

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Ensayos de control de calidad de hormigón reforzado con fibras en túneles: Experiencia mexicana

Carlos Aire ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6329>

RESUMEN

El Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) es ampliamente usado en la construcción del revestimiento de túneles y obras subterráneas en obras civiles y proyectos mineros en todo el mundo. Las atractivas propiedades del HRF han motivado que su uso en estas aplicaciones, haya ido en aumento y en la actualidad el HRF es una técnica de construcción de gran avance dentro de los procedimientos constructivos. En México y España, el HRF se ha utilizado exitosamente en proyectos de infraestructura civil importantes. Por ejemplo, en España se utilizó con éxito en las obras de la línea 9 del metro de la ciudad de Barcelona y actualmente, en México, se está utilizando HRF para el revestimiento de dos túneles del sistema de drenaje profundo de la ciudad de México y en las obras de la línea 12 del Metro de la Ciudad de México. El control de calidad del HRF en las aplicaciones de túneles es de gran importancia. Un control de calidad adecuado debe incluir la inspección y ensayos de control para evaluar el desempeño mecánico del HRF y verificar que se cumplan las especificaciones del proyecto. En el HRF es fundamental evaluar su comportamiento post-agrietamiento, determinando la absorción de energía y resistencia residual. Existen diferentes métodos de prueba para evaluar estas propiedades, tales como el ensayo de flexión en vigas, ensayo de panel y el ensayo de doble punzonamiento en cilindros. Este artículo presenta una revisión de los principales métodos de prueba que se emplean para evaluar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras, los cuales deben ser considerados como ensayos de control de calidad del hormigón con fibras utilizados en túneles y obras subterráneas. Además, se presenta la experiencia mexicana de la aplicación de algunos de estos procedimientos para evaluar el comportamiento del HRF empleado en obras subterráneas de la Ciudad de México.

PALABRAS CLAVE: Hormigón reforzado con fibras, control de calidad, ensayo de vigas, ensayo panel redondo, ensayo de panel cuadrado, ensayo de doble punzonamiento.

1.- INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha incrementado el uso del hormigón reforzado con fibras (HRF) en la industria de la construcción, principalmente para aplicaciones estructurales

tales como túneles. Desde el punto de vista constructivo, el uso de fibras incrementa el rendimiento y mejora la seguridad en obra, al reducir operaciones de colocación de malla, y reducir costos.

Con respecto al control de calidad, en construcciones subterráneas es esencial evaluar parámetros tales como la absorción de energía y resistencia residual del hormigón, los cuales en el caso del HRF son gobernados por el comportamiento post-agrietamiento del material compuesto (el hormigón y las fibras). Diferentes métodos de ensayo están disponibles para evaluar la absorción de energía (o tenacidad) del HRF y la mayoría de ellos están clasificados en dos grupos: ensayos de vigas y ensayos de paneles.

Recientemente, se desarrolló un nuevo método para evaluar la tenacidad y resistencia residual del HRF en cilindros. Es el ensayo Barcelona, basado en el ensayo de doble punzonamiento. A pesar de la variedad de ensayos disponibles, en México el muestreo in situ para evaluar estas propiedades es limitado debido a la falta de un protocolo de control de calidad para HRF. Como resultado, la absorción de energía y la resistencia residual no se verifican frecuentemente in situ, comprometiendo así la aplicación exitosa del HRF.

Últimamente, algunos de los métodos estándar disponibles (ASTM y UNE) han sido aplicados para el control de la calidad de los HRF en varios proyectos en la Ciudad de México, entre ellos el túnel Emisor Oriente (TEO), túnel Emisor Poniente (TEP), que son dos proyectos hidráulicos para el sistema de drenaje de la ciudad, y la ampliación de la línea 12 de metro en la Ciudad de México. El objetivo de este estudio es revisar los principales métodos de prueba para el control de calidad del HRF en la construcción subterránea.

2.- ENSAYOS DE VIGAS

Los ensayos de flexión en vigas son los más usados para caracterizar el comportamiento post-agrietamiento del HRF. Dada la dificultad de obtener vigas de hormigón proyectado y la dificultad de obtener elementos prismáticos de paneles, este método no es aplicable para hormigón proyectado reforzado con fibras.

2.1.- Ensayo de flexión en cuatro puntos – NBN B 15-238 y ASTM C1609

Es un procedimiento estándar (NBN B 15-238, ASTM C1609) que consiste en ensayar a flexión una viga aplicando carga a los tercios del claro entre apoyos. Las dimensiones típicas de la viga son de 150 × 150 × 600 mm. La figura 1 muestra la configuración típica este ensayo, el cual se controla por desplazamiento y registra la carga y desplazamiento en el centro del claro entre apoyos. La resistencia residual y la absorción de energía se obtienen de la curva carga-desplazamiento. Lo primero se calcula para desplazamiento de L/600 y L/150 y lo segundo se calcula como el área bajo la curva carga-desplazamiento hasta un desplazamiento de L/150, como lo especifica la ASTM C1609.

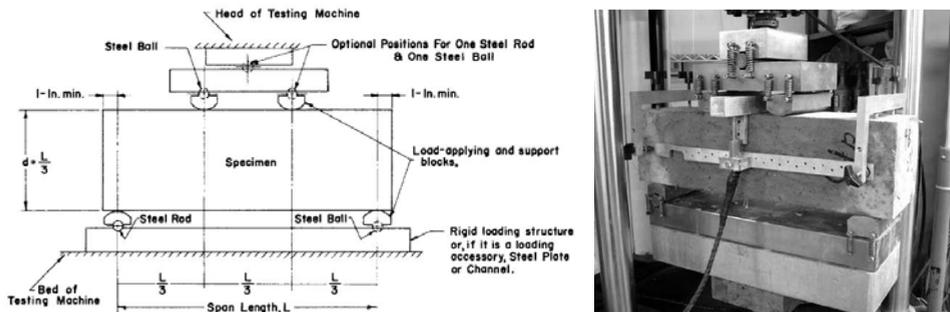


Figura 1. Ensayo de flexión en cuatro puntos.

2.1.- Ensayo de flexión en tres puntos – EN 14651

Este ensayo se realiza en viga de $100 \times 100 \times 400$ mm o $150 \times 150 \times 600$ mm con entalla central de 25 mm de profundidad. La viga debe tener un ancho y profundidad nominal de 150 mm y una longitud L de $550 \leq L \leq 700$ mm. La viga se somete a flexión en tres puntos, y se aplica carga al centro del claro entre apoyos (ver figura 2). El ensayo se realiza por control de abertura de grieta (CMOD). Además de la carga se registra el desplazamiento para lo cual se coloca dos extensómetros en ambas caras de la viga. Del ensayo se determina la resistencia residual para valores CMOD de 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5 mm, como lo especifica la EN 14651.

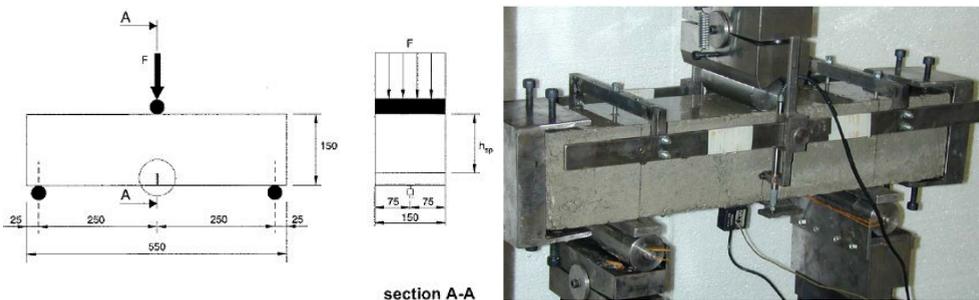


Figura 2. Ensayo de flexión en tres puntos.

3.- ENSAYOS DE PANEL

Los ensayos de panel fueron originalmente desarrollados para evaluar las propiedades del hormigón proyectado. Esta es la razón por lo cual estos métodos son frecuentemente aplicados al hormigón proyectado reforzado con fibras.

3.1.- Panel de sección cuadrada - EN14488-5

El ensayo consiste en aplicar una carga puntual en el centro de un panel apoyado en cuatro lados. Las dimensiones del panel son $100 \times 600 \times 600$ mm y las líneas de apoyo

representan una base cuadrada de 500×500 mm apoyado simplemente sobre cuatro líneas externas situadas en una base plana cuadrada de 500×500 mm. El comportamiento se evalúa mediante la carga máxima y la absorción de energía para un desplazamiento de 25 mm, calculada como el área bajo la curva carga-desplazamiento.

En cuanto a confiabilidad de resultados, el ensayo proporciona mayor superficie de falla que el ensayo de viga, que representa menor variabilidad, pero el ensayo es más complejo. El panel se apoyará sobre cuatro lados solo si la base es plana, de lo contrario el panel se puede deformar de forma no predecible y presentar varios picos. Esto es un inconveniente para el control de calidad sistemático del material además del peso del panel. A pesar de estas cuestiones, el panel cuadrado fue utilizado recientemente para caracterizar el HRF del revestimiento del túnel de la Línea 12 del metro de la Ciudad de México.

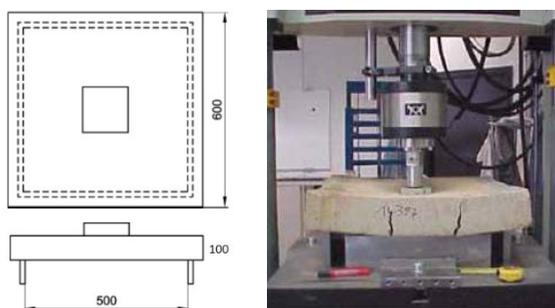


Figura 3. Ensayo de panel de sección cuadrada.

3.2.- Panel de sección circular – ASTM C1550

El ensayo consiste en aplicar una carga puntual al centro de un panel apoyado en tres puntos. Las dimensiones del panel son $75 e \times \phi 800$ mm (ver figura 4). El uso de tres puntos de apoyo asegura la distribución uniforme de carga y los planos de agrietamiento son bien definidos, en consecuencia, se puede predecir más fácilmente la distribución de carga. El comportamiento se obtiene a través de la curva carga-desplazamiento obtenida del ensayo. La capacidad residual y la absorción de energía se calcula para desplazamientos que de 5 a 40 mm. Dado que el comportamiento se ve afectado por el espesor del panel, éste debe cumplir con las tolerancias especificadas en la ASTM C1550.

Con respecto a otros ensayos, este ensayo presenta la ventaja de la confiabilidad de los resultados debido a la mayor superficie de falla comparado al ensayo de viga y por la simplicidad de la ejecución y configuración del ensayo comparado al panel cuadrado.

Un reciente proyecto de investigación del Instituto de Ingeniería de la UNAM ha propuesto un sistema de control de calidad para HRF en obras subterráneas que incluye ensayo de panel circular para evaluar el desempeño en términos de resistencia residual y absorción de energía [1]. Como resultado, el ensayo de panel circular ha sido propuesto como método de

control de calidad para HRF en el proyecto del *Túnel Emisor Poniente de la ciudad de México*.



Figura 4. Ensayo de panel de sección circular.

4.- ENSAYO BARCELONA DE DOBLE PUNZONAMIENTO - UNE 83515

El ensayo consiste en aplicar una carga de compresión en un cilindro a través de dos punzones de acero colocados al centro de la superficie superior e inferior del cilindro. La altura y diámetro del cilindro es de 150 mm, y el punzón de 24 mm de altura y 37.5 mm de diámetro. El ensayo se realiza por control de desplazamiento a una velocidad de 0.5 mm/seg como lo especifica la UNE 83515. Del ensayo se obtiene la curva carga-abertura circunferencial para lo cual se coloca un extensómetro a media altura del cilindro. Los parámetros de carga residual y absorción de energía se determinan para la abertura circunferencial de 2, 2.5, 4 y 6 mm, de acuerdo con la UNE 83515. La figura 5 muestra detalles típicos del ensayo.



Figura 5. Ensayo de doble punzonamiento.

El ensayo Barcelona es sencillo de ejecutar, requiere espécimen ligero y tiene la ventaja de que se puede realizar en una prensa convencional; mientras que el ensayo de vigas requiere control de lazo cerrado. También, se puede ensayar testigos (150 y 100 mm) extraídos de estructuras. Recientes estudios de [2] muestran el efecto del ensayo en cilindros moldeados y testigos así como la influencia del tamaño (150 y 100 mm).

Todo lo anterior hace que el ensayo Barcelona sea un método versátil, fiable y sencillo para caracterizar el HRF como se muestra en [1]. Este ensayo también ha sido propuesto como método de control de calidad en el proyecto *Túnel Emisor Poniente en la ciudad de México*.

5.- EXPERIENCIA MEXICANA EN EL CONTROL DE CALIDAD DE HRF

En respuesta al interés y significativo incremento del uso del hormigón reforzado con fibra (HRF) y hormigón proyectado reforzado con fibras (HPRF) en la industria de la construcción en México, el Instituto de Ingeniería de la UNAM emprendió un programa experimental para evaluar la resistencia residual y absorción de energía determinado por diversos métodos de prueba [1]. Para ello, se implementó los ensayos ASTM C1609, ASTM C1550, EN 14488-5 y UNE 83515. Los resultados permitieron establecer las bases para proponer los métodos de prueba para control de calidad del HRF y HPRF en las obras subterráneas de la ciudad de México. A continuación, se presenta algunos resultados de la aplicación de los métodos para determinar los parámetros característicos del HRF.

Actualmente, la ciudad de México está muy activa en construcción subterránea con tres proyectos importantes en ejecución usando hormigón con fibras: el Túnel Emisor Oriente (TEO), el Túnel Emisor Poniente (TEP) y la Ampliación de la Línea 12 del Metro (L-12). La figura 6 muestra fotografías de los túneles de cada uno de los proyectos.

El TEO y TEP son proyectos hidráulicos en la construcción del sistema de drenaje profundo de la Ciudad de México. El TEO tiene una longitud de 62 km, y 7 m de diámetro terminado. El TEP tiene 9.8 km de longitud y diámetro aproximado de 8 m, El túnel de la L-12 tiene una longitud de 4.6 km y diámetro aproximado de 11 m. En todos los casos el revestimiento primario es a base de dovelas. En los proyectos del TEO y TEP el revestimiento final es de hormigón reforzado con fibra sintética, y del túnel L-12 de hormigón proyectado con fibra metálica. A la fecha, se han obtenido muestras de HRF y HPRF de las obras del TEP y L-12.



Figura 6. Túnel Emisor Poniente, Túnel Emisor Oriente y Túnel Línea 12 del Metro.

5.1.- Túnel Emisor Poniente - TEP

5.1.1.- Ensayo de panel cuadrado – EN 14488-5

El ensayo fue realizado en paneles cuadrados estándar ($600 \times 600 \times 100$ mm) y la carga fue aplicada con una placa cuadrada ($100 \times 100 \times 20$ mm) en el centro del panel cumpliendo con la EN 14488-5. El ensayo se realizó en un marco de acero rígido con capacidad de 500 kN y un sistema de control de lazo cerrado. La velocidad de desplazamiento aplicado fue de 1 m/min y para medir el desplazamiento se colocó un transductor tipo LVDT en el centro del panel. La carga se aplica en la cara proyectada estando el lado moldeado liso del panel en la cara inferior durante el ensayo. La figura 7 muestra la configuración del ensayo y curvas típicas carga-desplazamiento obtenida del ensayo.

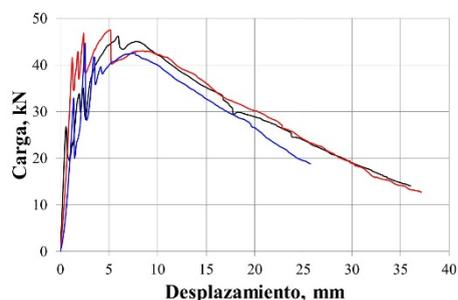


Figura 7. Ensayo de panel cuadrado EN 14488-5.

La tabla 1 muestra los resultados de la mezcla de hormigón que contiene 5 kg/m^3 de fibra sintética usado en el proyecto del TEP. Detalles adicionales de los ensayos puede encontrarse en [3]. El mecanismo de falla del panel cuadrado consiste en múltiples grietas que se reflejan en la curva carga-desplazamiento por varios picos durante el ensayo. La absorción de energía se calculó para desplazamientos de 25 mm. La variabilidad en los resultados es bastante aceptable, el cual está en la línea de otros estudios [4].

Tabla 1. Resultados de los ensayos de panel cuadrado (promedio de 3 ensayos)

Panel cuadrado	Absorción de energía	
	Joules.	C.V.
EN 14488-5		
T $\delta_{25 \text{ mm}}$	888.2	3.5%

5.1.2.- Ensayo de panel circular – ASTM C1550

Los ensayos se realizaron en paneles circulares especificados ($75 \times 800 \phi$ mm) de acuerdo con la ASTM C1550. Se usó un marco de carga rígido con capacidad de 500 kN y un sistema de control de lazo cerrado. La velocidad de desplazamiento fue de 4 mm/min y el ensayo se debe registrar un desplazamiento de al menos 40 mm. Se colocó un transductor LVDT de 100 mm de rango en el centro del panel para medir el desplazamiento. La carga se aplica en la cara proyectada. La absorción de energía se calculó para desplazamientos de

5, 10, 20 y 40 mm. La figura 8 presenta la configuración del ensayo y las curvas carga-desplazamiento.

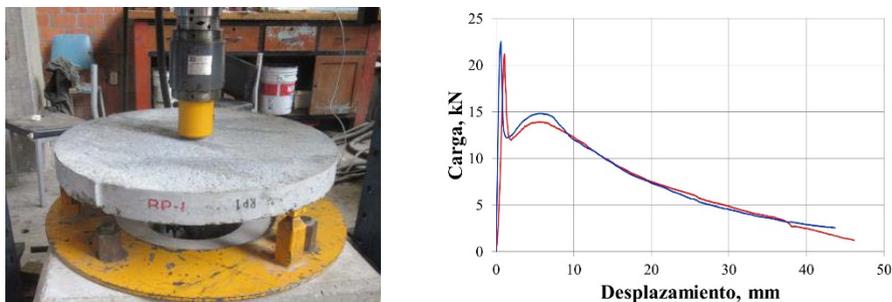


Figura 8. Ensayo de panel circular ASTM C1550.

La tabla 2 incluye los resultados de la mezcla de hormigón con 5 kg/m³ de fibra sintética usada en el proyecto del TEP. Detalles adicionales de los ensayos puede encontrarse en [3]. El mecanismo de falla del panel circular presenta tres grietas radiales que divide la sección en tres secciones. De acuerdo con el ASTM C1550 un ensayo exitoso implica un modo de falla que incluya al menos tres grietas radiales. La variabilidad de los resultados en términos de tenacidad son menores de 7%, lo cual confirma reportes previos sobre la variabilidad observada en paneles circular [4].

Tabla 2. Resultados de los ensayos de panel circular (promedio de 2 ensayos)

<i>Panel circular</i>	<i>Absorción de energía</i>	
ASTM C1550	Joules.	C.V.
T δ_5 mm	66.2	6.7%
T δ_{10} mm	134.2	4.9%
T δ_{20} mm	230.2	2.4%
T δ_{40} mm	326.9	0.9%

5.1.3.- Ensayo Barcelona – UNE 83515

El ensayo Barcelona se realizó de acuerdo con la UNE 83515 en cilindros estándar ((150 ϕ \times 150 mm). Se usó un equipo MTS de 500 kN de capacidad y un sistema de control de lazo cerrado. La velocidad de desplazamiento aplicado fue de 0.5 mm/min. Se registró la abertura circunferencial hasta 6 mm usando un extensómetro circunferencial que se colocó al centro de la altura del cilindro. La absorción de energía se calcula para abertura circunferencial de 2.0, 2.5, 4.0 y 6.0 mm. La figura 9 muestra la configuración del ensayo y las curvas carga-abertura circunferencial.

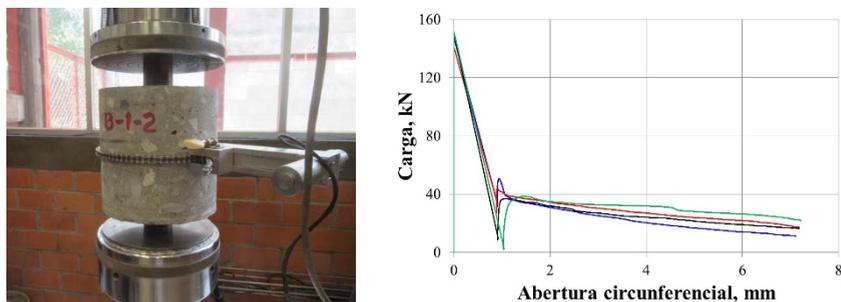


Figura 9. Ensayo Barcelona – UNE 83515.

La tabla 3 muestra los resultados de la mezcla de hormigón con 5 kg/m^3 de fibra sintética (detalles adicionales puede encontrarse en [3]). Los cilindros fueron extraídos de dos vigas diferentes, pero de la misma amasada del hormigón de los paneles. Aunque los resultados corresponden a promedio de menor número de cilindros, la variabilidad de los resultados es aceptable. El potencial del ensayo Barcelona como método de control para HRF no sólo es que la prueba es más sencilla y de menor dispersión, sino que también se puede hacer más pruebas con la misma cantidad de hormigón que para vigas.

Tabla 3. Resultados de los ensayos Barcelona (promedio de 2 ensayos)

Cilindro	Absorción de energía (viga 1)		Absorción de energía (viga 2)	
	Joules.	C.V.		
UNE 83515				
T δ_c 2.0 mm	120.5	0.8%	112.6	2.2%
T δ_c 2.5 mm	136.2	0.3%	128.8	2.9%
T δ_c 4.0 mm	176.3	3.5%	172.7	6.0%
T δ_c 6.0 mm	217.2	7.5%	222.9	9.2%

5.1.3.- Ensayo de vigas – ASTM C1609

Los ensayos se realizaron en vigas especificadas ($150 \times 150 \times 600 \text{ mm}$) y la carga se aplicó a los tercios del claro entre apoyos (450 mm), de acuerdo a lo que especifica la ASTM C1609. Se usó el mismo marco de carga y equipo empleado en los ensayos de panel. La configuración del montaje fue de acuerdo con el ASTM C78, como lo especifica la ASTM C1609. La velocidad de desplazamiento aplicada es de 0.09 mm/min y se colocaron transductores de desplazamiento tipo LVDT colocado al centro del claro entre apoyos uno en cada cara de la viga. La absorción de energía se calcula para un desplazamiento de $L/150$ y la resistencia residual para desplazamientos de $L/600$ y $L/150$. La Figura 10 muestra la configuración del ensayo y las curvas carga-desplazamiento del ensayo.

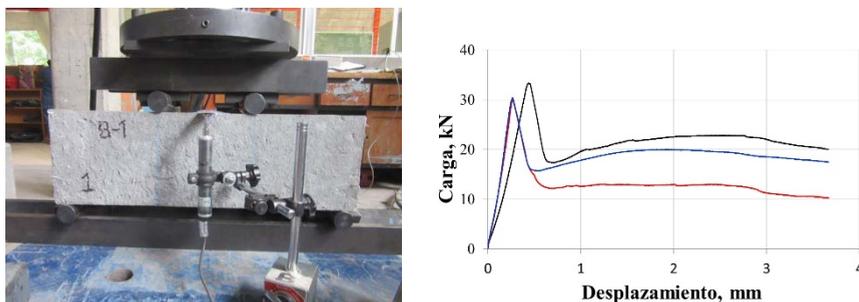


Figura 10. Ensayo a flexión en vigas ASTM C1609.

La tabla 4 muestra los resultados de la mezcla de hormigón de 5 kg/m³ de fibra sintética usadas en el proyecto del TEP. Mayores detalles de los resultados en [3]. El mecanismo de falla de la viga presenta una grieta en el tercio central del claro entre apoyos. Los resultados muestran una significativa variabilidad, particularmente en el caso de la resistencia residual. Esto concuerda con estudios previos [4], el cual reporta gran dispersión en los resultados en términos de tenacidad en vigas con y sin entalla.

Tabla 4. Resultados de los ensayos de viga (promedio de 3 ensayos)

Viga	Resistencia residual		Absorción de energía	
	MPa.	C.V.	Joules	C.V.
$f_{r, T_{L/600}}$	3.3	19.6		
$f_{r, T_{L/150}}$	3.4	33.5	57.9	18.1

5.2.- Línea 12 del Metro

5.2.1.- Ensayo de panel cuadrado – EFNARC 1996

De acuerdo con las especificaciones del proyecto, los ensayos se realizaron de acuerdo con la *European Specification for Sprayed Concrete* [5]. El ensayo se realizó en paneles estándar de 600 × 600 × 100 mm y la carga se aplicó con una placa cuadrada de 100 × 100 × 20 mm en el centro del panel. El ensayo se realizó en un marco de acero rígido con capacidad de 500 kN y un sistema de lazo cerrado. La velocidad de desplazamiento aplicado fue de 1.5 mm/min y se colocó un transductor tipo LVDT en el centro del panel para medir el desplazamiento. La carga se aplicó en la cara opuesta al proyectado, es decir, el lado proyectado rugoso estuvo en la parte inferior durante el ensayo, como lo especifica la EFNARC (1996), contrario a lo especificado en la EN 14488-5. La absorción de energía se calculó para desplazamientos de 25 mm. La Figura 11 muestra la configuración del ensayo y curvas típicas de comportamiento carga-desplazamiento obtenidas del ensayo.

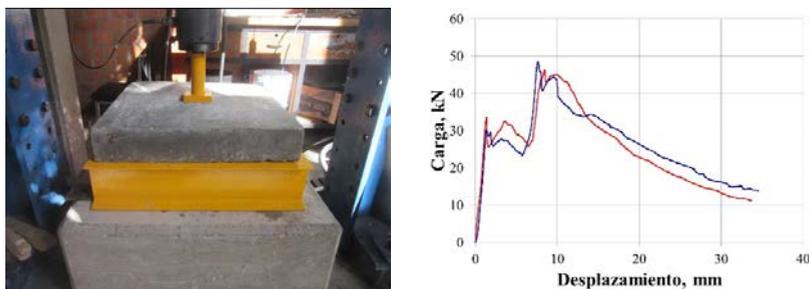


Figura 11. Ensayo de panel cuadrado – EFNARC 1996.

La Tabla 5 muestra los resultados de la mezcla de hormigón proyectado que contiene 30 kg/m^3 de fibra metálica usado en el proyecto de la línea 12 del metro de la ciudad de México. El mecanismo de falla sigue el típico patrón de diversas grietas en la superficie del panel y que se manifiestan en el comportamiento carga-desplazamiento en los diferentes picos durante el ensayo. Mayores detalles de los ensayos puede encontrarse en [6]. Aunque fueron solo dos ensayos, la variabilidad es bastante aceptable, lo cual coincide con estudios previos donde se evalúa la dispersión de las propiedades mecánicas de hormigón reforzado con fibras empleando diferentes métodos para hormigones de resistencia convencional y alta resistencia [4].

Tabla 5. Resultados de los ensayos de panel cuadrado (promedio de 2 ensayos)

<i>Panel cuadrado</i>	<i>Absorción de energía</i>	
EN 14488-5	Joules.	C.V.
T $\delta_{25 \text{ mm}}$	738.5	0.5%

6.- CONCLUSIONES

El creciente interés y uso del hormigón reforzado con fibras en el sector de la construcción en México resalta la necesidad de definir protocolos de control de calidad por razones de seguridad. Este artículo revisa los métodos de prueba estándar disponibles para evaluar el comportamiento post-agrietamiento del hormigón reforzado con fibra (colocado o proyectado) y su aplicabilidad para el control sistemático de la calidad en la construcción subterránea. Estos ensayos fueron evaluados mediante la realización de programas experimentales en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM en México, que son, la prueba de flexión en cuatro puntos (ASTM C1609), la prueba del panel cuadrado (EN 14488-5), la prueba del panel redondo (ASTM C1550) y el ensayo Barcelona (UNE 83515).

El método de prueba más empleado es el ensayo de viga (tres o cuatro puntos), sin embargo la experiencia muestra una gran variabilidad en los resultados, comprometiendo así su capacidad para el control sistemático de la calidad. Los paneles también se usan frecuentemente como pruebas de control, especialmente para hormigón proyectado, y los

resultados presentan una dispersión menor comparado a las vigas. No obstante, estas pruebas son difíciles de realizar debido a la configuración (concretamente el panel cuadrado) y el peso de los elementos. El ensayo Barcelona, que consiste en un ensayo de doble punzonamiento, es una prueba sencilla con baja dispersión que presenta ventajas adicionales como la posibilidad de realizar pruebas de especímenes extraídos de estructuras reales y utilizando una prensa convencional (sin necesidad de un sistema de lazo cerrado).

Sobre la base de la experiencia adquirida, el Instituto de Ingeniería de la UNAM ha propuesto nuevas normas mexicanas basadas en el ensayo de panel y el ensayo Barcelona, que actualmente están vigentes. Estas normas van a promover un nuevo sistema de control de calidad de proyectos de construcción subterránea en México.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo del Fondo de Investigación del Instituto de Ingeniería de la UNAM para llevar a cabo el programa experimental en el laboratorio de estructuras y materiales. También, expresa su agradecimiento a las empresas EUCLID, BASF, EPC, BEKAERT y CEMEX por suministrar los materiales. Agradece al personal del laboratorio y especialmente a los estudiantes de pregrado Concepción García, Sergio Ortiz y Ángel Trejo y de posgrado Gabriela Zárate por su participación en las investigaciones y diferentes campañas experimentales.

REFERENCIAS

- [1] Aire C., Zárate G., Aguado A., Molins C., y García T. (2016). “Sistema de control de calidad para evaluar la tenacidad del hormigón lanzado reforzado con fibras”. Fondo de Investigación del Instituto de Ingeniería. Proyectos Internos. Informe Interno Instituto de Ingeniería UNAM. P5538, 89 p, Julio 2016.
- [2] Aire C., Carmona S., Aguado A. y Molins C (2015), “Double punch test of fiber reinforced concrete: Effect of the specimen origin and size”. ACI Materials Journal, March-April V 112 (2). MS No. M-2013-212.R2, doi: 10.14359/51687362. pp 199-208. 2015.
- [3] Aire C. (2017). “Evaluación de la absorción de energía de paneles de sección circular y cuadrado y de la tenacidad en vigas de hormigón reforzado con macrofibras sintéticas”. Informe Interno Instituto de Ingeniería UNAM. P7544, 65 p, Septiembre 2017.
- [4] Parmentier B., De Grove E., Vandewalle L., & Van Rickstal F. (2008). “Dispersion of the mechanical properties of FRC investigated by different bending test”. Tailor Made Concrete Structures. Walvaren & Stoelhorst (eds).
- [5] EFNARC (1996) European Specification for Sprayed Concrete. ISBN 09522483 1
- [6] Aire C. (2017). “Ensayos de caracterización de paneles de sección cuadrada con hormigón lanzado reforzado con fibras de acero”. Informe Interno Instituto de Ingeniería UNAM. P6912, 14 p, enero 2017.