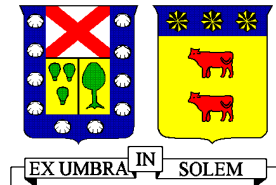


**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA**

**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

**VALPARAISO - CHILE**



**UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA**

**VALIDACIÓN EN OBRA DE UNA CORRELACION ENTRE PANEL CUADRADO Y**

**ENSAYO BARCELONA**

Memoria de titulación presentada por

**CRISTIAN ALEJANDRO REYES SOTOMAYOR**

Como requisito parcial para optar al título de

**CONSTRUCTOR CIVIL**

Profesor Guía

**Sergio Carmona Malatesta**

**ENERO 2020**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al profesor Sergio Carmona, por su gran apoyo en el desarrollo de este documento y en toda la vida académica.

A mis padres por el Gran esfuerzo en criar y formar a esta persona.

A mis amigos, de antes, de hoy y de siempre, quienes me apoyaron en cada proceso vivido.

## **DEDICATORIA**

A mi hermosa familia, a mi maravillosa hija y a mi mejor amiga, quien también es mi compañera y pilar de la familia.

## RESUMEN

Durante las últimas dos décadas, el uso del hormigón reforzado con fibras (HRF) se ha transformado en una solución de fortificación en la minería subterránea, que ha permitido incrementar la seguridad y la productividad en los desarrollos mineros, dando al país un potencial de crecimiento en rubro no visto hasta fines del siglo XX.

Dadas las ventajas al emplear hormigones reforzados con fibras en términos productivos, es que se requiere que los procesos de control de la calidad, avancen con la misma velocidad en relación a las mejoras en productividad. Esta condición muchas veces, no se cumple, dadas las dificultades operativas de los entornos subterráneos y las exigencias de los proyectos en términos de costo y plazo.

En relación al control de calidad sistemático en obra de los hormigones con fibra, este normalmente se realiza mediante el ensayo de absorción de energía, ejecutado sobre un panel cuadrado. Sin embargo, este ensayo es difícil de implementar en las obras subterráneas dado las dificultades en su traslado que usualmente experimentan las muestras y la lejanía de los centros mineros de los laboratorios habilitados para desarrollar el ensayo.

Para lograr implementar un sistema de control confiable, que reduzca los costos asociados a los ensayos de absorción de energía, es que se presenta un método que establece una correlación entre el ensayo de Barcelona y los ensayos de absorción de energía de EFNARC.

## **ABSTRACT**

During the last two decades, the use of fiber reinforced concrete (HRF) has become a fortification solution in underground mining, which has increased safety and productivity in mining developments, giving the country a potential for growth in item not seen until the late twentieth century.

Given the advantages of using concretes reinforced with fibers in productive terms, it is required that the processes of quality control, advance with the same speed in relation to improvements in productivity. This condition is often not met, due to the operational difficulties of the underground environments and the demands of the projects in terms of cost and time.

In relation to the systematic quality control of concrete with fiber, this is normally carried out through the energy absorption test executed on a square panel. However, this test is difficult to implement in underground works given the difficulties in its transfer that samples usually experience and the distance from the mining centers of the laboratories authorized to develop the test.

To achieve the implementation of a reliable control system that reduces the costs associated with energy absorption tests, a method is presented that establishes a correlation between the Barcelona test and the EFNARC energy absorption tests.

## CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS .....	7
INDICE DE FIGURAS .....	8
1. INTRODUCCIÓN .....	9
2. MARCO TEÓRICO .....	11
3. TENACIDAD Y ABSORCIÓN DE ENERGÍA DE LOS HRF .....	15
3.1. CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA .....	16
3.2. DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE ENSAYO BCN .....	18
4. CORRELACIÓN ENTRE E25 Y EBCN, 6.....	20
5. DETALLES EXPERIMENTALES .....	20
5.1. ENSAYOS Y RESULTADOS.....	22
6. VALIDACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE E25 AND E25(EBCN, 6) .....	28
7. APLICACIÓN DE LA CORRELACIÓN PROPUESTA.....	31
8. CONCLUSIONES .....	35
9. REFERENCIAS .....	36

## ÍNDICE DE TABLAS

Nº		PÁG
1.	Tabla 1.1 Puntos de muestreo desde donde se cortaron los testigos.	21
2.	Tabla 1.2. Energía disipada por los SRF a $TCOD = 6$ mm, en Joule (J)	22
3.	Tabla 1.3. Valores atípicos	23
4.	Tabla 1.4. Resultados análisis de regresión no lineal.	24

## INDICE DE FIGURAS

N°		PÁG
1.	Figura 1.1. Vista del ensayo de panel EFNARC.	19
2.	Figura 1.2. Configuración del ensayo BCN.	20
3.	Figura 1.3. Resultados de análisis de regresión	24

## 1. INTRODUCCIÓN

Incrementalmente, el hormigón reforzado con fibras (HRF) ha tenido aplicaciones en la ingeniería estructural, dado que las fibras sintéticas han permitido reducir o sustituir las barras de refuerzo en sistemas estructurales. Los campos de aplicación del HRF ha sido el de los pavimentos, el sostenimiento de taludes o el sostenimiento del macizo rocoso. (Ferreira y Branco 2007; Walraven 2009; De la Fuente *et al.*, 2012<sup>a</sup>; Olivares, Galán y Roa 2003).

El uso del HRF en reemplazo del hormigón reforzado solo con barras de acero, permite obtener una serie de ventajas tanto desde el punto de vista de comportamiento estructural en horas tempranas de fraguado como en los costos asociados a la operación. Esas han sido verificadas en los aumentos productivos que se dan hoy en día en la minería subterránea y superficie (Campos y Carmona, 2016)

La principal propiedad de los HRF es su capacidad para absorber energía durante proceso de agrietamiento ante la acción de cargas. Sin embargo, la eficiencia del refuerzo que proporciona las fibras depende de (1) las propiedades de las fibras: resistencia, adherencia y rigidez; y (2) de su distribución: fracción relativa o cuantía y orientación (Zollo, 1997). Actualmente, existe una gran variedad de fibras, fabricadas con diferentes materiales y de diferentes formas y tamaños, y el tipo de fibra a usar se elige en función de la propiedad que se desea mejorar.

En los últimos años en Chile, el uso de hormigón proyectado y reforzado con fibra (HRF) se ha extendido ampliamente en obras subterráneas, particularmente en túneles para proyectos de carreteras, minería e hidroeléctricos, como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1. Proyección de HRF en túnel minero en Chile.**

En relación a la propiedad de absorción de energía, la cual se ve mejorada con la inclusión de fibras que atraviesan las grietas que se van generando y propagando, a medida que el elemento estructural se va deformando, es importante determinar cuál es la capacidad última del elemento estructural, en relación a su capacidad de absorción de energía.

Dado lo anterior, es que existen metodologías y modelos para determinar el comportamiento de un elemento estructural, en relación a su capacidad de absorber energía y dada la utilización de fibras sintéticas en su matriz, en función de la deformación de los elementos. Esta experiencia se encuentra suficientemente condensada en las especificaciones para hormigones proyectados publicadas por la European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete (EFNARC), en 1996.

La EFNARC posee experiencia en la descripción y modelamiento del HRF en función de su capacidad para absorber energía. Pero aún no desarrolla conocimiento dirigido a correlacionar el comportamiento de otros ensayos relacionados al mecanismo de falla, en relación al test propuesto por ellos.

Dado lo anterior, se propone analizar datos experimentales provistos desde una campaña de extracción de testigos para determinar una correlación entre un *ensayo de tracción indirecta* desarrollado para el control de calidad de los HRF y el ensayo de absorción de energía, sobre panel cuadrado, propuesto por EFNARC. De este modo, se propone encontrar un método de bajo costo y de fácil implementación en minería subterránea, que permita modelar el comportamiento de la absorción de energía en hormigón proyectado y correlacionarla con el ensayo de Barcelona realizado a testigos extraídos en un proyecto minero subterráneo.

## 2. MARCO TEÓRICO

De acuerdo al uso común que se le da en el país, el término “*Hormigón Proyectado*” corresponde a la definición del “American Concrete Institute”, *Shotcrete* correspondiente a la denominación “shotcrete”, el cual corresponde a un hormigón colocado por proyección neumática de alta velocidad desde una boquilla. Otras definiciones indican que el hormigón proyectado es una mezcla de cemento, árido y agua proyectado neumáticamente (EFNARC), a esta mezcla se le aplican aditivos, adiciones, fibras o una mixtura de estas.

La Guía Chilena del Hormigón Proyectado (ICH, 2015), clasifica en dos tipos al hormigón, según el mecanismo de proyección: *mezcla seca* o *mezcla húmeda* la cual deberá cumplir con lo estipulado en la norma ACI 506R-05 Guide to Shotcrete y ACI 506.2-95 Specification for Shotcrete. (Hurtubia y Carmona, 2017)

Las especificaciones Europeas EFNARC, para el hormigón que se coloca mediante aire a presión, clasifican al hormigón proyectado por uso, las que pueden ser: estructural, apoyo a la roca y excavación, soporte de corto plazo, mejoras de superficie y reparación. El uso extendido del shotcrete ha determinado el desarrollo de un campo del conocimiento asociado al desarrollo de las aplicaciones de hormigones proyectados en diversos ámbitos. El más común de estos

corresponde al uso como refuerzo en taludes y en la minería subterránea como elemento de soporte, el cual variará sus solicitaciones dadas las condiciones del macizo rocoso que soporta.

Las fibras utilizadas como elementos que mejoran la performance del hormigón proyectado, se vienen utilizando desde el siglo pasado, pero su uso extendido se ha dado en la última década. Existe diversidad de tipos de estas, siendo posible clasificarlas, según su materialidad, esto es: de acero, de fibra de vidrio, carbono, vegetales y poliméricas.

La fibra de refuerzo son elementos individuales cortos, distribuidos a través de la masa del hormigón proyectado. La adición de estas fibras se da por diversas razones, tales como el control del rebote, control de la fisuración por retracción plástica, para mejorar la resistencia al fuego y para mejorar su desempeño frente a solicitaciones sostenidas que produzcan falla por fisuración. Algunos diseñadores se han resistido al uso de la fibra por la dificultad aparente para controlar la distribución uniforme de la fibra en la matriz de hormigón proyectado. Sin embargo, otros estudios han mostrado que un buen diseño de mezcla y un adecuado manejo y carguío de este producto permiten una dispersión uniforme en la mezcla.

La función estructural de la fibra de refuerzo en el hormigón proyectado es proporcionar tenacidad la cual describe la capacidad del hormigón proyectado reforzado con fibras para mantener y potencialmente redistribuir las cargas desde que la fisuración comienza. En un diseño teórico determinista, la matriz de HRF se diseña como si no existiera agrietamiento. Sin embargo, debido a la complejidad de estos sistemas estructurales y la gran cantidad de variables que se pueden considerar en la fabricación de HRF, especialmente cuando está implicado el soporte del macizo rocoso, existe siempre la posibilidad de una estimación errónea de las solicitaciones sobre el soporte estructural, por lo tanto, la capacidad de carga después de la aparición de las primeras grietas es clave a la hora de mantener la capacidad de servicio del sistema estructural. La capacidad de carga o de la absorción de energía post agrietamiento corresponde numéricamente a la cuantificación de la tenacidad, la que se

evalúa a través de ensayos normalizados. Las mediciones de la absorción de energía, posterior a la fisuración, en una viga o panel de prueba se utilizan para cuantificar la capacidad del HRF agrietado para soportar las solicitaciones de carga. Existen varias herramientas de diseño geotécnico que sirven como orientación sobre el valor de tenacidad que se debe especificar para aplicaciones en minería u obras civiles subterráneas (Campos y Carmona, 2016).

Actualmente, las fibras sintéticas son ampliamente utilizadas en túneles debido a que son estables químicamente frente a la acción de agentes externos y aseguran de mejor forma la performance del HRF en comparación con los HRF que utilizan la fibra metálica en su matriz, la cual posee problemas con la acción de la corrosión cuando se encuentra en ambientes agresivos. Sin perjuicio de lo anterior, las fibras igualmente se degradan bajo la acción de los rayos UV o pueden tener un punto de vitrificación a  $-20^{\circ}\text{C}$ , dependiendo de la materialidad de fabricación. Además, las fibras sintéticas incluso pueden perder sus propiedades físicas y mecánicas a temperaturas superiores a  $50^{\circ}\text{C}$ . De todas formas las condiciones extremas mencionadas en este párrafo son de difícil ocurrencia en los entornos subterráneos, mejorando comparativamente su performance frente a otro tipo de fibras o refuerzos.

Dependiendo de su diámetro, las fibras sintéticas se clasifican en microfibras, con diámetro menor a  $0,3\text{mm.}$ , y en macrofibras, las que tienen un diámetro igual o superior a  $0,3\text{ mm.}$  En la Figura 2 se presentan ambos tipos.



**Figura 2. Diferentes tipos de fibras para HRF; Fuente: [www.policemento.com.ar](http://www.policemento.com.ar)**

La macrofibra, denominada fibra sintética estructural, tiene la capacidad de armar estructuralmente el hormigón, permitiendo eliminar las mallas de acero electro soldada y reducir la armadura en determinadas condiciones. La incorporación de estas fibras le confiere al hormigón ductilidad, que le permite deformarse conservando una buena resistencia; y tenacidad, dándole la capacidad de oponerse a la propagación de la fisura disipando energía de deformación. (Campos y Carmona 2016).

La longitud de la macrofibra varía entre los 20 y los 60 mm., y la elección de la misma para el empleo en el hormigón está directamente relacionada con el tamaño máximo de este. Para reemplazar la malla electro soldada por la fibra sintética estructural y/o reducir la armadura, se debe evaluar la particularidad del proyecto y verificar el cálculo estructural del elemento y/o de la estructura en general.

En tanto, las microfibras en el hormigón tienen un uso no estructural y se emplean, principalmente, para el control de fisuración por retracción plástica, protección pasiva contra el fuego y durabilidad.

En general, estas fibras se incorporan al hormigón durante la preparación de la mezcla, de manera que queden distribuidas aleatoriamente en la masa del mismo. En el caso de la adición de microfibra, no estructural, no se requiere ningún cambio en el diseño de la dosificación del hormigón, sin

embargo, para determinar la dosificación de la fibra sintética estructural, se requiere evaluar las características estructurales del mismo. (Hurtubia y Carmona 2017).

### **3. TENACIDAD Y ABSORCIÓN DE ENERGÍA DE LOS HRF**

Es una propiedad clave para un estado estructural deformado con desplazamiento relevante después del agrietamiento. La evaluación de la tenacidad se puede realizar en términos de capacidad de absorción de energía, normalmente entre el inicio de la carga y una deflexión especificada en un ensayo de panel u otro similar y se determina como el área bajo la curva carga/deflexión para una probeta. Es una propiedad que se ve afectada principalmente por el contenido y tipo de fibra, pero también puede ser fuertemente influenciada por la resistencia y la calidad de la matriz de hormigón proyectado. Las unidades de medida son Joules (N-m o kN-mm). En algunos países de habla inglesa, la prueba del panel redondo, como se describe en la norma ASTM C1550-17, es el mecanismo de testeado más común para medir la tenacidad del hormigón proyectado reforzado con fibras. En Europa occidental, se utilizan principalmente la Norma Europea EN 14488-318 para vigas o la norma EN 14488-5 para paneles, estos ensayos se conocían con anterioridad como los ensayos de vigas y de paneles de EFNARC. Existe correlaciones útiles entre los valores de tenacidad y absorción de energía utilizando los diversos métodos de ensayo, para espesor de probetas iguales. El sistema de calidad de la roca RQD se actualizó en 2002 para incluir valores de tenacidad, según ensayos en panel EN 14488-5 para hormigón proyectado reforzado con fibras utilizados en los revestimientos. Los valores de tenacidad necesarios para un proyecto dependen de los requisitos de la aplicación de que se trate, de los valores y método de ensayo los cuales deben ser especificados por un ingeniero o experto geomecánico. Es de común ocurrencia en minería, la especificación de HRF en términos de resistencia a partir de la especificación de la capacidad mínima de absorción de energía a partir de pruebas de panel.

### 3.1. CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA

La determinación de la capacidad de absorción de energía se realizó de acuerdo al procedimiento establecido en la recomendación EFNARC (1996), ensayándose paneles cuadrado de  $600 \times 600$  mm y 100 mm de espesor, apoyado en sus 4 bordes, dejando una luz libre en bordes opuestos de 500 mm.

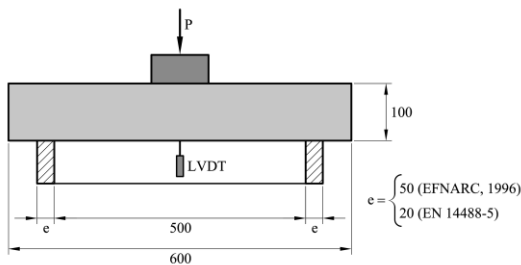
La carga se aplicó en el centro del panel, sobre una superficie de contacto de  $100 \times 100$  mm, como se puede ver en la Figura 2. Siguiendo la recomendación EFNARC, el ensayo se realiza bajo control de desplazamiento del actuador, a una velocidad de deflexión central de 1.5 mm/min.

La carga y deflexión se registran en forma continua hasta que se alcanza una deflexión central de 25.

Usando esa respuesta, la capacidad de absorción de energía,  $E_{25}$ , se calcula como:

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

Donde  $P(\delta)$  es la carga en función de la deflexión  $\delta = 25$  mm.

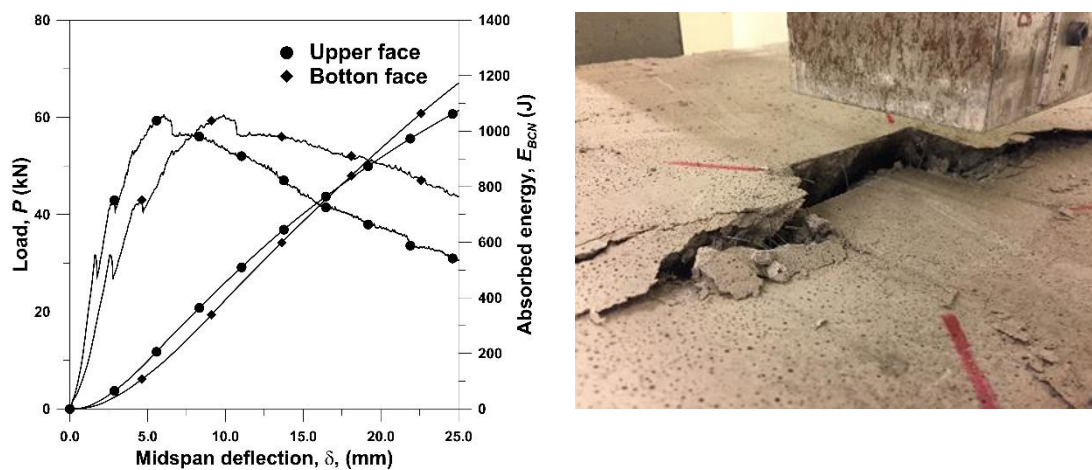


**Figura 2. Configuración del ensayo de panel cuadrado.**

Los resultados de las pruebas de panel cuadrado presentan una alta variabilidad, con coeficientes de variación intramuestra (CoV) que pueden exceder el 20%. Esto se debe a múltiples factores típicos del proceso de proyección de HRF tales como: la presión de aire, la distancia y el ángulo de proyección, así como también el mismo proceso de muestreo, incluyendo las condiciones del molde de soporte, el curado, el transporte y el posterior corte de las muestras de panel en laboratorio. Además

de lo anterior, los paneles son pesados (excediendo el nivel permitido por la ley 20949 para manipulación manual) y difícil manejo, tanto en la faena como en el laboratorio, lo que hace que muchos paneles presenten daños o defectos que alteran los resultados.

Otra fuente de error, es el punto de medición de la deflexión. Las curvas de carga-deformación obtenidas al medir la deflexión en las caras superior e inferior de un panel se muestran en la Figura 3.a. Se puede observar que para una deflexión central de 25 mm, medida en la cara inferior del panel, la deflexión medida en la cara superior es significativamente menor, con el consiguiente efecto en el cálculo de la energía absorbida.



**Figura 3. (a) Comparación de la medida de la deflexión central con respecto a la cara inferior y superior del panel; (b) Estado final de la cara superior de un panel de HRF después de la prueba EFNARC.**

En la Figura 3b se muestra una falla por punzonamiento (punching failure) causada por la carga localizada en la cara superior del panel, como se observa en tres muestras de hormigones reforzados con contenido de fibra medio y alto. Este tipo de falla hace que la placa de carga penetre en la cara superior del panel, lo que disminuye el desplazamiento medido en esa cara con respecto a la deflexión central registrada en la cara inferior del panel.

### 3.2. DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE ENSAYO BCN

El ensayo Barcelona (BCN) es un ensayo de tracción indirecta, en el cual una probeta cilíndrica de hormigón reforzado con fibras, es sometida a un doble punzonamiento, mediante una carga de compresión aplicada con dos punzones de acero colocados en el centro de las caras superior e inferior del cilindro, respectivamente, como se muestra en la Figura 4.(a). El cilindro tiene un diámetro ( $d$ ) igual a la altura ( $h$ ), y los punzones un diámetro ( $2a$ ) igual a 0,25 del diámetro de la probeta. Durante el ensayo se debe registrar la carga aplicada,  $P$ , y el desplazamiento total de apertura de las grietas ( $TCOD$  del inglés Total Crack Opening Displacement), para determinar la curva  $P - TCOD$ .



**Figura 4. (a) Configuración del BCN ; (b) Estado final típico de especímenes sometidos a pruebas de doble punzonamiento.**

Durante el ensayo, la carga aplicada produce bajo los punzones un cono sometido a un estado triaxial de compresión, que incrementa el diámetro del cilindro provocando esfuerzos de tracción perpendiculares a las líneas radiales de la probeta. Debido a ese esfuerzo de tracción, con simetría cilíndrica, cuando el estado tensional supera la resistencia a tracción del hormigón, se propagan grietas perpendiculares al estado tensional. Esto permite que el cono penetre en el cilindro,

incrementando el radio de la probeta y produce 2 o más fisuras alineadas, tres fisuras distribuidas a 120°, y, a veces, cuatro fisuras perpendiculares.

Cuando las grietas se abren, la dilatación circunferencial corresponde al *TCOD* y la energía disipada se puede calcular como:

$$E_{BCN,x} = \int_0^{Rx} P(Rx) d(Rx) \quad (2)$$

Donde  $E_{BCN,x}$  es la energía disipada a cierto valor de la deformación circunferencia total  $R_x$ .

Debido a su simplicidad y al mayor conocimiento que se tiene de la respuesta de los HRF sometidos al ensayo BCN, respaldado en un gran número de investigaciones tanto a nivel experimental (Carmona *et al.*, 2012; 2013; Aire *et al.*, 2015) como numérico (Pros *et al.*, 2011; 2012; Pujadas *et al.*, 2013; 2014), este ensayo progresivamente se empieza a utilizar para evaluar el comportamiento post agrietamiento de los HRF, como se puede ver en la investigaciones realizadas por Chao *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2015; Carmona *et al.*, 2016; Choumanidis *et al.*, 2017; Rambo *et al.*, 2018, y se ha propuesto como ensayo de control de los shotcrete reforzados con fibras en algunos proyectos de gran envergadura, como se ha propuesto para el Metro de Lima (Geocontrol, 2015).

#### **4. CORRELACIÓN ENTRE $E_{25}$ Y $E_{BCN,6}$**

De acuerdo con la recomendación de EFNARC, la capacidad de absorción de energía del HRF debe determinarse para una deformación media del panel  $\delta = 25$  mm, lo que representa un estado avanzado de agrietamiento y daño del panel mismo. Luego, para establecer una correlación experimental con la prueba BCN, se ha propuesto comparar la energía  $E_{25}$  con la energía disipada por el cilindro sometido a una prueba de doble punzonamiento (DPT) con una apertura de grieta total  $TCOD = 6$  mm, la cual, en la prueba de BCN también es equivalente a un estado avanzado de apertura de grietas. Para ello, se desarrolló una extensa investigación experimental en un laboratorio que utiliza un concreto diseñado para ser proyectado en húmedo, el cual se reforzó con tres cantidades diferentes de fibras sintéticas como se usa actualmente en la construcción de los soportes de fortificación en diferentes tipos de túneles, así como también en minas, carreteras y plantas hidroeléctricas. que se ejecutan en Chile.

#### **5. DETALLES EXPERIMENTALES**

Los hormigones se prepararon con un cemento puzolánico de tipo IP según la norma ASTM C 595 y arena de río triturada; las proporciones de la mezcla se presentan en la Tabla 1. Se probaron tres contenidos diferentes de las mismas fibras sintéticas. Las características de las fibras muestran en la Tabla 2.

**Tabla 1.** Características y propiedades de los HRF ensayados.

Material (kg/m <sup>3</sup> )		Hormigones		
		HRF – 4	HRF – 8	HRF – 12
Cemento tipo IP		420		
Arena 0/10		1655		
Aditivo Superplastificante		2.10		
Aditivo Superfluidificante		2.10		
Aditivo Activo		2.94		
Agua		215		
Contenido de fibra		4	8	12
Numero de especimen	Ensayo BCN	10	9	10
	Ensayo Panel cuadrado	10	10	10
	Ensayo de compresión	3	3	3
Propiedades del Hormigón				
resistencia a la compresión, $f_c$ (MPa)		39.5	40.9	42.3
$V_f$ (%)		0.44	0.88	1.32

**Tabla 2.** Propiedades de la fibra sintética (datos del fabricante).

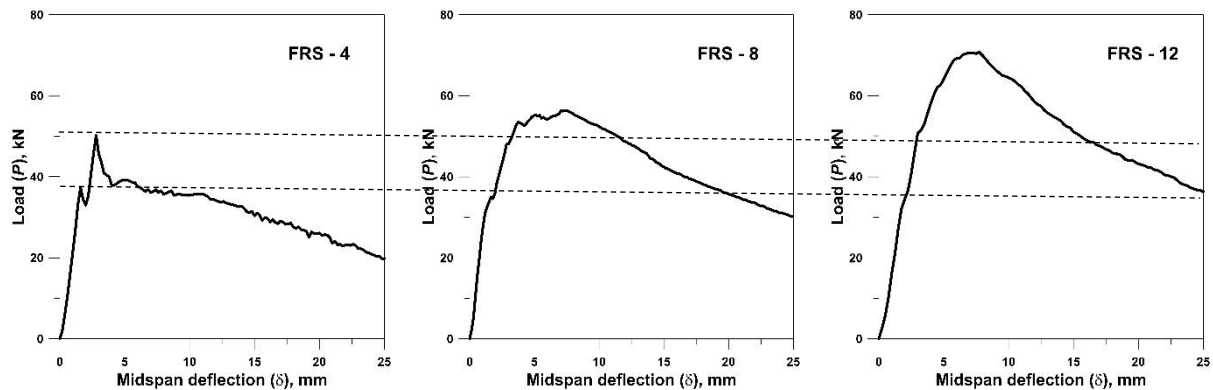
Designación	$l_f$ (mm)	$d_f$ (mm)	$\lambda_f$ $l_f/d_f$	$f_{st}$ (MPa)	E (GPa)	Fibras/kg N°
BC	54	0.84*	64.3	640	12	37000

(\*) Diámetro equivalente determinado con la información del fabricante.

Los hormigones se prepararon en el laboratorio utilizando un mezclador de paletas convencional de 200 litros de capacidad. Para el ensayo BCN, las muestras se moldearon en moldes cilíndricos con un diámetro de 150 mm y una altura de 150 mm. Los paneles se moldearon en moldes de acero de 600×600×100 mm. El número de muestras para cada serie de materiales se proporciona en la Tabla 1. Todas las muestras se desmoldaron después de 24 horas y se guardaron en una sala de curado hasta el análisis. La tabla 1 también incluye los resultados de los ensayos de compresión.

## 5.1. ENSAYOS Y RESULTADOS

Las pruebas de panel se realizaron en un sistema hidráulico con control de circuito cerrado de 100 kN de capacidad bajo control de la deformación. La deflexión se midió con un LVDT de 50 mm, colocado en la cara inferior central de la muestra. La carga y la deformación fueron registradas continuamente por el sistema de prueba a una velocidad de 3 datos / s. Las curvas medias obtenidas con cada hormigón testeado se muestran en la Figura 5.



**Figura 5.** Curvas medias  $P - \delta$  obtenidas con ensayos de panel.

En la curva HRF-4, se observó un primer pico con una carga promedio de 37.3 kN, con una deformación central  $\delta = 1.60$  mm asociada con la formación de la primera grieta, y un segundo pico con una carga promedio de 50.2 kN y  $\delta = 2.80$  mm cuando se produjo la segunda grieta. En estos hormigones, las grietas usualmente estaban orientadas en forma de  $\times$  o  $+$ , como se muestra en la Figura 6a. Después del segundo pico, se observó un reblandecimiento de la muestra, con una disminución gradual en la carga sostenida por el HRF, el cual alcanzó una carga promedio de 19.8 kN en una desviación central de 25 mm. Para los niveles de deflexión avanzados (ver Figura 6b), se puede observar una alta rotación de las partes del panel agrietado, con fricción entre el borde de soporte y los bordes del panel, como se muestra en la Figura 6c.

En el HRF – 8, la primera grieta se obtuvo con una carga promedio de 34.5 kN y  $\delta = 1.77$  mm, y la segunda grieta se produjo con una carga  $P = 47.8$  kN y  $\delta = 3.06$  mm. Posteriormente, la carga continuó aumentando, con picos locales asociados con la formación de otras grietas, hasta que se alcanzó una carga absoluta máxima  $P = 56.5$  kN en  $\delta = 7.03$  mm. Luego se observó un reblandecimiento de la muestra, por lo cual la carga disminuyó gradualmente, alcanzando una carga  $P = 30.02$  kN en una deflexión  $\delta = 25$  mm.

Como se puede observar en la Figura 5, las cargas correspondientes a la primera y la segunda grieta no parecían depender de la cantidad de fibra de refuerzo. Sin embargo, en los paneles reforzados con cantidades medias y altas (HRF-8 y HRF-12, respectivamente), inicialmente se produjo una grieta por flexión, que causó los primeros picos que se pueden observar en las curvas  $P-\delta$ . Sin embargo, debido a la mayor cantidad de fibras presentes, el sistema de ensayo tuvo que aumentar la carga aplicada para mantener la tasa de deformación establecida, que además de la fuerza de fricción desarrollada en la área de apoyo del panel, dio lugar a un fallo de punzonamiento el cual se refleja en la formación de grietas alrededor de la superficie cargada, como se puede observar en la Figura 6d, limitando el trabajo de las fibras en tensión y distorsionando la medición de la deformación realizada en la cara superior del panel.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 6.** (a) Patrón de fisuras de los paneles HRF-4 después del ensaye (b) Rotación entre partes de los paneles de la serie HRF-4; (c) Evidencia de la fricción del panel en el marco de soporte; (d) Falla de corte por punzonamiento observado en paneles con cantidades medias y altas de fibra.

La capacidad de absorción de energía de cada HRF se calculó utilizando la ecuación (1), obtenida desde las curvas presentadas en la Figura 7 y resumidas en la Tabla 3, en la que el coeficiente de variación (CoV) también se incluye entre paréntesis. El efecto beneficioso por la incorporación de fibras se muestra entre los paréntesis. Teniendo en cuenta que en la mayoría de los proyectos se especifica una capacidad de absorción de energía del HRF de 1000 J, se puede observar que esta capacidad se alcanza en el laboratorio con un contenido de fibras de 8 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 3.** Valores promedio de absorción de energía y coeficientes de variación para  $E_{25}$  obtenidos mediante ensayos de muestras de HRF, en (J).

$\delta$ (mm)	HRF – 4	HRF – 8	HRF – 12
5.0	143.8 (17.4)	193.9 (20.6)	189.6 (23.4)
10.0	340.6 (13.5)	466.5 (15.6)	530.4 (13.7)
15.0	519.1 (12.7)	705.8 (13.5)	818.6 (10.2)
20.0	673.4 (12.2)	900.6 (11.3)	1053.2 (10.3)
25.0	803.6 (11.7)	1064.9 (9.9)	1252.4 (10.7)

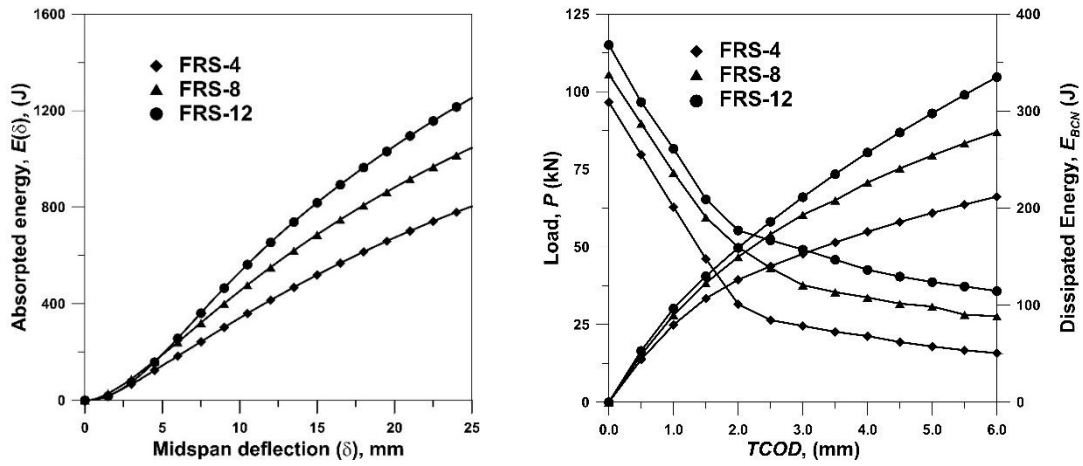
Por otro lado, las pruebas de BCN se llevaron a cabo utilizando un sistema hidráulico convencional de 3 MN de capacidad. Respetando la norma UNE 83 515, el desplazamiento de la carrera se utilizó como parámetro de control a una velocidad constante de 0,5 mm/min. La dilatación circunferencial se midió por medio de un extensómetro de 12 mm de rango, fijado a los extremos de una cadena y colocado a la mitad de la altura de la muestra. Los datos de prueba se registraron mediante un sistema de adquisición de datos a una frecuencia de dos datos por segundo. La Figura 8a muestra la media de las curvas  $P - TCOD$  registradas durante las pruebas de BCN. En todas estas curvas, el  $TCOD$  está cerca de cero hasta que se alcanza la carga máxima y, luego, aumenta cuando se produce el

agrietamiento de la muestra. En el régimen de post-fractura, el material exhibe un reblandecimiento, gobernado por el contenido de fibra.

La energía disipada por el HRF durante el proceso de fractura se calculó utilizando la ecuación (2), obteniendo las curvas  $E_{BCN} - TCOD$  presentadas en la Figura 7b y resumidas en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Valores promedio de  $E_{BCN}$  obtenidos con cada ensaye, en (J).

$TCOD$ (mm)	HRF - 4	HRF - 8	HRF - 12
0.5	44.1	48.8	52.9
1.0	79.7	89.8	97.5
1.5	106.9	123.1	134.3
2.0	126.2	150.5	164.5
2.5	140.1	173.8	191.3
3.0	152.8	194.0	216.6
3.5	164.6	212.3	240.4
4.0	175.6	229.5	262.5
4.5	185.7	245.9	283.3
5.0	195.1	261.5	303.1
5.5	203.7	276.3	322.1
6.0	211.8	290.2	340.3



**Figura 7.** (a) Promedio de las curvas  $\delta - E_{25}$  obtenidas al ensayar el panel cuadrado de cada concreto estudiado; (b) Respuestas medias de  $P - TCOD$  y  $E_{BCN} - TCOD$  obtenidas con pruebas de BCN de cada concreto ensayado.

Los valores promedio de  $E_{25}$  y  $E_{BCN,6}$  obtenidos en la investigación experimental se presentan en la Tabla 5 y se representan en la Figura 8, donde se observa que la relación entre estas dos propiedades del HRF se ajusta a una ecuación de la forma:

$$E_{25} (E_{BCN,6}) = a \times (E_{BCN,6})^b \quad (3)$$

donde  $a$ , y  $b$ , son parámetros experimentales que dependen del tipo y el contenido de las fibras en el concreto. Estos parámetros se han determinado utilizando un análisis de regresión no lineal, obteniendo los parámetros  $a = 5,267$  y  $b = 0,938$  con un coeficiente de determinación  $r^2 = 0,9987$ . Este modelo se ajusta muy bien a los resultados experimentales, como se puede ver en la Tabla 5 y la Figura 8.

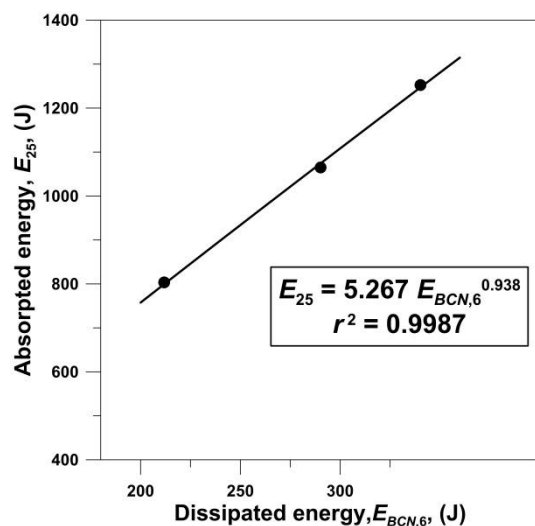


Figura 8. Correlación entre  $E_{25}$  and  $E_{BCN,6}$  obtenidos a nivel de laboratorio.

**Tabla 5.** Ajuste de la ecuación (3) a los datos experimentales.

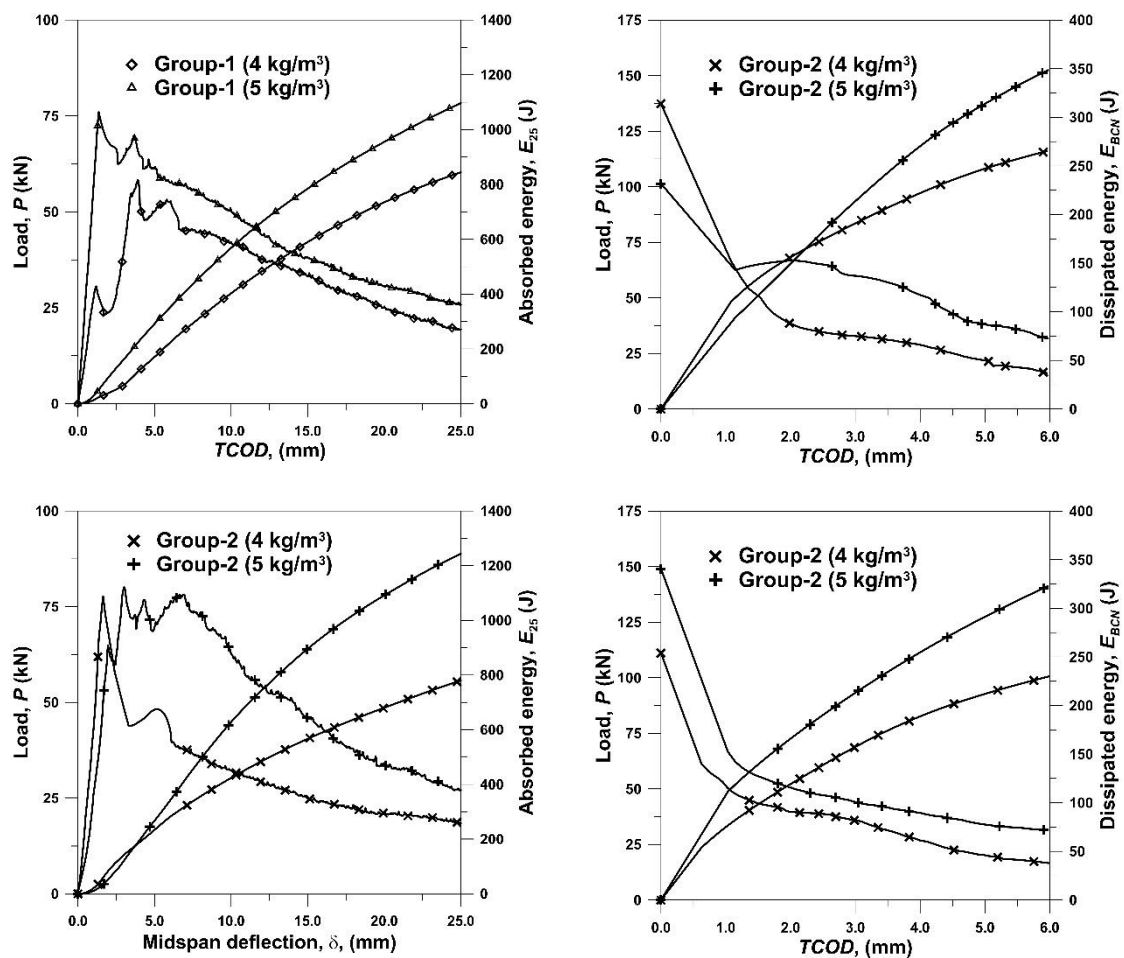
Concreto	$E_{BCN,6}$ (J)	$E_{25}$ (J)	$E_{25}(E_{BCN,6})$ (J)	Diferencia (%)
HRF-4	211,8	803,6	799,4	-0,52
HRF-6	290,2	1064,9	1074,1	0,87
HRF-12	340,3	1252,4	1247,1	-0,42

## 6. VALIDACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE $E_{25}$ AND $E_{25}(E_{BCN,6})$

Para reemplazar la prueba de panel con la prueba BCN en el control de HRF en la construcción de túneles en Chile, se validó la ecuación (3) utilizando los resultados obtenidos con dos grupos de muestras de HRF obtenidas por una empresa constructora que ejecutó una sección de un túnel minero.

Los HRF muestreados se reforzaron con las mismas fibras utilizadas en el laboratorio (Tabla 2) y los hormigones se mezclaron a nivel industrial y se trasladaron a la frente en camiones mixer hasta el punto de proyección. Se tomaron muestras de los HRF llenando moldes de madera durante la

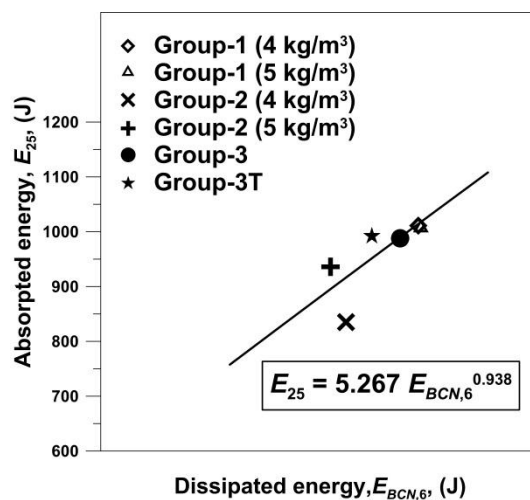
proyección de hormigón que conforma parte del soporte del túnel. Después de 48 horas, los moldes se transfirieron a un laboratorio en el lugar, donde se cortaron testigos cilíndricos de 153 mm de diámetro y longitud variable y paneles con dimensiones nominales de 600×600×100 mm. Vale la pena indicar que los paneles se cortaron a través de sus seis caras con una sierra de diamante enfriada con agua. Posteriormente, los especímenes se trasladaron al Laboratorio de la Universidad Técnica Federico Santa María, donde se analizaron siguiendo las normas UNE 83515 y EN 14488-5. Antes de las pruebas, los testigos se cortaron en una proporción de  $H / d \approx 1$ .



**Figura 9.** Curvas típicas de  $P$ -TCOD and  $P$ - $\delta$  obtenidas en las pruebas BCN y panel EFNARC.

Las curvas típicas de  $P - TCOD$  and  $P - \delta$  obtenidas en las pruebas de panel y BCN, respectivamente, se muestran en la Figura 9 y los resultados obtenidos en cada investigación se

presentan en la Tabla 6, en la cual también se presenta la cantidad nominal de la fibra de refuerzo utilizada en cada hormigón proyectado estudiado y el valor de la capacidad de absorción de energía estimada para cada serie utilizando la ecuación (3).



**Figura 10.** Validación de la correlación con resultados de muestras tomadas en obra.

Como se puede observar en la Tabla 6, la capacidad de absorción de energía estimada del HRF utilizando la ecuación (3) se ajusta bien a los resultados experimentales obtenidos con las muestras del sitio, con una diferencia máxima de 9,82%, que se puede observar gráficamente en la Figura 10. Por otra parte, se observa que la dispersión de los resultados de las pruebas de panel es mayor que la diferencia de los resultados de energía disipada obtenidos con la prueba de BCN, que ratifica una de las ventajas de esta prueba y ha sido ampliamente demostrada por diferentes autores (Molins et al., 2009; Carmona et al., 2012; Cavalaro y Aguado, 2015).

**Tabla 6.** Resultados de muestras obtenidas en el PMCHS.

Grupo	Cantidad de fibra (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{BCN,6}$ (J)	$E_{25}$ (J)	Ecuación. (3) (J)	Diferencia (%)
1	4	273 (9.3)	1011 (5.0)	1016	0.49
	5	274 (15.6)	1007 (13.6)	1019	1.19
2	4	245 (13.4)	835 (19.2)	917	9.82
	5	239 (12.7)	936 (16.2)	896	-4.27

## 7. APLICACIÓN DE LA CORRELACIÓN PROPUESTA

Teniendo en cuenta la bondad de ajuste de la ecuación (3), se propuso el uso de la prueba BCN para verificar la capacidad de absorción de energía de los HRF utilizados en la construcción de una sección del soporte de un túnel minero.

Para ello, se utilizó el siguiente procedimiento:

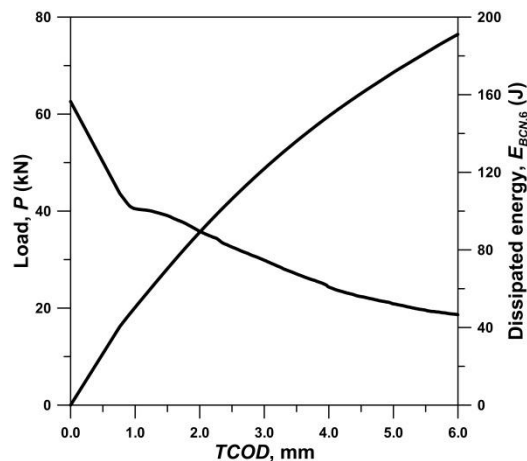
- Se identificó 15 puntos donde se tomaron muestras de los paneles y cuyos valores de energía absorbida dentro de la muestra tienen un CoV inferior al 10%.
- Se perforó al menos 2 núcleos de 150 mm de diámetro desde el hormigón proyectado del soporte del túnel en cada uno de los puntos seleccionados.
- Se obtuvo la energía disipada en TCOD = 6.0 mm de cada núcleo por medio de la prueba BCN.

Siguiendo el procedimiento propuesto, se seleccionaron los puntos de muestreo de panel que se muestran en la Tabla 7, junto con los valores de la capacidad de absorción de energía obtenidos durante el ensaye.

En los mismos puntos de muestreo que se indican en la Tabla 7, se perforaron dos núcleos de diámetro  $d = 153$  mm para la prueba BCN. Antes de las pruebas, los núcleos se cortaron para obtener una relación  $H/(d \approx) 1$ . Las pruebas se realizaron siguiendo las especificaciones y la configuración indicadas en la norma UNE 83 515 (Figura 4a). El estado final de la muestra se puede ver en la Figura 12, junto con las curvas experimentales típicas obtenidas de  $P - TCOD$  y  $TCOD - E_{25}(E_{BCN,6})$ . Los resultados para cada muestra se dan en la Tabla 8.

**Tabla 7.** Valores de absorción de energía obtenida durante los ensayos usados en esta investigación.

Muestra	pk	$E_{25}$ (J)			CoV (%)
		Panel 1	Panel 2	$E_{25,i}$	
1	7994.77 – 7997.96	978	1028	1003	3.5
2	68.382 – 73.170	1005	967	986	2.7
3	681.441 – 671.841	1036	1025	1031	0.8
4	22.66	986	979	983	0.5
5	20	1009	998	1004	0.8
6	85	996	977	987	1.4
7	40	990	986	988	0.3
8	124	1023	910	967	8.3
9	141.196 – 148.801	1000	1001	1001	0.1
10	50.91 – 53.427	940	1004	972	4.7
11	208.44 – 212.23	1020	1004	1012	1.1
12	50	1025	1014	1020	0.8
13	937	948	931	940	1.3
14	645.745	923	903	913	1.6
15	6809.221	932	904	918	2.2



**Figura 11.** Ensayo de BCN: (a) estado de las probetas después del ensaye; (b) curvas típicas obtenidas.

**Tabla 8.** Energía disipada,  $E_{BCN,6}$ , obtenidas con ensayos de BCN.

Muestra	pk	BCN-1 (J)	BCN-2 (J)	$E_{BCN,6i}$ (J)	CoV (%)
1	7994.77 – 7997.96	276	292	284	4,0
2	68.382 – 73.170	218	237	228	5,9
<b>3</b>	<b>681.441 – 671.841</b>	<b>231</b>	<b>349</b>	<b>290</b>	<b>28,8</b>
4	22.66	292	258	275	8,7
5	20	305	305	305	0,0
<b>6</b>	<b>85</b>	<b>244</b>	<b>208</b>	<b>226</b>	<b>11,3</b>
<b>7</b>	<b>40</b>	<b>172</b>	<b>300</b>	<b>236</b>	<b>38,4</b>
<b>8</b>	<b>124</b>	<b>236</b>	<b>200</b>	<b>218</b>	<b>11,7</b>
9	141.196 – 148.801	230	220	225	3,1
10	50.91 – 53.427	191	219	205	9,7
11	208.44 – 212.23	287	295	291	1,9
<b>12</b>	<b>50</b>	<b>254</b>	<b>177</b>	<b>215,5</b>	<b>25,3</b>
13	937	322	311	317	2,5

Como se puede ver en la Tabla 8, dos muestras (número 14 y 15) se descartaron porque fallaron repentinamente cuando se alcanzó la carga de agrietamiento, debido al bajo contenido de fibra. Por otro lado, el CoV de cuatro muestras, que se muestra en negrita, es superior al 10%, estos resultados también se descartaron.

Los valores de  $E_{25}$  se estimaron utilizando la ecuación (3) con los datos experimentales medios que se muestran en la Tabla 9, logrando el resultado mostrado en la Figura 10, donde la diferencia absoluta para los valores medios de la energía absorbida es inferior al 2.0%.

**Tabla 9.** Energía disipada,  $E_{BCN,6}$ , obtenida mediante ensayos de BCN .

Muestra	$E_{BCN,6}$ (J)		$E_{25}$ (J)		Ecuacion. (3) (J)	Diferencia (%)
1	284	266 (15.5)	1003	988 (2.4)	973	-1.5
2	228		986			
4	275		983			
5	305		1004			
9	225		1001			
10	205		972			
11	291		1012			
13	317		940			

Por otro lado, si la capacidad de absorción de energía se estima con la ecuación (3), utilizando todas las muestras que se indican en la Tabla 8, el valor promedio correspondiente a

$E_{25}(E_{BCN,6}) = 255 \text{ J}$  es  $E_{25} = 953 \text{ J}$ . Este valor difiere en un 3,96% con respecto al promedio  $E_{25} = 992 \text{ J}$  obtenido de las pruebas del panel.

## 8. CONCLUSIONES

Para mejorar el control de ejecución del revestimiento con HRF de túneles, se ha desarrollado una correlación experimental entre la prueba de panel EFNARC de un hormigón reforzado con fibra sintética y la prueba de Barcelona de doble punzonamiento.

Además, se justifica que una correlación entre las pruebas basadas en la relación de los mecanismos de fractura es difícil de obtener debido a la complejidad de los mecanismos de falla involucrados en el panel EFNARC; para los refuerzos livianos, la fractura es causada predominantemente por la flexión, mientras que para los refuerzos con fibra significativos, la fractura es causada predominantemente por punzonamiento.

La expresión desarrollada, basada en las pruebas a las muestras realizadas en el laboratorio con diferentes cantidades de fibra de refuerzo, relaciona directamente la energía de ambas pruebas sin requerir otras variables adicionales, como la cantidad de fibra o la resistencia a la compresión del concreto, al menos en el rango de resistencias analizadas.

La aplicación de dicha correlación a un hormigón proyectado en sitio utilizando la misma fibra ha resultado satisfactoria, con una diferencia entre la medida experimental y la correlacionada de 1.5%. Por lo tanto, es posible afirmar que el criterio y la metodología utilizados pueden aplicarse a otros casos.

El beneficio de utilizar probetas mucho más pequeños, los cuales se pueden extraer del revestimiento real, simplificará y mejorará el control de calidad en los proyectos subterráneos

que involucren el sostenimiento de túneles mediante el uso de HRF, además de reducir el costo de construcción y los residuos de dicha tarea.

## 9. REFERENCIAS

UNE 83507. “Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Rotura por compresión”. AEN/CNT 83-Hormigón, 1986, 4pp.

“Shotcrete – Guía Chilena del Hormigón Proyectado”. Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón (ICH), 2015, pp13.

VERMA, S. and QUIROZ - RUIZ, A. “Critical values for six Dixon tests for outliers in normal samples up to sizes 100, and applications in science and engineering”. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol 23, número 2 (2006), pp 133-161.

R. B. DEAN, And W. J. DIXON “Simplified Statistics for Small Numbers of Observations”. Anal. Chem., 1, 23 (4) (1951), pp 636-638

GRUBBS, F. E. “Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples”. Technometrics, Vol. 11, No. 1. 11 (1) (1969), pp 1–21

WALRAVEN, J. C. “High performance fiber reinforced concrete: progress in knowledge and design codes”. RILEM Material and structures, vol. 42 (2009), pp 1247-1260.

ROBERT B. DEAN AND WILFRID J. DIXON. "Simplified Statistics for Small Numbers of Observations". Anal. Chem., 23 (4), (1951), pp 636–638.

M. OLIVARES S., C. GALÁN MARÍN, J. ROA FERNÁNDEZ “LOS COMPOSITOS: CARACTERÍSTICAS y APLICACIONES EN LA EDIFICACIÓN. Informes de la Construcción, Vol. 54, n° 484, marzo-abril 2003”. Vol. 54, n°484 (2003), pp 46.

HURTUBIA N. A., CARMONA S. “DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA ABSORBIDA DE HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS MEDIANTE EL ENSAYO DE PANELES EFNARC”. TESIS Como requisito parcial para optar al título de Constructor Civil, UTFSM, (2017), pp 13-31.

C. L. CAMPOS, CARMONA S. “CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE HORMIGONES REFORZADOS CON CUANTÍAS MEDIAS DE FIBRAS SINTÉTICAS.” TESIS Como requisito parcial para optar al título de Constructor Civil, UTFSM, (2016), pp 18.

GEORGE C. CANAVOS, “Probabilidades y estadística aplicaciones y métodos”, pp 621 (tabla F)

ALLENDE, H. “Probabilidades y estadística”. Valparaíso, UTFSM, 1982, pp 353. AENOR. UNE 83515 – Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona. AEN/CTN 83 – Hormigón, Madrid (in Spanish), 2010.

AIRE, C., CARMONA, S., AGUADO, A., MOLINS, C., (2015), “Double-Punch Test of Fiber-Reinforced Concrete: Effect of Specimen Origin and Size,” *ACI Materials Journal*, V. 112, No 2, pp 199–208, [doi.org/10.14359/51687362](https://doi.org/10.14359/51687362).

ASTM International (2017), “ASTM C 595/C595M–17 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements” *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.01, 8 pp.

BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J., (1974), “Engineering classification of rockmass for the design of tunnel support”, *Rock Mechanics*, V. 6, No 4, pp. 189 – 236.

BARTON N., BANDIS S.C., (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.

CARMONA, S., AGUADO, A., MOLINS, C., (2012) “Generalization of then Barcelona test for the toughness control of FRC”, *Materials and Structures*, V. 45, No 7, 1053 – 1069, [doi.org/10.1617/s11527-011-9816-8](https://doi.org/10.1617/s11527-011-9816-8).

CARMONA, S., MOLINS, C., AGUADO, A., (2018), “Correlation Between Bending Test and Barcelona Tests to Determine FRC Properties” accepted in *Construction and Building Materials*.

CAVALARO, S., AND AGUADO, A., (2015) “Intrinsic Scatter of FRC: An Alternative Philosophy to Estimate Characteristic Values,” *Materials and Structures*, V. 48, No. 11, pp. 3537–3555, [/doi.org/10.1617/s11527-014-0420-6](https://doi.org/10.1617/s11527-014-0420-6).

CEN (2005), EN 14488–1 Testing sprayed concrete — Part 1: Sampling fresh and hardened concrete. 10 pp.

JIMÉNEZ, P., GARCÍA, A., MORÁN F., (2000), “Hormigón Armado”, Ed. Gustavo Gili, ISBN: 9788425218255, 846 pp. (in Spanish).

CEN (2006), “EN 14488-5:2006 Testing sprayed concrete. Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens”, 8 pp.

EFNARC (1996), European Specification for Sprayed Concrete. European Federation of National Associations of Specialist Contractors and Material Suppliers for the Construction Industry, 30 pp.

MOLINS, C., AGUADO, A. AND MARI, A., (2006), “Quality control test for SFRC to be used in precast segments”, Tunnelling and Underground Space Technology, V. 21, No 3, pp. 423-424. doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.067.

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, V. 42, No 4, pp. 415–425, doi.org/10.1617/s11527-008-9391-9.

European Committee for Standardization, “EN 14651: Test Method for Metallic Fibered Concrete—Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality (LOP), Residual)”, 2005. 17 pp.

CEB-FIP (2010), “Model Code – First Complete Draft,” FIB Bull vol. 1, V. 55, pp. 1–318.

Bjøntegaard, Ø., “Energy absorption capacity for fibre reinforced sprayed concrete. Effect of friction in round and square panel tests with continuous support (Series 4)”, Technical Report 2534, Norwegian Public Roads Administration Directorate of Public Roads Technology Department, 2009, 60 pp.

RABBAT, B. AND RUSSELL, H. (1985). "Friction Coefficient of Steel on Concrete or Grout." J. Struct. Eng., V. 111, No 3, pp. 505-515."

### **3. ANEXO**

Para el análisis que se desarrolló, se establece una hipótesis que permite correlacionar el comportamiento de una muestra, en relación al resultado de ensayo de Barcelona y la absorción de energía. Los datos que se consideran aptos para ser analizados son aquellos en los cuales el coeficiente de variación intra muestra es inferior a 10%.

Posteriormente a estos datos se les aplica los criterios de Dixon y Grubbs para detectar valores outlier.

#### ***10.1 CRITERIOS PARA DESCARTAR DATOS OBSERVACIONES OUTLIER***

La muestra y los resultados asociados a las variables aleatorias que se estudiarán, pueden estar gobernadas por diversidad de fenómenos físicos que interactúan entre sí. Para el caso del estudio, se supone que los datos obtenidos corresponden a variables aleatorias asociadas a valores de absorción de energía. Los valores aleatorios para la absorción de energía, se suponen siguen una Distribución Probabilidad Normal.

Los valores aberrantes se pueden originar por diversas fuentes de error grueso, pudiendo ser entre otros: errores del operador, cambio del operador, falla en los sistemas de extracción de testigos, fallas de los equipos mecánicos de proyección, mal manejo de muestras, problemas de presión en la línea de aire, problemas de temperatura en el sitio, etc.

Dado lo anterior, con el objetivo de descartar los valores atípicos o aberrantes, se evaluaron los datos, mediante las criterios de Grubbs and Dixon.

##### ***10.1.1. CRITERIO DE DIXON***

Este criterio utiliza relaciones entre las diferencias entre datos que parecen atípicos comparados con el resto de los valores del grupo de datos.

La implementación de método consiste en la definición de un intervalo de confianza para un estadístico. Dado un nivel de significación se establece si el valor corresponde a un valor que podría ser clasificado como *outlier*.

El procedimiento consiste en calcular un estadístico Q, el cual es comparado con el valor de Q tabulado para un nivel de confianza especificado. Si, Q calculado  $\geq$  Q tabulado, el valor sospechoso es retirado de la muestra (Dean y Dixon, 1951)

El valor Q se determina mediante la siguiente expresión:

$$Q = \frac{x_2 - x_1}{x_{n-1} - x_1}$$

### **10.1.2 CRITERIO DE GRUBBS**

La prueba de Grubbs utiliza una estadística de prueba, la cual corresponde a la diferencia absoluta entre el valor atípico y el promedio de la muestra dividida por la desviación estándar de la muestra, s.

El procedimiento para detectar el valor outlier consiste en: dado un conjunto de datos experimentales  $g_i$  con  $i = 1, 2, \dots, n$ , ordenados ascendentemente, para detectar el dato outlier se debe calcular la siguiente expresión:

$$G_c = \frac{x_i - \bar{x}}{s}$$

El valor  $G_c$  es comparado con un valor crítico tabulado, para un nivel de significancia específico. Si  $G_{calculado} > G_{tabulado}$ , entonces el dato en cuestión, corresponde a un dato outlier. (Grubbs F. 1969)

En ambos casos los estadísticos críticos se encuentran tabulados según nivel de significancia.

Adicionalmente, para elegir el mecanismo de descarte, se utilizarán los enfoques asociados a la eliminación de un valor extremo de la muestra y los estadísticos correspondientes para este tipo de criterio.