

Influencia del efecto escala en los parámetros de diseño de hormigón reforzado con fibras

Influence of size effect on the design parameters of fibre reinforced concrete

Eduardo Galeote^{*,a}, Ana Blanco^b, Albert de la Fuente^c

^aDr. Ingeniero de la Construcción, Smart Engineering (Spin-off UPC), Investigador post-doctoral, eduardo.galeote@upc.edu

^bDra. Ingeniera de Caminos, Loughborough University, Profesora lectora, a.blanco-alvarez@lboro.ac.uk

^cDr. Ingeniero de Caminos, Universitat Politècnica de Catalunya, Profesor agregado, albert.de.la.fuente@upc.edu

RESUMEN

Debido a la reducción de la resistencia residual del hormigón reforzado con fibras (HRF) al incrementar el tamaño de un elemento, resulta de gran interés determinar el alcance del efecto escala para el cálculo de los parámetros del modelo constitutivo. Para ello, se han realizado ensayos de flexotracción en probetas de tres dimensiones planteando el uso de la rotación de la probeta como alternativa a la abertura de fisura para establecer los valores f_{R1} y f_{R3} del modelo constitutivo. Tras comparar los resultados experimentales con una simulación por análisis inverso, se observa que la utilización de la rotación de la probeta en lugar de la abertura de fisura lleva a resultados menos influenciados por el efecto escala.

ABSTRACT

As a result of the reduction of the residual strength of fibre reinforced concrete (FRC) while increasing the dimension of an element, it becomes of great interest to determine the influence of size effect on the constitutive model parameters. For this, bending tests have been conducted on specimens of three dimensions suggesting the use of the rotation of the specimen instead of the crack opening to assess f_{R1} and f_{R3} of the constitutive model. After comparing the experimental results with a simulation through an analytical back-calculation model, the results show that considering the rotation of the specimen leads to results less influenced by the size effect than those obtained when considering the crack opening.

PALABRAS CLAVE: HRF, efecto escala, ecuación constitutiva, diseño, análisis inverso

KEYWORDS: FRC, size effect, constitutive law, design, back-calculation

1. Introducción

El *fib* Model Code 2010 (MC2010) incorpora recomendaciones de diseño para hormigón reforzado con fibras (HRF). En este aspecto, la ley constitutiva para HRF presente en el MC2010 define el comportamiento post-fisuración mediante una relación tensión-deformación que involucra tanto el comportamiento de *softening* como el de *hardening*. No obstante, a pesar de la presencia del efecto escala en el hormigón y su resistencia, la mayor

parte de los códigos y recomendaciones de diseño asumen que el comportamiento del hormigón sigue las teorías clásicas de elasticidad y plasticidad [1]. Además, en el caso del HRF, el hecho de ser un material relativamente nuevo introducido con fines estructurales, hace que generalmente se asuma una ausencia del efecto escala. Así, salvo las recomendaciones de RILEM o la normativa alemana (DVB), que sí incluyen un parámetro para considerar el efecto

escala en HRF, se hace necesario investigar en el modo en que tal efecto debe tenerse en cuenta.

Los parámetros que definen la ley constitutiva del MC2010 se obtienen mediante ensayos de flexión a tres puntos en probetas de dimensiones estandarizadas. Sin embargo, estudios anteriores han mostrado la posibilidad de utilizar vigas de pequeño tamaño para caracterizar el HRF [2] dadas las ventajas que presentan en términos de manejabilidad y ahorro de material. Por ello, se ha llevado a cabo una campaña experimental con cuatro dosificaciones de HRF con contenidos de 90 y 190 kg/m³. Para cada dosificación, se fabricaron vigas de tres dimensiones para ser ensayadas a flexotracción y determinar los parámetros de la resistencia residual. Estos parámetros se utilizan para calcular la ecuación constitutiva de HRF y obtener las curvas resistencia-abertura de fisura mediante análisis inverso.

Los resultados experimentales muestran que existe una clara influencia de las dimensiones de las probetas en la resistencia residual del HRF. Asimismo, los resultados del análisis inverso mostraron un elevado nivel de semejanza al ser comparados con las curvas experimentales al determinar los parámetros de la ecuación constitutiva del HRF considerando aberturas de fisura proporcionales y rotaciones constantes. Estos resultados resultan razonables dado que, de este modo, las deformaciones se mantienen constantes y equivalentes para las distintas dimensiones de probetas.

2. Campaña experimental

2.1 Materiales y probetas

Se han fabricado hormigones en base a cuatro dosificaciones de HRF con contenidos de fibra de 90 y 190 kg/m³ de fibras y relaciones agua-cemento (a/c) de 0.16 y 0.23. El incremento en el contenido de fibras se ha realizado reemplazando un volumen equivalente de arena silíceo para mantener constante el

contenido de cemento [3]. Asimismo, se ha añadido nanosílice en un contenido del 5% sobre el peso de cemento (s.p.c.). El menor contenido de agua de las dosificaciones M90A y M190A respecto a las dosificaciones M90B y M190B se ha compensado mediante un aumento del contenido de superplastificante. Los detalles de las dosificaciones se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Dosificaciones [kg/m³].

Materiales	M90A	M190A	M90B	M190B
CEM I 52.5R	800	800	800	800
Arena silíceo 3 – 4 mm	1131	1098	1129	1098
Filler (CaCO ₃)	200	200	200	200
Agua	129	129	185	185
Nanosílice (s.p.c.)	5%	5%	5%	5%
Superplastif. (s.p.c.)	4%	4%	2%	2%
Fibras de acero	90	190	90	190

Se han utilizado microfibras de 13 mm de longitud debido a las reducidas dimensiones de las probetas de menor tamaño. La utilización de microfibras conlleva un incremento del número de fibras por unidad de volumen, reduciendo así la dispersión de los resultados [4] debido a una mayor homogeneidad en el número de fibras en la cara de fractura. Las propiedades y características de las microfibras utilizadas en esta campaña experimental se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de las fibras.

Característica	Microfibra de acero
Geometría	Recta
Longitud [mm]	13
Diámetro [mm]	0.20
Resistencia [MPa]	2750
Módulo elástico [GPa]	200



Tabla 3. Caracterización mecánica de las cuatro dosificaciones.

Parámetro	M90A		M190A		M90B		M190B	
	Promedio [MPa]	CV [%]	Promedio [MPa]	CV [%]	Promedio [MPa]	CV [%]	Promedio [MPa]	CV [%]
f_{cm}	115.9	0.7	117.2	0.5	108.8	2.4	100.3	6.8
E_{cm}	36337	0.5	37674	0.5	32807	0.3	34095	9.3
f_{LOP}	8.02	6.5	9.54	6.8	7.86	2.3	8.16	-
f_{R1}	14.58	5.8	17.83	7.6	12.06	6.9	16.35	-
f_{R2}	14.63	4.0	16.96	2.7	11.99	4.0	15.75	-
f_{R3}	13.03	3.8	14.73	4.6	10.36	3.9	13.00	-
f_{R4}	11.18	3.7	11.99	4.3	8.69	3.6	10.37	-

Los resultados de la caracterización de las cuatro dosificaciones se muestran en la Tabla 3. Para cada dosificación se han fabricado 3 probetas cúbicas de 150×150 mm y 3 probetas cilíndricas de 150×300 mm. Por otro lado, se produjeron 3 probetas prismáticas de dimensiones 150×150×600 mm, 6 probetas de 100×100×400 mm y 9 probetas de 40×40×160 mm, resultando así en un total de 108 probetas prismáticas de 3 dimensiones diferentes. Las probetas cúbicas se emplearon para determinar la resistencia a compresión de acuerdo con las indicaciones de la normativa EN 12390-3, las probetas cilíndricas se utilizaron para obtener el módulo de elasticidad de acuerdo con la norma EN 12390-13 y con las probetas prismáticas se realizaron ensayos a flexotracción siguiendo la norma EN 14651 para obtener la resistencia residual. Los ensayos a flexotracción de las vigas de menores dimensiones se realizaron manteniendo constantes las relaciones canto-luz y canto-entalla en vigas de 150×150×600 mm.

3. Resultados

3.1 Resistencia post-fisuración

El ensayo a flexotracción se ha realizado en probetas de tres dimensiones con el objetivo de analizar la influencia del tamaño de probeta en la resistencia residual. Para comparar la resistencia residual media de las vigas de distintos tamaños, los resultados se han expresado en términos de resistencia-rotación.

El planteamiento de utilizar la rotación como parámetro alternativo al CMOD en la comparación de la resistencia de probetas de distintas dimensiones ha sido realizado por otros autores [2]. Las curvas resistencia-rotación (θ) de la Figura 1 muestran un comportamiento de *hardening* y una clara influencia del tamaño de probeta en la resistencia residual.

En línea con los resultados de investigaciones anteriores [5,6], la resistencia de las dosificaciones M90B y M190B se ha visto reducida a medida que la dimensión de la probeta aumenta. No obstante, dicha tendencia no ha podido ser identificada de manera clara para las dosificaciones M90A y M190A. En M90A, la resistencia residual de las probetas de mayores dimensiones fue menor que en las probetas de menor tamaño a pesar que hasta una rotación de 0.006 rad los resultados en las tres dimensiones de probetas fueron similares. En M190A, la mayor resistencia se alcanzó en las probetas de 100 mm, mientras que la menor resistencia se obtuvo en las probetas de 150 mm. A diferencia de M90A, M90B o M190B, la probeta de menor tamaño (40 mm) de la dosificación M190A presentó una resistencia inferior a la obtenida en la probeta de 100 mm y mayor que la obtenida para la de 150 mm.

El valor medio de f_{LOP} y de la resistencia máxima de las cuatro dosificaciones de HRF se muestran en la Figura 2 de acuerdo con la dimensiones de cada probeta. La tendencia general indica una reducción de ambas resistencias a medida que aumenta el tamaño de probeta.

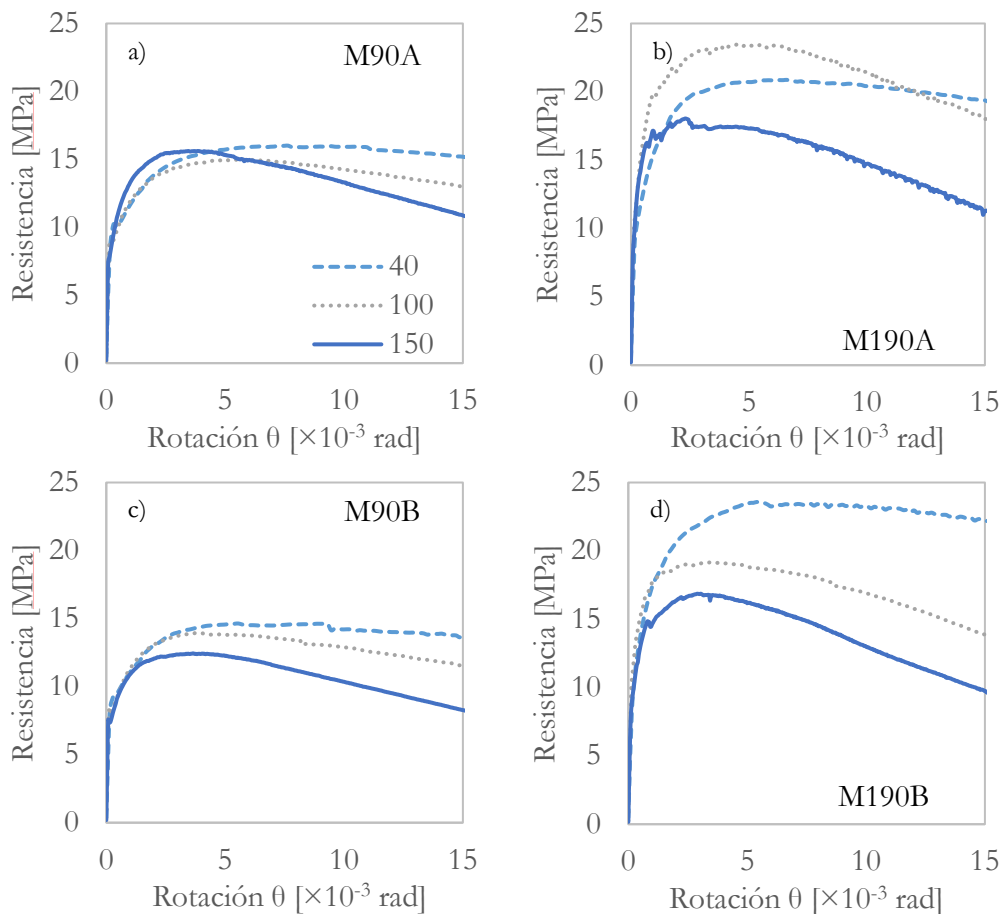


Figura 1. Resistencia residual de M90A, M190A, M90B y M190B.

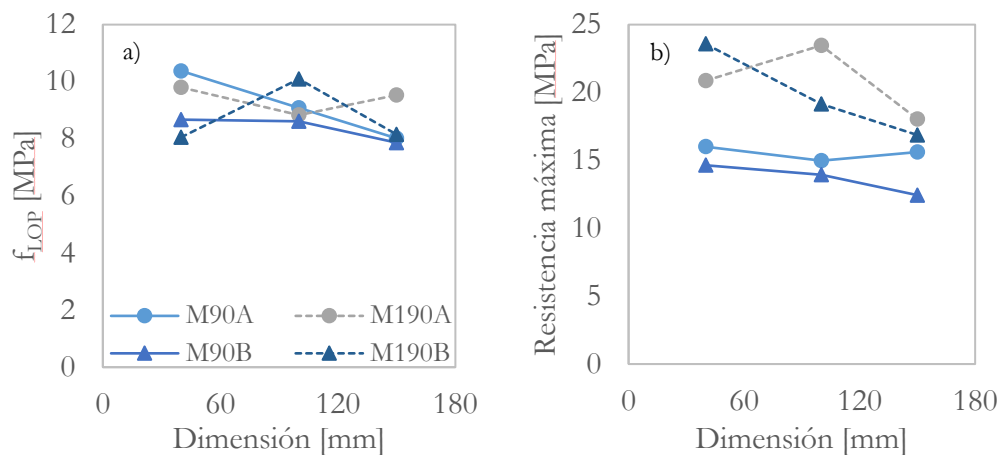


Figura 2. Efecto escala en a) f_{LOP} y b) resistencia máxima.

La incorporación de distintos contenidos de fibras no muestra una influencia significativa en f_{LOP} , puesto que dicha resistencia está principalmente influenciada por las propiedades de la matriz de hormigón. Nótese que en las probetas de menor tamaño, las dosificaciones M90A y M190A presentaron resistencias f_{LOP} superiores que en las dosificaciones M90B y M190B debido a las diferencias en la relación a/c. Asimismo, la menor resistencia a de las

dosificaciones con 190 kg/m³ de fibras con respecto a las dosificaciones con 90 kg/m³, confirma que un incremento del contenido de fibras no supone una mejora de la resistencia de fisuración f_{LOP} . De hecho, la disminución de f_{LOP} en M190A y M190B respecto a M90A y M90B puede ser consecuencia de una mayor porosidad introducida en la matriz debido al incremento del contenido de fibras [7,8].

Los resultados de la Figura 2b muestran un claro incremento de la máxima resistencia residual con el aumento de fibras [9,10]. Los resultados también indican la influencia de la relación a/c en la resistencia residual atribuida a una mayor adherencia entre la interfaz matriz-fibra para relaciones a/c menores [11].

La rotación en la resistencia residual máxima se determinó para las cuatro dosificaciones y las tres dimensiones de probeta. La Figura 3 muestra la relación rotación-dimensión de probeta, donde se observa una tendencia decreciente de la relación según aumenta la dimensión del elemento ensayado.

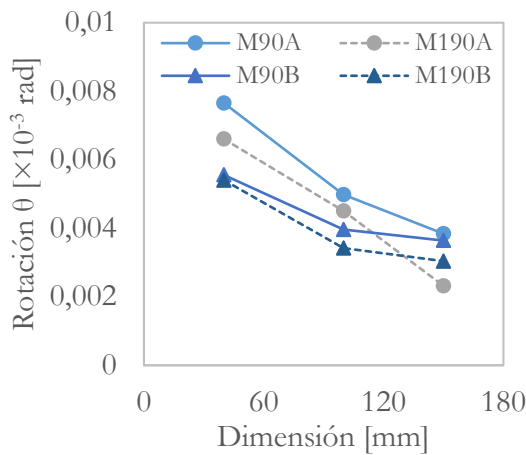


Figura 3. Efecto escala en la capacidad de rotación en máxima resistencia residual

La rotación para la máxima resistencia residual aumenta para tamaños de probeta menores, lo que se atribuye a la dependencia mutua de la rotación con la resistencia residual máxima: la aparición de fisuras activa el *pull-out* de las fibras y, para una misma rotación, la abertura de fisura en probetas de mayor tamaño es mayor que en probetas de dimensiones más reducidas. Así, la fuerza externa necesaria para producir el arrancamiento de la fibra es mayor en las probetas de menor dimensión. Por ello, la rotación en elementos menores incrementa respecto a los de mayor dimensión para alcanzar una fuerza de *pull-out* equivalente y la máxima resistencia residual.

3.2 Análisis inverso

Un análisis inverso basado en el *Analysis of Evolutionary Sections* (AES) [12] en el que se divide la sección de hormigón en número n de capas se ha utilizado para determinar de forma analítica el comportamiento a flexión del HRF. Para la utilización del AES, se asumen las siguientes consideraciones:

1. Las secciones permanecen planas tras las cargas o deformaciones impuestas.
2. Compatibilidad de deformaciones: se asume adherencia perfecta entre matriz y fibras.
3. Las deformaciones producidas por cortante se consideran despreciables y no son consideradas en el cálculo.

El modelo constitutivo para HRF del MC2010 ha sido implementado en AES utilizando los datos experimentales de los ensayos de caracterización de las 4 amasadas. Los parámetros de resistencia residual del modelo constitutivo (f_{FTS} , f_{FTU}) se obtienen a través de las resistencias f_{R1} y f_{R3} , para lo que se han considerado dos enfoques alternativos para su cálculo. El primer enfoque (Figura 4a) considera la abertura de fisura total (FCO, *full crack opening*) de 0.5 y 2.5 mm independientemente del tamaño de la probeta. El segundo enfoque (Figura 4b) propone la utilización de una abertura de fisura equivalente (ECO, *equivalent crack opening*) dependiente de la profundidad de la probeta.

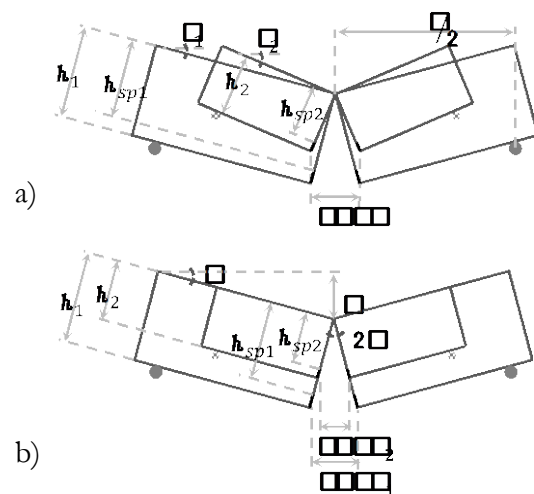


Figura 4. Enfoques a) FCO y b) ECO.

Ambos enfoques tienen una repercusión directa sobre las deformaciones ε_{SLS} y ε_{ULS} dado que estos parámetros se calculan a través de la abertura de fisura y el canto útil de la pieza. El mecanismo FCO lleva a un CMOD comparativamente mayor en probetas de menores dimensiones. En este caso, un CMOD constante conlleva mayores flechas y mayores deformaciones ε_{SLS} y ε_{ULS} cuando se reduce el tamaño de la probeta (Figura 5a). Por otro lado, el enfoque ECO lleva a flechas y deformaciones idénticas para elementos de distintas dimensiones con valores variables de $CMOD_1$ y $CMOD_2$ en función del tamaño de viga (Figura 5b).

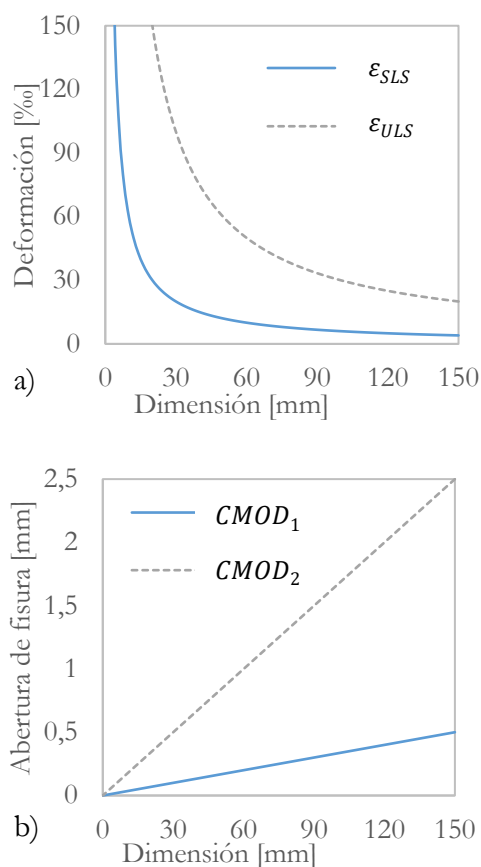


Figura 5. a) Deformación en FCO y b) abertura de fisura en ECO.

3.3 Comparación de enfoques

Los parámetros de la ecuación constitutiva presentan distintos valores dependiendo del enfoque empleado para su cálculo y tienen una influencia directa en los resultados del AES. La

Figura 6 muestra las curvas experimentales de las cuatro amasadas comparadas con las curvas analíticas obtenidas mediante el AES utilizando el FCO y el ECO. Los resultados se muestran mediante una relación resistencia-rotación hasta 0.02 rad, que corresponde a deformaciones $\varepsilon = 40\%$ en la entalla. Las probetas de 150 mm presentan una única curva analítica dado que para este tamaño de probeta ambos enfoques (FCO y ECO) coinciden.

Una comparación entre las curvas analíticas obtenidas mediante los enfoques FCO y ECO muestran que, debido al cálculo de la ecuación constitutiva con ECO, las curvas analíticas resistencia-rotación presentan un ajuste más preciso a los resultados experimentales. Estas diferencias y similitudes se basan tanto en las deformaciones como en las tensiones asociadas a cada enfoque.

Hasta el punto de aparición de la primera fisura, no aparecen diferencias entre los resultados analíticos y los resultados experimentales dado que ambos enfoques quedan definidos del mismo modo de acuerdo a las propiedades del hormigón no fisurado sometido a tracción. A partir de este punto, y en la fase fisurada, las diferencias en la ley constitutiva muestran las variaciones entre los resultados experimentales y los analíticos.

Las diferencias entre ambos enfoques se acentúan a medida que se reduce el tamaño de probeta, especialmente en las de dimensiones de 40 mm, y según el contenido de fibras. Para contenidos de 90 kg/m^3 , los resultados de FCO y ECO presentan los mismos valores hasta una rotación de 0.005 rad. A partir de este punto, FCO muestra una mayor resistencia que ECO y el resultado experimental, siendo los resultados de estos dos últimos muy similares. Para contenidos de 190 kg/m^3 , FCO subestima la resistencia hasta una rotación de aproximadamente 0.007 rad, mientras que la sobreestima a partir de esta rotación. Por el contrario, ECO muestra un buen ajuste de los resultados a lo largo de toda la curva.

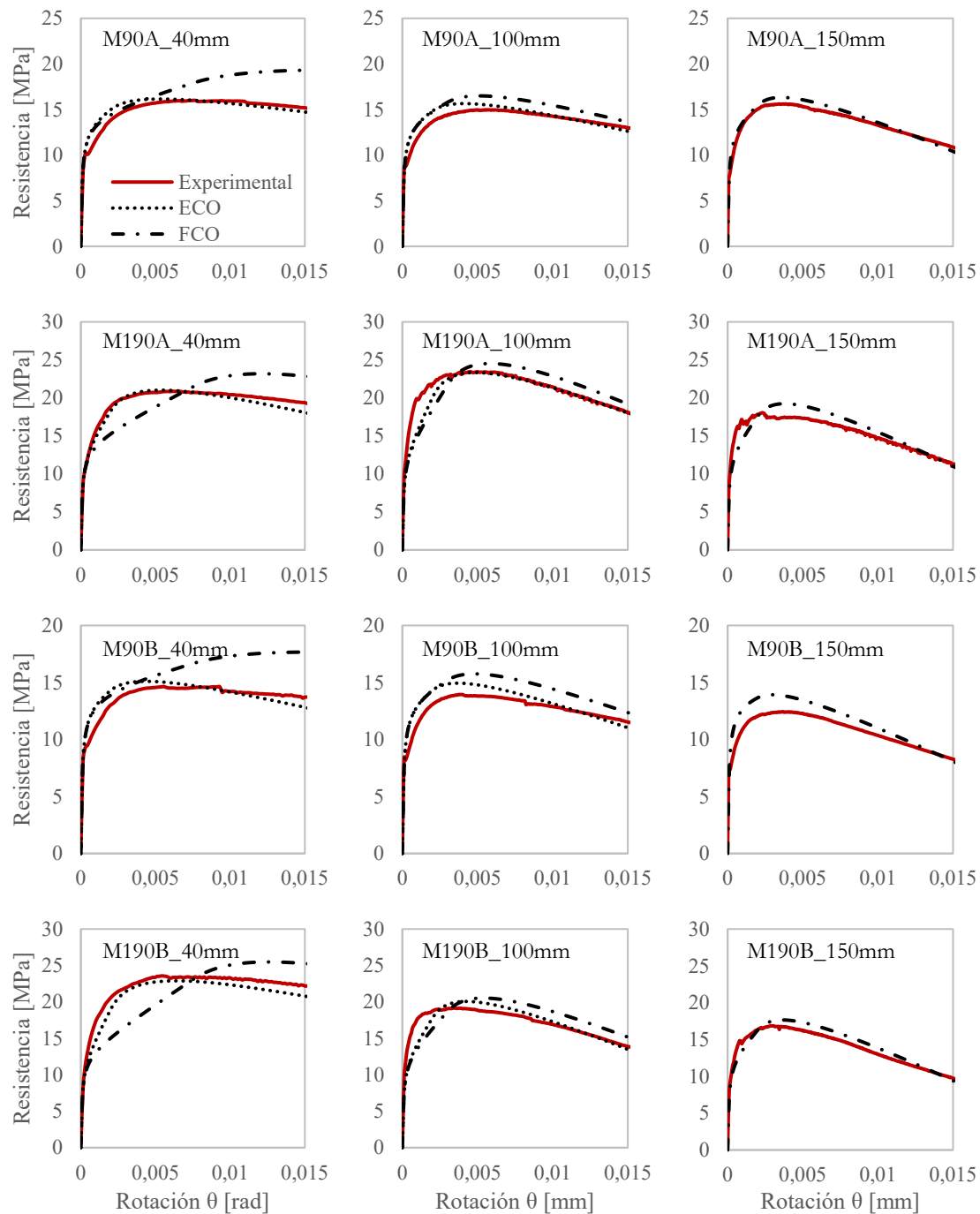


Figura 6. Comparación de resultados analíticos y experimentales.

4. Conclusiones

En base a los resultados de la campaña experimental, se ha observado la influencia del efecto escala en el comportamiento a flexotracción del HRF. Asimismo, los parámetros de la ecuación constitutiva del MC2010 se han calculado empleando probetas de diferentes dimensiones y los resultados analíticos obtenidos a través de un análisis

inverso fueron comparados con los resultados experimentales. De acuerdo con los resultados obtenidos, se derivan las siguientes conclusiones:

- Se observa una clara influencia del tamaño de probeta en la resistencia residual del HRF. La resistencia post-fisuración se ve reducida a medida que aumenta el tamaño del elemento. Dicha tendencia se hace más evidente para contenidos a/c elevados.

- El contenido de fibras tiene una fuerte influencia en la resistencia residual máxima. La rotación a la que se alcanza la resistencia residual máxima se ve reducida a medida que el tamaño del elemento incrementa. Este efecto se atribuye a la mayor rotación requerida en probetas de menores dimensiones para alcanzar una fuerza *pull-out* de las fibras equivalente a la de las mayores probetas.
- Los resultados analíticos del AES presentan un ajuste más preciso a las curvas experimentales cuando se utiliza el enfoque ECO para determinar los parámetros de la ecuación constitutiva, especialmente para elementos de menores dimensiones. En las probetas de mayores dimensiones los resultados de ambos enfoques ECO y FCO coinciden.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad a través del proyecto SAES (BIA2016-78742-C2-1-R). El primer autor agradece el apoyo económico del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través de la beca FPU.

Referencias

- [1] C.G. Hoover, Z.P. Bažant, Cohesive crack, size effect, crack band and work-of-fracture models compared to comprehensive concrete fracture tests, *Int. J. Fract.* 187 (2014) 133–143.
- [2] G. Giaccio, J.M. Tobes, R. Zerbino, Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete, *Cem. Concr. Compos.* 30 (2008) 297–306.
- [3] K. Wille, S. El-Tawil, A.E. Naaman, Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading, *Cem. Concr. Compos.* 48 (2014) 53–66.
- [4] L. Vandewalle, Hybrid fiber reinforced concrete, in: M.S. KONSTAGDOUTOS (Ed.), *Meas. Monit. Model. Concr. Prop.*, Springer Netherlands, Dordrecht, 2006: pp. 77–82.
- [5] D.L. Nguyen, D.J. Kim, G.S. Ryu, K.T. Koh, Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete, *Compos. Part B Eng.* 45 (2013) 1104–1116.
- [6] D.-Y. Yoo, N. Banthia, J.-M. Yang, Y.-S. Yoon, Size effect in normal- and high-strength amorphous metallic and steel fiber reinforced concrete beams, *Constr. Build. Mater.* 121 (2016) 676–685.
- [7] R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC), *Cem. Concr. Res.* 56 (2014) 29–39.
- [8] T.A. Söylev, T. Özturan, Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction, *Constr. Build. Mater.* 73 (2014) 67–75.
- [9] R. Zerbino, J.M. Tobes, M.E. Bossio, G. Giaccio, On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete, *Cem. Concr. Compos.* 34 (2012) 191–200.
- [10] B. Zhou, Y. Uchida, Influence of flowability, casting time and formwork geometry on fiber orientation and mechanical properties of UHPFRC, *Cem. Concr. Res.* 95 (2017) 164–177.
- [11] J.S. Lawler, D. Zampini, S.P. Shah, Microfiber and Macrofiber Hybrid Fiber-Reinforced Concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 17 (2005) 595–604.
- [12] A. de la Fuente, A. Aguado, C. Molins, J. Armengou, Numerical model for the analysis up to failure of precast concrete sections, *Comput. Struct.* 106–107 (2012) 105–114.