

ENSAYO DE DOBLE PUNZONAMIENTO PARA CONCRETO REFORZADO CON FIBRA: EFECTO DEL TAMAÑO Y ORIGEN DE LA PROBETA

Carlos Aire¹, Climent Molins² y Antonio Aguado²

RESUMEN

Tradicionalmente, para caracterizar el comportamiento del concreto reforzado con fibra (CRF) se realizan ensayos a flexión en vigas. Sin embargo, de acuerdo con diferentes estudios sobre CRF, se ha observado coeficientes de variación del orden de 20 % para resultados de ensayo a flexión en vigas. Recientemente, se desarrolló un nuevo método basado en el ensayo de doble punzonamiento, llamado ensayo Barcelona, como una alternativa para determinar la resistencia a tracción indirecta del CRF. Es un ensayo de fácil ejecución mediante el cual un cilindro de 150 mm de diámetro y 150 mm de altura, se somete a ensayo de doble punzonamiento, lo que permite obtener la resistencia a tracción indirecta del CRF, con coeficientes de variación menor a los obtenidos por métodos donde se emplean vigas. Este artículo presenta los resultados de un estudio comparativo entre resultados de resistencia y tenacidad aplicando el ensayo Barcelona obtenida de probetas moldeadas de 100 y 150 mm y probetas testigos de 93 y 153 mm.

Palabras claves: Concreto reforzado con fibra, ensayo de doble punzonamiento, tenacidad, ensayo Barcelona.

ABSTRACT

Traditionally, to characterize the behavior of reinforced concrete with fiber (CRF) flexural tests are performed on beams. However, in accordance with various studies on CRF, it has been seen different variation coefficients of the order of 20 % for the results of flexural test beams. Recently, it has been developed a new method based on the double punching, called Barcelona test, as an alternative to determine the resistance to the indirect traction of the CRF. It is a test of easy execution over which a cylinder of 150 mm of diameter and 150 mm of height, undergoes double punching test, which allows to obtain the resistance to indirect traction of the CRF, with coefficients of variation less than those obtained by methods which employ beams. This article shows the results of a comparative study between results of resistance and sturdiness applying the Barcelona test obtained in molded test tubes of 100 and 150 mm and witness test tubes of 93 and 153 mm.

Keywords: Reinforced concrete with fiber, double punching test, sturdiness, Barcelona Test.

RESUMO

Tradicionalmente, para caracterizar o comportamento do concreto reforçado com fibra (CRF) são realizados ensaios de flexão em vigas. No entanto, de acordo com diferentes estudos sobre CRF, observa-se coeficientes de uma variação cerca de 20 % para resultados em teste de flexão em vigas. Recentemente, foi desenvolvido um novo método baseado no ensaio de dupla perfuração, chamado ensaio Barcelona, como uma alternativa para determinar a resistência à tração indireta do CRF. Ensaio de fácil execução mediante o qual um cilindro de 150 mm de diâmetro e 150 mm de altura, que é submetido a teste de dupla perfuração, o que permite obter a resistência à tração indireta do CRF, com coeficientes de variação inferiores aos obtidos por métodos onde se empregam vigas. Este artigo apresenta os resultados de um estudo comparativo entre resultados de resistência e tenacidade aplicando o ensaio Barcelona obtido das provetas moldadas de 100 e 150 mm e provetas testemunhas de 93 e 153 mm.

Palavras chaves: Concreto armado com fibra, ensaio de dupla perfuração, tenacidade, ensaio Barcelona.

⁽¹⁾ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Estructuras y Materiales, Edificio 3-217, Circuito Escolar S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, México DF, México. E-mail: aire@pumas.iingen.unam.mx

⁽²⁾ Profesores, Universidad Politécnica de Cataluña BarcelonaTech, ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Campus Nord. C1. 2ª Planta, Jordi Girona Salgado 1 C.P. 08034 Barcelona España. E-mail: climent.molins@upc.edu, antonio.aguado@upc.edu

INTRODUCCIÓN

En general, los ensayos para caracterizar el comportamiento del CRF se basan en ensayos a flexión en vigas, para obtener la resistencia máxima, resistencia residual y tenacidad (Laranjeira, 2010). Sin embargo, estos ensayos han mostrado que los resultados de resistencia residual presentan elevada dispersión, con coeficientes de variación mayores de 20 % (Chao *et al.*, 2011).

Existen tres métodos de ensayo de vigas de uso frecuente, la europea UNE-EN-14651 (2007), la belga NBN-B15-238 (1995) y la americana ASTM C1609 (2012), en las que la carga se aplica a los tercios del claro. Sin embargo, existen otros procedimientos, como el ensayo de paneles, de sección cuadrada EN 14488-5 (2002) o sección circular ASTM C1550 (2012), con aplicación de carga al centro de la sección; no obstante, los paneles son de difícil manejo y peso importante. Como consecuencia, estos métodos son, generalmente, más costosos y requieren de mayor tiempo de ejecución.

Con el objeto de superar estos inconvenientes, Molins *et al.* (2009), propusieron un nuevo método de ensayo para evaluar el comportamiento a tracción indirecta basado en el ensayo de doble punzonamiento propuesto por originalmente por Chen (1970). Este nuevo método, denominado ensayo Barcelona se trata de una adaptación del ensayo anterior para CRF, el cual puede usarse como un método alternativo al ensayo Brasileño para determinar la resistencia a tracción indirecta del concreto.

El ensayo Barcelona, ha mostrado su capacidad como método de control sistemático del comportamiento del CRF, al mismo tiempo ha evolucionado en la contrastación numérica del planteamiento (Carmona *et al.*, 2009a, 2012b, Pros *et al.*, 2011a, 2012b, Pujadas *et al.*, 2013) y en el tratamiento experimental (Aire *et al.*, 2013 y Carmona *et al.*, 2013). Una de las ventajas del ensayo Barcelona, es la posibilidad de extraer testigos de un elemento estructural de CRF ya construidos a fin de verificar sus propiedades. Esto es importante en el caso que se utilicen las fibras con responsabilidad estructural, tal y como se contempla en el Model Code 2010 de la FIB ISBN: 978-2-88394-096-3, ISBN 978-2-88394-095-6 o en otras normativas: EHE (2008), CNR-DT 204 (2006), DVB (2001), Di Prisco (2009). Para ampliar la aplicación del ensayo Barcelona es necesario evaluar la influencia del tipo de probeta, obtenida de moldeado directo o de extracción de testigo, teniendo en cuenta que las probetas moldeadas contienen fibras íntegras mientras que en testigos extraídos, un número importante de fibras están incompletas al quedar cortadas.

El objetivo del presente artículo es evaluar la aplicación del Barcelona, tanto para probeta moldeada como para probeta testigo, con fibras de diferentes longitudes, a través de un estudio comparativo entre los resultados de resistencia a tracción indirecta y tenacidad.

1. ENSAYO BARCELONA

El ensayo Barcelona, es un ensayo de tracción indirecta desarrollado para CRF, en la que una probeta cilíndrica de iguales de 150 mm de diámetro y 150 mm de altura se somete a un ensayo de doble punzonamiento mediante una carga que se transmite a través de dos punzones y según el eje central de simetría (Fig. 1). Es un método de prueba aprobado como norma española UNE-83515 (2010), como un procedimiento sistemático para caracterizar CRF.

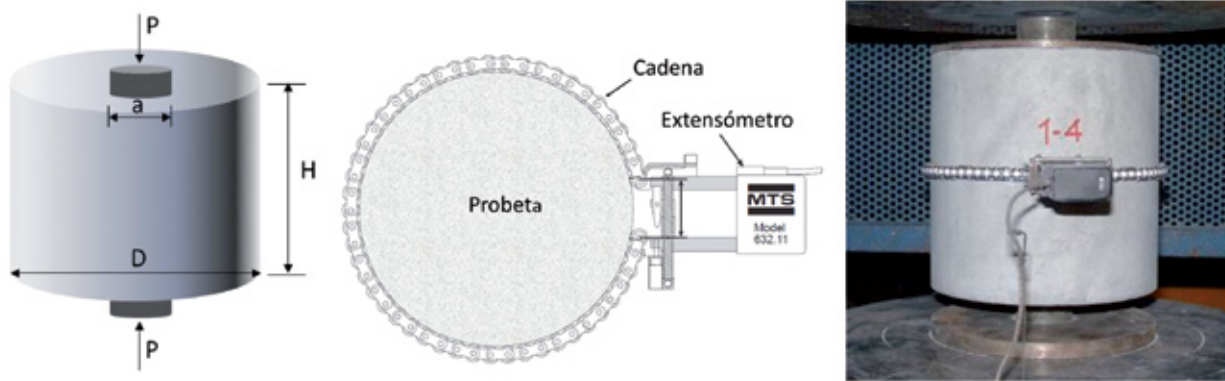


Fig. 1: Configuración del ensayo Barcelona.

De acuerdo a la norma UNE 83515 (2010), la dimensión normal del diámetro de la probeta cilíndrica debe ser de 150 mm, que puede obtenerse por (a) moldeo directo de cilindros de ϕ 150 \times H 150 mm y (b) moldeo directo de cilindros de ϕ 150 \times H 300 mm y posterior corte a mitad de altura. La relación entre el diámetro de la probeta cilíndrica y el punzón es de un cuarto. En el caso de extracción de testigo, el diámetro no debe ser menor de 100 mm, siempre que se mantenga la relación de diámetro igual a la altura.

El control del ensayo se realiza por apertura circunferencial, usando una cadena que se coloca a media altura del cilindro, como se muestra en la Fig. 1. El modo de falla típico presenta tres planos de fractura radial, sin embargo, es posible encontrar dos o cuatro planos. El ensayo se puede realizar en una prensa convencional para rotura de probetas a compresión y es un ensayo de gran facilidad comparado con métodos tradicionales para CRF basados en vigas y paneles de sección cuadrada o circular. Además requiere de una prensa de menor capacidad, las cargas de rotura son de reducida magnitud y el volumen necesario de concreto es menor comparado con otros métodos, lo que significa ahorro de material y facilidad del manejo de la probeta.

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

La Tabla 1 muestra el programa de ensayos de la campaña experimental. En la fabricación de las mezclas de concreto se usó cemento CEM I 52.5R, polvo de mármol (500 μ m), arena (0 a 3 mm), agregado grueso de dos graduaciones (3-6 y 6-12 mm), un aditivo superplastificante y agua potable. Se emplearon fibras de acero de dos fabricantes diferentes, ambos son filamentos de acero estirados en frío con extremos conformados; las de tipo Bekaert tipo Dramix encolados en peines y las de Maccaferri tipo Wirand fibras individuales (Fig. 2).

Tabla 1: Programa de ensayos – Fibras de acero Bekaert y Maccaferri.

Serie	Fibra	Tipo	l_n (mm)	d_n (mm)	l_n / d_n	Cuantía
M1	Dramix	RC6535BN	35	0.55	64	30
M2	Dramix	RC6540CN	40	0.62	65	30
M3	Wirand	FF3-50	50	0.75	67	30
M4	Dramix	RC6560BN	60	0.90	67	30

l_n y d_n , longitud y diámetro nominal (datos del fabricante).

Las proporciones de mezcla de concreto fueron de 350 kg/m³ de cemento, 510 kg/m³ de arena, 400 kg/m³ de grava de 3-6 mm, 520 kg/m³ de grava de 6-12, 178 kg/m³ de agua y 12 kg/m³ de aditivo. Se empleó una proporción constante de 30 kg/m³ de fibra para cada mezcla, cuatro longitudes diferentes (35, 40, 50 y 60 mm) y una relación de esbeltez, del orden de l/d 65.

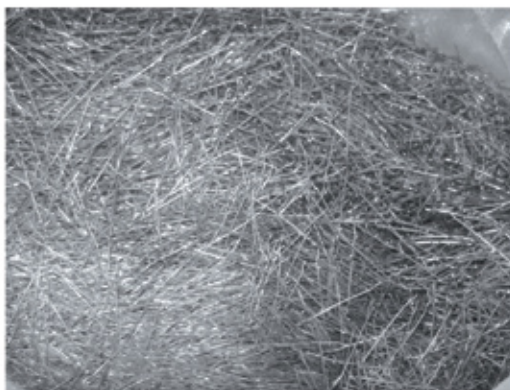
Para cada serie se fabricaron doce probetas moldeadas: seis de 100 \times 200 mm, y seis de 150 \times 150 mm; y un bloque de concreto de 750 \times 750 \times 200 mm. Las probetas moldeadas de 100 \times 200 mm se partieron en dos mitades de 100 mm de altura para obtener la muestra de ensayo estándar según la UNE 83515 (2010). De los bloques de concreto se extrajeron doce probetas testigo: seis de 93 mm y seis de 153 mm. Además, se fabricaron tres cilindros de 100 \times 200 mm y tres de 150 \times 300 mm para determinar la resistencia a compresión.



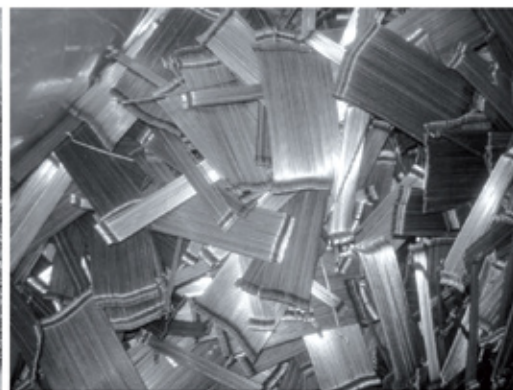
Fibra DRAMIX RC6535BN



Fibra DRAMIX RC6540CN



Fibra WIRAND FF3-50



Fibra DRAMIX RC6560BN

Fig. 2: Fibras de acero empleadas.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 Características dimensionales

La Tabla 2 presenta las características dimensionales y mecánicas de las cuatro fibras. Los valores de longitud y diámetro que se muestran son el promedio de veinte mediciones (coeficiente de variación en paréntesis, COV).

Tabla 2: Propiedades de las fibras.

Designación	l_f (mm)	d_f (mm)	l_f / d_f	E (GPa)	f_t (GPa)
Dramix RC6535BN	35.4 (0.4)	0.55 (0.0)	64.3	210	1.345
Dramix RC6540CN	42.1 (0.5)	0.61 (0.0)	69.0	210	1.440
Wirand FF3-50	48.8 (2.4)	0.72 (0.9)	67.8	210	1.230
Dramix RC6560BN	60.3 (1.5)	0.84 (1.0)	71.2	210	1.160

E y f_t , datos del fabricante.

3.2 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión promedio en cilindros de 150 mm, fue de 57 MPa (COV= 2.2 %), y en cilindros de 100 mm de 58 MPa (COV= 1.3 %). La edad de ensayo promedio fue de 55 días).

3.3 Resultados del ensayo Barcelona

Para los ensayos se utilizó una prensa Ibertest de 3 MN de capacidad. La velocidad del ensayo fue de 0.5 ± 0.05 mm/min. La apertura de fisura (TCOD) se midió con un extensómetro MTS modelo 632.12F-20 que se fija en los extremos de una cadena circunferencial (Fig. 1). Las señales de carga y TCOD se almacenaron durante todo el ensayo para obtener el diagrama carga-TCOD (Fig. 3). Para el cálculo de la resistencia a tracción Saludes *et al.*, (2007) propusieron al expresión (1), donde f_{ct} es la resistencia a tracción, P la carga de rotura, H la altura del cilindro, y a el diámetro del punzón.

$$f_{ct} = \frac{4 \cdot P}{9 \cdot \pi \cdot a \cdot H} \quad (1)$$

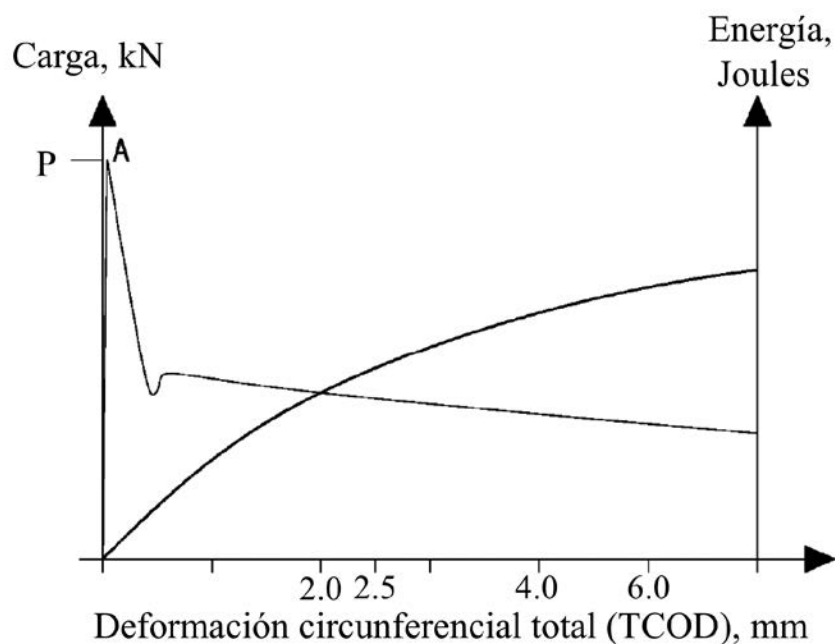
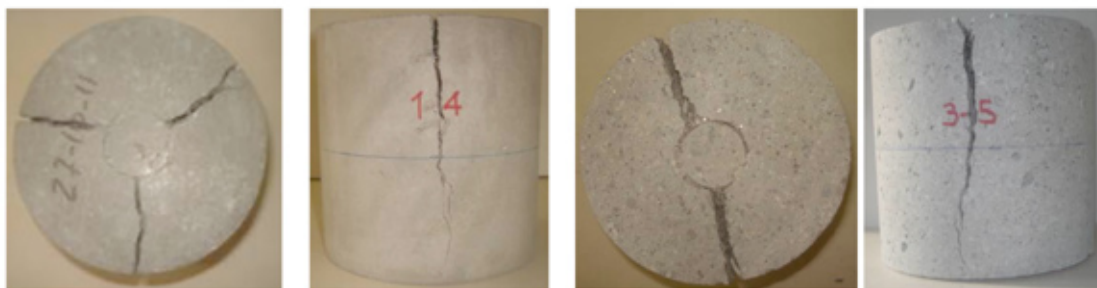


Fig. 3: Diagramas de carga y energía – TCOD.

3.3.1 Modo de falla

El modo de falla típico corresponde a la formación de dos a tres grietas radiales principales sobre las caras de carga y fisuras secundarias (Fig. 4). Las grietas principales que inician en la cara de carga atraviesan toda la altura de la probeta, las secundarias presenta una longitud menor. En las probetas moldeadas, la tendencia es la formación de tres grietas, y en las probetas testigos el de dos grietas.

En general, no se observó influencia debido al tipo de probeta (moldeada o extracción de testigo), ni por el efecto de corte realizado en las probetas moldeadas de 100×200 mm para obtener las muestras de 100 mm de diámetro y 100 mm de altura.



Probeta moldeada de 150 mm (M1-4) y probeta testigo de 153 mm (M3-5).



Probeta moldeada de 100 mm (M2-5) y probeta testigo de 93 mm (M2-6).

Fig. 4: Modo de falla típico de las probetas.

3.3.2 Comportamiento carga-deformación (TCOD)

En general, el comportamiento carga-TCOD es similar para todas las series (Fig. 5). Las curvas presentan un desplazamiento casi nulo desde el inicio de carga hasta alcanzar la carga máxima. Al aparecer las primeras fisuras, se presenta el régimen de post-fisuración a partir del cual comienza a trabajar la fibra y la carga disminuye a medida que aumenta la apertura de fisura. La resistencia residual a tracción, que corresponde a una deformación circunferencial determinada (TCOD), es variable y depende de la cantidad de fibra en la mezcla. En esta misma figura, también se muestran los diagramas carga-tenacidad, en el eje secundario de las ordenadas.

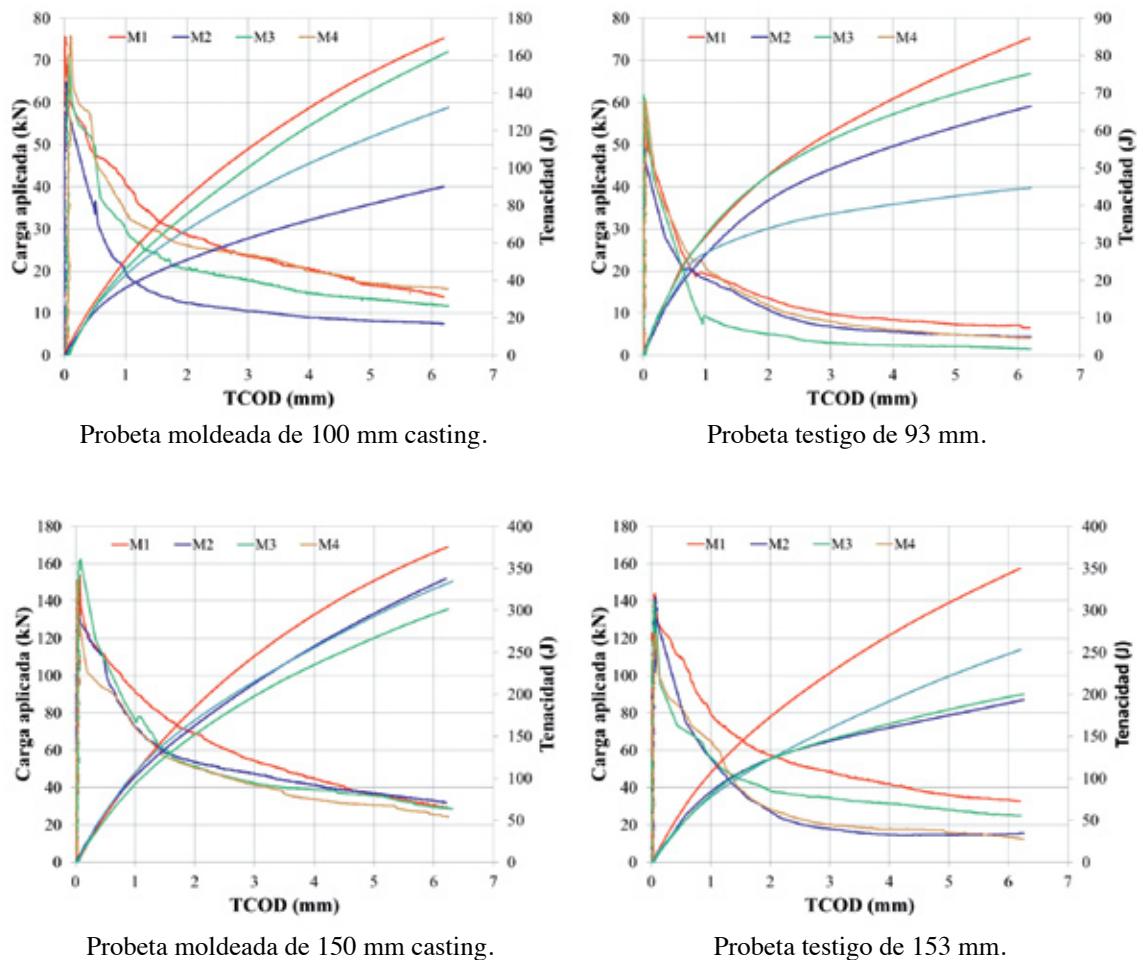


Fig. 5: Diagramas carga y tenacidad vs. TCOD.

3.3.3 Resistencia a tracción máxima

La Tabla 3 muestra los resultados de resistencia a tracción máxima y coeficiente de variación para cada serie como promedio de seis especímenes. La resistencia promedio para las probetas moldeadas de 100 y 150 mm fue de 4.3 y 3.9 MPa, respectivamente. El coeficiente de variación varía entre 3.1 y 7.1 % en las probetas moldeadas de 100 mm, y en las probetas moldeadas de 150 mm entre 1.8 y 3.8 %. En las probetas testigo de 93 y 153 mm, la resistencia a tracción máxima promedio fue de 3.7 y 3.3 MPa, respectivamente. El coeficiente de variación fue de 3.9 a 8.4 % en las probetas testigos de 93 mm y en las de 153 entre 4.1 y 10.8 %.

Los resultados muestran que el ensayo Barcelona presenta una consistente baja variabilidad, lo cual se transforma en una medida de repetibilidad del ensayo y consolida su aplicación como un método de prueba potencial para caracterizar CRF. En la misma Tabla 3, los resultados respecto al valor de la resistencia a compresión están comprendidos en el rango de porcentajes usuales para la resistencia a compresión obtenida (Carmona *et al.*, 2013 y FIB: ISBN 978-2-88394-095-6).

Tabla 3: Resultados de Resistencia a tracción máxima (en MPa).

Diámetro Φ (mm)		M1 - 35 mm		M2 - 40 mm		M3 - 50 mm		M4 - 60 mm	
		MPa	COV(%)	MPa	COV(%)	MPa	COV(%)	MPa	COV(%)
100	f_{ct}	4.4	4.2	4.0	7.1	4.3	8.1	4.5	3.1
	f_{ct}/f_{ct100} (%)	7.59	--	8.00	--	6.83	--	7.38	--
150	f_{ct}	4.0	1.8	3.6	2.4	4.0	3.8	3.8	2.2
	f_{ct}/f_{ct150} (%)	7.27	--	6.21	--	6.90	--	6.91	--
93	f_{ct}	3.8	8.4	3.3	3.9	3.9	5.8	3.7	7.9
	f_{ct}/f_{ct100} (%)	6.55	--	6.60	--	6.19	--	6.07	--
153	f_{ct}	3.3	8.8	3.3	6.6	3.3	4.1	3.2	10.8
	f_{ct}/f_{ct150} (%)	6.00	--	5.69	--	5.69	--	5.82	--

La relación media f_{ct100}/f_{ct150} y f_{ct93}/f_{ct153} es de 1.12 para todas las series de probetas moldeadas y para las probetas testigos. Estos resultados muestran, que a medida que disminuye el diámetro, los valores de la resistencia aumentan del orden del 12 %, debido, probablemente, a las condiciones de ensayo, y no tanto al propio concreto. Los coeficientes de variación son aceptables, lo que redonda de forma positiva en la fiabilidad del ensayo.

Tabla 4: Relación entre resistencias a tracción máxima.

Factor	Relación	M1-35 mm	M2-40 mm	M3-50 mm	M4-60 mm	Promedio	COV (%)
Volumen	f_{ct100}/f_{ct150}	1.10	1.11	1.08	1.18	1.12	4.2
	f_{ct93}/f_{ct153}	1.15	1.00	1.18	1.16	1.12	7.4
Probeta testigo	f_{ct93}/f_{ct100}	0.86	0.83	0.91	0.82	0.85	4.7
	f_{ct153}/f_{ct150}	0.83	0.92	0.83	0.84	0.85	5.1
vs. probeta moldeada	f_{ct93}/f_{ct150}	0.95	0.92	0.98	0.97	0.95	2.9

Con respecto a la contrastación entre probetas moldeadas y probetas testigo de igual diámetro, cabe señalar que las probetas testigo conducen a un valor menor respecto a las moldeadas en una relación de 0.85, para las dos relaciones de volumen. Nuevamente se observa la repetitividad de la medida, lo que como se ha dicho aumenta la fiabilidad del ensayo.

Para explicar esa menor resistencia de la probeta testigo, una de las causas posibles es que en las probetas moldeadas se tiene un efecto pared que ayuda a orientar las fibras, probablemente en este caso, según la dirección z del colado intentando hacer más isotrópico el material (Carmona *et al.*, 2013 y Torrents *et al.*, 2012), modificando la respuesta a tracción, o bien, a que la concentración de fibra efectiva (completa) en la probeta testigo es menor. Asimismo, es posible que la extracción del testigo por rotación dañe ligeramente el concreto alrededor de las fibras cortadas. Aunque dicho daño no es visible a simple vista, puede existir.

La relación promedio de f_{ct93}/f_{ct150} es de 0.95 con un coeficiente de variación del 2.9 %. Dicho valor coincide exactamente con el producto del factor volumen (1.12) con el factor de testigo respecto moldeado (0.85). Ello demuestra que es posible, en caso de extracción de testigo, para caracterizar la resistencia a tracción de la matriz, usar una dimensión de diámetro menor a la especificada en la UNE 83515 (2010) y Pujadas *et al.*, (2013). Esta nueva alternativa de diámetro será de utilidad cuando por razones prácticas no se pueda extraer testigos de 100 mm de diámetro, que es el mínimo especificado.

A medida que disminuye la relación de esbeltez de las fibras (L/D), aumenta la resistencia máxima, como se observa en la Fig. 6, sin embargo, las variaciones son pequeñas y pueden considerarse como un grupo homogéneo de comparación.

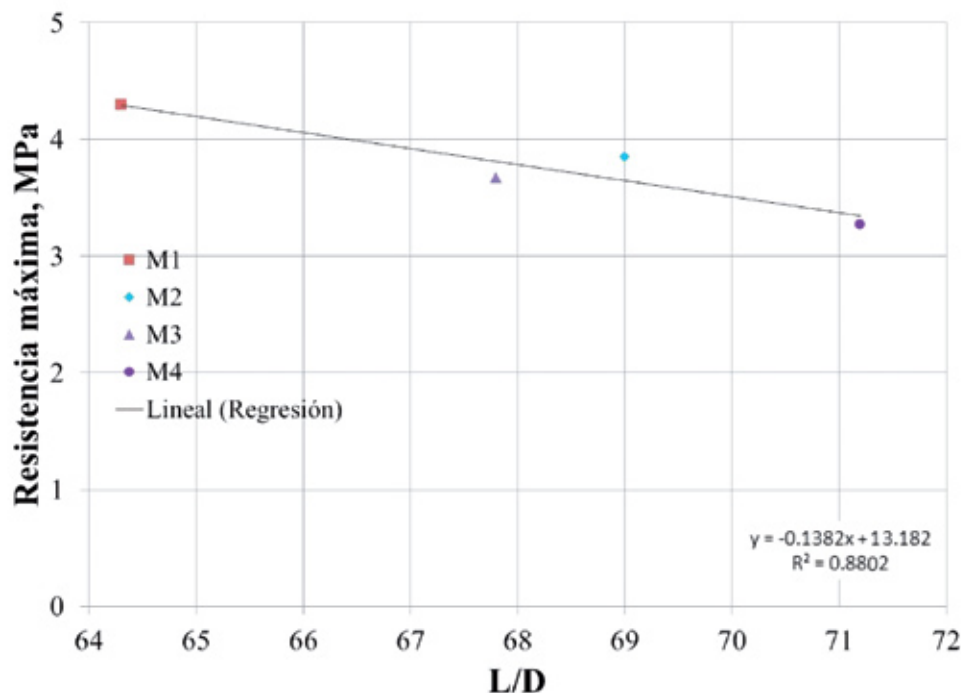


Fig. 6: Relación entre la resistencia máxima y relación de esbeltez.

3.3.4 Resistencia residual

La capacidad residual de los concretos a partir de probetas moldeadas es dispersa, no encontrándose influencia significativa en los resultados de resistencia residual por el empleo de fibras de mayor longitud. Los concretos de la serie M3 y M4, alcanzaron resistencias residuales menores o muy similares a los concretos de las series M1 y M2 (Tabla 5).

La resistencia residual de las probetas moldeadas es siempre mayor que la de los testigos, como era de esperarse. Esto obedece a que una cantidad significativa de fibras resultan cortadas durante el proceso de extracción del testigo. Al perder uno de los extremos, la fibra pierde parte de su eficacia al no estar adecuadamente anclada. En las probetas modeladas todas las fibras están íntegras con sus ganchos y pueden desarrollar toda su capacidad resistente.

Las resistencias residuales son mayores en las probetas de mayor diámetro. Para el caso de las probetas moldeadas, responde a que el efecto pared del molde es mayor en las de menor diámetro, incrementando la orientación según la dirección de colado (paralela al eje del cilindro) y, consecuentemente, reduciendo la orientación según los ejes X-Y que redundan en una menor capacidad respuesta.

Para el caso de las probetas testigo, la reducción responde a dos factores: en primer lugar, la proporción de fibras cortadas aumenta al reducirse el diámetro del testigo y, consecuentemente, la capacidad resistente se reduce; y, en segundo lugar, al aumentar la longitud de la fibra también aumenta la proporción de fibras que pierden uno de sus extremos. Por esta razón, a igual diámetro de probeta moldeada o testigo, la relación entre la resistencia residual y la resistencia máxima disminuye en mayor medida. Ello se produce para todos los valores de TCO (Tabla 6).

La variabilidad de los resultados es alta en todos los valores de TCO, con un máximo de 31.9 %, sin embargo, los resultados en las probetas testigo presentaron, en general, mayores dispersiones con un valor máximo de 54.7 %.

Tabla 5: Resultados de resistencia residual (en MPa).

TCOD (mm)	M1 - 35 mm		M2 - 40 mm		M3 - 50 mm		M4 - 60 mm	
	MPa	COV (%)	MPa	COV (%)	MPa	COV (%)	MPa	COV (%)
Probeta moldeada de 100 mm								
2	1.34	19.4	1.28	20.5	1.21	11.4	1.37	19.9
2.5	1.17	21.1	1.17	20.4	1.11	12.4	1.24	21.7
4	0.89	26.4	0.96	22.4	0.94	14.2	1.00	30.0
6	0.66	29.8	0.76	24.0	0.78	9.6	0.83	31.9
Probeta moldeada de 150 mm								
2	1.71	6.9	1.21	13.0	1.32	9.1	1.70	16.3
2.5	1.50	10.7	1.12	14.8	1.20	9.3	1.49	15.2
4	1.09	19.2	0.90	21.0	0.99	8.8	1.14	19.3
6	0.81	24.5	0.73	21.1	0.80	8.2	0.93	19.6
Probeta moldeada de 93 mm								
2	0.87	13.1	0.65	40.1	0.60	37.2	0.60	31.0
2.5	0.71	14.5	0.55	44.0	0.52	41.8	0.49	24.9
4	0.50	19.2	0.43	51.0	0.40	43.5	0.37	17.3
6	0.42	30.8	0.33	49.1	0.29	54.6	0.28	20.5
Probeta moldeada de 153 mm								
2	0.97	41.8	0.73	23.1	0.59	36.4	0.65	54.7
2.5	0.87	43.6	0.63	29.7	0.52	40.7	0.55	53.1
4	0.68	42.9	0.49	27.5	0.44	42.4	0.45	48.9
6	0.51	39.0	0.43	16.1	0.39	36.8	0.38	47.5

Tabla 6: Relación entre la resistencia residual y resistencia máxima.

TCOD (mm)	Resistencia residual / Resistencia máxima								
	M1-35	M2-40	M3-50	M4-60	M1-35	M2-40	M3-50	M4-60	
	Probetas moldeadas								
	100 mm				150 mm				
2	0.31	0.30	0.28	0.32	0.44	0.31	0.34	0.44	
2.5	0.27	0.27	0.26	0.29	0.39	0.29	0.31	0.39	
4	0.21	0.22	0.22	0.23	0.28	0.23	0.26	0.30	
6	0.15	0.18	0.18	0.19	0.21	0.19	0.21	0.24	
TCOD (mm)	Probetas moldeadas								
	93 mm				153 mm				
	2	0.24	0.18	0.16	0.16	0.30	0.22	0.18	0.20
	2.5	0.19	0.15	0.14	0.13	0.27	0.19	0.16	0.17
4	0.14	0.12	0.11	0.10	0.21	0.15	0.13	0.14	
6	0.11	0.09	0.08	0.08	0.16	0.13	0.12	0.12	

3.3.5 Tenacidad

La absorción de energía que se obtiene en las probetas testigo es significativamente menor que la energía disipada en las probetas moldeadas, que es resultado del efecto de corte al obtener las probetas testigo. En el caso de las probetas testigo, la mayor tenacidad se presentó en las series con menor longitud de fibra, debido a que pequeña proporción de las fibras pierden sus extremos en comparación con las de mayor longitud (Tabla 7).

Tabla 7: Resultados de tenacidad.

Tenacidad	M1 - 35 mm		M2 - 40 mm		M3 - 50 mm		M4 - 60 mm	
	Joules	COV (%)	Joules	COV (%)	Joules	COV (%)	Joules	COV (%)
Probeta moldeada de 100 mm								
T2 mm	71.8	13.0	64.6	11.4	65.8	9.8	75.1	13.0
T2.5 mm	82.6	13.5	75.2	12.4	75.8	9.5	86.3	13.8
T4 mm	108.9	15.4	102.7	14.0	102.5	9.0	115.4	16.3
T6 mm	135.4	17.2	132.0	15.5	132.1	8.8	147.0	18.8
Probeta moldeada de 150 mm								
T2 mm	193.1	4.7	148.9	7.7	169.1	5.3	192.0	12.0
T2.5 mm	225.1	4.8	172.1	8.4	194.3	5.3	223.9	12.4
T4 mm	301.4	5.7	232.2	10.5	259.3	5.8	301.8	13.2
T6 mm	375.7	8.3	293.9	12.8	330.8	6.3	384.7	14.1
Probeta moldeada de 93 mm								
T2 mm	50.5	11.5	39.5	20.3	45.1	18.6	42.0	13.4
T2.5 mm	56.7	11.0	44.2	22.4	49.7	20.3	46.3	14.5
T4 mm	71.0	10.4	55.7	26.8	60.7	24.3	56.2	14.9
T6 mm	85.5	11.6	67.5	29.6	71.5	27.5	66.2	14.6
Probeta moldeada de 153 mm								
T2 mm	135.0	23.3	113.2	7.0	105.7	13.7	117.3	30.6
T2.5 mm	153.4	25.5	126.9	8.0	117.0	15.7	129.4	32.7
T4 mm	200.3	29.7	160.4	11.0	145.9	20.5	158.9	35.7
T6 mm	247.2	31.5	197.3	13.0	179.7	23.7	192.3	37.2

De forma análoga a lo expresado en el análisis de los resultados de la resistencias residuales, la tenacidad aumenta a medida que aumenta el diámetro de la probeta por el efecto de la orientación de las fibras según el plano horizontal y, así mismo, para las probetas testigo, la tenacidad aumenta a medida que aumenta la probabilidad de encontrar más fibras no cortadas en la probeta.

El coeficiente de variación de las tenacidades en las probetas moldeadas es menor que el de las probetas testigo, lo cual es consistente con los resultados en términos de resistencia residual. En las probetas moldeadas el C.V., varía entre 4.7 y 18.8 % mientras que en las probetas testigo estuvo entre 7.0 y 37.2 %. La variabilidad de los resultados en las probetas moldeadas que estuvo entre 4.7 y 14.1 %, es un valor aceptable comparado a resultados obtenidos de otros métodos que se basa en vigas donde se encuentran variabilidad de resultados mayores a 20 % (Laranjeria, 2010).

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó un estudio comparativo entre los resultados de resistencia y tenacidad aplicando el ensayo Barcelona sobre probetas moldeadas de 100 y 150 mm de diámetro y probetas testigos extraídos de 93 y 153 mm de diámetro. Otra variable fue la longitud de fibra, manteniendo constante el contenido de fibra y la esbeltez. Se emplearon cuatro longitudes de fibra, 35, 40, 50 y 60 mm, con esbeltez de 65, y 30 kg/m³ de contenido de fibra. De los resultados obtenidos se derivan las siguientes conclusiones:

- No hay influencia del tamaño, ni del tipo de probeta en el tipo de falla. En general, el tipo de falla fue la formación de tres grietas radiales y dos en el caso de los testigos, y en mayor proporción se presentó en la cara de cara superior de la probeta.

- La variabilidad de los resultados de resistencia a tracción máxima fue del 5 % para las probetas moldeadas y entre 2 y 7 % para los testigos.

- Se encontraron las siguientes relaciones entre los valores de resistencia máxima a tracción: $f_{ct100}/f_{ct150} = 1.12$, $f_{ct93}/f_{ct153} = 1.12$, $f_{ct153}/f_{ct150} = 0.85$ y $f_{ct93}/f_{ct100} = 0.85$. Ello pone de manifiesto la relación clara entre volúmenes de probeta (independientemente de si se trata de una probeta testigo o de una probeta moldeada) y entre probetas y testigos (independientemente del volumen de concreto de la probeta).

- La capacidad residual se ve afectada por el diámetro de la probeta y la forma de obtención de la misma (moldeada o testigo) y, en el caso de los testigos, también por la longitud de la fibra. Se observa claramente la reducción de la resistencia residual en testigos extraídos y se ha obtenido experimentalmente una relación que permite estimar dicho efecto.

De esta forma, los resultados obtenidos permiten aplicar de forma fiable el método de prueba ensayo Barcelona para determinar la resistencia a tracción indirecta de concreto reforzado con fibra a testigos con distintos diámetros, de forma que pueden relacionarse entre sí y con los resultados de probetas moldeadas.

Agradecimientos

Este trabajo fue llevado a cabo en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló (LTE) del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, donde el Dr. Aire desarrolló una estancia de investigación, la cual fue financiada por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM (DGAPA-UNAM) y por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Los autores agradecen a Tomás García Vicente, Director del LTE, por su colaboración en el desarrollo de la investigación, y a la empresa de prefabricados Escofet por su apoyo en la fabricación de las probetas y a las empresas Bekaert y Maccaferri, por el suministro de fibras.

El Dr. Aire, también agradece al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por el financiamiento del Proyecto de Investigación Experimental P2569-ID730-01-11-2012/31-10-2013: “Ensayo a tracción indirecta de doble punzonamiento para concreto reforzado con fibras: Implementación del método de prueba UNE 83515 (2010)”, actualmente en desarrollo y con la participación internacional de los Grupos de Tecnología del Hormigón de la Universidad Politécnica de Cataluña y Universidad de la Coruña, España.

REFERENCIAS

ASTM C1550 (2012), “Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete”, *Using Centrally Loaded Round Panel*, Book of Standards Vol. 04.02, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, pp. 14.

ASTM C1609 (2012), “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete”, *Using Beam With Third-Point Loading*, Book of Standards Vol. 04.02, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, pp. 9.

Aire, C., Aguado, A. and Molins, C. (2013), “Método de doble punzonamiento de tracción indirecta para concreto reforzado con fibra: Ensayo Barcelona”. *Investigación y Desarrollo*. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Reporte Interno, pp. 100.

Carmona, S., Aguado, A., Molins, C. y Cabrera, M. (2009), “Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (Ensayo Barcelona)”, *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 24, No. 2, Santiago, Chile, pp. 119-140.

Carmona, S., Aguado, A., and Molins, C. (2013), “Characterization of the properties of steel fiber reinforced concrete by means of the generalized Barcelona”, *Construction and Building Materials*, Vol. 48, pp. 592-600.

Carmona, S., Aguado, A., and Molins, C. (2012), “Generalization of the Barcelona test for the toughness control of FRC”, *Materials and Structures*, (RILEM), Vol. 45, No. 7, pp. 1053-1069. DOI: 10.1617/s11527-011-9816-8.

Chao, S., Karki, Cho J., and Waweru R., (2012), "Use of Double Punch Test to Evaluate the Mechanical Performance of Fiber Reinforced Concrete", RILEM State of the Art Reports, Vol. 2, *Hogh Performance Fiber Reinforced Cement*

Composites 6, HPRCC 6 (Editors: G.J. Parra-Montesinos, H.W. Reinhardt, and A. E. Naaman), pp. 27-34. DOI: 10.1007/978-94-007-2436-5_4.

Chen W., (1970), "Double punch test for tensile strength of concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 67 (2), pp. 993-995.

CNR-DT 204 (2006), "Istruzioni per la progettazione, l'Esecuzione ed il controllo di strutture fibrorinforzato", *Consiglio Nazionale delle Ricerche*, Italia, pp. 61.

Di Prisco M. (2009), "FRC: structural applications and standards", *Materials and Structures*, Vol 42, No. 9, pp. 1169-1171. DOI 10.1617/s11527-009-9545-4.

DBV (2001), "Merkblatt Stahlfaserbeton, Deutsche Beton Vereins, Guide to Good Practice", Steel Fibre Concrete, Concrete Technology, *German Society for Concrete and Construction Technology*, pp. 77.

EHE (2008), "Instrucción de Hormigón Estructural", Comisión Permanente del Hormigón, Ministerio de Fomento, España, BOE Boletín Oficial del Estado, pp. 304.

EN 14488-5 (2002), "Testing sprayed concrete-Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens", European Standard, European Committee for Standardization, Bruselas, pp. 12.

Federation Internationale du beton (2010), "Model Code 2010, First complete draft", Vol. 1, Laussane, Switzerland, Bulletin 55, pp. 312, ISBN 978-2-88394-096-3.

Federation Internationale du beton (2010), "Model Code 2010, First complete draft", Vol. 1, Laussane, Switzerland, Bulletin 55, pp. 318, ISBN 978-2-88394-095-6.

Laranjeira F. (2010), "Design-oriented constitutive model for steel fiber reinforced concrete", *Doctoral Thesis*, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, Spain, pp. 218. [Consultado en Julio de 2011], Disponible en: <http://www.tdx.cat/bitstream/10803/6174/1/TFLO1de3.pdf>.

Molins C., Aguado A. and Saludes S. (2009), "Double Punch Test to control the energy dissipation in Tension of FRC (Barcelona Test)", *Material and Structures*, Vol. 42, pp. 415-425.

NBN 15-238 (1995), "Essais des bétons renforcés de fibres-Essai de flexion sur éprouvettes prismatiques", Test on fibre reinforced concrete: Bending test on prismatic samples, *Norme Belge*, Institut Belge de Normalisation, pp. 10.

Pros, A., Diez, P., and Molins, C. (2012) "Modeling Steel Fiber Reinforced Concrete: numerical Immersed Boundary approach and a phenomenological mesomodel for concrete-fiber interaction". *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 90, pp. 65-86. DOI: 10.1002/nme.3312.

Pros, A., Diez, P., and Molins, C. (2011), "Numerical modeling of the double punch test for plain concrete", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48, pp. 1229-1238. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2011.01.006.

Pujadas, P., Blanco, A., Cavalaro, S., de la Fuente. A. and Aguado A. (2012), "New analytical model to generalize the Barcelona test using axial displacement", *Journal of Civil Engineering and Management*. DOI:10.3846/1392-3730.2012.756425.

Saludes S., Aguado A. and Molins C., (2007), "Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado con fibras (ensayo Barcelona)", *Cátedra BMB Innovación en Tecnología del Hormigón*, Barcelona, Publicacions del Dept d'Enginyeria de la Construcció, pp. 338.

Torrents, J.M., Blanco, A., Pujades, P., Aguado, A., Juan, P. and Sánchez, M.A. (2012), “Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fiber in concrete”, *Materials and Structures* (RILEM). Vol. 45, No. 10, pp. 1577-1592. DOI: 10.1617/s11527-012-9858-6.

UNE 83515 (2010), “Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción, Ensayo Barcelona”, Madrid, España, pp. 7.

UNE EN 14651 (2007), “European Standard” Test method for metallic fibered concrete-Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), European Standard, European Committee for Standardization, Bruselas, pp. 18.