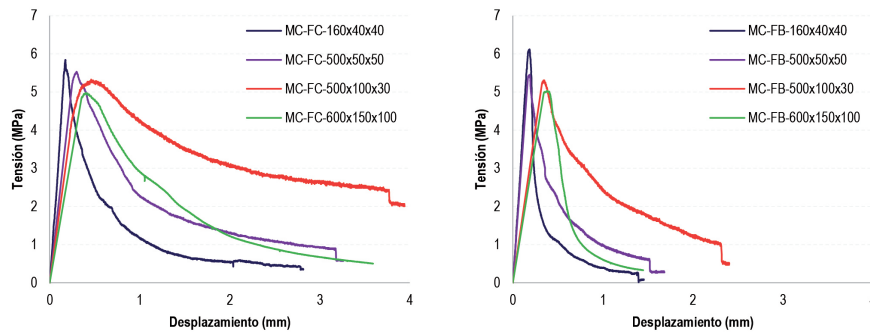


Fig.3: Comportamiento a flexión de los morteros de cemento en función de la geometría de la probeta.

designada por la normativa- con las resistencias obtenidas cuando se ensayan las otras geometrías de probetas planteadas, se observa, un aumento de las resistencias en un 5% y 1% cuando se ensayan probetas de 40x40x160 mm, mientras que para las probetas de 100x100x100 mm y para las de Ø100x200 mm, la resistencia a compresión cae en un 6% y 7% y un 23% y 28%, respectivamente. Por tanto, se observa, que el factor de escala desaparece cuando el tamaño de la probeta tiende a infinito [14].

3.4. EFECTO DE LA FORMA Y EL TAMAÑO DE LA PROBETA EN LA DUCTILIDAD A FLEXIÓN

Como se observa en la Fig.3, el comportamiento a flexión de los morteros con fibras puede dividirse en las etapas descritas en el apartado 3.2. variando estas en función de la forma y el tamaño de la probeta.

Tanto la linealidad en el periodo elástico como el comportamiento postfisuración dependen de la relación canto/ancho de la probeta. En la etapa lineal, las probetas con una menor relación canto/ancho tienen una menor rigidez, mientras que presentan un mejor comportamiento postfisuración, soportando una mayor deformación antes de producirse el colapso. Esto es debido al modo

de fabricación. Al existir un plano dominante las fibras se orientan preferentemente en dos direcciones elevando el número de fibras que atraviesan la zona de fractura [22].

En la Tabla 5 aparecen reflejados los parámetros que indican la ductilidad a flexión en función del tipo de probeta. La adición de fibras supone una mejora de los valores de absorción de energía respecto a sus homólogos de referencia, independientemente del tipo de probeta y fibra empleada. De media, para ambas fibras, la $G_{fl/150}$ y la G_{fu} aumentan en un

147% y 409% cuando se ensayan probetas de 500x50x50 mm, en un 218% y 752% cuando son probetas de 500x100x30 mm y en un 198% y 360% para probetas de 600x100x150 mm. Los morteros de carbono, de media, presentan valores de $G_{fl/150}$ y G_{fu} un 40% y un 133% superiores a los obtenidos por los morteros con adición de fibras de basalto independientemente del tipo de probeta empleada.

Cotejando los valores obtenidos del ensayo sobre la probeta de 160x40x40 mm -la designada por la normativa- con los resultados obtenidos cuando se ensayan las otras geometrías de probetas planteadas, la $G_{fl/150}$ y G_{fu} de los morteros con fibras de carbono aumenta un 20% y 72% cuando se ensayan probetas de 500x50x50 mm, un 74% y 232% cuando se trata de probetas 500x100x30 mm y un 71% y 78% para probetas de 600x100x150 mm. Mientras que, para morteros con fibras de basalto, los valores de $G_{fl/150}$ y G_{fu} son superiores en un 32% y 55%, en un 108% y 211% y en un 71% y 78%, respectivamente.

El análisis del efecto de la forma y el tamaño de la probeta en los parámetros de ductilidad a compresión de los morteros con fibras aparece como material suplementario disponible en la web.

Designación	Resistencia a flexión (Mpa)								Resistencia a compresión (Mpa)							
	160x40x40		500x50x50		500x100x30		600x100x150		40x40x40		40x40x160		100x100x100		Ø100x200	
MC-R	6,90	(0,21)	6,45	(0,32)	6,10	(0,06)	5,99	(0,24)	23,63	(0,95)	24,73	(0,25)	21,60	(0,43)	17,27	(0,86)
MC-FC-1	5,86	(0,29)	5,31	(0,16)	5,30	(0,11)	4,95	(0,15)	19,72	(0,99)	20,73	(0,41)	18,56	(0,56)	15,12	(0,60)
MC-FB-1	6,12	(0,24)	5,46	(0,11)	5,31	(0,16)	5,00	(0,05)	20,82	(0,21)	21,04	(0,84)	19,30	(0,39)	14,90	(0,45)

*(Entre paréntesis se muestra la desviación estándar).

Tabla 4: Resistencia a flexión y compresión de los morteros de cemento según el tipo de probeta

Probeta	Designación	G_{fr} (N/mm)		δ_{max} (mm)	$G_{fl/150}$ (N/mm)		G_{fu} (N/mm)		δ_u (mm)	I_u
160x40x40	MC-R	0,595	(0,006)	0,130	0,595	(0,054)	0,595	(0,012)	1,296	1,0
	MC-FC-1	0,522	(0,010)	0,175	2,130	(0,192)	3,770	(0,038)	2,816	7,2
	MC-FB-1	0,633	(0,057)	0,186	1,433	(0,043)	1,725	(0,035)	1,393	2,7
500x50x50	MC-R	0,900	(0,027)	0,274	0,900	(0,027)	0,900	(0,027)	0,274	1,0
	MC-FC-1	0,907	(0,073)	0,297	2,566	(0,026)	6,469	(0,259)	3,178	7,1
	MC-FB-1	0,474	(0,005)	0,172	1,889	(0,038)	2,700	(0,027)	1,517	5,7
500x100x30	MC-R	1,049	(0,021)	0,343	1,049	(0,084)	1,049	(0,031)	0,343	1,0
	MC-FC-1	1,627	(0,049)	0,468	3,696	(0,074)	12,512	(1,126)	3,776	7,7
	MC-FB-1	0,942	(0,028)	0,343	2,975	(0,089)	5,365	(0,107)	2,317	5,7
600x150x100	MC-R	0,993	(0,040)	0,347	0,994	(0,020)	0,994	(0,030)	0,347	1,0
	MC-FC-1	1,087	(0,087)	0,418	3,639	(0,109)	6,695	(0,067)	3,591	6,2
	MC-FB-1	0,990	(0,040)	0,375	2,288	(0,183)	2,448	(0,073)	1,446	2,5

*(Entre paréntesis se muestra la desviación estándar).

Tabla 5: Parámetros de ductilidad a flexión en función de la geometría de la probeta

4. CONCLUSIONES

Los resultados del estudio confirman que la geometría de la probeta afecta significativamente al comportamiento y propiedades de los morteros de cemento con fibras de carbono y basalto. Se extraen las siguientes conclusiones:

- La inclusión progresiva de fibras de carbono y basalto a los morteros de cemento provoca una caída de las resistencias mecánicas. Las pérdidas de resistencias se sitúan entre un 22-26% a flexión y entre un 18-19% a compresión cuando se adicionan fibras en un porcentaje del 1,33%. Esto es debido a que los altos porcentajes utilizados dificultan la correcta dispersión de las fibras, aumentando el contenido de aire ocluido y disminuyendo la compacidad.
- El aumento de capacidad de absorción de energía, según se va acrecentando los porcentajes de fibras adicionadas, ponen de manifiesto el aumento de la ductilidad de estos morteros. Los valores de energía absorbida últimos llegan a ser un 533% (fibras de carbono) y un 464% (fibras de basalto) superiores a los morteros de cemento de referencia, cuando el porcentaje de fibras añadidas es del 1%. El aumento de la ductilidad se debe a la buena interacción entre la matriz cementicia y las fibras.
- La tensión que resiste una probeta disminuye a medida que aumenta su tamaño, mostrándose en consecuencia, los mejores resultados en las probetas de 160x40x40 mm. Esto pone de manifiesto la existencia del denominado "efecto tamaño" por el cual la resistencia deja de ser una propiedad intrínseca del material, para pasar a depender del tamaño de la probeta.
- Las curvas de tensión-desplazamiento dependen del tamaño y de la forma de la probeta. La caída de resistencias es más suave en el caso de probetas con mayor relación ancho/canto (500x100x30 mm), absorbiendo este tipo de probeta una mayor cantidad de energía antes de producirse el colapso.
- Los morteros de cemento con fibras de carbono tienen una mayor capacidad de absorción de energía en comparación con los morteros adicionados con fibras de basalto, independientemente del tipo de probeta ensayada, llegando a absorber un 141% más de energía antes de producirse el colapso.

REFERENCIAS

[1] Mindess S. Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete. Elsevier, 2014. ISBN 978-1-84569-263-6

[2] Meyer Christian. "The greening of the concrete industry." *Cement and concrete composites* 31.8, 2009. p 601-605. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>

[3] Zhao Q, Dong J, Pan H, et al. "Impact behavior of basalt fiber reinforced concrete." *Fuhe Cailiao Xuebao (Acta Materiae Compositae Sinica)* 27.6, 2010. p 120-125.

[4] Kizilkanat A. B, Kabay N, Akyüncü V, et al. "Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study." *Construction and Building Materials* 100, 2015. p 218-224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.006>

[5] Fenu L, Daniele F, and Ezio C. "Dynamic behaviour of cement mortars reinforced with glass and basalt fibres." *Composites Part B: Engineering* 92, 2016. p 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.035>

[6] Graham R. K, Huang B, Shu X, et al. "Laboratory evaluation of tensile strength and energy absorbing properties of cement mortar reinforced with micro- and meso-sized carbon fibers". *Construction and Building Materials*, 2013. Vol 44, p 751-756. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.071>

[7] Nguyen H, Carvelli V, Fujii T, et al. "Cement mortar reinforced with reclaimed carbon fibres, CFRP waste or prepreg carbon waste." *Construction and Building Materials* 126, 2016. p 321-331. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.044>

[8] Balaguru P N, Shah S P. *Fiber reinforced cement composites*. New York: McGraw-Hill, Inc.; 1992. p. 1-13. ISBN: 0070564000

[9] Chung D. D. L. "Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material." *Composites Part B: Engineering* 31.6-7, 2000. p 511-526. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(99\)00071-2](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(99)00071-2)

[10] Bantia N, Gupta R. "Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices." *Materials and Structures* 37.10, 2004. P 707-716. <https://doi.org/10.1007/BF02480516>

[11] Shah S. P, Sankar R. "Internal cracking and strain softening response of concrete under uniaxial compression." *Materials Journal* 84.3, 1987. p 200-212.

[12] Torrenti J. M, Benajja E. H, Boulay C. "Influence of boundary conditions on strain softening in concrete compression test." *Journal of engineering mechanics* 119.12, 1993. p 2369-2384. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1993\)119:12\(2369\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1993)119:12(2369))

[13] Jansen D. C, Surendra P. S. "Effect of length on compressive strain softening of concrete." *Journal of Engineering Mechanics* 123.1, 1997. p 25-35. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:1\(25\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:1(25))

[14] Del Viso J. R, Carmona J. R, Ruiz G. "Influencia de la forma y del tamaño de la probeta en la resistencia a compresión de hormigones de alta resistencia." *Anales de la Mecánica de Fractura*. Vol. 2. 2007.

[15] EN 196-1. *Methods of testing cement - part 1: Determination of strength*. European Committee for Standardization; 2005.

[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] Garcés P, Fraile J, Vilaplana-Ortego E, et al. "Effect of carbon fibres on the mechanical properties and corrosion levels of reinforced portland cement mortars." *Cement and Concrete Research* 35.2, 2005. p 324-331. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.013>

[19] Kabay N. "Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber." *Construction and Building Materials* 50, 2014. p 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.040>

[20] Jiang C, Fan K, Wu F, et al. "Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete." *Materials & Design* 58, 2014. p 187-193. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.056>

[21] Calafat, M. E. "El aumento de la fragilidad con el tamaño en estructuras de hormigón." *Informes de la Construcción*, 50 1998, 456-457, 71-80. <https://doi.org/10.3989/ic.1998.v50.i456-457.888>

[22] Faccioni L, Conforti A, Minelli F, et al. "Improving shear strength of unreinforced masonry walls by nano-reinforced fibrous mortar coating." *Materials and structures* 48.8, 2015. p 2557-2574. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0337-0>

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).

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/9016-1.pdf

