

# OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DE CALIDAD PARA HORMIGÓN CON FIBRAS MEDIANTE EL ENSAYO BARCELONA Y EL MÉTODO INDUCTIVO

**Eduardo Galeote Moreno**

Dr. Ingeniero de Caminos  
Universitat Politècnica de Catalunya  
Investigador post-doc  
eduardo.galeote@upc.edu

**Albert de la Fuente Antequera**

Dr. Ingeniero de Caminos  
Universitat Politècnica de Catalunya  
Profesor Agregado  
albert.de.la.fuente@upc.edu

**Antonio Aguado de Cea**

Dr. Ingeniero de Caminos  
Universitat Politècnica de Catalunya  
Catedrático de Universidad  
antonio.aguado@upc.edu

## RESUMEN

El ensayo de flexotracción a tres puntos es uno de los métodos más empleados en la caracterización de la resistencia residual y el control de calidad del hormigón reforzado con fibras (HRF). Sin embargo, la elevada variabilidad de los resultados junto con la complejidad de dicho ensayo ha motivado la aparición de nuevos métodos para determinar resistencia post-fisuración del HRF. En este aspecto, el ensayo Barcelona surge como alternativa para la caracterización del HRF debido a la menor variabilidad de sus resultados, el menor consumo de material en la fabricación de probetas y la mayor simplicidad del ensayo. Asimismo, resulta de gran relevancia controlar el contenido de fibras en el HRF dada su influencia en la resistencia residual. Por este motivo, se propone el método inductivo como herramienta complementaria para determinar el contenido de fibras en el HRF. Así, el principal objetivo de este estudio es mostrar una metodología orientada a la utilización del ensayo Barcelona junto con el inductivo para el control de calidad del HRF especialmente en obras de grandes dimensiones.

**PALABRAS CLAVE:** control de calidad, hormigón con fibras, ensayo Barcelona, método inductivo, ensayo de flexotracción

## 1. INTRODUCCIÓN

El ensayo de flexotracción a tres puntos es ampliamente utilizado en el diseño y caracterización del HRF dada la representatividad de la geometría de las probetas el Modo I de fractura asociado a la propagación de la fisura. Sin embargo, tal como sugiere la normativa belga NBN B15-238, el ensayo de flexotracción es un método poco apropiado para la ejecución sistemática del control de calidad del HRF. Esto se debe esencialmente a la elevada dispersión de los resultados, que puede alcanzar habitualmente valores del 20% [1,2]. Asimismo, la complejidad del ensayo, el tamaño de las probetas y la necesidad de equipos de alta precisión con sistema de circuito cerrado dificulta y encarece el coste de este ensayo.

Con el objeto de solventar los problemas que surgen con el ensayo de flexotracción, el *fib* Model Code 2010 [3] permite la utilización de ensayos alternativos en cuanto éstos muestren factores de correlación adecuados con el ensayo de flexotracción. En este aspecto, el ensayo Barcelona [2] se

## Nuevos hormigones

presenta como un método para agilizar y facilitar el control de calidad dada la mayor simplicidad del ensayo y la mejora en la repetitividad de los resultados [4].

Por otro lado, debido a la influencia de las fibras en la resistencia residual del HRF, la normativa UNE-EN 14721:2006 describe el procedimiento para determinar el contenido de fibras de acero en HRF. De acuerdo al procedimiento establecido, el hormigón fresco debe someterse a un lavado y el hormigón endurecido debe triturarse para extraer y separar las fibras de la matriz de hormigón. Esto resulta un proceso largo y laborioso que limita el número de probetas de las que puede determinarse el contenido de fibras. Por este motivo, se plantea el ensayo inductivo [5] como un método no destructivo que puede realizarse con gran celeridad y que proporciona el contenido de fibras mediante una ecuación calibrada que relaciona la inductancia con el contenido de fibras.

El objetivo principal de este estudio es describir una metodología para establecer una correlación entre el ensayo Barcelona y el ensayo de flexotracción. Asimismo, se muestra el procedimiento para determinar el contenido de fibras mediante el método inductivo, así como su proceso de calibración. En este aspecto, la correlación entre ensayos muestra una herramienta a utilizar para facilitar y abaratar los costes durante el control de calidad del HRF basado en la utilización del ensayo Barcelona. Este planteamiento está en consonancia con el *fib* Model Code 2010 y abre el camino a utilizar un procedimiento similar para establecer correlaciones entre otro tipo de ensayos.

## 2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

### 2.1. Probetas y ensayos

Se produjeron tres amasadas de la misma dosificación de hormigón para fabricar probetas prismáticas de 150x150x600mm y probetas cúbicas de 150x150 mm para ensayar mediante el ensayo de flexotracción y el ensayo Barcelona, respectivamente. Para la primera amasada (A1), se fabricaron 10 probetas prismáticas y 20 probetas cúbicas. Para las dos amasadas adicionales (A2 y A3), se fabricaron 5 probetas prismáticas y 10 probetas cúbicas.

El ensayo a flexotracción se hace de acuerdo a la normativa EN 14651, realizando una entalla en el centro de vano de la viga, debilitando así la sección central donde se aplica la carga. Un dispositivo CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) se sitúa en la entalla entre dos láminas de acero para recoger simultáneamente los datos de abertura de fisura y carga aplicada. El ensayo se controla mediante el CMOD estableciendo una velocidad de abertura de fisura de 0.05 mm/min hasta que la fisura alcanza un ancho de 0.10 mm. A partir de este punto, la velocidad se aumenta a 0.20 mm/min hasta alcanzar una abertura de fisura final de 4 mm.

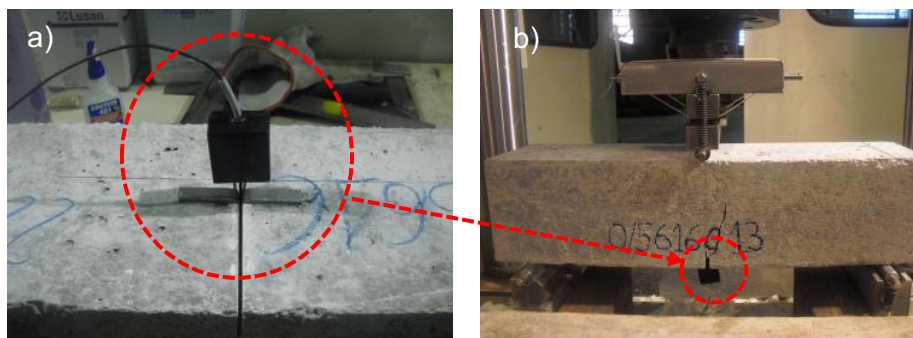


Figura 1 – a) CMOD y b) configuración general del ensayo de flexotracción

El ensayo inductivo es un método de reciente desarrollo para la caracterización de hormigón con fibras de acero [5,6] mediante el que puede determinarse la orientación y el contenido de fibras en probetas cúbicas o cilíndricas. Para este ensayo se utiliza un cilindro plástico alrededor del cual hay enrollados filamentos de cobre o aluminio que constituyen el sensor del elemento a modo de bobina. A través de dicha bobina circula un corriente eléctrica que genera un campo magnético alrededor del dispositivo. Este campo magnético interacciona con las fibras del hormigón, produciendo una variación en el campo magnético que da como resultado una variación en la inductancia medida.



Figura 2 - Equipo para ensayo inductivo

Tras realizar el ensayo inductivo en las probetas cúbicas de las tres amasadas, se realiza el ensayo Barcelona de acuerdo con el proceso descrito en la norma UNE 83515 y como se muestra en la Figura XX. Para este ensayo se colocan concéntricamente dos punzones cilíndricos en la cara superior e inferior de la probeta cúbica. Dichos punzones tienen un diámetro de  $\frac{1}{4}$  del diámetro del cilindro inscrito en la probeta cúbica y una altura de 25 mm. La prensa hidráulica transmite la carga a la probeta a través de los punzones a una velocidad constante de 0.5 mm/min durante todo el ensayo.

La carga a compresión aplicada a través de los punzones genera un estado de carga triaxial desde el centro al borde de la probeta. Esto produce un incremento del diámetro de la probeta que lleva a la rotura del hormigón cuando se alcanza la tensión de fisuración iniciando la activación de las fibras en la etapa post-fisuración. Durante esta etapa, los fragmentos en los que la probeta queda dividida tras la rotura permanecen unidos debido a la presencia de fibras.

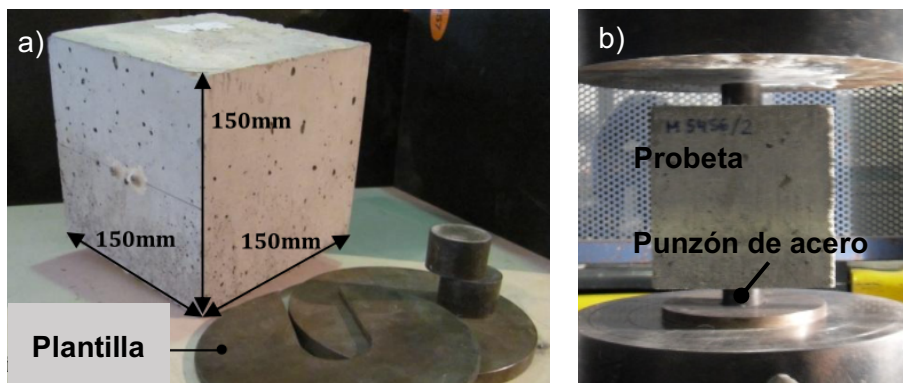


Figura 3 - a) Probeta cilíndrica y punzones; b) configuración del ensayo Barcelona

Para calibrar el ensayo inductivo con el tipo de fibra utilizado en esta campaña experimental se trituraron 6 probetas previamente ensayadas mediante el método Barcelona. Las fibras de estas probetas fueron separadas del hormigón y pesadas para determinar el contenido. Una correlación

### Nuevos hormigones

entre el contenido de fibras en cada probeta y la inductancia medida mediante el ensayo inductivo proporciona el contenido de fibras en el resto de probetas.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Resistencia residual

El promedio de los resultados de los ensayos de flexotracción correspondientes a las tres amasadas se muestran en la Tabla 1. En dicha tabla aparecen las resistencias residuales para aberturas de fisura de 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5 mm ( $f_{R1}$ ,  $f_{R2}$ ,  $f_{R3}$  y  $f_{R4}$ , respectivamente), juntamente con el coeficiente de variación de cada parámetro. Los resultados de los ensayos Barcelona realizados en probetas cúbicas se muestran en la Tabla 2. Estos resultados muestran el valor medio de la resistencia residual para desplazamientos verticales de 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5 mm ( $f_{R0.5}$ ,  $f_{R1.5}$ ,  $f_{R2.5}$  y  $f_{R3.5}$ , respectivamente), así como la dispersión asociada a cada una de dichas resistencia

Parámetro	A1		A2		A3		A1-A2-A3	
	Promedio	CV %	Promedio	CV %	Promedio	CV %	Promedio	CV %
$f_{R1}$ [MPa]	2.36	22.2%	3.10	23.6%	3.02	23.9%	2.83	14.4%
$f_{R2}$ [MPa]	2.49	26.1%	3.06	24.8%	3.17	25.6%	2.91	12.7%
$f_{R3}$ [MPa]	2.39	26.9%	2.83	22.1%	3.03	23.8%	2.75	11.8%
$f_{R4}$ [MPa]	2.27	27.5%	2.60	23.5%	2.80	23.2%	2.56	10.4%

Tabla 1 - Resultados de flexotracción de A1, A2 y A3

Parámetro	A1		A2		A3		A1-A2-A3	
	Promedio	CV %	Promedio	CV %	Promedio	CV %	Promedio	CV %
$f_{R0.5}$ [MPa]	1.48	14.0%	1.54	9.1%	1.47	23.3%	1.50	2.5%
$f_{R1.5}$ [MPa]	1.05	17.7%	1.02	12.0%	0.98	22.6%	1.02	3.5%
$f_{R2.5}$ [MPa]	0.86	19.0%	0.75	19.0%	0.80	20.8%	0.80	6.9%
$f_{R3.5}$ [MPa]	0.74	21.2%	0.60	24.6%	0.68	21.3%	0.67	10.4%

Tabla 2 - Resultados ensayo Barcelona de A1, A2 y A3

Los resultados de flexotracción muestran resistencias de A1 menores que en A2 y A3. No obstante, y a excepción de  $f_{R1}$ , A1 presenta la mayor variabilidad entre las tres amasadas, aun cuando el coeficiente de variación en A2 y A3 toma valores alrededor del 23% y 25%. Por otro lado, los resultados del ensayo Barcelona muestran las mayores resistencias en A1, con la excepción de  $f_{R0.5}$ . En comparación con los resultados del ensayo de flexotracción, los resultados del ensayo Barcelona muestran menores resistencias, hecho que se atribuye principalmente al diferente mecanismo de rotura que gobierna ambos ensayos y la diferencia entre áreas de fractura.

A pesar de las diferencias en los resultados entre amasadas, la media de las resistencias (A1-A2-A3) para ambos tipos de ensayo presentan una dispersión más reducida. Para el ensayo de flexotracción, esta dispersión se reduce al 12%, mientras que en los resultados del ensayo Barcelona la variabilidad media es del 5.8%. Tal reducción en la variabilidad de los resultados de diferentes amasadas indica la similitud entre ellas y la homogeneidad del material en la fabricación de distintas amasadas, indicando así un buen proceso de fabricación.

#### 3.2. Correlación entre ensayos

#### Nuevos hormigones

Para establecer una correlación entre los parámetros de ambos ensayos, es necesario plantear una ecuación empleando los resultados experimentales obtenidos a través del ensayo de flexotracción y el ensayo Barcelona. A partir de un análisis paramétrico se determina que mediante el uso de la carga y la energía del ensayo Barcelona para desplazamientos verticales de 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5 mm, es posible obtener el valor de la carga residual correspondiente al ensayo de flexotracción para aberturas de fisura de 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5 mm. Cada carga asociada a una abertura de fisura en el ensayo de flexotracción está relacionada con la carga y energía correspondiente al mismo valor de desplazamiento vertical del ensayo Barcelona, tal como se muestra en la Ecuación 1. Así, para obtener la carga residual del ensayo de viga asociado a una abertura de fisura de 0.5 mm ( $F_{3PBT,0.5}$ ), se utiliza la carga y la energía asociada a un desplazamiento vertical de 0.5 mm del ensayo Barcelona ( $F_{BCN,0.5}$  y  $E_{BCN,0.5}$ ).

$$F_{3PBT,i} = a \cdot F_{BCN,i} + b \cdot E_{BCN,i}^2 \quad (1)$$

En primera instancia, es necesario contar con los resultados de ambos ensayos para calibrar los parámetros  $a$  y  $b$  de la Ecuación 1, dado que dichos parámetros dependen de las propiedades del hormigón y de las fibras. En este aspecto, se han utilizado los resultados experimentales de A1 y A2 para la calibración de  $a$  y  $b$ , mientras que los resultados de A3 se han utilizado para verificar la correlación. Por ello, en lugar de utilizar únicamente los valores medios de A1 y A2, se han introducido en el análisis los resultados de todas las probetas ensayadas para incrementar el número de datos y mejorar la verosimilitud de la correlación mediante un mejor ajuste de los valores  $a$  y  $b$ .

En la amasada A1 se fabricaron 10 probetas para el ensayo de flexotracción y 20 probetas cúbicas para el ensayo Barcelona. Por este motivo, se ha calculado el promedio de cada par de probetas del ensayo Barcelona, obteniendo así 10 resultados del ensayo Barcelona con los que plantear una correlación con los 10 resultados del ensayo de flexotracción. En el caso de las probetas correspondientes a A2, se ha seguido un procedimiento análogo dado que se fabricaron 12 probetas para el ensayo Barcelona y 6 probetas para el ensayo de flexotracción. Los parámetros  $a$  y  $b$  obtenidos tras la calibración se muestran en la Tabla 3.

CMOD [mm]	$a$	$b$
0.5	$1.19 \cdot 10^{-1}$	$7.11 \cdot 10^{-4}$
1.5	$1.76 \cdot 10^{-1}$	$1.80 \cdot 10^{-4}$
2.5	$1.76 \cdot 10^{-1}$	$1.53 \cdot 10^{-4}$
3.5	$1.95 \cdot 10^{-1}$	$8.94 \cdot 10^{-5}$

**Tabla 3 - Parámetros de calibración de la correlación**

En la Figura 4 se muestran dos modelos de gráficos correspondientes a los resultados del ensayo de flexotracción y el ensayo Barcelona. La energía del ensayo Barcelona se calcula como el área bajo la curva carga-desplazamiento hasta el desplazamiento vertical especificado. En la Figura 4 se muestran los parámetros de ambos ensayos para un CMOD o un desplazamiento vertical de 0.5 mm, a pesar de que para otras aberturas o desplazamientos el procedimiento de cálculo es análogo.

## Nuevos hormigones

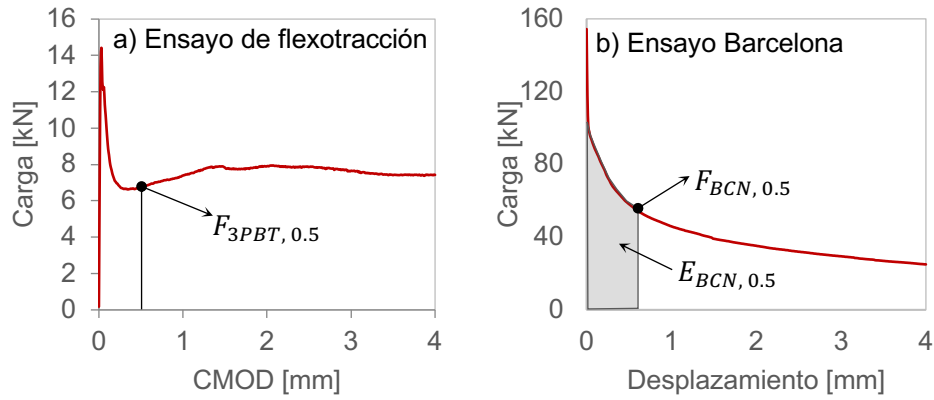


Figura 4 - Curvas de a) ensayo de flexotracción y b) ensayo Barcelona

Los valores en la Tabla 4 muestran los resultados experimentales del ensayo de flexotracción comparado con los resultados de la correlación obtenidos mediante los parámetros de la Tabla 3 y los resultados experimentales del ensayo Barcelona de A3. También se muestra un intervalo de confianza del 99% para cada carga y abertura de fisura de acuerdo con los resultados de la calibración.

CMOD [mm]	$F_{3PBT}^{EXP}$ [kN]	$F_{3PBT}^{CORR}$ [kN]	$CI_{99\%}$ [kN]
0.5	9.14	8.24	1.33
1.5	8.85	8.53	1.51
2.5	8.26	7.64	1.54
3.5	7.55	6.84	1.45

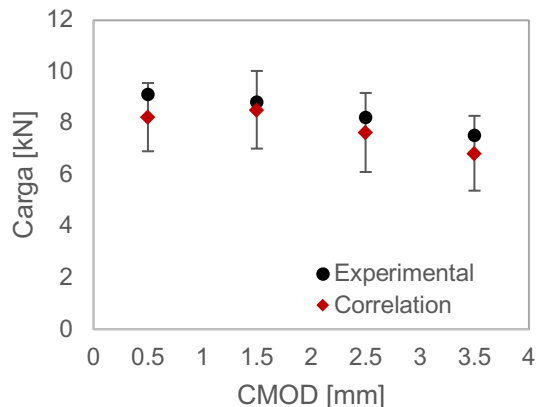


Tabla 4 - Resultados experimentales y de la correlación

En general, los resultados muestran una tendencia parecida entre los resultados experimentales y los de la correlación. Es necesario destacar que el valor medio experimental de los resultados del ensayo de flexotracción son ligeramente superiores a los resultados medios obtenidos mediante la correlación. Además, el valor mínimo del intervalo de confianza se puede considerar como un margen de seguridad que reduce el valor del resultado de la correlación para permanecer en el lado de la seguridad.

### 3.3. Determinación del contenido de fibras

La interacción entre las fibras de acero y el campo magnético generado por la bobina permite establecer una correlación entre inductancia y contenido de fibras. Para ello, se mide la inductancia en tres direcciones perpendiculares de una probeta que posteriormente debe ser triturada para obtener una correlación con el contenido real de fibras. Para este fin, se han utilizado 6 probetas de la amasada A1, cuyos resultados de inductancia y contenido de fibras se muestran en la Tabla 5.

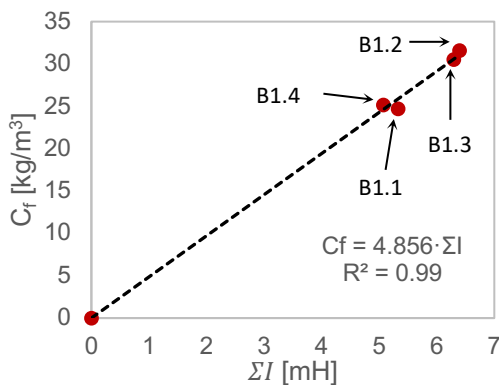


Identificación de la probeta	Dimensiones [mm]	$I_1$ [mH]	$I_2$ [mH]	$I_z$ [mH]	$\Sigma I_i$ [mH]	Contenido real de fibras [kg/m <sup>3</sup> ]
A1.1	150x150	2.30	2.27	0.76	5.33	24.7
A1.2	150x150	2.62	2.59	1.18	6.39	31.6
A1.3	150x150	2.47	2.40	1.42	6.29	30.5
A1.4	150x150	2.11	2.09	0.87	5.07	25.2
A1.5	150x150	2.48	2.44	0.85	5.77	29.4
A1.6	150x150	2.49	2.21	0.81	5.51	26.3

Tabla 5 - Resultados del ensayo inductivo y contenido de fibras

Los resultados muestran un contenido medio de fibras de 27.95 kg/m<sup>3</sup> con una variabilidad del 10.5%. Esta dispersión se atribuye principalmente a la heterogeneidad del material y la distribución aleatoria de las fibras en el hormigón. Esta heterogeneidad se ve reflejada en la producción de probetas, provocando que haya distintos contenidos de fibra en probetas de una misma amasada.

La relación entre inductancia y contenido de fibras se muestra en la Figura 5. El eje de abscisas representa la suma de las inductancias medidas en tres direcciones perpendiculares ( $\Sigma I = I_1 + I_2 + I_z$ ), mientras que el eje de ordenadas muestra el contenido de fibras ( $C_f$ ). Para establecer la correlación, se han utilizado los resultados de las inductancias y el contenido de fibras pesado de las probetas B1.1, B1.2, B1.3 y B1.4. Para verificar si dicha correlación se ajusta a los resultados experimentales se han utilizado las probetas B1.5 and B1.6. Estas probetas se han ensayado mediante el método inductivo y se ha obtenido el contenido de fibras estimado mediante la relación  $\Sigma I - C_f$ . Tras ello, las dos probetas se han triturado y se han extraído sus fibras con el fin de verificar si el contenido de fibras estimado se ajusta al contenido de fibras real. Los resultados de esta comparación se muestran en la Figura 5.



Probeta	Cont. real de fibras [kg/m <sup>3</sup> ]	Cont. estimado de fibras [kg/m <sup>3</sup> ]	Diferencia
B1.5	29.4	28.0	4.7%
B1.6	26.3	26.8	1.7%

Figura 5 - Relación  $\Sigma I - C_f$  y comparación entre contenido real y estimado de fibras en A1.5 and A1.6

La relación entre inductancia y contenido de fibras presenta un coeficiente de ajuste tal que  $R^2 = 0.99$ . Así, la diferencia entre el contenido de fibras real y estimado en las probetas B1.5 y B1.6 presenta una diferencia máxima del 4.7%. El contenido de fibras estimado en las probetas de las amasadas A2 y A3 se muestra en la Figura 6 junto con el contenido real medio de 27.95 kg/m<sup>3</sup> obtenido como referencia en las probetas de la amasada A1. Como se observa en la Figura 6, los contenidos de fibras en las probetas A2 presentan valores superiores e inferiores al valor real promedio, mientras que las probetas de la amasada A3 muestran contenidos de fibra generalmente menores al promedio del contenido real de fibras medido en A1.

**Nuevos hormigones**

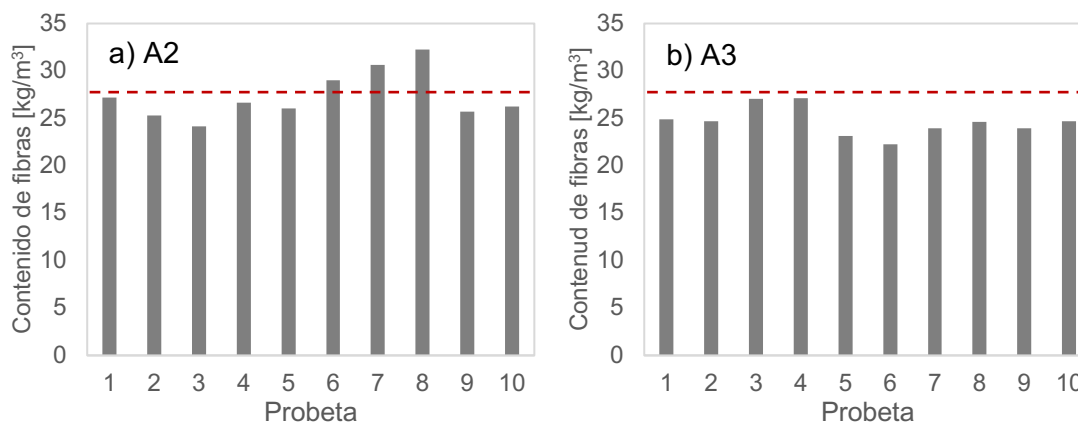


Figura 6 - Contenido de fibras en probetas a) A2 y b) A3

Así, los resultados muestran contenidos medios de fibras de 27.32 y 24.63 kg/m<sup>3</sup> para A2 y A3, respectivamente. La dispersión en ambos casos alcanza valores de 9.3% y 6.2% considerando las 10 probetas analizadas por cada amasada. La variabilidad en los contenidos estimados es debida a dos factores principales: la propia variabilidad del ensayo inductivo y las diferencias en contenidos de fibras atribuida a la heterogeneidad del HRF.

#### 4. CONCLUSIONES

La simplicidad del ensayo Barcelona muestra una clara ventaja frente a la ejecución del ensayo de flexotracción. Las dimensiones más reducidas de las probetas y la ausencia de preparación previa de las probetas permite la reducción del tiempo total de ensayo, su simplificación y una reducción de los costes asociados. En este último aspecto, el ensayo Barcelona puede realizarse en equipos convencionales de ensayo a compresión sin necesidad de sistema de circuito cerrado ni dispositivo de control de abertura de fisura (CMOD). En base a los resultados de la correlación y la estimación del contenido de fibras mediante el método inductivo, se derivan las siguientes conclusiones:

- Las diferencias entre el valor medio de las resistencias experimentales con las resistencias de la correlación presentan diferencias comprendidas entre el 3.6% y el 9.8%. Para este caso de estudio, estas diferencias resultaron incluso menores que la dispersión de los resultados de flexotracción entre las distintas amasadas.
- Los intervalos de confianza muestran diferencias máximas de 1.5 kN en los resultados de las correlaciones. Estos intervalos de confianza pueden utilizarse para reducir los valores de la correlación y mantenerse en el lado de la seguridad con un 99% de probabilidad de que el resultado experimental del ensayo de flexotracción sea superior al de la correlación.
- Los parámetros  $a$  y  $b$  de la correlación alcanzan valores más precisos cuanto mayor es la muestra de resultados experimentales utilizados para su calibración. En este aspecto, resulta importante disponer de un elevado número de datos para calibrar dichos parámetro mejorar los resultados y la fiabilidad de la correlación.
- El contenido de fibras puede estimarse mediante el método inductivo con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.99$ . Las diferencias en los contenidos de fibras se atribuye principalmente al carácter heterogéneo del HRF.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el apoyo económico del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (MECIC) a través de la ayuda RTC-2016-5263-5 asociada al proyecto eFIB



(optimización de procesos constructivos y de diseño de elementos estructurales empleando hormigones reforzados con fibras en sustitución de la armadura convencional), proyecto desarrollado conjuntamente con SACYR Ingeniería e Infraestructuras. Los autores también agradecen al MECIC la ayuda asociada al proyecto SAES (BIA2016-78742-C2-1-R). El primer autor agradece al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades la ayuda económica recibida a través de la beca FPU13/04864.

## 6. REFERENCIAS

- [1] B. Parmentier, E. De Grove, Dispersion of the mechanical properties of FRC investigated by different bending tests, *Tailor Made Concr. Struct.* (2008).
- [2] C. Molins, A. Aguado, S. Saludes, Double Punch Test to control the energy dissipation in tension of FRC (Barcelona test), *Mater. Struct.* 42 (2008) 415–425.
- [3] International Federation for Structural Concrete, *fib Model Code for Concrete Structures 2010*, 2010.
- [4] P. Pujadas, a. Blanco, S.H.P. Cavalaro, a. de la Fuente, a. Aguado, Multidirectional double punch test to assess the post-cracking behaviour and fibre orientation of FRC, *Constr. Build. Mater.* 58 (2014) 214–224.
- [5] J.M. Torrents, A. Blanco, P. Pujadas, A. Aguado, P. Juan-García, M.Á. Sánchez-Moragues, Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete, *Mater. Struct.* 45 (2012) 1577–1592.
- [6] S.H.P. Cavalaro, R. López, J.M. Torrents, A. Aguado, Improved assessment of fibre content and orientation with inductive method in SFRC, *Mater. Struct.* (2014).