

ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN PANELES DE CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRAS

Carlos Aire¹

¹ Instituto de Ingeniería UNAM, México, aire@pumas.iingen.unam.mx

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados de una campaña experimental destinada a investigar el comportamiento mecánico de mezclas de concreto lanzado reforzado con fibras por medio de ensayos de panel cuadrado (EN 14488-5) y panel circular (ASTM C1550). Se tomaron muestras de paneles circulares y cuadrados del concreto lanzado reforzado con fibras de acero del revestimiento primario de las obras de ampliación de la línea 12 del metro de la ciudad de México. El artículo presenta los resultados de absorción de energía determinados mediante los métodos de ensayo de paneles EN 14488-5 y ASTM C1550, analiza la aplicación práctica de ambas metodologías y presenta una correlación preliminar entre los resultados obtenidos de ambos ensayos.

Palabras claves: concreto lanzado reforzado con fibras, absorción de energía, panel circular, panel cuadrado.

ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN PANELES DE CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRAS

Antecedentes

El creciente interés en el uso de Concreto Reforzado con Fibras (CRF) y Concreto Lanzado Reforzado con Fibras (CLRF) en obras subterráneas en México, ha llevado a la necesidad de caracterizar adecuadamente sus propiedades mecánicas para una especificación apropiada y proponer un sistema práctico de control de calidad para evaluar su cumplimiento. Existe una variedad de métodos de prueba para evaluar el desempeño del CRF. En años anteriores, el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM) llevó a cabo campañas experimentales para evaluar el desempeño de CRF y CLRF, mediante ensayos de viga ASTM C1609, de paneles circular ASTM C1550 [1] y cuadrado UNE 14488-5 [2], y ensayo Barcelona UNE 83515.

Un importante proyecto de infraestructura de túneles en desarrollo es la ampliación de la línea 12 del metro de la ciudad de México (L-12), donde se usa CLRF como revestimiento primario. Con la experiencia en investigación de CRF y CLRF, el II-UNAM propuso evaluar el desempeño de CLRF en este proyecto. Para ello se elaboró un programa experimental considerando un conjunto completo de pruebas. Se seleccionaron los ensayos de panel y cilindros para determinar la absorción de energía y caracterizar el rendimiento del CLRF. Las muestras se tomaron a pie de obra de la L-12. En este artículo se presentan los resultados de paneles cuadrados (UNE 14488-5) y paneles circulares (ASTM C1550).

Ampliación de la Línea 12 del metro de la ciudad de México – L-12

Es un proyecto de infraestructura de túnel de 4,6 km de longitud y 11 m de diámetro donde se ubicarán tres estaciones de metro conectando las estaciones Mixcoac y Observatorio, uniendo la zona Oriente y Poniente de la ciudad. Con esta ampliación de la línea del metro se prevé reducir en 60 % el tiempo de traslado entre la estación Mixcoac y Observatorio.

El proyecto ejecutivo, comprendió en su primera fase en la construcción de 13 lumbreras de profundidades entre 15 y 46,5 m, que se utilizan como obras auxiliares para comunicar al túnel con el exterior, además de permitir el ingreso de la maquinaria, equipo, personal de la obra y materiales necesarios para la construcción. El perfil estratigráfico del suelo a lo largo del trazo del proyecto es predominante de arcilla arenosa de consistencia dura, sin embargo, en algunos tramos de túnel se encuentra suelos blandos de poca estabilidad. Eventualmente, en el caso de suelos inestables se resuelven con elementos de soporte, como marcos metálicos separados entre ellos 0,50 m a 1,00 m dependiendo del tipo de suelo. En casos de sobreexcavación se resuelve con productos de inyección, como lechadas de cemento y concreto fluido, cuya selección se adopta de acuerdo con la magnitud de la sobreexcavación.

Para la construcción del túnel, se emplea el método de excavación mecánica convencional mediante máquinas rozadoras. Las rozadoras excavan mediante una cabeza giratoria, provista de dientes de corte que van montadas sobre un brazo mecánico que permite la excavación. El avance promedio de excavación es de 1,5 m. Después de la excavación de la sección media superior, se coloca el revestimiento primario, que consiste en aplicar Concreto Lanzado Reforzado con Fibras de Acero (CLRFA). El espesor de revestimiento primario es de 20 cm, colocado en dos capas de 10 cm cada una, aproximadamente. Entre la capa de revestimiento primario y definitivo se coloca una geomembrana de PVC para evitar posibles filtraciones de agua hacia el exterior. El revestimiento definitivo es de 40 cm de espesor en bóveda. En el revestimiento definitivo se emplea concreto lanzado sin fibras; el refuerzo es con varillas de acero.

La Figura 1 muestra un procedimiento típico de los trabajos en obra. En la superficie se mide la temperatura, masa unitaria y revenimiento del concreto. Después se añade la fibra y se suministra el concreto hacia el túnel. Los materiales empleados en la fabricación del concreto fueron: cemento resistente a sulfatos (cemento = 410 kg/m³), arena andesita, grava caliza de 10 mm de tamaño máximo, reductor de agua, acelerante y fibra de acero de 35 mm de longitud y 65 de esbeltez (contenido de fibra = 30 kg/m³ de concreto). La resistencia a compresión del concreto fue de 250 kg/cm².



Figura 1: Procedimiento de colocación de revestimiento primario del túnel L-12.

Ensayos de control del CLRF

La propiedad más significativa del CLRF es la absorción de energía. Las fibras empiezan a trabajar cuando el concreto se agrieta, redistribuyendo y controlando la propagación de las grietas mientras que el revestimiento experimenta deformación. La capacidad de carga del CLRF determina el desempeño del revestimiento.

La absorción de energía del CLRF se determina a partir de ensayos de flexión, usando paneles circulares, paneles cuadrados o vigas. Para su determinación se han desarrollado nuevos métodos de prueba estandarizados, los cuales se usan internacionalmente.

El desempeño post-elástico de paneles sujetos a una carga puntual en el centro, es representado por la energía absorbida hasta una deflexión central especificada. En este método de prueba, la energía absorbida hasta una deflexión dada representa la habilidad o capacidad de redistribución de esfuerzos que tiene el CRF después del agrietamiento. Los métodos de ensayo típico de panel son los especificados por la ASTM C1550 para paneles circulares, y por la EN 14488-5 para paneles cuadrados. La capacidad de absorción de energía es el factor más importante para evaluar el rendimiento del CLRF, y se calcula para un desplazamiento especificado en cada método de prueba.

Otro método para evaluar la resistencia a flexión del CLRF es la prueba en vigas. Para ello se fabrican artesas y mediante corte se obtiene las vigas. Se ensayan de acuerdo con la ASTM C1609 o UNE 14561, y se determina la tenacidad en flexión. Éste método presenta inconvenientes por el tamaño, peso y volumen de concreto de las artesas necesario para obtener las vigas, así como su manipulación en el túnel y laboratorio durante la preparación de las muestras. Un reciente desarrollo, es el ensayo de doble punzonamiento (UNE 83515), conocido como ensayo Barcelona. Con este ensayo se determina la tenacidad en cilindros que se calcula para una apertura circunferencial de fisura especificada.

Alcance

Como parte de los trabajos de un Proyecto de Investigación referente a evaluar el desempeño de los Concretos Lanzados Reforzados con Fibras (CLRF) de acero del revestimiento primario de las obras de ampliación del túnel de la línea 12 del metro (L-12) de la ciudad de México, se realizaron ensayos de panel cuadrado, ensayos de panel circular y ensayos Barcelona. A continuación, se presentan los resultados de dos series de ensayos. Cada serie comprende el muestreo y ensayo de tres paneles circulares y tres paneles cuadrados.

Ensayos de panel cuadrado – EN 14488-5

El ensayo se realizó de acuerdo con la EN 14488-5, en panel cuadrado de 600 / × 600 / × 100 e mm. La carga se aplicó en el centro del panel a través de una placa 100 a × 100 a × 20 e mm. La velocidad de desplazamiento del ensayo fue de 1 mm/min. Se midió la flecha con un transductor de desplazamiento tipo LVDT de 100 mm de rango colocado al centro de la superficie inferior del panel. La carga se aplicó sobre la cara enrasada del panel. La prueba finaliza al alcanzar una flecha de 25 mm. La Figura 2 muestra la configuración del ensayo.



Figura 2: Ensayo de panel de sección cuadrada, EN 14488-5.

Los paneles ensayados con carga central fallaron formando fisuras que empiezan en el centro del panel y dividen el espécimen en varias secciones, como se muestra en la Figura 3 (muestras de la Serie 1). La falla fue gradual, debido a la presencia de las fibras en la matriz de concreto. En todos los casos, Series 1 y 2, se observó dos fisuras principales que parten del centro del panel, extendiéndose hacia los lados extremos del panel.

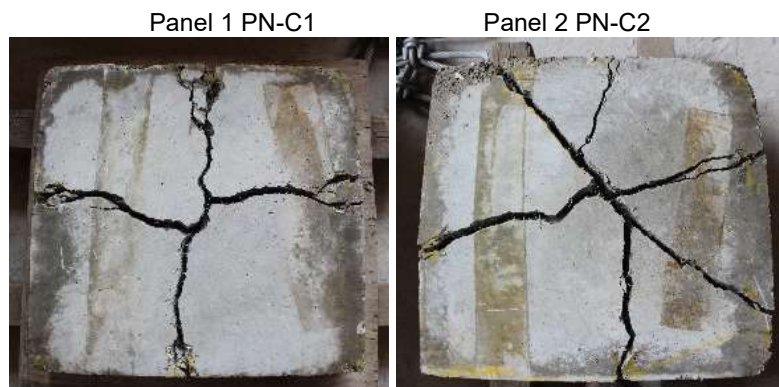


Figura 3: Modo de falla típico de los paneles cuadrados ensayados.

La Figura 4 muestra las curvas carga vs desplazamiento de las dos series de ensayo. Las curvas son muy similares para ambos casos. En el primer tramo de curva la carga asciende gradualmente con pequeños incrementos de desplazamiento, y presenta varios picos de carga hasta alcanzar la carga máxima. En este tramo de curva el aporte de la fibra es mínimo, hasta que se presenta el agrietamiento a partir del cual la fibra trabaja en conjunto con el concreto. La carga máxima, en cada serie de ensayo es muy similar, así como el comportamiento post-agrietamiento.

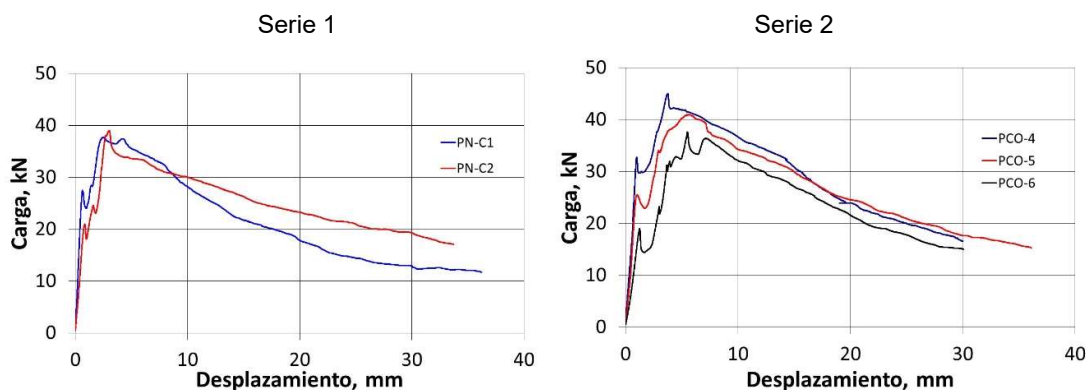


Figura 4: Curvas carga-desplazamiento-Ensayo EN 14488-5.

Las Tablas 1 y 2 muestran los resultados de tenacidad (absorción de energía), de las series de ensayo 1 y 2. La tenacidad se determinó como el área bajo la curva carga vs desplazamiento entre el origen y la flecha central de 25 mm, como lo especifica la EN 14488-5. Los resultados muestran que la tenacidad promedio de los paneles de las series 1 y 2 es de 647,6 y 670,5 Joules, con un coeficiente de variación de 5,1 % y 9,2 %, respectivamente.

Tabla 1: Resultados de tenacidad EN 14488-5, $T_{\delta_{25\text{mm}}}$ – Serie 1.

ID	Panel	U	Tenacidad	Promedio
$T_{\delta_{25\text{mm}}}$	PN-C1	Joules	624,3	$T_{\text{prom}} = 647,6 \text{ J}$
$T_{\delta_{25\text{mm}}}$	PN-C2	Joules	671,0	C.V. = 5,1 %

Tabla 2: Resultados de tenacidad EN 14488-5, $T_{\delta 25\text{mm}}$ – Serie 2.

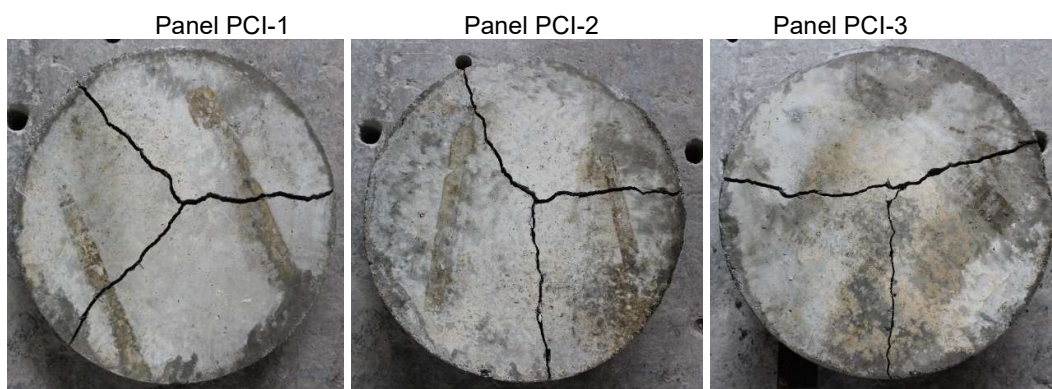
ID	Panel	U	Tenacidad	Promedio
$T_{\delta 25\text{ mm}}$	PCO-4	Joules	629,3	$T_{\text{prom}} = 670,5\text{ J}$
$T_{\delta 25\text{ mm}}$	PCO-5	Joules	741,8	C.V. = 9,2 %
$T_{\delta 25\text{ mm}}$	PCO-6	Joules	640,4	

Ensayos de panel circular – ASTM C1550

El ensayo se realizó de acuerdo con la ASTM C1550, en panel de sección circular de $800\ \phi \times 75\ \text{e mm}$, para caracterizar el comportamiento de flexión del concreto expresado como absorción de energía en el rango de post-agrietamiento. La velocidad de desplazamiento del ensayo fue de 4 mm/min, y el desplazamiento se registra para cuatro valores de desplazamiento, 5, 10, 20 y 40 mm. Para medir el desplazamiento se colocó un transductor de desplazamiento tipo LVDT de 100 mm de rango en el centro de la superficie inferior del panel. La carga se aplicó al centro de la superficie del panel sobre la cara enrasada, mientras que la cara lisa queda sobre los tres apoyos, como lo especifica la ASTM C1550. La Figura 5 muestra la configuración del ensayo.

**Figura 5:** Ensayo de panel de sección circular, ASTM C1550.

La Figura 6 muestra el modo de falla del panel circular. De acuerdo con la ASTM C1550, para que un ensayo se considere exitoso, al menos dos de tres paneles ensayados deben presentar falla típica formada por tres grietas; en otro caso, se debe descartar el panel con falla diferente y considerar únicamente los dos paneles que presenten la falla típica. En este caso de estudio los paneles de ambas series presentaron tres grietas.

**Figura 6:** Modo de falla de paneles circulares.

En la Figura 7 se muestra las curvas cargas vs desplazamiento de las series ensayadas. Las curvas presentan un tramo inicial ascendente donde la carga asciende gradualmente

con pequeños incrementos de desplazamiento. En este tramo inicial lineal la carga es soportada por el concreto y el aporte de la fibra es mínimo o nulo. En esta primera fase, la curva alcanza un pico máximo (carga máxima), y enseguida se inicia el proceso de agrietamiento del concreto y la carga se transmite a las fibras, hasta que finalmente absorben toda la carga y las fibras trabajan en conjunto con el concreto. El comportamiento post-agrietamiento es muy similar para los paneles ensayados de ambas series.

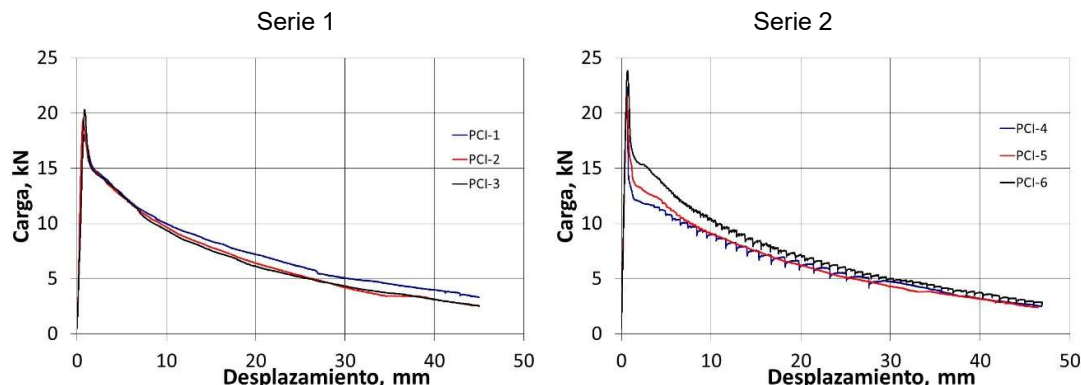


Figura 7: Curvas carga-desplazamiento-Ensayo ASTM C1550.

La absorción de energía se determinó como el área bajo la curva carga vs desplazamiento entre el origen y la flecha central especificada en la ASTM C1550. Los resultados se muestran en las Tablas 3 y 4. La absorción de energía promedio para los paneles ensayados de la serie 1 y 2 es de 299,2 y 275,3 Joules para una flecha de 40 mm. La variabilidad de los resultados es de 5,0 % y 15,5 %, respectivamente.

Tabla 3: Resultados de tenacidad ASTM C1550, $T_{\delta 5\text{mm}}$, $T_{\delta 10\text{mm}}$, $T_{\delta 20\text{mm}}$ y $T_{\delta 40\text{mm}}$ – Serie 1.

ID	U	$T_{\delta 5\text{mm}}$	$T_{\delta 10\text{mm}}$	$T_{\delta 20\text{mm}}$	$T_{\delta 40\text{mm}}$
PCI-1	Joules	69,2	125,1	210,0	316,3
PCI-2	Joules	69,9	124,8	204,0	292,9
PCI-3	Joules	69,1	123,1	199,5	288,5
T_{prom}	Joules	69,4	124,3	204,5	299,2
CV	%	0,7 %	0,9 %	2,6 %	5,0 %

Tabla 4: Resultados de tenacidad ASTM C1550, $T_{\delta 5\text{mm}}$, $T_{\delta 10\text{mm}}$, $T_{\delta 20\text{mm}}$ y $T_{\delta 40\text{mm}}$ – Serie 2.

ID	U	$T_{\delta 5\text{mm}}$	$T_{\delta 10\text{mm}}$	$T_{\delta 20\text{mm}}$	$T_{\delta 40\text{mm}}$
PCI-4	Joules	61,1	110,5	187,0	266,0
PCI-5	Joules	66,4	117,5	193,1	238,1
PCI-6	Joules	75,6	134,0	218,9	321,7
T_{prom}	Joules	67,7	120,7	199,6	275,3
CV	%	10,9%	10,0%	8,5%	15,5%

Correlación entre la absorción de energía – Panel cuadrado vs Panel circular

La Figura 8 muestra una correlación preliminar entre resultados de absorción de energía de los dos tipos de panel usado en esta investigación. Los puntos en la figura corresponden a los valores individuales de absorción de energía de cada panel en cada serie. Los resultados permiten establecer que existe una correlación lineal entre los datos, que indica que es posible conocer el desempeño de ambos tipos de paneles, conociendo uno de ellos. El factor de conversión es 2,265 ($r^2 = 0,84$). Como ejemplo, 1000 Joules de absorción de energía a 25 mm de desplazamiento en un panel cuadrado, es equivalente a 441,5 Joules de absorción de energía a 40 mm de desplazamiento en un panel circular. Este factor de

conversión, es un factor preliminar, actualmente, está en proceso de análisis resultados de nuevas series de muestreos de paneles circulares y cuadrados. El factor de conversión encontrado para la correlación de resultados entre ambos tipos de panel en este estudio es muy cercano al valor de 2,5 ($r^2 = 0,90$) reportado en otros estudios (Bernard, 2002).

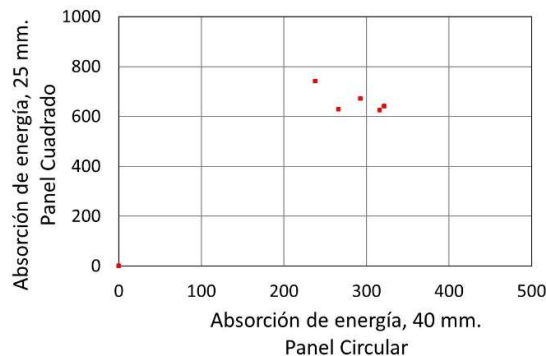


Figura 8: Correlación entre Absorción de Energía de Panel Cuadrado vs Panel Circular.

Aplicabilidad de los métodos

De la experiencia en los trabajos de ampliación del túnel de la línea 12 de la ciudad de México, relacionado a la obtención de muestras estándar de tipo panel, cuadrado y circular, se puede concluir que su aplicación en obra subterránea es posible, siguiendo Protocolos de muestreo, manipulación, acabado y estrategia para implementar estos métodos. Es importante mencionar, que durante el muestreo se coordinó las labores con la Gerencia de Obra, con el fin de no interferir con el lanzado de concreto en el túnel, siguiendo las normas de seguridad pertinentes. La Figura 9 muestra un detalle de la disposición de los moldes de muestreo y enrasado de los paneles realizado después del lanzado, dada la característica de fraguado rápido de la mezcla, por el uso de acelerante como componente de mezcla.

Con respecto al laboratorio, el ensayo se realiza por control de desplazamiento, sin el cual no es posible obtener el comportamiento post-agrietamiento de los concretos en estudio, a partir del cual se obtiene la capacidad de absorción de energía para desplazamientos de 25 y 40 mm en el panel cuadrado y circular, respectivamente. Por esta razón, es indispensable disponer equipos que permitan el control por desplazamiento.

De la naturaleza los paneles, cuyo peso aproximado es de 90 kg, se requiere de apoyo de personal para su adecuada manipulación durante el proceso de muestreo en obra, así como en laboratorio para las labores de montaje y desmontaje durante el ensayo. La experiencia en este estudio, demuestra que es posible llevar a cabo estas actividades, siguiendo un procedimiento establecido en ambos escenarios.

Actualmente, en México ambos métodos de ensayo se utilizan como medios de control para concreto reforzado con fibras (CRF) y concreto lanzado reforzado con fibras (CLRF), principalmente por la repetitividad de sus resultados y su aceptable coeficiente de variación. Ello ha motivado la iniciativa del Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM) para liderar el desarrollo de normas mexicanas NMX, para ensayo de paneles de sección cuadrada y circular. Para ello se tomó como referencia datos obtenidos de amplias campañas experimentales de laboratorio en el II-UNAM, de varios estudios de CRF y CLRF, de estudios de aplicación industrial de CLRF y datos resultado de varias campañas y muestreos en la obra de ampliación del túnel de la línea 12 del metro de la ciudad de México. En la actualidad, están vigentes las normas NMX para ensayo de panel circular, ensayo de viga con carga a los tercios y ensayo Barcelona, y en desarrollo la propuesta de

ensayo de panel cuadrado. El ensayo Barcelona es una alternativa factible al ensayo de panel, por su facilidad de obtención de las muestras y aceptable variabilidad de resultados.



Figura 9: Muestreo de paneles cuadrados y circulares en obra.

CONCLUSIONES

El concreto reforzado con fibras (CRF) es una tecnología que durante los últimos años se utiliza con bastante frecuencia en la industria de la construcción, por lo tanto, es importante evaluar su desempeño en obra. Este trabajo presentó la aplicación de los métodos actuales para evaluar el desempeño del concreto lanzado reforzado con fibras (CLRF). Se realizaron ensayos para determinar la capacidad de absorción de energía del concreto de revestimiento primario del túnel de la ampliación de la línea 12 del metro de la ciudad de México. Para ello se fabricaron en obra tres tipos de muestras: panel circular, panel cuadrado y artesas para obtener cilindros para el ensayo Barcelona. En este artículo se presentaron los resultados de los ensayos de panel.

Los muestreos realizados en la obra de ampliación de la L-12 representan un proyecto piloto, parteaguas para la implementación de un Protocolo de Control que evalúe el desempeño del CLRF y permita conocer los diferentes escenarios, facilidades, dificultades y otros aspectos que se presentan en obra durante el desarrollo de los muestreos, resultado de ensayos y análisis de todos los componentes involucrados.

Como conclusión se puede afirmar que es posible obtener muestras estándar a partir del cual se puede evaluar el desempeño del CLRF y su aplicación como método de control de calidad en obras subterráneas. Estos métodos se usan actualmente como métodos de prueba para evaluar las propiedades del CRF en túneles, el cual se mide por su capacidad residual, determinando la resistencia residual y capacidad de absorción de energía.

Basado en la experiencia ganada en trabajos de campo e investigaciones, el Instituto de Ingeniería de la UNAM plantea proponer nuevas normas mexicanas para el control de CRF, el cual impulsará un nuevo sistema de control de calidad para el CRF en obra subterránea.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Dirección General de Construcción de Obras para el Transporte de la Ciudad de México por las facilidades brindadas durante los trabajos de muestreo de especímenes en el túnel, que permitió la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] ASTM C1550, Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel), (2012).
- [2] EN 14488-5, Test sprayed concrete – Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens (2007).
- [3] Bernard S, "Correlations in the behavior of fibre reinforced shotcrete beam and panel specimens", Materials and Structures, Vol. 35, (2002), 156-164.