

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

C. Aire^{1*}, L. Aguilar¹

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

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

Recepção: 18/06/2020 | Aceitação: 31/10/2020 | Publicação: 01/01/2020

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.

Citar como: Aire, C., Aguilar, L. (2021), "*Ensaio de controle de concreto projetado com fibra no túnel da linha 12 do metrô 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.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o primeiro autor contribuiu com a campanha experimental (50%), a análise dos resultados e a redação do artigo, o segundo autor com a campanha experimental (50%) e revisão do artigo.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 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.

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

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.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos para o uso exclusivo do título da revista No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Hoje, o uso de fibras no concreto se tornou uma tendência frequente na construção civil. Em nosso país, inicialmente substituíram as telas eletro-soldadas em concreto fundido, pisos industriais e elementos pré-fabricados. A nível internacional, as aplicações desta tecnologia são variadas, entre elas, pavimentos, pisos industriais, apoios de encostas, elementos arquitetônicos e construção de túneis (Gettu et.al., 2004; Kasper et.al., 2008; De la Fonte et.al., 2012). Atualmente, as fibras de aço também são utilizadas na construção de segmentos para revestimento de túneis (Blom, 2002), (Burgers et.al., 2007), (De la Fuente et.al., 2013). No México, as primeiras aplicações foram em pisos industriais, porém, seu uso tem aumentado recentemente, principalmente em obras subterrâneas, tanto em obras civis como em mineração.

Uma das principais propriedades beneficiadas pelo reforço de fibras no concreto é a capacidade de absorção de energia após a fissuração, ou seja, por mais que o elemento fissure, ele pode continuar resistindo à carga e deformar-se sem colapsar, permitindo redistribuição das tensões (De Waal, 2000), melhorando o comportamento antes da fratura, impacto e fadiga (Gopalaratnam e Gettu, 1995). A eficiência das fibras incorporadas na mistura de concreto depende (1) das propriedades da fibra: resistência, rigidez e aderência, (2) da distribuição da fibra: fração relativa, conteúdo e orientação (Zollo, 1997).

Para medir a absorção de energia, foram desenvolvidos diferentes métodos de ensaio padronizados que permitem avaliar o desempenho do concreto reforçado com fibras, para sua aplicação é importante levar em consideração: 1) A complexidade do ensaio; 2) A complexidade da preparação da amostra; 3) A complexidade da execução; 4) A reprodutibilidade do ensaio; 5) Custo e aplicabilidade na prática e aceitação do método de ensaio pelos pesquisadores. (Kooiman, 2000). Os métodos propostos para avaliar a absorção de energia de CRFs devem ser avaliados de acordo com as condições descritas acima para determinar sua aplicação prática como Protocolos de Controle em Obra para CRFs.

Levando em consideração os fundamentos anteriores e a vasta experiência do Instituto de Engenharia da UNAM em pesquisas sobre o CRF, este trabalho apresenta os resultados de um Programa Experimental de avaliação do desempenho do CPRF em um caso prático, a Extensão da Linha 12 do CDMX Metro. A absorção de energia (tenacidade) do concreto do revestimento primário do túnel L-12 e sua complexidade é avaliada para preparar os corpos de prova correspondentes aos ensaios de painel de seção quadrada EN 14488-5 (l 600 × l 600 × h 100 mm), ensaio de painel circular ASTM C1550 (φ 800 × e 75 mm) e ensaio Barcelona UNE 83515 (h 150 × φ 150 mm) proposto por Chen (1970). Optou-se por usar padrões internacionais porque, durante essa campanha experimental, o México não tinha padrões que permitissem avaliar esse tipo de ensaio.

2. TRABALHO DE EXTENSÃO DA LINHA 12 DO METRO CDMX

2.1 Generalidades

O Ministério de Obras e Serviços da Direção Geral de Construção de Obras de Transporte (DGOT) está construindo a extensão da linha 12 do metrô da Cidade do México. É um projeto de infraestrutura que consiste em um túnel de 4,6 quilômetros de extensão no qual estarão localizadas três estações de metrô que conectarão as estações Mixcoac e Observatório, ligando as áreas Leste e Oeste da Cidade do México. Com esta expansão da linha 12 do metrô da Cidade do México, espera-se que o tempo de viagem entre as estações Mixcoac para o Observatório seja reduzido em até 60 por cento.

O projeto executivo, que atualmente está em sua primeira fase, consiste na construção de 13 acessos com profundidades entre 15 e 46,5 m. Os acessos servem para comunicar o túnel com o exterior e ao mesmo tempo introduzir o maquinário, equipamento, pessoal do local e materiais necessários para a construção. O perfil estratigráfico do solo ao longo da linha do projeto é predominantemente de argila arenosa de consistência dura, entretanto, em algumas seções do túnel são encontrados solos moles com pouca estabilidade. Não há presença de nível freático. No caso de solos instáveis, resolve-se com elementos de suporte, como esquadrias metálicas com separação de 0,50 m a 1,00 m entre si, dependendo do tipo de solo mole. Em outros casos, quando ocorre sobre-escavação, resolve-se com produtos de injeção, como caldas de cimento e concreto fluido, cuja escolha é feita de acordo com a magnitude da sobre-escavação.

Para a construção do túnel com 4,6 km de extensão e diâmetro médio de 11 m, utiliza-se o método convencional de escavação mecânica por meio de máquinas de escavação. Os escavadores de parede escavam por meio de uma cabeça rotativa, dotada de dentes cortantes que são montados em um braço mecânico que permite a escavação. O avanço médio da escavação é de 1,5 m, fazendo uma média de dois a três avanços por dia. Após a escavação da seção intermediária superior, é colocado o revestimento primário para dar estabilidade ao solo, que consiste na aplicação de concreto projetado reforçado com fibras de aço (CPRF). A espessura do revestimento primário é de 20 cm, que é colocado em duas camadas de aproximadamente 10 cm cada. Uma geomembrana de PVC é colocada entre a camada de revestimento primária e secundária para evitar possível infiltração de água no revestimento final. O revestimento secundário é de concreto abobadado de 40 cm de espessura. Nesta segunda camada de revestimento, é utilizado o concreto projetado sem fibras; o reforço é com barras de aço.

2.2 Ensaios de controle

A propriedade mais representativa do CPRF é a absorção de energia. Após as fissuras do concreto, as fibras começam a trabalhar durante o processo de fissuração, redistribuindo e controlando a propagação das fissuras à medida que o sistema de revestimento CPRF sofre deformação. A capacidade de carga do CPRF determina o desempenho do sistema de revestimento.

A absorção de energia de CPRF é determinada por meio de ensaios de flexão. Existem dois procedimentos no uso tradicional: a) o ensaio de painel, seção circular ou seção quadrada, e b) o ensaio de viga. Para sua determinação, novos métodos de ensaio padronizados foram desenvolvidos, os quais são utilizados internacionalmente. O ensaio de viga é usado principalmente em aplicações de pavimentação.

O desempenho pós-elástico de painéis circulares / quadrados submetidos a uma carga pontual no centro é representado pela energia absorvida até uma deflexão central especificada. Os métodos de ensaio de resistência à flexão típicos incluem ASTM C1550, para painéis circulares, e EN 14488-5, para painéis quadrados. A determinação da capacidade de absorção de energia é o fator mais importante na avaliação do desempenho do CPRF, que é calculado para uma deflexão especificada, 25 mm em painel quadrado e 40 mm em painel circular.

Outros métodos de avaliação da resistência à flexão são os ensaios de viga. Para isso, são necessários painéis CPRF que são cortados em vigas e ensaiados de acordo com as normas ASTM C1609 e UNE EN-14651, para determinar a tenacidade à flexão.

Um desenvolvimento recente é o Double-Punching Test (DPT), proposto por Chen (1970) padronizado pela UNE 83515, conhecido como ensaio de Barcelona. Este ensaio determina a tenacidade do cilindro que é calculada para uma abertura de fissura circunferencial especificada de 6 mm. Carmona et.al., (2009), considera que este ensaio se caracteriza pela sua baixa complexidade no preparo dos corpos de prova, proporciona um controle sistemático adequado da CRF no local e apresenta uma grande superfície de fratura específica ao longo de sua altura.

Para avaliar o desempenho dos concretos do revestimento primário do túnel L-12, o II-UNAM

realizou ensaios de controle, para os quais foram confeccionados diversos tipos de amostras CPRF obtidas no túnel, e realizada campanha experimental de acompanhamento em todas as operações de lançamento do concreto, com ênfase na amostragem e ensaio de amostras.

A Figura 1 mostra um procedimento típico para colocar o revestimento de aço primário no CPRF no túnel L-12. Quando o caminhão de concreto chega à obra, é obtida uma amostra de concreto sem fibra, a temperatura e o abatimento são medidos para sua rejeição ou aceitação. Em caso de aceitação, a quantidade de fibra de projeto é imediatamente incorporada, permitindo que seja integrada e misturada pelo tempo estabelecido. Terminado o tempo de mistura, o concreto é fornecido ao túnel por meio de uma tubulação, que é recebida por um caminhão betoneira que transporta o concreto do porto até a frente de obra, incorporando-o ao equipamento de vazamento. Os materiais utilizados na fabricação do concreto foram: cimento CPC 40RS (NMX-C-414-ONNCCE), agregados de pedra: areia de andesita, cascalho calcário com tamanho máximo de 10 mm (NMX-C-111-ONNCCE), aditivo de linha tipo B e F (ASTM C 494), aditivo acelerador TamShot 70 AF (ASTM C 1141) e fibra de aço longa de 35 mm, relação de esbeltez (l / Ø) 65, resistência à tração de 1.345 (N/m²), na dosagem de 30 kg/m³ de concreto. Uma relação água / cimento 0,50. A resistência à compressão de projeto especificada em 28 dias é $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$.



Figura 1. Procedimento para aplicar o revestimento primário do túnel L-12

3. ENSAIO DE PAINÉL QUADRADO – EN 14488-5

Os ensaios de absorção de energia em um painel com seção quadrada de $1600 \times 1600 \text{ mm}$ de seção e 100 mm de espessura foram realizados de acordo com a norma EN 14488-5. O ensaio consiste em ensaiar painéis quadrados, os quais são submetidos a uma carga central que é aplicada através de uma placa quadrada de $100 \times 100 \text{ mm}$ e 20 mm de espessura. A partir do ensaio, obtém-se o comportamento carga-deformação e a partir dessa curva é calculada a capacidade de absorção de energia na faixa pós-fissuração até uma deformação especificado de 25 mm , calculado como a área sob a curva.

Para realizar o ensaio de painel quadrado, está disponível um sistema de controle de malha fechada que permite o controle por deformação e um quadro de reação que é integrado a um atuador e sistema de célula de carga. O atuador tem capacidade de 500 kN , sendo utilizado um transdutor de deformação tipo LVDT para a instrumentação dos painéis. A velocidade de aplicação do deformação do pistão do atuador foi de 1 mm / min . A faixa de medição do LVDT usado é de 100 mm .

Na figura 2 é mostrada a configuração do ensaio de painel quadrado, conforme EN 14488-5. A face do painel que está nivelada corresponde à face superior da amostra no ensaio (EN 14488-5).

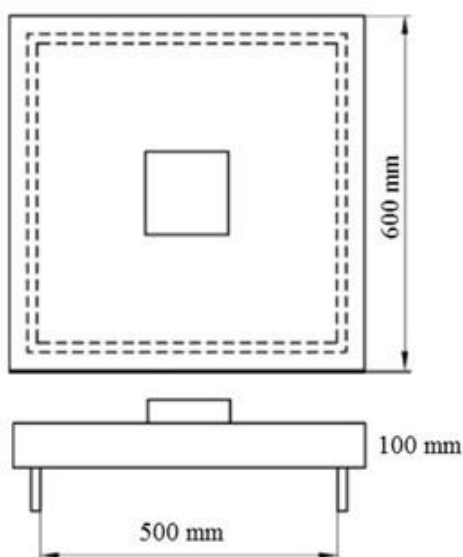


Figura 2. Esquema de configuração do ensaio de painel, segundo a EN 14488-5

Os painéis utilizados para este ensaio correspondem aos corpos de prova PCO-1, PCO-2 e PCO-3, os quais foram obtidos a partir da mesma mistura (lote) de concreto fornecido em campo para o revestimento primário do túnel. Sua ruptura típica se comporta formando duas fissuras principais que atravessam toda a seção do painel, e outras fissuras secundárias, conforme mostrado na figura 3. A ruptura foi gradativa, devido à presença das fibras na matriz do concreto.

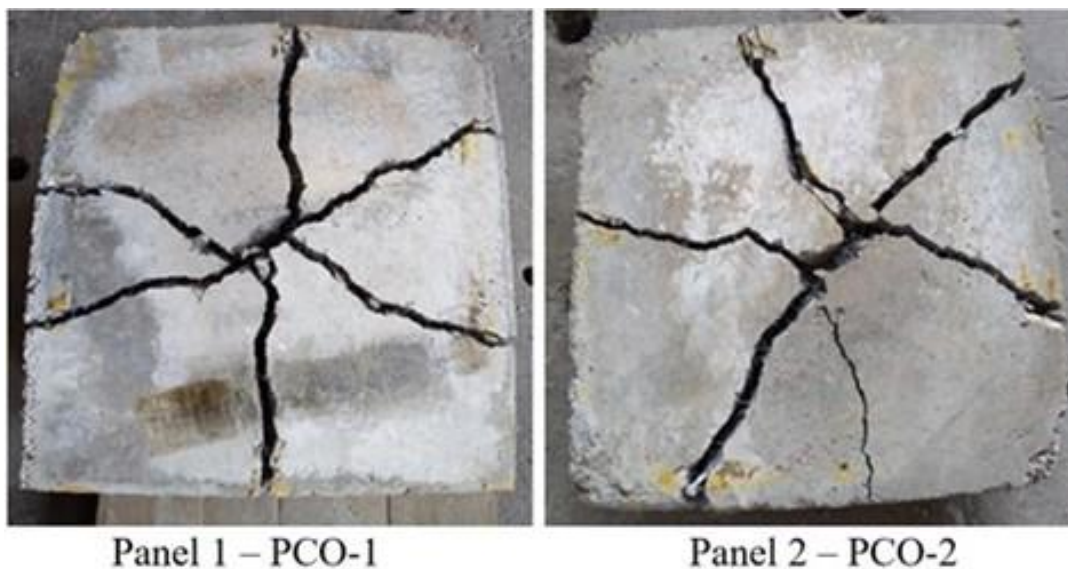


Figura 3. Modo de falha típico dos painéis quadrados ensaiados

A Figura 4 mostra as curvas carga-deformação dos painéis ensaiados. As curvas apresentam comportamento semelhante, independente do painel ensaiado. As curvas apresentam duas seções, uma seção inicial ascendente e uma pós-fissura descendente. Na primeira seção, a carga sobe gradualmente com pequenos incrementos de deformação e ocorrem vários picos. Nesse trecho inicial da curva, a contribuição da fibra não é total, até que ocorra a fissura a partir da qual a fibra atua junto com o concreto. Nesta fase, foram observadas várias quedas de carga, principalmente devido à fissuração do concreto. Porém, há uma recuperação em todos os casos até atingir um valor de carga máxima, a partir do qual ocorre uma diminuição gradativa no pós-fissuração. O ensaio

termina atingindo uma deformação mínima de 25 mm. A Figura 4 mostra que o comportamento pós-fissuração é muito semelhante para ambos os painéis, além disso, os valores de carga máxima são bastante semelhantes; portanto, estima-se que a absorção de energia apresenta valores semelhantes.

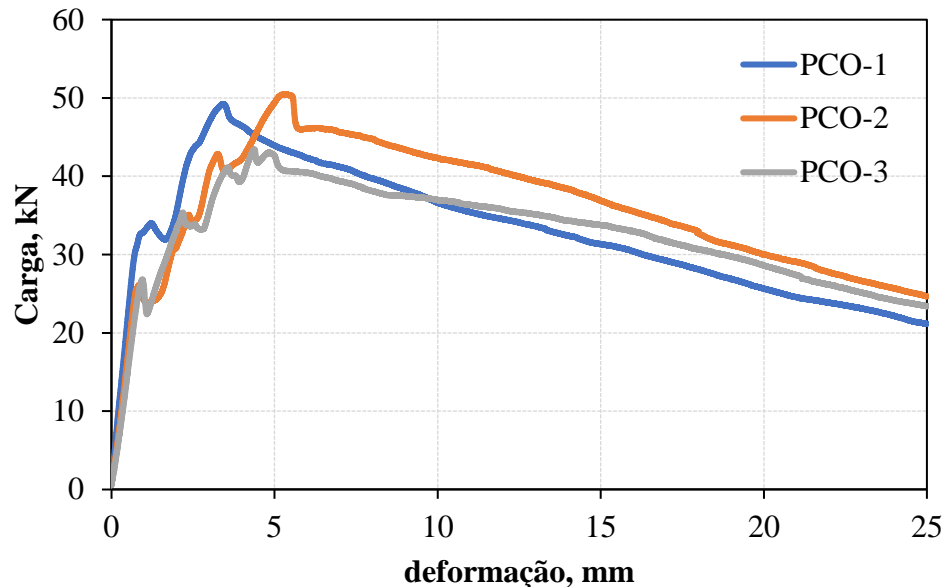


Figura 4. Curvas de carga-deformação dos painéis quadrados ensaiados

A tenacidade foi determinada como a área sob a curva carga-deformação entre a origem e o deformação central de 25 mm, conforme especificado na EN 14488-5. Os resultados são apresentados na tabela 1. Os resultados mostram que a tenacidade média (absorção de energia) dos painéis ensaiados é de 843,14, com um coeficiente de variação de 5,27%. A repetibilidade dos resultados é bastante aceitável.

Tabela 1. Resultados de tenacidade, $T_{\delta_{25\text{mm}}}$

ID	Painel	U	Tenacidade	média
$T_{\delta_{25\text{ mm}}}$	PCO-1	Joules	820.83	$T_{\text{prom}} = 843.14 \text{ J}$ C.V. = 5.27%
$T_{\delta_{25\text{ mm}}}$	PCO-2	Joules	894.29	
$T_{\delta_{25\text{ mm}}}$	PCO-3	Joules	814.31	

Esses painéis de ensaio apresentam alto grau de complexidade na etapa de amostragem, transporte e ensaio por se tratarem de corpos de prova com peso médio de 80 kg cada, além de necessitarem de pelo menos duas pessoas treinadas para o preparo e manuseio das amostras durante a amostragem e ensaio. O excedente de concreto para sua elaboração deve ser considerado, em torno de 0,1 m³ para os três corpos de prova, situação que representa um custo extraordinário no consumo de concreto, que será afetado pela periodicidade do ensaio, porém, sua aplicação será determinada se o projeto especifica seu uso no Protocolo de Controle como método de avaliação, ou caso não, utilize outro ensaio se sua correlação com ele for conhecida.

4. ENSAIO DE PAINEL CIRCULAR – ASTM C1550

Os ensaios de absorção de energia em um painel de seção circular de $75 \times 800 \phi$ mm foram realizados de acordo com a norma ASTM C1550. O ensaio permite caracterizar o comportamento à flexão do concreto exposto como absorção de energia na faixa pós-fissuração.

Para a realização dos ensaios, existe um dispositivo de montagem dos painéis que atende às especificações da norma. O dispositivo é constituído por uma placa circular sobre a qual são colocados três pontos de apoio diametralmente equidistantes. Esses três pontos de apoio são colocados simetricamente circunscritos em um círculo de 750 mm de diâmetro, e devem suportar a aplicação de uma carga vertical de 100 kN no centro do painel e ser suficientemente rígidos para que nenhuma deformação inaceitável ocorra durante o ensaio. Esses suportes são constituídos por bases de aço piramidais com dispositivos nos vértices que atuam como uma junta esférica e permitem a rotação livre da placa durante o ensaio.

O painel se apoia sobre os três pivôs dispostos simetricamente e uma carga pontual é aplicada no centro do painel, conforme mostrado na figura 5. A carga é aplicada na face nivelada, com a face moldada do painel apoiada nos três pivôs. Durante o ensaio, a carga e o deformação são registrados continuamente e a curva carga-deformação é obtida, a partir da qual pode ser obtida a absorção de energia.

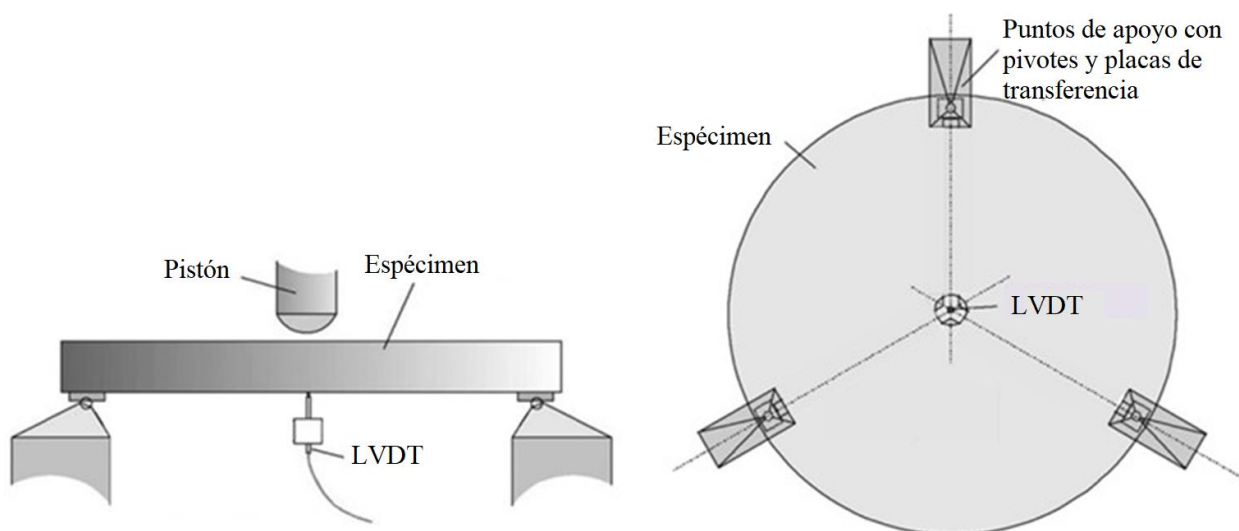


Figura 5. Esquema de configuração do ensaio de painel, segundo a ASTM C1550

A informação da resposta carga-deformação completa do ensaio do painel circular requer também um equipamento de ensaio bastante rígido e um sistema de controle que permita obter informações no pós-pico (pós-fissuração), para o qual, foi utilizado o mesmo kit de ensaio de painel quadrado. A velocidade de deformação aplicada foi de 4 mm/min, conforme estabelecido pela ASTM C1550. O ensaio termina quando uma deformação mínima de 40 mm é alcançada. A instrumentação foi realizada com transdutor de deformação tipo LVDT de faixa de 100 mm, que é posicionado no centro da parte inferior do painel. A absorção de energia, calculada como a área sob a curva carga-deformação, é determinada para 5, 10, 20 e 40 mm de deformação, conforme especificado pela norma.

Painéis ensaiados com carga de ponto central tipicamente falharam em formar três fissuras radiais começando no centro do painel e dividindo o corpo de prova em três seções, como mostrado na figura 6. O modo de falha foi gradual, devido à presença das fibras na matriz de concreto, ao contrário do ensaio de painéis sem fibra, onde a partir de experiências anteriores observou-se que

a falha é repentina (Aire e Rodríguez, 2011).

De acordo com ASTM C1550, um ensaio bem-sucedido envolve um modo de falha que inclui pelo menos três trincas radiais. Ocasionalmente, os corpos-de-prova apresentam um modo de falha envolvendo uma única fissura, que se caracteriza pela baixa absorção de energia. O resultado deste ensaio deve ser descartado e apenas o resultado de dois ensaios mostrando um modo de falha que inclui três trincas radiais deve ser considerado. Neste estudo os três painéis apresentaram três fissuras radiais.

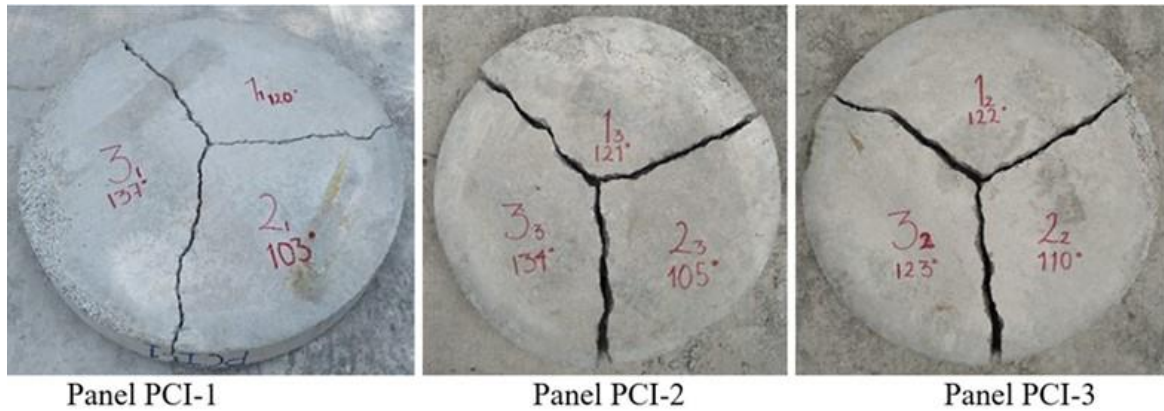


Figura 6. Modo de falha de painéis circulares

A Figura 7 mostra a configuração do ensaio de painel circular e a figura 8 mostra as curvas carga-deformação a partir dos resultados obtidos. No México, o método de ensaio equivalente de ASTM C 1550 é regulamentado em NMX C539 (NMX 539, 2017). As curvas carga-deformação apresentam uma seção ascendente inicial onde a carga sobe gradativamente com pequenos incrementos de deformação. Nesta seção linear inicial a carga é suportada pelo concreto e a contribuição da fibra é mínima ou nula. Nesta primeira fase, a curva atinge um pico máximo (carga máxima), e imediatamente se inicia o processo de fissuração do concreto e a carga é transmitida às fibras, até que finalmente elas absorvem toda a carga e as fibras trabalham em conjunto com o concreto. A fase pós-fissuração é caracterizada por uma diminuição gradual da carga e deformação. Os três painéis têm capacidades residuais semelhantes.



Figura 7. Ensaio de painel de seção circular, ASTM C1550

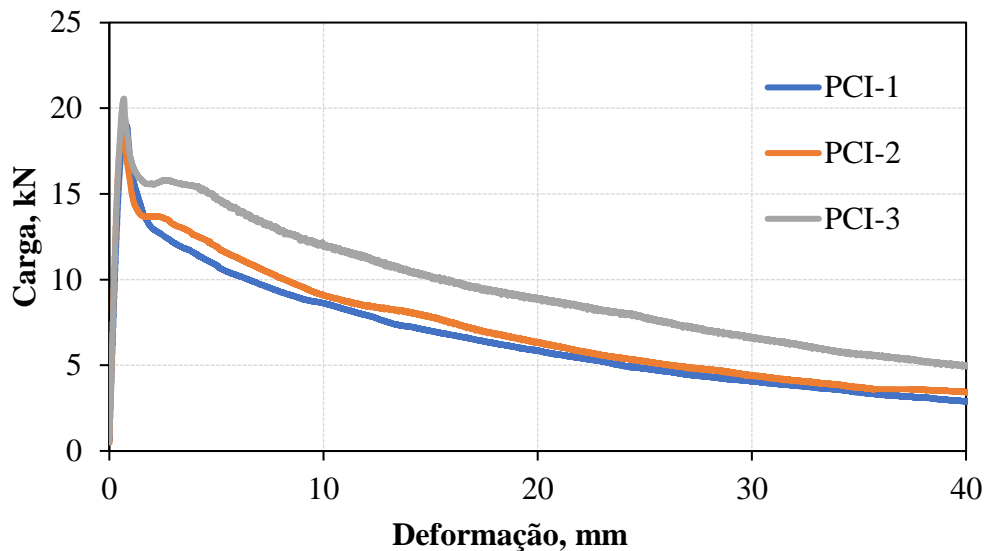


Figura 8. Curva carga vs deformação de painéis circulares

A tenacidade foi determinada como a área sob a curva carga-deformação entre a origem e o deformação central especificado na norma. Os resultados são mostrados na Tabela 2. A absorção de energia foi determinada como a área sob a curva carga-deformação entre a origem e o deformação central especificado em ASTM C1550. Os resultados são apresentados na tabela 2. A absorção média de energia para os painéis ensaiados é de 311 Joules para um deformação de 40 mm, com um coeficiente de variação de 19,7%.

Tabela 2. Resultados de tenacidade, $T_{\delta 5\text{mm}}$, $T_{\delta 10\text{mm}}$, $T_{\delta 20\text{mm}}$ 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

circulares, da mesma forma que os quadrados, também apresentam alto grau de complexidade na sua etapa de amostragem, transporte e ensaios por serem corpos de prova com peso médio de 100 kg cada, além de necessitarem de pelo menos duas pessoas treinadas para a preparação e manuseio de amostras durante a amostragem e ensaio. O processo de arrasamento é tedioso e dependendo das características da obra, a sua transferência para as salas de cura requer mais equipamentos, devendo também ter espaço suficiente para ser armazenada e curada. Deve-se considerar o excedente de concreto para sua elaboração, em torno de 0,15 m³ para os três corpos de prova, situação que representa um custo extraordinário no consumo de concreto, que será afetado pela periodicidade do ensaio, porém, sua aplicação será determinada se o projeto especifica seu uso para o Protocolo de Controle como método de avaliação, ou caso não, utilize outro ensaio caso seja conhecida sua correlação com este.

5. ENSAIO BARCELONA – UNE 83515

O ensaio de Barcelona é um método de ensaio para determinar a resistência à fissuração, tenacidade e resistência residual do concreto reforçado com fibras por meio de um ensaio de puncionamento duplo. É aplicável a corpos de prova cilíndricos de concreto, moldados ou extraídos de uma estrutura, com altura aproximadamente igual ao seu diâmetro. Os elementos essenciais para a aplicação deste método de ensaio são: a corrente circunferencial com extensômetro, discos de carga (punções) e discos de montagem. Os corpos de prova podem ser obtidos por moldagem direta de moldes cilíndricos de $h 150 \times \phi 150$ mm, de moldes cilíndricos de $h 150 \times \phi 300$ mm e posterior corte para obter $h / \phi = 1$, ou por extração de núcleo de $\phi 150$ mm de estruturas reais, o que é uma vantagem do método quando é necessário avaliar o desempenho do concreto colocado no local. O ensaio é realizado de acordo com a norma UNE 83515. A Figura 9 mostra um diagrama da configuração do ensaio Barcelona. A carga deve ser aplicada uniformemente com uma velocidade de descida do pistão da prensa de $0,5 \pm 0,05$ mm / min durante todo o ensaio. Isso é considerado concluído quando a deformação circunferencial total atinge pelo menos 6 mm.

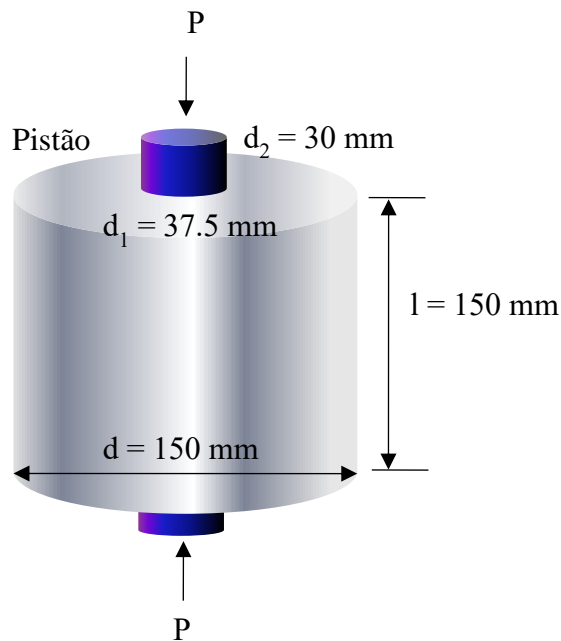


Figura 9 Configuração do ensaio Barcelona – UNE 83515

Para a realização deste ensaio, foi realizada uma amostragem numa calha de madeira $650 B \times 350 b \times 150 h$ mm, da qual foram extraídos 4 testemunhos. Para a extração dos testemunhos foi utilizada uma extratora, como a mostrada na Figura 10. A verticalidade do núcleo foi garantida por meio do nivelamento da superfície de apoio. A carga foi aplicada na face nivelada.

A Figura 11 mostra a configuração do ensaio. O método de ensaio equivalente de UNE 83515 no México é NMX C538 (NMX C538, 2017).



Figura 10. Extração de testemunhos para o ensaio de Barcelona.



Figura 11. Ensaio de dupla punção, configuração, UNE 83515

A falha do cilindro no ensaio de Barcelona apresenta 3 trincas que cruzam toda a altura do cilindro, conforme mostrado na figura 12.



Figura 12. Modo de falha típico de cilindros, Ensaio de Barcelona.

A Figura 13 mostra as curvas circunferenciais de deformação de carga dos cilindros ensaiados. As curvas apresentam uma deformação quase nula do início da carga até a carga máxima. Ao atingir a carga máxima, aparecem as primeiras fissuras e pós-fissuras. A carga diminui até uma certa abertura circunferencial e as fibras começam a funcionar. A carga é recuperada e o comportamento residual é apresentado.

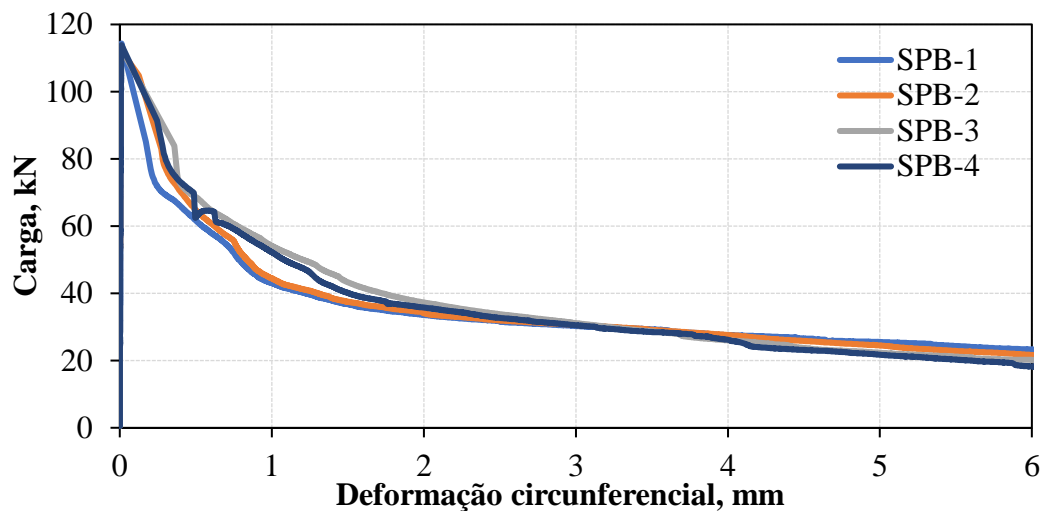


Figura 13. Curvas de carga-deformação circunferencial do ensaio de Barcelona

A Tabela 3 mostra os resultados de tenacidade dos cilindros ensaiados. O coeficiente de variação dos resultados varia entre 2,5% e 6,8%.

Tabela 3. Resultados de tenacidade, $T_{\delta 2mm}$, $T_{2.5mm}$, $T_{\delta 4mm}$ y $T_{\delta 6mm}$

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

Os cilindros utilizados para este ensaio têm a vantagem de serem obtidos de calhas no caso do concreto lançado, extraindo-os de um elemento fundido ou confeccionando os próprios cilindros com moldes específicos, portanto, a sua obtenção tem um baixo grau de complexidade na etapa de amostragem, transporte e ensaio, por se tratarem de corpos de prova com peso médio de 5 kg cada, além de exigirem uma pessoa treinada para o preparo e manuseio das amostras durante a amostragem e os ensaios. O excedente de concreto para sua preparação é mínimo e sua aplicação será determinada se o projeto especificar seu uso para o Protocolo de Controle como método de avaliação.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos para os três ensaios propostos em termos de absorção de energia, a análise estatística encontrou maior variabilidade nos resultados dos painéis circulares e menor variabilidade nos cilindros para o Ensaio de Barcelona. Essa situação pode ser atribuída ao motivo de maior espessura, maior concentração de fibras no núcleo de concreto.

As amostragens realizadas até o momento na obra de ampliação do L12 representam um projeto piloto para avaliação da aplicação dos métodos, os quais não são especificados para o projeto, portanto, não se pode afirmar que os valores obtidos estejam em conformidade com os parâmetros especificados em termos de absorção de energia para CPRFs de aço, no entanto, representam um divisor de águas para a implantação de um Protocolo de Controle que avalia o desempenho do CPRF e permite conhecer os diferentes cenários, facilidades, dificuldades e outros aspectos que se apresentam in loco durante o desenvolvimento das amostragens, resultados de ensaios e análises

de todos os componentes envolvidos.

Derivado da campanha experimental aplicada ao caso prático da Extensão da Linha 12 do Metrô da Cidade do México, identifica-se que os processos de amostragem, preparação de corpos de prova e ensaios para o Ensaio de Barcelona (UNE 83515) são mais práticos desde o início. do ponto de vista das condições da obra, pois são corpos de prova de menor peso e menores dimensões, se comparados aos painéis, portanto, são feitos em menos tempo e quando você tem bastante experiência, manuseio, preparação e ensaios, pode ser feito por uma só pessoa.

O aumento da utilização do CRF, a experiência adquirida nestes trabalhos de campo e pesquisas relacionadas, têm motivado o setor privado, empresas de construção e instituições acadêmicas como o Instituto de Engenharia da UNAM a levantar, propor e desenvolver métodos de ensaio avaliar o CRF com base em normas internacionais, com o uso de informações em aplicações locais. Que vai promover um novo sistema de controle de qualidade para concreto reforçado com fibra em obras subterrâneas no México.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Direção Geral de Construção de Obras de Transporte da Cidade do México as facilidades oferecidas durante os trabalhos de extração de amostras no túnel, que permitiram a realização deste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- 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*. Tunneling 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, Delf 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)