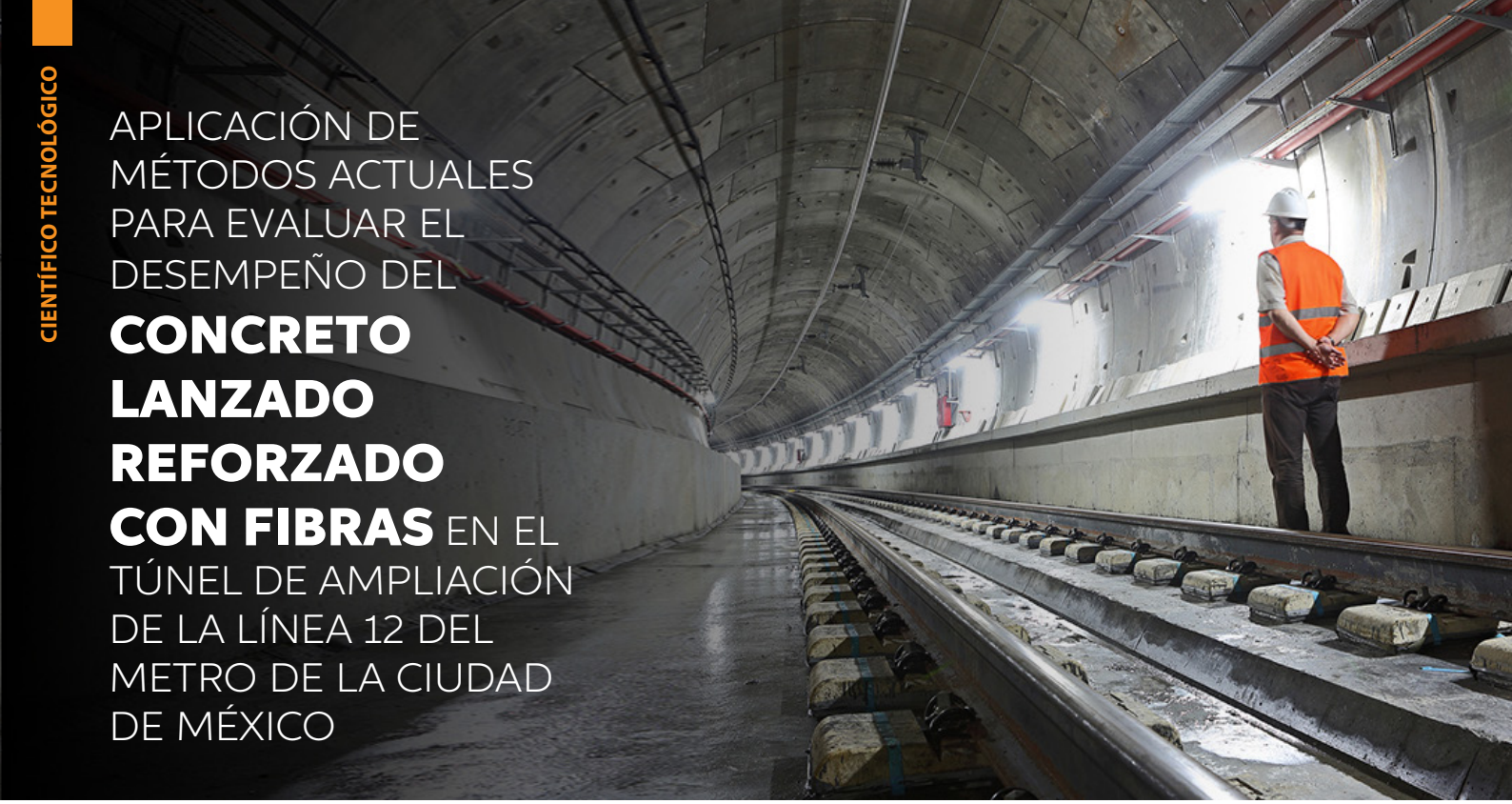


APLICACIÓN DE MÉTODOS ACTUALES PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DEL **CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRAS** EN EL TÚNEL DE AMPLIACIÓN DE LA LÍNEA 12 DEL METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

• *Carlos Aire*
Investigador, Instituto de Ingeniería-Universidad Nacional Autónoma de México

El concreto lanzado reforzado con fibras es un material que durante los últimos años se ha incrementado su uso en la industria de la construcción en México. Existen aplicaciones en obras civiles como en trabajos de minería, en donde se emplea como material de revestimiento primario y definitivo. Este incremento en el uso de esta tecnología en las obras subterráneas ha llevado a la necesidad de caracterizar sus propiedades mecánicas. La principal característica del concreto reforzado con fibras es la absorción de energía, que puede determinarse por varios métodos de prueba. En este artículo se presenta una aplicación de dos métodos de prueba actuales basado en el ensayo de paneles para determinar la capacidad de absorción de energía del concreto del revestimiento del túnel de ampliación de la línea 12 del metro de la ciudad de México, donde se emplea la tecnología del concreto lanzado reforzado con fibras de acero en el revestimiento primario. Se obtuvieron en obra muestras de panel de sección cuadrada y circular que fueron ensayados en laboratorio para determinar la absorción de energía. Como conclusión se puede afirmar que es posible aplicar los métodos de prueba basado en el ensayo de paneles para evaluar el desempeño del concreto lanzado reforzado con fibras en el túnel de la línea 12 de la ciudad de México.

1. Introducción

Actualmente, el uso de fibras en el concreto es una tendencia frecuente en la industria de la construcción. En México, se usa como reemplazo de mallas electrosoldadas en concretos lanzados, en pisos industriales y en elementos prefabricados. Recientemente, se ha incrementado su uso en obras subterráneas, tanto en obras civiles como en minería. Por ello es de interés conocer el desempeño de este tipo de concreto. A diferencia del concreto convencional, en el cual la resistencia a compresión es la propiedad característica, en el concreto reforzado con fibras (CRF) se caracteriza por su comportamiento post-agrietamiento, midiendo su capacidad de absorción de energía. Para medir esta propiedad se han desarrollado diferentes métodos de prueba estandarizados que permite evaluar el desempeño del concreto reforzado con fibras. El Instituto de Ingeniería de la UNAM ha implementado varios de estas metodologías, entre ellos: los ensayos de viga ASTM C1609 y EN 14651, los ensayos de panel circular ASTM C1550 [1] y panel cuadrado EN 14488-5 [3] y el ensayo Barcelona UNE 83515 [4]

En el área Metropolitana de la Ciudad de México, recientemente se construyeron dos importantes proyectos de infraestructura subterránea, en los que se consideraron el uso de CRF para el revestimiento de los túneles: el Túnel Emisor Oriente (TEO) y el Túnel Emisor Poniente (TEP-II) pertenecientes al Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México, construidos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), con la finalidad de aumentar la capacidad de evacuación de las aguas residuales y pluviales de la ciudad de México. En estos proyectos, TEO y TEP-II, se colocaron CRF sintética para el revestimiento definitivo de los túneles.

Actualmente, otro proyecto de infraestructura de túneles en desarrollo es la ampliación del metro de la Línea 12 (L-12) de la ciudad de México (CDMX), que considera el uso de concreto lanzado reforzado con fibras de acero (CLRFA) para el revestimiento primario del túnel. Es un proyecto que desarrolla la Dirección General de Construcción de Obras para el Transporte (DGCOT), y que se construye para mejorar el transporte de la ciudad de México. De acuerdo con las especificaciones del proyecto, la resistencia del concreto lanzado se verifica mediante ensayo de testigos de concreto que se obtienen de placas de concreto muestreadas en obra.

Basándose en la experiencia de investigaciones sobre CRF, el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM) propuso a la DGOT un estudio para evaluar el desempeño del CLRFA, para este proyecto de construcción subterránea. Para ello el II-UNAM elaboró un programa y campaña experimental, incluyendo muestreos en obra y ensayos de laboratorio considerando un conjunto completo de pruebas para estudiar el comportamiento del concreto colocado determinando sus propiedades residuales. Paneles y cilindros fueron seleccionados para determinar la absorción de energía y caracterizar el comportamiento del CLRFA. Las muestras se tomaron durante el lanzado de concreto en el túnel de la L12. En este artículo se presentan los resultados de paneles cuadrados (UNE 14488-5) y paneles circulares (ASTM C1550 [1]).

2. Ampliación de la línea 12 del metro de la cdmx

2.1 Generalidades

La Secretaría de Obras y Servicios de la Dirección General de Construcción de Obras para el Transporte (DGOT) construye la ampliación de la línea 12 del metro de la ciudad de México. Es un proyecto de infraestructura que consiste en un túnel de 4.6 kilómetros de longitud en los que se ubicarán tres estaciones de metro que conectarán las estaciones Mixcoac y Observatorio, uniendo las zonas Oriente y Poniente de la ciudad de México.

Para la construcción del túnel de 4.6 km de longitud y diámetro promedio de 11 m, 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. Posterior a la excavación de la sección media superior, se coloca el revestimiento primario para dar estabilidad al terreno, que consiste en aplicar concreto lanzado reforzado con fibras de acero (CLRFA). El espesor de revestimiento primario es de 20 cm, que se coloca en dos capas de 10 cm cada una, aproximadamente. El revestimiento secundario es de concreto de 40 cm de espesor en bóveda. En esta segunda capa de revestimiento, se emplea concreto lanzado sin fibras; el refuerzo es con varillas de acero.

2.2 Ensayos de control

La propiedad más representativa CLRF es la absorción de energía. La absorción de energía del CLRF se determina mediante la realización de ensayos de flexión. Existen dos procedimientos de uso tradicional: a) el ensayo de panel, de sección circular o sección cuadrada, y b) el ensayo de viga. Para su determinación se han desarrollado nuevos métodos de prueba estandarizados, los cuales se usan internacionalmente. El ensayo de viga se usa principalmente en aplicaciones de pavimentos.

El desempeño post-elástico de paneles circulares/cuadrados 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 concreto reforzado con fibras después del agrietamiento. Los métodos típicos de prueba de resistencia a flexión incluyen la ASTM C1550 [1], de paneles circulares, y la EN 14488-5, de paneles cuadrados. La determinación de la capacidad de absorción de energía es el factor más importante para evaluar el desempeño del CLRF, la cual se calcula para una deflexión especificada de 25 mm para el panel cuadrado y de 40 mm para el panel circular.

Otros métodos para evaluar la resistencia a flexión son las pruebas en vigas. Para ello se requiere de paneles de CLRF, y posteriormente se obtienen vigas mediante corte y se ensayan de acuerdo con los estándares ASTM C1609 y UNE 14561, para determinar la tenacidad en flexión para valores de deflexión especificada en cada norma.

Un reciente desarrollo, es el ensayo de doble punzonamiento (UNE 83515 [4]), conocido como ensayo Barcelona, con el cual se determina la tenacidad en cilindros para una apertura circunferencial de fisura especificada de 6 mm.

Teniendo en cuenta lo anterior, el II-UNAM desarrolló una campaña experimental para evaluar el desempeño del concreto del revestimiento primario del túnel de la L-12, para lo cual se elaboraron diferentes tipos de muestras de CLRFA obtenidas en el túnel.

La figura 1 muestra un procedimiento típico de la colocación del revestimiento primario de CLRFA en el túnel L-12. Un procedimiento típico es el siguiente: cuando el camión de concreto llega a obra, se toma una muestra representativa de concreto sin fibra y se mide la temperatura y revenimiento. Enseguida se incorpora la cantidad de fibra de diseño especificada. La incorporación y tiempo de mezclado se realiza de acuerdo con las recomendaciones del fabricante de fibra. Una vez terminado el tiempo de mezclado, el concreto se suministra al interior del túnel mediante una tubería, la cual es recibida por un camión revolvedor que transporta el concreto desde la lumbrera hacia el frente de trabajo incorporándolo al equipo de lanzado.

Los materiales empleados en la fabricación del concreto fueron: cemento CPC 40RS, arena andesita, grava caliza de 10 mm de tamaño máximo, aditivo acelerante y fibra de acero de 35 mm de longitud en una dosis de 30 kg/m3 de concreto.

En el interior del túnel se realizaron tres tipos de muestreo: panel circular (tres especímenes), panel cuadrado (tres especímenes) y artesas (dos especímenes), a partir de los cuales se realizaron los ensayos ASTM C1550 [1] (panel circular), EN 14488-5 [3] (panel cuadrado) y UNE 83515 [4](ensayo Barcelona). En este artículo solo se presentan los resultados de los ensayos de panel cuadrado y circular.

3. Ensayo de panel cuadrado – en 14488-5 [3]

Las pruebas de absorción de energía en panel de sección cuadrada de l 600 × l 600 mm de sección y e 100 mm de espesor se realizaron de acuerdo con la norma EN 14488-5 [3]. La prueba consiste en ensayar paneles cuadrados, que se someten a una carga central que se aplica a través de una placa cuadrada de 100 × 100 mm y 20 mm de espesor. Del ensayo se obtiene el comportamiento carga-desplazamiento y a partir de esta curva se calcula la capacidad de absorción de energía en el rango de post-agrietamiento hasta un desplazamiento especificado de 25 mm, calculada como el área bajo la curva.

Para realizar el ensayo se utilizó un sistema de control por lazo cerrado que permite el control por desplazamiento, y un marco de carga que se integra a un sistema de actuador y celda de carga. El actuador tiene una capacidad de 500 kN, y para registrar el

Figura 1

Procedimiento de colocación del revestimiento primario del túnel L-12

desplazamiento se empleó un transductor de desplazamiento tipo LVDT de 100 mm de rango. La velocidad del ensayo fue de 1 mm/min.

En la figura 2, se muestra la configuración del ensayo de panel cuadrado, de acuerdo con la EN 14488-5 [3]. El panel se apoya en un marco de acero cuadrado. La cara del panel que se enrasa, corresponde a la cara superior del espécimen en la prueba (EN 14488-5 [3]).

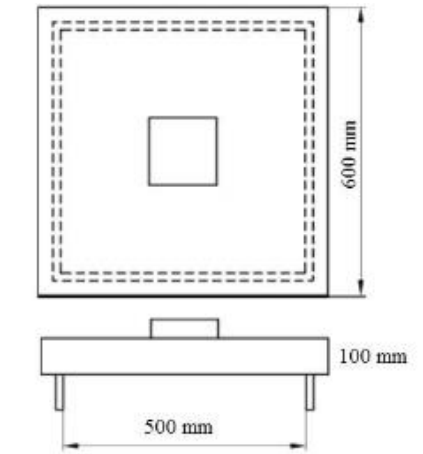
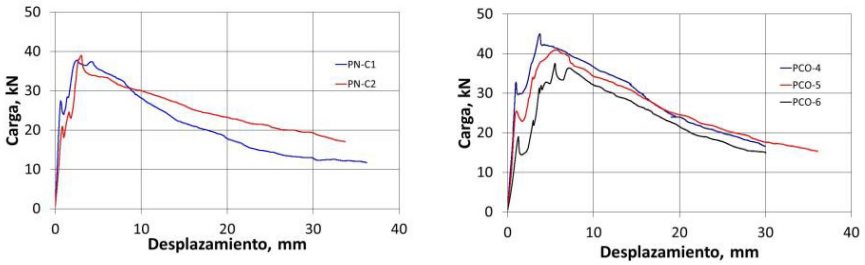


Figura 2

Esquema de configuración del ensayo de panel, según la EN 14488-5

El modo de fallo de los paneles ensayados mostró un patrón como el que se muestra en la figura 3, caracterizada por dos fisuras principales que atraviesa toda la sección del panel, y otras fisuras secundarias. En todos los casos, la falla fue gradual, debido a la presencia de las fibras en la matriz de concreto.

La figura 4 muestra las curvas carga-desplazamiento de los paneles ensayados (dos series). Las curvas presentan dos tramos, un tramo inicial ascendente y el post-agrietamiento descendente. En el primer tramo la carga asciende gradualmente con pequeños incrementos de desplazamiento, y se presentan varios picos. En este tramo inicial de la curva el aporte de la fibra no es total, hasta que se presenta el agrietamiento a partir del cual la fibra trabaja en conjunto con el concreto. En esta fase, se observó varios descensos de carga que se debe principalmente al agrietamiento del concreto, sin embargo, hay una recuperación en todos los casos hasta alcanzar un valor de carga máxima, a partir del cual se presenta un descenso gradual en el post-agrietamiento. La prueba finaliza al alcanzar un desplazamiento mínimo de 25 mm. La figura 4 muestra que el comportamiento post-agrietamiento es muy similar para los paneles ensayados, asimismo, los valores de carga máxima son bastante parecidas; por lo que se estima que la absorción de energía presente valores semejantes.



Serie 1 Serie 2

Figura 4

Curvas carga-desplazamiento de los paneles cuadrados ensayados

La absorción de energía se determinó como el área bajo la curva carga-desplazamiento entre el origen y el desplazamiento central de 25 mm, como lo especifica la EN 14488-5 [3]. Los resultados se muestran en las tablas 1 y 2 para las dos series de ensayo. Los resultados muestran que la absorción de energía promedio para 25 mm de desplazamiento de los paneles ensayados es de 647.6 Joules (CV 1%) y 670.5 Joules (CV 9.2%), para las dos series de ensayo. La variabilidad de los resultados es bastante aceptable (CV < 10%).

Tabla 1 Resultados de tenacidad, Tδ25mm

ID	Panel	U	Tenacidad	Promedio
T ™25 mm	PN-C1	Joules	624.3	Tprom = 647.6 J
T ™25 mm	PN-C2	Joules	671.0	C.V. = 5.1%

Tabla 2 Resultados de tenacidad, Tδ25mm

ID	Panel	U	Tenacidad	Promedio
T ™25 mm	PCO-4	Joules	629.3	Tprom = 670.5 J
T ™25 mm	PCO-5	Joules	741.8	C.V. = 9.2%
T ™25 mm	PCO-6	Joules	640.4	

4. **Ensayo de panel circular** – ASTM C1550 [1]

Las pruebas de absorción de energía en panel de sección circular de 75 e × 800 ϕ mm, se realizaron de acuerdo con la norma ASTM C1550 [1]. La prueba permite caracterizar el comportamiento de flexión del concreto expresado como absorción de energía en el rango de post-agrietamiento.

Panel 1 – PCO-1 Panel 2 – PCO-2

Figura 3

Modo de falla típico de los paneles cuadrados ensayados

Para el ensayo se empleó el mismo equipo del panel cuadrado. En este caso, el dispositivo de apoyo está conformado por una placa circular sobre el cual se colocan tres puntos de apoyo diametralmente equidistantes. De acuerdo con la ASTM C1550 [1], estos tres puntos de apoyo se colocan simétricamente circunscritos en un círculo de 750 mm de diámetro, y deben resistir la aplicación de una carga vertical de 100 kN en el centro del panel y ser lo suficientemente rígido para que no se presenten desplazamientos inadmisibles durante la prueba. Estos apoyos están conformados por unas bases piramidales de acero con dispositivos en los vértices que hacen de rotula y permiten el libre giro de la placa durante la prueba.

El panel se apoya en los tres pivotes dispuestos simétricamente y se aplica una carga puntual sobre el centro del panel, como se muestra en la figura 5. La carga se aplica en la cara enrasada, estando la cara moldeada del panel apoyada sobre los tres pivotes. Durante la prueba se registra la carga y desplazamiento de manera continua y se obtiene la curva carga-desplazamiento a partir del cual se puede obtener la absorción de energía.

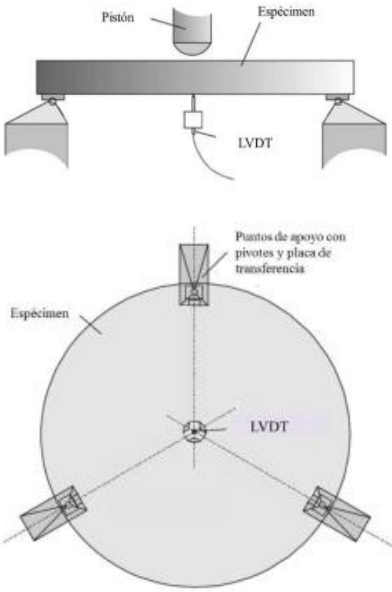


Figura 5

Esquema de configuración del ensayo de panel, según la ASTM C1550

La velocidad de desplazamiento aplicada fue de 4 mm/min, como lo establece la ASTM C1550 [1]. La prueba finaliza cuando se alcanza, como mínimo, un desplazamiento de 40 mm. La instrumentación se hizo mediante un transductor de desplazamiento tipo LVDT de 100 mm de rango, que se coloca al centro de la parte inferior del panel. La absorción de energía, calculada como el área bajo la curva carga-desplazamiento se determina para 5, 10, 20 y 40 mm de desplazamiento, como lo especifica la ASTM C1550 [1].

Los paneles ensayados fallaron típicamente formando tres fisuras radiales que empiezan en el centro del panel y dividen el espécimen en tres secciones, como se muestra en la figura 6. El modo de falla fue gradual, como en el caso del panel cuadrado. De acuerdo con la ASTM C1550 [1], un ensayo exitoso implica un modo de falla que incluya al menos tres grietas radiales. Ocasionalmente, los especímenes presentan un modo de falla que implica una sola fisura, los cuales se caracterizan por presentar una baja absorción de energía. El resultado de esta prueba deber ser descartada y solo se deben considerar el resultado de dos ensayos que presenten modo de falla que incluya tres grietas radiales. En este estudio los paneles presentaron tres fisuras radiales.

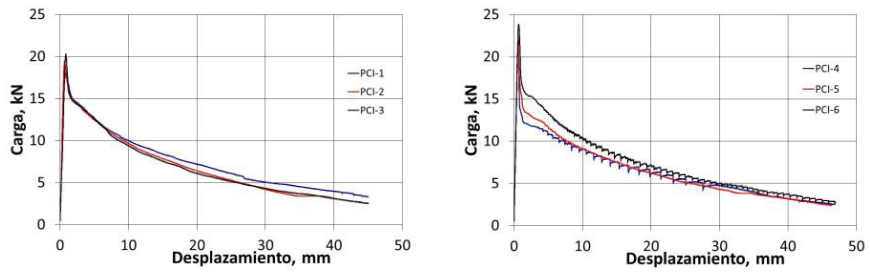
Panel PCI-1 Panel PCI-2 Panel PCI-3

Figura 6

Modo de falla de paneles circulares

La figura 7 muestra las curvas carga-desplazamiento de los paneles ensayados. Las curvas carga-desplazamiento presentan un tramo inicial ascendente donde la carga asciende de 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. La fase de post-agrietamiento se caracteriza por el descenso gradual de la carga y desplazamiento. Los tres paneles presentan capacidades residuales similares.

La absorción de energía se determinó como el área bajo la curva carga-desplazamiento entre el origen y el desplazamiento central especificada en la ASTM C1550 [1]. Los resultados se muestran en las tablas 3 y 4 para las doce series ensayadas. La absorción de energía promedio para un desplazamiento de 40 mm para los paneles ensayados es de 299.2 Joules (CV 5.0%) y 275.3 Joules (CV 15.5%), para las dos series de ensayo.



Serie 1 Serie 2

Figura 7

Ensayo de panel de sección circular, ASTM C1550

Tabla 3 Resultados de tenacidad, Tδ5mm, Tδ10mm, Tδ20mm y Tδ40mm

ID	U	T ᵀᴹ5 mm	T ᵀᴹ10 mm	T ᵀᴹ20 mm	T ᵀᴹ40 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, Tδ5mm, Tδ10mm, Tδ20mm y Tδ40mm

ID	U	T ᵀᴹ5 mm	T ᵀᴹ10 mm	T ᵀᴹ20 mm	T ᵀᴹ40 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%

Factor de conversión de la absorción de energía: panel cuadrado vs panel circular

Es frecuente el interés en conocer la correlación entre los resultados de los ensayos obtenidos mediante el ensayo de panel cuadrado y panel circular. Existe un valor reportado por Bernard [2] que encontró una relación de 2.5 (r2 = 0,90) para los valores de absorción energía entre el panel cuadrado y circular. En nuestro caso, se encontró un factor de conversión de 2.265 (r2 = 0.84). Sin embargo, este valor es una primera aproximación, debido a que se requiere de mayor información, mayores datos de campo, mayor número de muestras en variadas aplicaciones subterráneas que incluyan diferentes tipos y dosis de fibras, para poder establecer un factor de conversión de mayor aproximación. Por el momento es posible conocer la absorción de energía para ambos tipos de paneles como una primera aproximación, conociendo uno de ellos. 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.

5. Conclusiones

El concreto reforzado con fibras 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 una aplicación de dos métodos actuales para evaluar el desempeño del concreto lanzado reforzado con fibras. Se realizaron muestreos en obra y ensayos en laboratorio para determinar la capacidad de absorción de energía del concreto de revestimiento del túnel de la ampliación de la línea 12 del metro de la ciudad de México. Se fabricaron en obra dos tipos de muestras: panel circular y panel cuadrado.

Los muestreos hasta ahora desarrollados en la obra de ampliación de la L12 representan un proyecto piloto, desarrollado con la finalidad de proponer un Protocolo de Control para evaluar 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 concreto lanzado reforzado con fibras y su aplicación como método de control de calidad en construcciones subterráneas. Varios de estos métodos se usan actualmente como métodos de prueba para evaluar las propiedades del concreto reforzado con fibras en túneles, el cual se mide por su capacidad residual, determinando la resistencia residual y la absorción de energía.

6. 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 este trabajo.

7. Referencias

[1] ASTM C1550 (2012), Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)
[2] Bernard S. (2002). Correlations in the behavior of fibre reinforced shotcrete beam and panel specimens. Materials and Structures. Vol. 35 April 2002, pp 156-164
[3] EN 14488-5 (2007): Test sprayed concrete – Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens
[4] UNE 83515 (2008), "Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Ensayo Barcelona", Madrid, España, 7 pp.

Universidad Central

Programa Ejecutivo
Advance
Ven y transforma tu futuro

Conoce nuestra oferta académica
en www.ucentral.cl/advance

Admisión 2021

INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL
(Online - Santiago - R. Coquimbo)

- Modalidad online y presencial
- Permite compatibilizar vida estudiantil, laboral y familiar
- Clases 3 veces por semana
- Próximo a metro Parque Almagro, Toesca y Moneda

advance@ucentral.cl 600 582 2222

4 AÑOS ACREDITADA
GESTIÓN INSTITUCIONAL | DESDE DICIEMBRE 2017
DOCENCIA DE PREGRADO | HASTA DICIEMBRE 2021

DIRECCIÓN DE COMUNICACIONES CORPORATIVAS