

Ensayos de control del concreto lanzado con fibras en el túnel de la línea 12 del metro de la CDMX

C. Aire^{1*} , L. Aguilar¹

*Autor de Contacto: aire@pumas.iingen.unam.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.493>

Recepción: 18/06/2020 | Aceptación: 31/10/2020 | Publicación: 01/01/2021

RESUMEN

En este artículo se evalúan tres ensayos para caracterizar el comportamiento del Concreto Lanzado con fibras metálicas en el revestimiento primario del túnel de la línea 12 del metro de la CDMX. Se elaboraron tres paneles cuadrados (UNE 14488-5), tres paneles redondos (ASTM C1550) y cuatro cilindros para ensayo Barcelona (UNE 83515). Todos se pueden utilizar como métodos de control de Calidad para Concretos Reforzados con Fibras (CRF) en construcciones subterráneas, sin embargo, se encontró mayor variabilidad en los resultados de los paneles circulares, además de ser estos los especímenes con mayor complejidad para su elaboración y ensayo, por lo tanto, se recomienda la aplicación del ensayo Barcelona para el control de calidad en obra debido a que resulta más sencilla la preparación, manipulación y ejecución del muestreo y ensayo.

Palabras clave: concreto lanzado reforzado con fibras; absorción de energía; ensayo de paneles circulares, ensayo de paneles cuadrados; ensayo Barcelona.

Citar como: Aire, C., Aguilar, L. (2021), "Ensayos de control del concreto lanzado con fibras en el túnel de la línea 12 del metro de la CDMX", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 73 – 87, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.493>

¹ Ingeniería Estructural, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Contribución de cada autor

En este trabajo el primer autor contribuyó con la campaña experimental (50%), el análisis de los resultados y la redacción del artículo, el segundo autor con la campaña experimental (50%) y revisión del artículo.

Licencia Creative Commons

Este trabajo está publicado bajo los términos de una Licencia Internacional Creative Commons Atribución 4.0 Internacional ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2021.

Control tests of shotcrete with fibers in the tunnel of metro line 12 from CDMX

ABSTRACT

This paper three tests are evaluated to characterize the behavior of Shotcrete with metallic fibers in the primary lining of the tunnel on metro line 12 from CDMX. Three square panels (UNE 14488-5), three round panels (ASTM C1550) and four cylinders for Barcelona test (UNE 83515) were made. All can be used as quality control methods for Fiber Reinforced Concrete (FRC) in underground constructions, however, greater variability was found in the results of circular panels, in addition to being the specimens with the greatest complexity for their elaboration and test, therefore, the application of the Barcelona test is recommended for quality control on site because it is easier to prepare, handle and perform sampling and testing.

Keywords: fiber reinforced shotcrete; energy absorption; circular panels test, square panel test; Barcelona test

Ensaios de controle de concreto projetado com fibra no túnel da linha 12 do metrô CDMX

RESUMO

Neste artigo três ensaios são avaliados para caracterizar o comportamento do concreto projetado com fibras metálicas no revestimento primário do túnel da linha 12 do metrô CDMX. Três painéis quadrados (UNE 14488-5), três painéis redondos (ASTM C1550) e quatro cilindros para ensaio de Barcelona (UNE 83515) foram feitos. Todos podem ser utilizados como métodos de controle de qualidade para Concreto Reforçado com Fibras (CRF) em construções subterrâneas, porém, constatou-se maior variabilidade nos resultados dos painéis circulares, além de serem os corpos de prova com maior complexidade para sua elaboração e ensaio, portanto, a aplicação do ensaio de Barcelona é recomendada para controle de qualidade no local porque é mais fácil de preparar, manusear e realizar amostragem e ensaio.

Palavras-chave concreto projetado reforçado com fibra; absorção de energia; ensaio de painel circular, ensaio de painel quadrado; ensaio de Barcelona

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el uso de fibras en el concreto se ha convertido en una tendencia frecuente en la industria de la construcción. En nuestro país, inicialmente reemplazaron mallas electrosoldadas en concretos lanzados, pisos industriales y elementos prefabricados. A nivel internacional, son variadas las aplicaciones de esta tecnología, entre ellas, pavimentos, pisos industriales, sostenimiento de taludes, elementos arquitectónicos y en construcción de túneles (Gettu et.al., 2004; Kasper et.al., 2008; De la Fuente et.al., 2012). En la actualidad también se emplean las fibras de acero en la construcción de dovelas para el revestimiento de túneles (Blom, 2002), (Burgers et.al., 2007), (De la Fuente et.al., 2013). En México, las primeras aplicaciones fueron en pisos industriales, sin embargo, recientemente se ha incrementado su uso, principalmente en obras subterráneas, tanto en obras civiles como en minería.

Una de las principales propiedades beneficiadas por el reforzamiento con fibras en el concreto es la capacidad de absorción de energía después de la fisuración, esto quiere decir que, por más que el elemento se fisure, éste podrá seguir resistiendo carga y deformarse sin colapsar, permitiendo la redistribución de tensiones (De Waal, 2000), mejorando el comportamiento ante la fractura, el impacto y la fatiga (Gopalaratnam y Gettu, 1995). La eficiencia de las fibras incorporadas a la mezcla de concreto depende de (1) las propiedades de la fibra: resistencia, rigidez y unión, (2) la distribución de la fibra: fracción relativa, contenido y orientación (Zollo, 1997).

Para medir la absorción de energía se han desarrollado diferentes métodos de prueba estandarizados que permiten evaluar el desempeño del concreto reforzado con fibras, para su aplicación es importante tener en cuenta: 1) La complejidad de la prueba; 2) La complejidad de la preparación de las muestras; 3) La complejidad de la ejecución; 4) La reproductividad de la prueba; 5) El costo y la aplicabilidad en la práctica y la aceptación del método de prueba por los investigadores. (Kooiman, 2000). Los métodos propuestos para evaluar la absorción de energía de los CRF, deben ser evaluados conforme a las condiciones descritas anteriormente para determinar su aplicación práctica como Protocolos de Control en Obra para los CRF.

Teniendo en cuenta los fundamentos anteriores y la amplia experiencia del Instituto de Ingeniería de la UNAM en investigaciones sobre CRF, en este trabajo se presentan los resultados de un Programa Experimental para evaluar el desempeño del CLRF en un caso práctico, la Ampliación de la Línea 12 del Metro de la CDMX. Se evalúa la Absorción de Energía (Tenacidad) del concreto del revestimiento primario del túnel de la L-12 y su complejidad para elaborar los especímenes correspondientes a los ensayos de panel de sección cuadrada EN 14488-5 ($l\ 600 \times l\ 600 \times h\ 100$ mm), ensayo de panel circular ASTM C1550 ($\phi\ 800 \times e\ 75$ mm) y ensayo Barcelona UNE 83515 ($h\ 150 \times \phi\ 150$ mm) propuesto por Chen (1970). Se decide utilizar normatividad internacional debido a que, durante esta campaña experimental, en México no se cuenta con normas que permitan evaluar este tipo de ensayos.

2. OBRA DE 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. Con esta ampliación de la línea 12 del metro de la ciudad de México, se prevé que el tiempo de traslado entre las Estaciones Mixcoac a Observatorio se reduzca en hasta 60 por ciento.

El proyecto ejecutivo, que actualmente se encuentra en su primera fase consiste en la construcción

de 13 lumbreras de una profundidad entre 15 y 46.5 m. Las lumbreras sirven para comunicar al túnel con el exterior y al mismo tiempo introducir 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. No existe presencia de nivel de aguas freáticas. En el caso de suelos inestables se resuelve con elementos de soporte, tales como marcos metálicos con separación de 0.50 m a 1.00 m entre ellos, dependiendo del tipo de suelo blando. En otros casos, cuando se presenta 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 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. haciendo un promedio de dos a tres avances por día. 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 (CLRF) de acero. El espesor de revestimiento primario es de 20 cm, que se coloca en dos capas de 10 cm cada una, aproximadamente. Entre la capa de revestimiento primario y secundario se coloca una geomembrana de PVC para evitar posibles filtraciones de agua hacia el revestimiento definitivo. 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 del CLRF es la absorción de energía. Después de que el concreto se agrieta, las fibras empiezan a trabajar durante el proceso de agrietamiento, redistribuyendo y controlando la propagación de las grietas a medida que el sistema de revestimiento de CLRF experimenta deformación. La capacidad de carga del CLRF determina el desempeño del sistema de revestimiento.

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. Los métodos típicos de prueba de resistencia a flexión incluyen el ASTM C1550, 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 rendimiento del CLRF, la cual se calcula para una deflexión especificada, 25 mm en panel cuadrado y 40 mm en panel circular.

Otros métodos para evaluar la resistencia a flexión son las pruebas en vigas. Para ello se requiere paneles de CLRF que se cortan en vigas y son ensayadas de acuerdo con los estándares ASTM C1609 y UNE EN-14651, para determinar la tenacidad en flexión.

Un reciente desarrollo, es el ensayo de doble punzonamiento (Double-Punching Test, DPT), propuesto por Chen (1970) normalizado por 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 de 6 mm. Carmona et.al., (2009), considera que este ensayo se caracteriza por su baja complejidad en la elaboración de probetas, aporta un adecuado control sistemático del CRF en obra y presenta una gran superficie específica de fractura a lo largo de su altura.

Para evaluar el desempeño de los concretos del revestimiento primario del túnel de la L-12 el II-UNAM realizó ensayos de control, para lo cual se fabricaron diferentes tipos de muestras de CLRF obtenidas en el túnel, y emprendió una campaña experimental dando seguimiento a todas las operaciones de colocación del concreto, con énfasis en el muestreo y ensayo de especímenes.

La figura 1 muestra un procedimiento típico de la colocación del revestimiento primario de CLRF de acero en el túnel L-12. Al llegar a obra el camión de concreto se procede a obtener una muestra de concreto sin fibra, se mide la temperatura y revenimiento para su rechazo o aceptación. En caso de aceptación, enseguida se incorpora la cantidad de fibra de diseño, permitiendo que se integre y mezcle durante el tiempo establecido. 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 lumbreña hacia el frente de trabajo incorporándolo al equipo de lanzado. Los materiales empleados en la fabricación del concreto fueron: cemento CPC 40RS (NMX-C-414-ONNCCE), agregados pétreos: arena andesita, grava caliza de 10 mm de tamaño máximo (NMX-C-111-ONNCCE), aditivo de línea tipo B y F (ASTM C 494), aditivo acelerante TamShot 70 AF (ASTM C 1141) y fibra de acero de 35 mm de longitud, relación de esbeltez (l/\varnothing) 65, resistencia a la tracción de 1.345 N/mm^2 , en una dosis de 30 kg/m^3 de concreto. Una relación de agua/cemento 0.50. La resistencia a compresión de diseño especificada a 28 días es de $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$,

Se realizaron tres tipos de muestreo, panel circular, panel cuadrado y artesas, a partir de los cuales se realizaron los ensayos ASTM C1550 (panel circular), EN 14488-5 (panel cuadrado) y UNE 83515 (ensayo Barcelona). Todas las probetas que se obtuvieron para esta campaña experimental corresponden al mismo diseño de mezcla, y cada tipo de muestreo al mismo lote suministrado en campo. Sin embargo, no se cuenta con el diseño de la mezcla porque esta información es propiedad del proveedor del concreto.



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

3. ENSAYO DE PANEL CUADRADO – EN 14488-5

Las pruebas de absorción de energía en panel de sección cuadrada de $l = 600 \times l = 600 \text{ mm}$ de sección y $h = 100 \text{ mm}$ de espesor se realizaron de acuerdo con la norma EN 14488-5. La prueba consiste en ensayar paneles cuadrados, que se someten a una carga central que se aplica a través de una placa cuadrada de $100 \times 100 \text{ mm}$ 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 de panel cuadrado se dispone de 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 la instrumentación de los paneles se emplea un transductor de desplazamiento tipo LVDT. La velocidad de aplicación del

desplazamiento del pistón del actuador fue de 1 mm/min. El rango de medición del LVDT empleado es de 100 mm.

En la figura 2, se muestra la configuración del ensayo de panel cuadrado, de acuerdo con la EN 14488-5. La cara del panel que se enrasta corresponde a la cara superior del espécimen en la prueba (EN 14488-5).

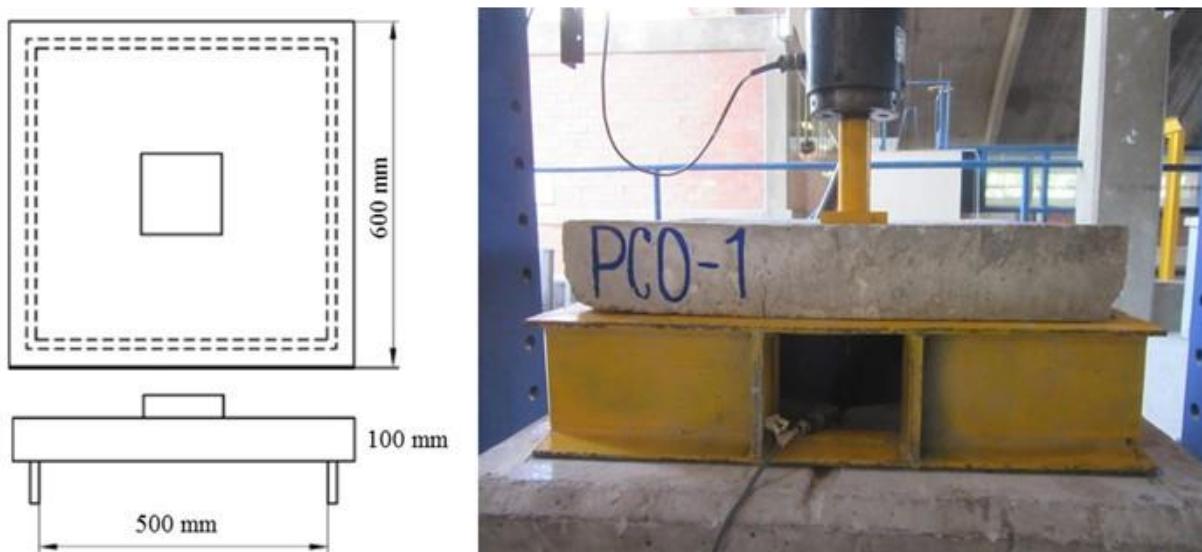


Figura 2. Esquema de configuración del ensayo de panel, según la EN 14488-5

Los paneles utilizados para este ensayo corresponden a los especímenes PCO-1, PCO-2 y PCO-3, mismos que se obtuvieron a partir de la misma mezcla (lote) de concreto suministrada en campo para el revestimiento primario del túnel. Su falla típica se comporta formando dos fisuras principales que atraviesan toda la sección del panel, y otras fisuras secundarias, como se muestra en la figura 3. La falla fue gradual, debido a la presencia de las fibras en la matriz de concreto.



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

La figura 4 muestra las curvas carga-desplazamiento de los paneles ensayados. Las curvas muestran un comportamiento similar, independientemente del panel ensayado. 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 observaron varios descensos de carga que se deben 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 alcanzar un desplazamiento mínimo de 25 mm. La figura 4 muestra que el comportamiento post-agrietamiento es muy similar para ambos paneles, asimismo, los valores de carga máxima son bastante parecidas; por lo que se estima que la absorción de energía presente valores semejantes.

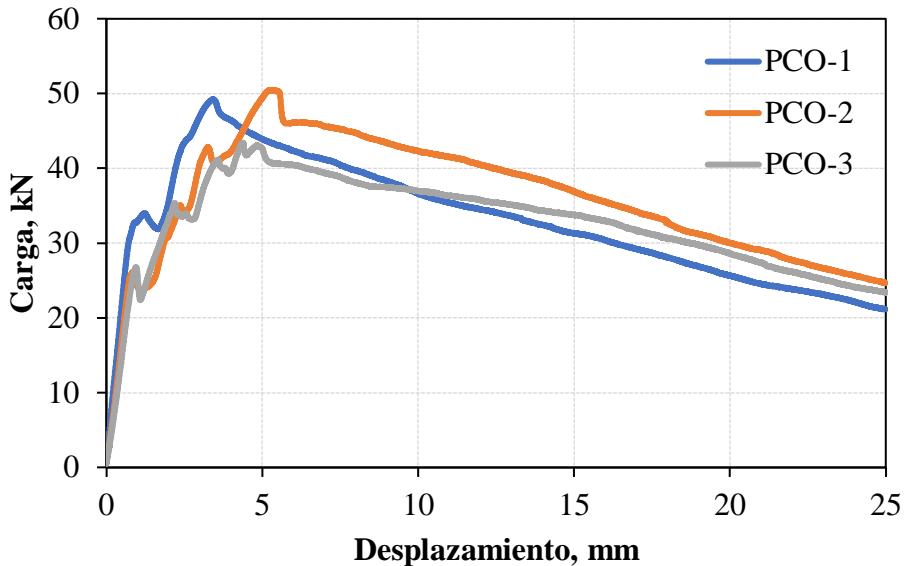


Figura 4. Curvas carga-desplazamiento de los paneles cuadrados ensayados

La tenacidad 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. Los resultados se muestran en la tabla 1. Los resultados muestran que la tenacidad (absorción de energía) promedio de los paneles ensayados es de 843.14, con un coeficiente de variación de 5.27%. La repetitividad de los resultados es bastante aceptable.

Tabla 1. Resultados de tenacidad, $T_{\delta 25\text{mm}}$

ID	Panel	U	Tenacidad	Promedio
$T_{\delta 25 \text{ mm}}$	PCO-1	Joules	820.83	$T_{\text{prom}} = 843.14 \text{ J}$
$T_{\delta 25 \text{ mm}}$	PCO-2	Joules	894.29	C.V. = 5.27%
$T_{\delta 25 \text{ mm}}$	PCO-3	Joules	814.31	

Estos paneles de prueba tienen un alto grado de complejidad en su etapa de muestreo, transporte y ensayo por tratarse de especímenes con peso promedio de 80 kg cada uno, además de requerir, al menos, dos personas capacitadas para la preparación y manipulación de las muestras durante el muestreo y ensayo. Se debe contemplar el excedente de concreto para su elaboración, alrededor de 0.1 m^3 por las tres probetas, situación que representa un costo extraordinario en el consumo de concreto, mismo que estará afectado por la periodicidad de la prueba, sin embargo, su aplicación estará determinada si en el proyecto se especifica su uso en el Protocolo de Control como método de evaluación, o en su defecto, utilizar otra prueba en caso de conocer su correlación con ésta.

4. ENSAYO DE PANEL CIRCULAR – ASTM C1550

Las pruebas de absorción de energía en panel de sección circular de $75 \text{ e} \times 800 \phi \text{ mm}$, se realizaron de acuerdo con la norma ASTM C1550. La prueba permite caracterizar el comportamiento de flexión del concreto expresado como absorción de energía en el rango de post-agrietamiento.

Para la realización de las pruebas se dispone de un dispositivo de montaje para los paneles que cumple con las especificaciones de la norma. El dispositivo está conformado por una placa circular sobre el cual se colocan tres puntos de apoyo diametralmente equidistantes. 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.

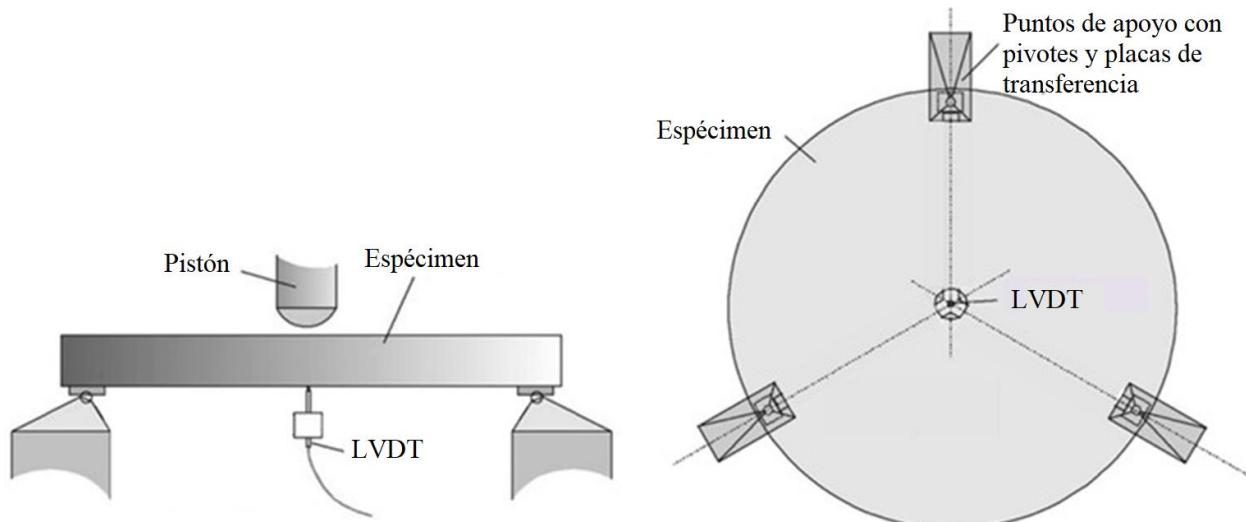


Figura 5. Esquema de configuración del ensayo de panel, según la ASTM C1550

La información de la respuesta completa carga-desplazamiento del ensayo de panel circular, también requiere de un equipo de prueba muy rígido y un sistema de control que permita obtener información del post-pico (post-agrietamiento), por lo cual, se empleó el mismo equipo ensayo del panel cuadrado. La velocidad de desplazamiento aplicada fue de 4 mm/min, como lo establece la ASTM C1550. 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 norma.

Los paneles ensayados con carga central puntual 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, debido a la presencia de las fibras en la matriz de concreto, a diferencia del ensayo de paneles sin fibra, en donde de experiencias previas se ha observado que la falla es repentina (Aire y Rodríguez, 2011).

De acuerdo con la ASTM C1550, 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 debe 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 tres paneles presentaron tres fisuras radiales.

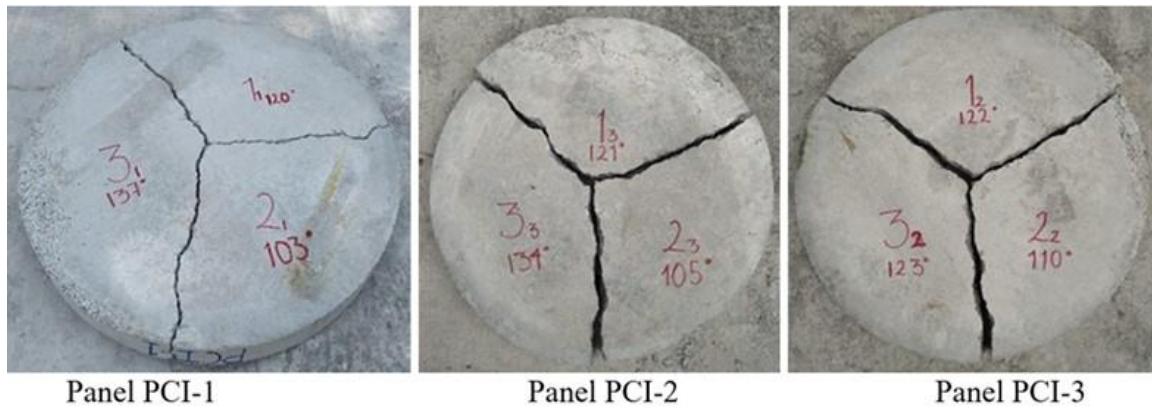


Figura 6. Modo de falla de paneles circulares

La figura 7 muestra la configuración del ensayo de panel circular y en la figura 8 se presentan las curvas carga-desplazamiento a partir de los resultados obtenidos. En México, el método de ensayo equivalente del ASTM C 1550 está normado en la NMX C539 (NMX 539, 2017). Las curvas carga-desplazamiento 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. La fase de post-agrietamiento se caracteriza por el descenso gradual de la carga y desplazamiento. Los tres paneles presentan capacidades residuales similares.



Figura 7. Ensayo de panel de sección circular, ASTM C1550

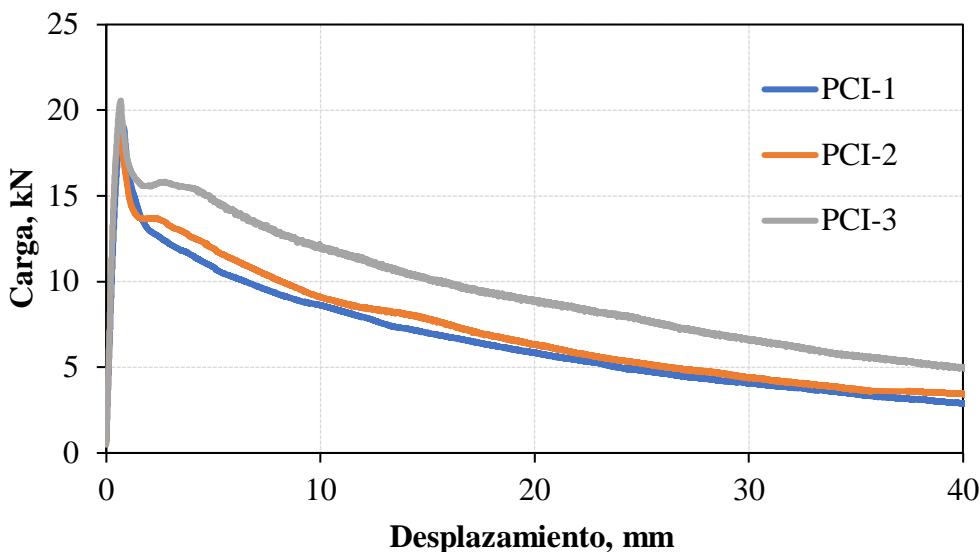


Figura 8. Curva carga vs desplazamiento de paneles circulares

La tenacidad se determinó como el área bajo la curva carga-desplazamiento entre el origen y el desplazamiento central especificada en la norma. Los resultados se muestran en la tabla 2. 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. Los resultados se muestran en la tabla 2. La absorción de energía promedio para los paneles ensayados es de 311 Joules para un desplazamiento de 40 mm, con un coeficiente de variación de 19.7%.

Tabla 2. Resultados de tenacidad, $T_{\delta 5\text{mm}}$, $T_{\delta 10\text{mm}}$, $T_{\delta 20\text{mm}}$ y $T_{\delta 40\text{mm}}$

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	63.8	111.6	182.4	265.6
PCI-2	Joules	66.7	118.8	196.0	286.9
PCI-3	Joules	77.2	143.3	246.1	380.8
T_{prom}	Joules	69.2	124.5	208.2	311.1
CV	%	10.2	13.3	16.1	19.7

Los paneles circulares, de igual forma que los paneles cuadrados también tienen un alto grado de complejidad en su etapa de muestreo, transporte y ensayo por tratarse de especímenes con peso promedio de 100 kg cada uno, además de requerir, al menos, dos personas capacitadas para la preparación y manipulación de las muestras durante el muestreo y ensayo. El proceso de enrase es tedioso y dependiendo de las características de la obra, su traslado hasta los cuartos de curado requiere de equipo mayor, además se debe contar con suficiente espacio para ser almacenados y curados. Se debe contemplar el excedente de concreto para su elaboración, alrededor de 0.15 m³ por las tres probetas, situación que representa un costo extraordinario en el consumo de concreto, mismo que estará afectado por la periodicidad de la prueba, sin embargo, su aplicación estará determinada si en el proyecto se especifica su uso para el Protocolo de Control como método de evaluación, o en su defecto, utilizar otra prueba en caso de conocer su correlación con ésta.

5. ENSAYO BARCELONA – UNE 83515

El ensayo Barcelona es un método de prueba para determinar la resistencia a fisuración, la tenacidad y la resistencia residual del concreto reforzado con fibras mediante un ensayo de doble punzonamiento. Es aplicable a probetas cilíndricas de concreto, moldeadas o extraídas de una estructura, de altura aproximadamente igual a su diámetro. Los elementos indispensables para la aplicación de este método de prueba son: la cadena circunferencial con extensómetro, discos de carga (punzones) y discos de montaje. Las probetas de ensayo pueden obtenerse de moldeo directo de moldes cilíndricos de $h = 150 \times \phi = 150$ mm, de moldes cilíndricos de $h = 150 \times \phi = 300$ mm y corte posterior para obtener $h/\phi = 1$, o de extracción de testigos de $\phi = 150$ mm de estructuras reales, que es una ventaja del método cuando se requiere evaluar el desempeño del concreto colocado en obra. La prueba se realiza de acuerdo con la norma UNE 83515. La figura 9 muestra un esquema de la configuración del ensayo Barcelona. La carga se debe aplicar de forma uniforme con una velocidad de descenso del pistón de la prensa de 0.5 ± 0.05 mm/min durante todo el ensayo. Éste se considera finalizado cuando el desplazamiento circunferencial total alcance como mínimo los 6 mm.

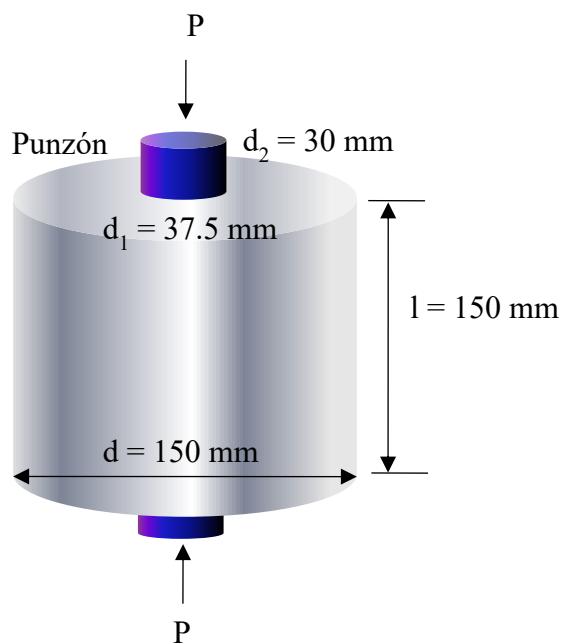


Figura 9 Configuración del ensayo Barcelona – UNE 83515

Para la realización de este ensayo se llevó a cabo el muestreo de artesa de madera de $650 B \times 350 b \times 150 h$ mm, de donde fueron extraídos 4 testigos. Para la extracción de testigos se usó una extractora de corazones, como la que se muestra en la figura 10. Se aseguró la verticalidad de los testigos nivelando la superficie de apoyo. La carga se aplicó sobre la cara enrasada.

La figura 11 muestra la configuración del ensayo. En método de ensayo equivalente de la UNE 83515 en México es la NMX C538 (NMX C538, 2017).



Figura 10. Extracción de testigos para Ensayo Barcelona.



Figura 11. Ensayo de doble punzonamiento, configuración, UNE 83515

La falla del cilindro del ensayo Barcelona presenta 3 grietas que atraviesan toda la altura del cilindro., como se aprecia en la figura 12.



Figura 12. Modo de falla típico de los cilindros, Ensayo Barcelona.

En la figura 13 se presentan las curvas carga-desplazamiento circunferencial de los cilindros ensayados. Las curvas presentan un desplazamiento casi nulo desde el inicio de carga hasta alcanzar la carga máxima. Al llegar a la carga máxima se presentan las primeras fisuras y el post-agrietamiento. La carga disminuye hasta una abertura circunferencial determinada y empiezan a trabajar las fibras. La carga se recupera y se presenta el comportamiento residual.

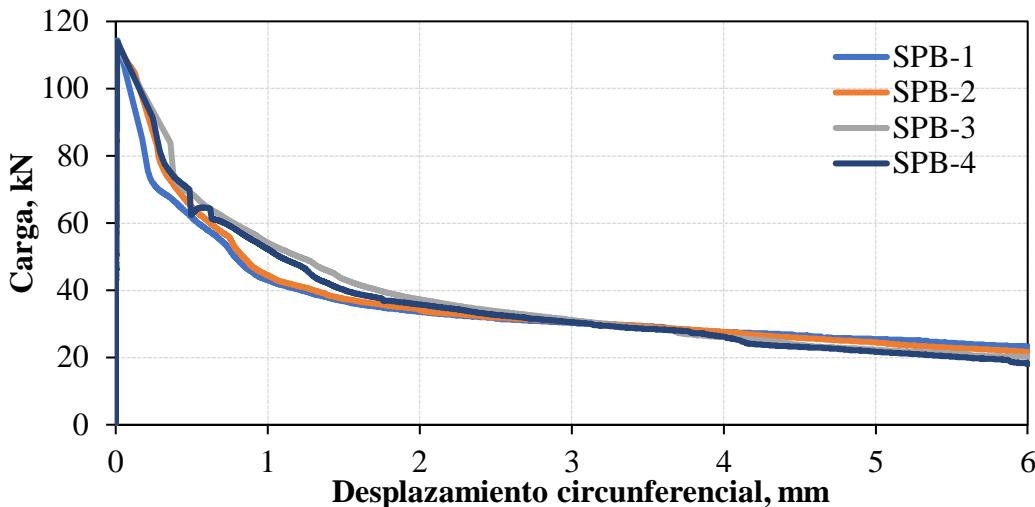


Figura 13. Curvas carga-apertura circunferencial del ensayo Barcelona

La tabla 3 muestra los resultados de tenacidad de los cilindros ensayados. El coeficiente de variación de los resultados varía entre 2.5% y 6.8%.

Tabla 3. Resultados de tenacidad, $T_{\delta 2\text{mm}}$, $T_{\delta 2.5\text{mm}}$, $T_{\delta 4\text{mm}}$ y $T_{\delta 6\text{mm}}$

ID	U	SPB-1	SPB -2	SPB -3	SPB -4	Prom	CV %
$T_{ct\ 2\text{mm}}$	Joules	102.9	108.9	120.2	115.5	111.9	6.8
$T_{ct2.5\text{mm}}$	Joules	119.2	125.5	137.9	132.5	128.8	6.3
$T_{ct\ 4\text{mm}}$	Joules	163.8	170.2	182.8	177.2	173.5	4.8
$T_{ct\ 6\text{mm}}$	Joules	214.7	219.1	227.9	220.5	220.5	2.5

Los cilindros utilizados para esta prueba tienen la ventaja de ser obtenidos a partir de artesas si se trata de Concretos Lanzados, extraerlos a partir de un elemento colado o elaborar propiamente los cilindros con moldes específicos, por lo tanto, su obtención tiene un bajo grado de complejidad en su etapa de muestreo, transporte y ensayo por tratarse de especímenes con peso promedio de 5 kg cada uno, además de requerir una persona capacitada para la preparación y manipulación de las muestras durante el muestreo y ensayo. El excedente de concreto para su elaboración es mínimo, y su aplicación estará determinada si en el proyecto se especifica su uso para el Protocolo de Control como método de evaluación.

6. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos para los tres ensayos propuestos en términos de absorción de energía, se encontró en el análisis estadístico mayor variabilidad en los resultados de los paneles circulares, y una menor variabilidad en los cilindros para el Ensayo Barcelona. Esta situación puede atribuirse a razón de mayor espesor, mayor concentración de fibras en el núcleo de concreto.

Los muestreos hasta ahora desarrollados en la obra de ampliación de la L12 representan un proyecto piloto a fin de valorar la aplicación de los métodos, mismos que no están especificados para el proyecto, por lo tanto, no se puede afirmar que los valores obtenidos cumplen con los parámetros especificados en términos de absorción de energía para los CLRF de acero, sin embargo, representa un 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.

Derivado de la campaña experimental aplicada al caso práctico de la Ampliación de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México, se identifica que los procesos de muestreo, preparación de especímenes y prueba para el Ensayo Barcelona (UNE 83515) resultan más prácticos desde el punto de vista de las condiciones de la obra, por tratarse de probetas de menor peso y menor dimensiones, comparada con los paneles, por consiguiente, se elaboran en menor tiempo y cuando se tiene la suficiente experiencia, la manipulación, preparación y ensayos, puede ser realizado por una sola persona.

El aumento en el uso de CRF, la experiencia ganada en estos trabajos de campo y de investigaciones afín, ha motivado al sector privado, empresas constructoras e instituciones académicas como es el Instituto de Ingeniería de la UNAM a plantear, proponer y desarrollar métodos de ensayo nacionales para evaluar el CRF basados en la normatividad internacional, con uso de información en aplicaciones locales. Los cuales impulsarán un nuevo sistema de control de calidad para el concreto reforzado con fibras en obras subterráneas en México.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen 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.

8. REFERENCIAS

- Aire, C., Rodríguez, M. (2011). *Estudio de las propiedades mecánicas básicas de concreto con fibras sintéticas*. Proyecto de investigación. Instituto de Ingeniería UNAM P1503. Informe elaborado para EUCLID. Junio. p. 78.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2007). *UNE EN 14488-5: Ensayos de hormigón proyectado. Parte 5: Determinación de la capacidad de absorción de energía de probetas planas reforzadas con fibras*. Madrid, España.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2007). *UNE EN 14651: Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)*. Madrid, España.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (2008). *UNE 83515: Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona*, Madrid, España.
- ASTM International. (2013). *ASTM C494/C494M-13 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. https://doi.org/10.1520/C0494_C0494M-13
- ASTM International. (2015). *ASTM C 1141/C1141M-15 Standard Specification for Admixtures for Shotcrete*. https://doi.org/10.1520/C1141_C1141M-15
- ASTM International. (2012). *ASTM C1550-12 Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)*. <https://doi.org/10.1520/C1550-12>
- ASTM International. (2012). *ASTM C1609/C1609M-12 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*. https://doi.org/10.1520/C1609_C1609M-12
- Blom, C. B. M. (2002). “*Design philosophy of concrete linings in soft soil*”. Doctoral Thesis. Delft University of Technology, p. 6
- Burgers, R., Walraven, J., Plizzari, G., Tiberti, G. (2007). “*Structural Behaviour of SFRC tunnel segments during TBM operations*”. Proceedings of the World Tunnel Congress 2007 and 33rd

- ITA/AITES Annual General Assembly, London, England., pp. 1461-1467.
- Carmona, S., Aguado, A., Molins, C., Cabrera, M. (2009), *Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (ensayo Barcelona)*. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 24 N° 2, pp. 119-140. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732009000200001>
- Chen, W. F. (1970). "Double punch test for tensile strength of concrete". ACI Journal, Proceedings Vol. 67, pp. 993-995.
- De La Fuente, A., Blanco, A., Pujadas, P., Aguado, A. (2013). *Advances on the use of fibres in precast concrete segmental*. Engineering a Concrete Future: Technology, Modeling & Construction. International Federation for Structural Concrete, pp. 691-694.
- De La Fuente, A., Pujadas, P., Blanco, A., Aguado, A. (2012). *Experiences in Barcelona with the use of fibres in segmental linings*. Tunneling and Underground Space Technology. Volumen 27, pp. 60-71. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.07.001>
- De Waal, R. G., (2000). "Steel fibre reinforced tunnel segments for the application in shield driven tunnel linings", Doctoral Thesis, Delft University of Technology.
- Gettu, R., Barragan, B., Garcia, T., Ramos, G., Fernandez, C., Oliver, R. (2004). *Steel fiber reinforced concrete for the Barcelona metro line 9 tunnel lining*, in: Di Prisco, M., Felicetti, R., Plizzari, G.A. (Eds.), 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes RILEM PRO 039, Bagneux, pp. 141-156.
- Gopalaratnam V., Gettu R. (1995). *On the Characterization of Flexural Toughness in Fiber Reinforced Concrete*. International Journal Cement and Concrete Composites. Vol. 17, pp 239-254. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)99506-O](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)99506-O)
- Kasper, T., Edvardsen, C., Wittneben, G., Neumann, D. (2008). *Lining design for the district heating tunnel in Copenhagen with fibre reinforced concrete segments*. Tunnelling and Underground Space Technology. Volumen 23, pp 574-587. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.11.001>
- Kooiman, A. G. (2000). "Modelling steel fibre reinforced concrete for structural design", Doctoral Thesis, Delft University of Technology.
- Norma Mexicana (2017). *NMX-C-414-ONNCCE-2017, Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos – Especificaciones y Métodos de Ensayo*. México.
- Norma Mexicana (2018). *NMX-C-111-ONNCCE-2018, Industria de la Construcción – Agregados para concreto Hidráulico – Especificaciones y Métodos de Ensayo*. México.
- Norma Mexicana (2017). *NMX-C-538-ONNCCE-2017, Industria de la Construcción – Concreto Reforzado con Macrofibras – Determinación de la Resistencia al Agrietamiento, Tenacidad y Resistencia Residual a Tensión – Método de Ensayo*. México.
- Norma Mexicana (2017). *NMX-C-539-ONNCCE-2017, Industria de la Construcción – Concreto Reforzado con Macrofibras – Determinación de la Tenacidad a la Flexión Utilizando el Panel Circular con carga central – Método de Ensayo*. México.
- Zollo, R. F. (1997). *Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development*. Cement and Concrete Composites. Volumen 19, pp. 107-122. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00046-7)