

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Determinación de la absorción de energía del hormigón reforzado con fibras mediante el ensayo de panel EFNARC y el ensayo Barcelona

S. Carmona ⁽¹⁾ y C. Molins ⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya, España.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5668>

RESUMEN

Actualmente, los shotcretes reforzado con fibras (FRS) que se utilizan en la construcción de sostenimientos de túneles de faenas mineras en Chile, se especifican y controlan a través de su capacidad de absorción de energía, la que se determina mediante el ensayo de panel cuadrado, siguiendo la recomendación EFNARC. Sin embargo, esta prueba no permite controlar la calidad del hormigón proyectado directamente sobre la roca, así como tampoco la verificación de puntos dudosos o no controlados. Debido a esto, se ha propuesto controlar los FRS mediante el ensayo Barcelona (BCN), que es un ensayo de tracción indirecta que se puede ejecutar utilizando testigos cortados directamente desde el soporte endurecido de túnel. Para aplicar progresivamente el ensayo BCN en reemplazo del ensayo de paneles, a partir de resultados experimentales se ha obtenido a relación tipo código que permite obtener la capacidad de absorción de energía del FRS a partir de ensayos de cilindros sometidos a doble punzonamiento. La expresión obtenida, fue validada con una segunda campaña experimental obteniendo resultados ampliamente satisfactorios.

PALABRAS CLAVE: capacidad de absorción de energía, hormigón reforzado con fibras, ensayo de panel cuadrado, ensayo Barcelona

1.- INTRODUCCIÓN

En Chile, en los últimos años, los hormigones proyectados o shotcrete reforzados con fibras (SRF) están siendo ampliamente utilizados para el revestimiento de túneles, especialmente en proyectos hidroeléctricos y faenas mineras, como se puede ver en la Fig. 1. En esos proyectos, los diseños de los sostenimientos se basan principalmente en el método Q – Barton modificado [1], [2], el que relaciona la calidad del macizo rocoso con la capacidad de absorción de energía mínima del FRS, la que se determina mediante el ensayo de paneles cuadrados muestreados durante la proyección, siguiendo las recomendaciones dadas en "European Specification for Sprayed Concrete" publicado por EFNARC [3].



Figura 1. Proyección de FRS en una faena minera en Chile.

Sin embargo, esta prueba requiere probetas de gran tamaño y peso, que deben ser llenadas durante la proyección del FRS en el túnel. Esto a menudo hace que el panel presente defectos o daños que alteran los resultados, aumentando la dispersión de los resultados, con coeficientes de variación (CoV) entre especímenes de la misma muestra superior al 20% [4]. Adicionalmente, el uso de paneles para el control de calidad de los FRS no permite verificar la calidad del sostenimiento resultante, así como tampoco volver a ensayar el FRS de un punto dudoso.

Debido a lo anterior, diferentes autores han considerado que este tipo de ensayo no es adecuado para el control de calidad del FRS en obra [5], [6], lo que ha motivado el uso del ensayo de tracción indirecta por doble punzonamiento (DPT) propuesto por Molins et al. [5], conocido como “ensayo Barcelona (BCN)”, para este propósito [7].

El ensayo BCN, normalizado en España por AENOR [7], se caracteriza por su simplicidad de ejecución y la baja dispersión de sus resultados, lo que, sumado a un gran número de investigaciones experimentales y numéricas, han permitido tener un mayor conocimiento de la respuesta de los HRF sometidos a doble punzonamiento.

El objetivo de este artículo es presentar los resultados de dos extensas campañas experimentales, las que, usando muestras de laboratorio y de obra, han permitido realizar un análisis de la respuesta de los paneles cuadrados y establecer una correlación entre la capacidad de absorción de energía de los FRS determinada mediante el ensayo de paneles cuadrados y la energía disipada por el FRS sometido a doble punzonamiento.

2. DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD DE LOS FRS

2.1.- Ensayo de Panel EFNARC

De acuerdo con la recomendación de EFNARC [3], las dimensiones mínimas de las muestras obtenidas en obras deben ser $600 \times 600 \times 100$ mm para proyección manual y 1000

$\times 1000 \times 100$ mm para proyección con robot. La determinación de la capacidad de absorción de energía se realiza ensayando paneles cuadrado de 600×600 mm y 100 mm de espesor, apoyado en sus cuatro bordes, dejando una luz libre entre bordes opuestos de 500 mm. El ensayo se realiza bajo control de desplazamiento del actuador, a una velocidad de deflexión central de 1,5 mm/min y la carga se aplica en el centro del panel, sobre una superficie de contacto de 100×100 mm, como se puede ver en la Fig. 2.



Figura 2. Configuración establecida por EFNARC para el ensayo de panel cuadrado.

Durante el ensayo, la carga y deflexión central se registran en forma continua hasta que se alcanza una deflexión central de al menos 30 mm. Usando esa respuesta, la capacidad de absorción de energía hasta una deflexión central de 25 mm, E_{25} , se calcula como:

$$E_{25} = \int_0^{25} P(\delta) d\delta \quad (1)$$

Donde $P(\delta)$ es la carga en función de la deflexión.

Debido a múltiples factores propios de la proyección, tales como la presión, distancia y ángulo de proyección, así como del muestreo, incluyendo condiciones de apoyo del molde, curado, transporte y posterior corte de los paneles en el laboratorio, sumado a que los paneles son pesados y difíciles de manipular, tanto en las obras como en laboratorio, lo que hace que muchos paneles presenten daños o defectos que alteran los resultados, existe una alta variabilidad de los resultados, con coeficientes de variación (CoV) intra muestra que pueden superar el 20%.

Otra fuente de error frecuente es el punto de medición de la deflexión. En la Fig. 3a, se muestran las curvas carga – deflexión obtenidas midiendo la deflexión sobre las caras superior e inferior de un panel. En ella se puede ver que, para una deflexión central de 25 mm medida sobre la cara inferior del panel, la deflexión medida sobre la cara superior es considerablemente menor, con el consecuente efecto en el cálculo de la energía absorbida.

Finalmente, se ha observado que, para bajas cuantías de fibras, la falla se produce por flexión, con la formación de dos grietas diagonales o en forma de cruz. Por otra parte, en paneles reforzados con cuantías medias y altas, inicialmente se produce la fisuración por flexión, la que provoca los primeros picos que se pueden observar en las curvas $P - \delta$. Sin embargo, debido a la presencia de las fibras, para mantener la velocidad de deformación establecida, el sistema de ensayos debe incrementar la carga, lo que sumado a la fuerza de roce que se desarrolla en la zona apoyada del panel, da origen a una falla por punzonamiento, lo que se refleja en la formación de grietas en torno a la zona cargada, como se puede ver en la Fig. 3b, limitando el trabajo de las fibras en tracción, distorsionando la medición de la deflexión realizada sobre la cara superior del panel y permitiendo concluir que el panel no falla sólo por flexión. Entonces, existe incertidumbre sobre que propiedad del HRF se determina mediante este ensayo. Dicha incertidumbre dificulta significativamente el desarrollo de correlaciones basadas en la interpretación física de los fenómenos implicados. Por esta razón, en esta ponencia se plantea una correlación estrictamente empírica entre ellos.

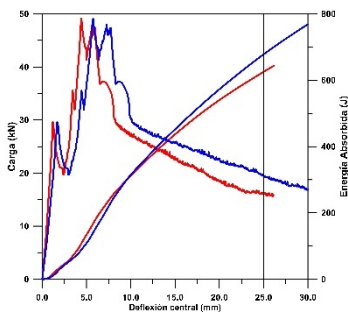


Figura 3. (a) Comparación de la medición de la deflexión central respecto de la cara inferior (línea roja) y superior (línea azul) del panel; (b) Falla por cortante por punzonamiento observada en paneles con cuantías de fibras medias y altas.

2.2.- Ensayo de doble punzonamiento o Barcelona

El ensayo de doble punzonamiento (DPT) o ensayo BCN, es un ensayo de tracción indirecta en el que un cilindro de HRF se somete a doble punzonamiento mediante cargas de compresión aplicada a través de dos punzones de acero colocados en el centro de las caras superior e inferior, respectivamente, como se puede ver en la Fig.4. A diferencia de otros ensayos de tracción indirecta utilizados para controlar las propiedades de los HRF, este ensayo se puede ejecutar en una prensa convencional para ensayos de compresión, con control de desplazamiento. El cilindro debe tener un diámetro ($2b$) igual a su altura ($2h$), esto es $2b / 2h = 1$, y los punzones tiene un diámetro ($2a$) igual a 0.25 del diámetro de la probeta. De acuerdo con la norma UNE 83 515 [7], el diámetro de la probeta debe ser de 150 mm, lo que permite utilizar probetas moldeadas o testigos cortadas desde estructuras existentes. Durante el ensayo, se debe registrar en forma continua la carga aplicada y el desplazamiento total de apertura de fisura ($TCOD$ por Total Circumferential Opening Displacement), medida a la mitad de la altura de la probeta.

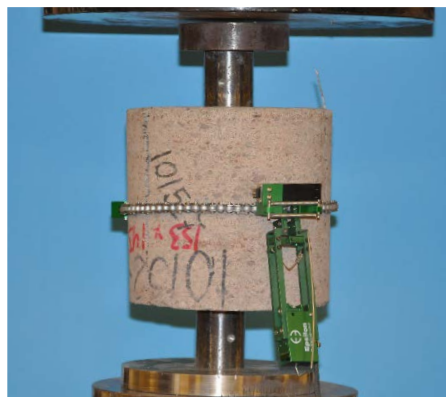


Figura 4. Configuración del ensayo BCN.

Durante el ensayo, debido a las cargas concentradas, bajo los punzones se produce un volumen cónico de compresión triaxial, el que tiende a provocar un incremento del diámetro del cilindro, generando un estado de tensiones de tracción perpendicular a los planos radiales de la probeta. Cuando este estado tensional excede la resistencia a tracción de la matriz cementicea, se abren y propagan fisuras perpendiculares a este campo de tensiones. Esto hace que los punzones penetren en la probeta, incrementando su diámetro y provocando la formación de fisuras radiales, como se muestran en la Fig. 5, donde puede ver el estado final de las probetas, que presentan dos grietas alineadas o tres grietas distribuidas a 120° o, a veces, cuatro grietas perpendiculares [6].

Cuando la probeta se agrieta, la dilatación circunferencial corresponde al desplazamiento total de apertura de fisuras ($TCOD$), y la energía disipada, E_{BCN} , se puede calcular como:

$$E_{BCN} = \int_0^{TCOD} P(TCOD)dTCOD \quad (2)$$

De acuerdo con la norma UNE 83515, la energía debe ser determinada a los valores de $TCOD = 2.0$ mm, 2.5 mm, 4.0 mm y 6.0 mm.

3.- CORRELACIÓN ENTRE E_{25} Y $E_{BCN,6}$

3.1.- Criterios para establecer la correlación

A partir de una investigación experimental en la que se ensayaron hormigones reforzados con tres cuantías de fibras sintéticas, Carmona y Molins [4] propusieron una relación tipo código entre la capacidad de absorción de energía, E_{25} , y la energía disipada, E_{BCN} , se propuso utilizar una función no lineal de la forma dada en la expresión (3):

$$E_{25} = aE_{BCN}^b \quad (3)$$

Donde a y b son parámetros experimentales que dependen del tipo SRF, tales como la dosis de cemento, relación agua/material cementante y tipo y contenido de fibras utilizada.

Considerando que, de acuerdo con la recomendación EFNARC, la energía se debe determinar a una deflexión central de 25 mm, lo que representa un avanzado estado de agrietamiento y de daño del panel del panel, se ha propuesto comparar la energía E_{25} , con la energía disipada por el cilindro sometido a DPT a una apertura total de fisuras $TCOD = 6$ mm, lo que en el ensayo BCN también equivale a un avanzado estado de apertura de las fisuras, lo que permite a las fibras de refuerzo desarrollar completamente su capacidad de refuerzo.

3.2.- Datos utilizados

Con el objetivo de reemplazar el ensayo de paneles EFNARC por el uso del ensayo BCN para el control de los FRS en la construcción de túneles en las faenas mineras en Chile, se ha propuesto el siguiente procedimiento para obtener muestras comparables:

- Identificar 15 puntos donde los resultados de la capacidad de absorción de energía determinada en los ensayos de los paneles muestrados durante el proceso de proyección del FRS presentaban un CoV menor que el 10%.
- En los puntos seleccionados, cortar 2 testigos de 150 mm desde el FRS endurecido del soporte del túnel.
- Mediante el ensayo BCN determinar la energía disipada por los testigos a una apertura $TCOD = 6,0$ mm.
- Con los resultados obtenidos, realizar un análisis estadístico, descartando datos atípicos y estableciendo una correlación entre la capacidad de absorción de energía del panel cuadrado EFNARC y la energía disipada por el FRS en el ensayo BCN.

Los datos utilizados fueron obtenidos desde un proyecto de construcción de túneles para faenas mineras donde el hormigón se refuerza con 5 kg/m³ de fibras sintéticas de 48 mm de longitud, con una resistencia a tracción de 640 MPa, un peso específico de 9.1 kN/m³ y un módulo de Young de 10 GPa. La resistencia a la compresión del hormigón ($f_{cm,28}$) es de 55 MPa. Siguiendo este procedimiento, se seleccionaron las 15 muestras con resultados de ensayos de panel cuadrado EFNARC que se dan en la Tabla 1.

En los mismos puntos donde se obtuvieron las muestras de la Tabla 1, se cortaron testigos de 150 mm de diámetro y 150 mm de longitud para realizar los ensayos BCN. Estos ensayos se ejecutaron en una prensa hidráulica de 300 kN de capacidad bajo control de desplazamiento, siguiendo las especificaciones y configuración dada en la norma UNE 83 515, mostrada en la Fig. 2. La deformación circunferencial fue medida con un extensómetro circunferencial de 12 mm de rango total y los datos fueron registrados en forma continua a razón de 2 datos/s, obteniéndose los resultados que se dan en la Tabla 2.

Tabla 1. Valores de E_{25} utilizados para establecer la correlación.

<i>Muestra</i>	<i>Panel 1</i>	<i>Panel 2</i>	E_{25} (J)	CoV (%)
1	1005	967	986	2,7
2	1036	1025	1031	0,8
3	986	979	983	0,5
4	1009	998	1004	0,8
5	996	977	987	1,4
6	990	986	988	0,3
7	1023	910	967	8,3
8	1000	1001	1001	0,1
9	940	1004	972	4,7
10	1020	1004	1012	1,1
11	1025	1014	1020	0,8
12	948	931	940	1,3
13	978	1028	1003	3,5
14	970	953	962	1,3
15	986	1022	1004	2,5

Tabla 2. Valores de $E_{BCN,6}$ obtenidos de los ensayos de testigos.

<i>Muestra</i>	<i>BCN 1</i> (J)	<i>BCN 2</i> (J)	$E_{BCN,6}$ (J)	CoV (%)
1	218	237	228	5,9
2	231	349	290	28,8
3	292	258	275	8,7
4	305	305	305	0,0
5	244	208	226	11,3
6	172	300	236	38,4
7	236	200	218	11,7
8	230	220	225	3,1
9	191	219	205	9,7
10	287	295	291	1,9
11	254	177	216	25,3
12	322	311	317	2,5
13	276	292	284	4,0

Como se puede ver en la Tabla 2, los valores de muestras 14 y 15 fueron descartados debido a que ellas presentaron una falla frágil debido a un bajo contenido de fibras. Por otra parte, las cinco muestras destacadas en negrillas no fueron incluidas en el análisis, debido a que el CoV intra muestra es mayor al 10%.

3.3.- Correlación obtenida

Con los datos válidos y usando un software para análisis estadístico, se determinó la relación entre $E_{BCN,6}$ y E_{25} , dada en la ecuación (4):

$$E_{25} = 639,4 \times E_{BCN,6}^{0,08} \quad (4)$$

En la Fig. 5a y Fig. 5b se compara la ecuación (4) con los resultados experimentales, observándose que las diferencias son menores a $\pm 2 \%$.

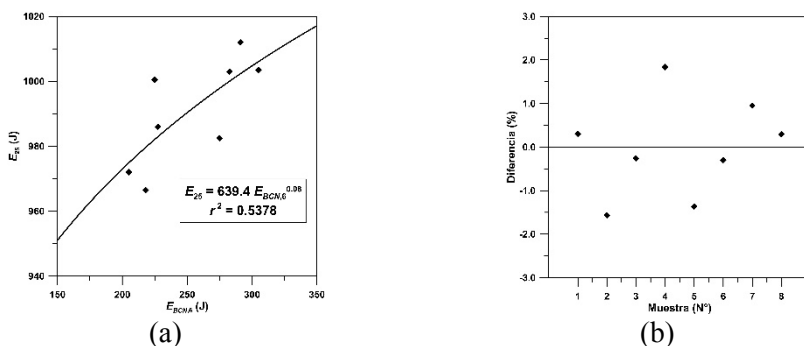


Figura 5. (a) Comparación de los valores experimentales y la ecuación (4); (b) Diferencia porcentual entre los valores experimentales de E_{25} y la ecuación (4).

4.- VALIDACIÓN DE LA CORRELACIÓN

Para validar la ecuación (4), se realizó un segundo muestreo en el mismo túnel, tanto de paneles como de testigos, los que se ensayaron siguiendo los procedimientos descritos anteriormente, obteniéndose los resultados que se presentan en la Tabla 3, donde, entre paréntesis, en la que se incluye el coeficiente de variación de cada muestra.

Observando los resultados de la Tabla 3, se puede ver que, en la mayoría de los valores, la capacidad de absorción de energía estimados usando la ecuación (4) tiene una la diferencia con los valores experimentales menor al 10%.

Por otra parte, si se determinar E_{25} usando el valor promedio de $E_{BCN,6}$ en la ecuación (4), se obtiene un valor estimado de la capacidad de absorción de energía del FRS de 1000 (J), el que coincide con el promedio alcanzado con los valores experimentales.

En los valores experimentales de energía de los ensayos EFNARC y Barcelona de la Tabla 3, se comprueba que a pesar de la relativamente gran dispersión que tienen una a una las determinaciones, en particular aquellas resultantes del ensayo Barcelona, la dispersión de aplicar la correlación es menor que las que tienen las propias determinaciones del ensayo BCN. Por tanto, aunque existe una diferencia del 27% cuando se compara experimento del panel con la correlación a partir del ensayo BCN, se considera posible dentro de las

dispersiones propias de la obra. En este sentido, cabe añadir que los testigos extraídos del sostenimiento presentan en la mayoría de los casos una dispersión comparable con la que presentan los paneles EFNARC de control.

Tabla 3. Validación de la ecuación (4).

Muestra	$E_{BCN,6}$ (J)	E_{25} (J)		Diferencia (%)
		Ecuación (4)	Experimental	
1	244 (18,8)	992	1018 (6,7)	2,6
2	276 (22,9)	1002	1033 (4,6)	3,0
3	318 (10,6)	1014	1079 (18,1)	6,4
4	232 (7,0)	989	1100 (12,5)	11,3
5	312 (22,2)	1012	1006 (8,3)	-0,6
6	330 (11,2)	1017	779 (15,1)	-23,4
7	293 (9,5)	1007	1279 (s/i)	27,0
8	241 (16,1)	991	950 (9,3)	-4,2
9	292 (6,0)	1007	847 (6,7)	-15,9
10	203 (35,4)	978	1028 (4,6)	5,1
11	306 (7,1)	1011	1044 (16,4)	3,3
12	247 (32,5)	994	894 (1,3)	-10,0
13	240 (12,8)	991	1033 (20,1)	4,2
14	252 (19,6)	995	935 (17,3)	-6,0
15	257 (14,3)	997	1031 (1,3)	3,5
Promedio	269	1000	1003	

5.- CONCLUSIONES

En importantes proyectos de construcción de túneles para faenas mineras que se están construyendo en Chile, la capacidad de absorción de energía de los FRS se determina mediante el ensayo de panel cuadrado propuesto por EFNARC. Sin embargo, para la ejecución de este ensayo se requiere de probetas pesadas, las que no permiten controlar la calidad del material proyectado en el sostenimiento.

Para facilitar los procedimientos de muestreo y ejecución de los ensayos de control, se ha propuesto el uso del ensayo Barcelona en reemplazo de los ensayos de paneles. El ensayo BCN se caracteriza por requerir una probeta relativamente pequeña, la que se puede obtener cortando testigos desde el sostenimiento endurecido.

Considerando que el proyecto especifica una capacidad de absorción de energía de $E_{25} = 1000$ (J), se ha establecido empíricamente una correlación con la energía disipada determinada mediante el ensayo BCN, la que ha sido validada con una campaña

experimental adicional, realizada con muestras obtenidas desde otro frente de trabajo del proyecto. Cabe señalar que dicha correlación es por ahora sólo válida para el hormigón estudiado. Por ello, se está investigando la posibilidad de obtener una correlación generalizada entre dichos ensayos.

REFERENCIAS

- [1] Barton, N., Lien, R., and Lunde, J. (1974) 'Engineering classification of rockmass for the design of tunnel support'. *Rock Mechanisc*, 6 (4), 189 – 236.
- [2] Barton N, Bandis SC (1990), 'Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice'. *Proceedings of the International Symposium on Rock Joints*, Loen, Norway, pp. 603–610.
- [3] EFNARC (1996), *European Specification for Sprayed Concrete*. European Federation of National Associations of Specialist Contractors and Material Suppliers for the Construction Industry. 30 pp.
- [4] Carmona, S., Molins, C. (2016), 'Use of Barcelona test for controlling fiber reinforced shotcrete in tunnelling'. *Proceedings of 13th International Conference Underground Construction Prague*, Czech Republic, 7 pp.
- [5] Molins, C., Aguado, A., Mari, A. Quality control test for SFRC to be used in precast segments. *Tunn Undergr Space Technol* 2006, 21 (3), 423 – 424.
- [6] Carmona, S., Aguado, A., Molins, C. (2012), 'Generalization of then Barcelona test for the toughness control of FRC'. *Materials & Structures*, 45 (7), 1053 – 1069.
- [7] AENOR, "UNE 83-515. Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona,". AEN/CTN 83–Hormigón, Madrid, 2010, pp. 8.