

# MÉTODOS DE PRUEBA PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS EN ESTADO PLÁSTICO Y ENDURECIDO

CARLOS AIRE

Durante los últimos años en la Industria de la Construcción se ha incrementado el uso del concreto reforzado con fibras (CRF) y el de concreto lanzado reforzado con fibras (CLRF) para aplicaciones de elementos y estructuras de concreto armado. Las propiedades del CRF son muy atractivas en pisos industriales y dovelas; y las del CLRF se usan para sostenimiento de túneles, minas, excavaciones y estabilidad de taludes.

En la actualidad el concreto lanzado es una técnica que constituye un gran avance dentro de los procedimientos constructivos ya que convierte la colocación y compactación del concreto en un único proceso. Además con el uso de fibras se requiere de menor espesor en aquellas zonas donde la malla no se ajuste al soporte lo que reduce la operación de colocación y el costo.

Se sabe que la incorporación de fibras beneficia al concreto en lo que se refiere al agrietamiento, tenacidad y resistencia al impacto; evitando que se presenten grandes deformaciones a las que puede estar sometido, por ejemplo en el sostenimiento de túneles y estabilización de taludes.

En lo que se refiere al control de calidad del concreto reforzado con fibras (CRF) existen diferentes métodos de prueba para evaluar el comportamiento a tenacidad; entre estos podemos distinguir dos grupos: los ensayos de viga (ASTM C1609), en los que una viga ( $b$  150 ×  $h$  150 ×  $l$  600 mm) se ensaya unidireccionalmente a flexión; y los ensayos de panel, para evaluar la capacidad de las fibras en las dos direcciones del plano. De los ensayos de panel destacan el ensayo de la norma europea EN14488: la placa de sección cuadrada ( $l$  600 ×  $a$  600 ×  $h$  100 mm); y el ensayo de la norma americana ASTM C1550: la placa de sección circular ( $\phi$  800 ×  $e$  75 mm). En la actualidad, una nueva alternativa para evaluar la tenacidad y resistencia residual del CRF y del CLRF es el

ensayo de la norma española UNE 83515: el ensayo de doble punzonamiento, conocido como Ensayo Barcelona: cilindro ( $h$  150 ×  $\phi$  150 mm).

En respuesta al incremento importante en el uso del concreto con fibras en el sector de la construcción, y dando continuidad a la línea de investigación sobre concreto reforzado con fibras, iniciada hace diez años en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, recientemente se impulsó la implementación de las nuevas técnicas y métodos de ensayo para evaluar y determinar las propiedades en estado plástico y de post-agrietamiento aplicables al CRF y CLRF. Estos estudios se han llevado a cabo en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del IIUNAM y han sido patrocinados por esta dependencia. En este documento se detallan aspectos generales de algunos de estos métodos para CRF y CLRF.

## Ensayo de vigas – ASTM C1609

Las pruebas de comportamiento a flexión en vigas se realizan de acuerdo con la norma ASTM C1609 y son para evaluar el comportamiento a flexión del concreto usando parámetros derivados de la curva carga-flecha obtenida para carga a los tercios usando un equipo servohidráulico de lazo cerrado. Mediante la prueba se determina la resistencia máxima calculada en el primer pico de la curva y las resistencias residuales en las flechas especificadas en la norma.

Las vigas se ensayan a flexión con un arreglo de carga a los tercios similar al especificado en la norma ASTM C78, pero incorporando un sistema de prueba servocontrolado y de lazo cerrado. Con los apoyos del dispositivo de carga se asegura que la fuerza aplicada a la viga sea perpendicular a la cara del espécimen sin excentricidad. La altura de la viga ( $d$ ) es  $1/3$  de la longitud de claro ( $L$ ). Las vigas son de 150 × 150 × 600 mm y  $L$  450 mm. La prueba consiste en centrar la viga sobre los apoyos, y sobre este conjunto se coloca el sistema de carga centrado con respecto a la carga por aplicar. Durante la prueba se registra de forma continua la carga y flecha, y posteriormente se obtiene la curva carga-flecha a partir de la cual se determina la resistencia residual para los niveles de flecha especificados en la norma ASTM C1609.

La prueba se realiza en un marco de carga muy rígido con actuador de 500 kN y un sistema de control con lazo cerrado. La velocidad de desplazamiento aplicada es de 0.09 mm/min, conforme lo establece la norma ASTM C1609. La prueba finaliza cuando se alcanza una flecha de  $L/150$  (3 mm).

Para la instrumentación se coloca dos transductores de desplazamiento tipo LVDT de 50 mm de rango, que se coloca

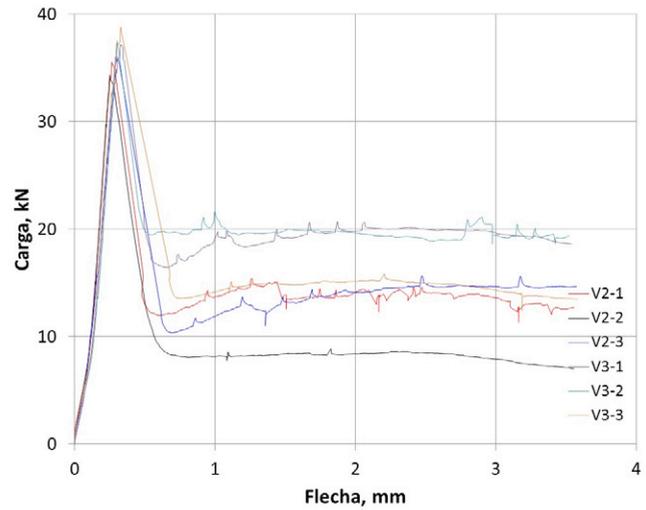
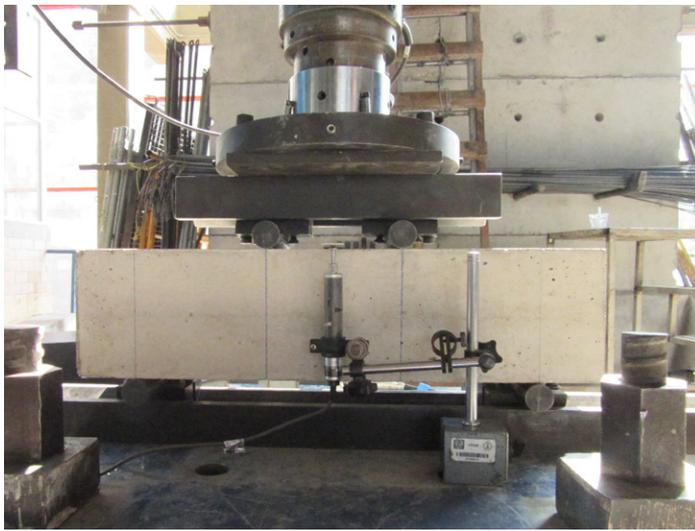


Figura 1. Ensayo a flexión en vigas – ASTM C1609.

al centro del claro de la viga, una en cada cara. La resistencia residual se calcula a las flechas de  $L/600$ ,  $L/300$  y  $L/150$ . La prueba también permite evaluar la tenacidad, en caso de que lo solicite la especificación, para lo cual se emplea el área bajo la curva carga-flecha hasta la flecha especificada ( $L/150$ ). La figura 1 muestra una vista del montaje e instrumentación de la prueba ASTM C1609, y curvas de carga vs flecha de un proyecto de investigación para evaluar el desempeño a tenacidad de concreto reforzado con macrofibras sintéticas solicitadas por una empresa local fabricante de fibras para concreto.

#### Ensayo de panel – ASTM C1550

Las pruebas de tenacidad a flexión en panel de sección circular de  $75 \times 800 \phi$  mm, se realizan de acuerdo con la norma ASTM C1550 y permiten caracterizar el comportamiento de flexión del concreto expresado como absorción de energía en el rango de post-agrietamiento.

El panel de ensayo se apoya en los tres pivotes dispuestos simétricamente sobre un anillo circular de acero y se aplica una carga puntual sobre el centro del panel. Durante la prueba se registra la carga y flecha de manera continua y se obtiene la curva carga-flecha a partir del cual se puede obtener la absorción de energía.

La información de la respuesta completa carga-flecha de la prueba de tenacidad en flexión, requiere de un equipo de

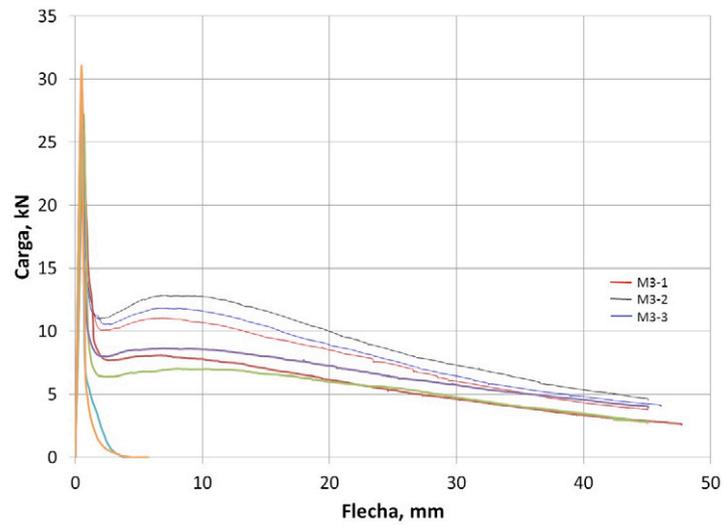
prueba muy rígido y un sistema de control que permita obtener información del post-pico (post-agrietamiento). Para esto se emplea un marco de carga con actuador de 500 kN de capacidad, controlado por un sistema analógico de lazo cerrado que permite controlar el ensayo por desplazamiento. La velocidad de desplazamiento que se aplica es de 4 mm/min, como lo establece la norma. La prueba finaliza cuando se alcanza, como mínimo, una flecha de 40 mm. Para registrar la flecha se coloca un transductor de desplazamiento tipo LVDT de 100 mm de rango, que se coloca al centro del panel. La tenacidad en esta prueba se define a las flechas de 5, 10, 20 ó 40 mm.

De acuerdo con la ASTM C1550, se debe fabricar un mínimo de tres paneles para cada edad de ensayo. Para considerar un ensayo exitoso, la ASTM requiere que el modo de falla del panel debe presentar tres grietas radiales y que al menos dos de los tres paneles deben presentar este modo de falla.

La fig 2 muestra una vista de la configuración de un ensayo típico de panel de acuerdo con el ASTM C1550, además curvas carga vs flecha de paneles sin fibra (M3-1) con dos diferentes dosis de fibra (M3-2 y M3-3), resultados de un estudio solicitado por una empresa fabricante de macrofibras sintéticas, interesadas en evaluar el desempeño post-agrietamiento de sus fibras en el concreto mediante la medición de la absorción de energía, que se calcula como el área bajo la curva carga vs flecha.



Figura 2. Ensayo a flexión en panel – ASTM C1550.



### Ensayo de doble punzonamiento – UNE 83515

El ensayo de doble punzonamiento (DPT), consiste en someter a compresión uniaxial un cilindro de concreto (150  $\phi \times 150$  H, mm) mediante dos discos cilíndricos de acero de 37.5 mm de diámetro y 30 mm de altura dispuestos concéntricamente por encima y por debajo del cilindro de ensayo. La prueba permite determinar la resistencia máxima, residual y absorción de energía del CRF.

El control del ensayo se realiza por posición, y se registra de forma continua la carga aplicada y la abertura circunferencial ( $\Delta\phi$ ) para lo cual se usa una cadena circunferencial con extensómetro. Durante el ensayo se registra de manera continua la carga y abertura circunferencial. La carga se aplica a una velocidad de 0.5 mm/min, lo que hace que sea un ensayo rápido. El ensayo termina cuando se alcanza una abertura mínima de 6 mm, como lo especifica la UNE 83515.

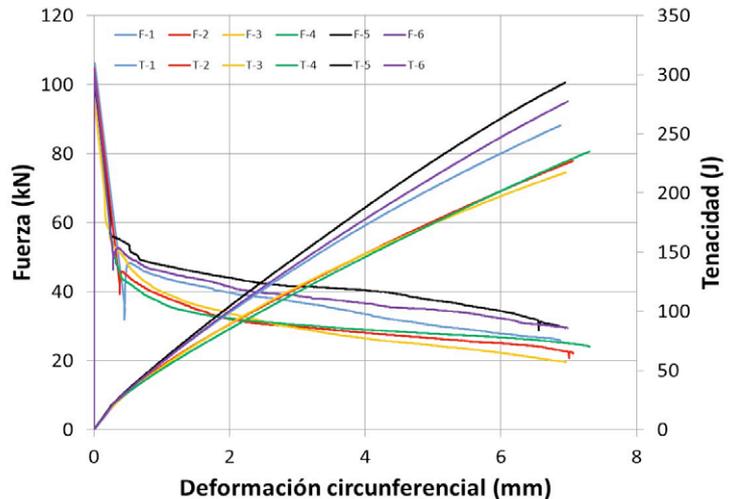


Figura 3. Ensayo de doble punzonamiento – UNE 83515.

Una ventaja de este método es que requiere probetas que se pueden fabricar individualmente (150  $\phi$   $\times$  150 H mm), obtener mediante corte de cilindros convencionales de 150  $\phi$   $\times$  300 H mm o de extracción de testigos de estructuras existentes. Son probetas de peso y volumen pequeño (7 kg, 3 lt), lo que representa una muestra de fácil manejo comparado con otros métodos que emplea vigas (a 150  $\times$  b 150  $\times$  h 600 mm, 32 kg) o paneles [sección circular ( $\phi$  80  $\times$  h 75 mm, 90 kg); o sección cuadrada (l 600  $\times$  a 600  $\times$  h 100 mm, 86 kg)], para caracterizar el CRF.

Los resultados de resistencia a tensión presentan coeficientes de variación (CV) bastante aceptables; del orden de 6 – 8 %. Esto confirma que la variabilidad de los resultados que se obtienen mediante el ensayo DPT es menor que aquellos obtenidos mediante otros métodos tradicionales como el ensayo a flexión de vigas. La repetitividad de los resultados permite consolidar al ensayo DPT como un método de control sistemático para evaluar el comportamiento de CRF. La fig 3 muestra la configuración típica del ensayo DPT y resultados de una amplia campaña experimental desarrollada para implementar el método DPT con el patrocinio del Instituto de Ingeniería.

### Ensayo de agrietamiento por contracción plástica - ACI544.2R

Es un método de prueba referenciado en el ACI544.2R y consiste en un dispositivo que tiene tres anillos circulares con diámetros de 280 y 580 mm interior y exterior respectivamente, 5 mm de espesor y 80 mm de altura, que se colocan sobre una superficie metálica no absorbente de 16 mm de espesor. Todo el conjunto se coloca dentro de una

cámara climática de condiciones constantes de temperatura, humedad y viento. El anillo exterior tiene soldadas sobre su perímetro 12 placas de acero de 30 mm de longitud, 5 mm de espesor y 80 mm de altura, que funcionan como restricciones que sirven para inducir el inicio del agrietamiento.

El espécimen de prueba es un anillo de concreto de 150 mm de ancho y 80 mm de espesor, que es vaciado en el molde en una sola capa y compactado con vibración externa.

La cámara de condiciones ambientales se debe mantener con temperatura de 20°C, humedad relativa de 40% y mantener un flujo de aire constante de 4 m/s sobre la superficie de concreto durante toda la prueba. La prueba dura 6 horas desde que los anillos se introducen en la cámara climática. Durante la prueba se monitorea que se mantenga las condiciones de ambiente en la cámara. Para controlar la temperatura, humedad y viento se usan aparatos comercialmente disponibles en el mercado.

Mediante este método se determina el índice de grieta, que es el valor promedio de los anchos de grieta acumulado de los anillos ensayados. El ancho de grieta acumulado para cada anillo es el promedio de la suma de los anchos de grieta medida a lo largo de dos secciones circulares concéntricas que se traza sobre la superficie superior de cada anillo. Otra variable que se determina es el área de grieta sobre la superficie de concreto. Para ello se divide la longitud de cada grieta en varios tramos y se mide su ancho. El producto del ancho por la longitud de cada tramo es el área agrietada para cada anillo de prueba. La fig 4 muestra un ensayo típico de agrietamiento por contracción plástica y los resultados de un estudio realizado para una empresa de fibras para concreto.

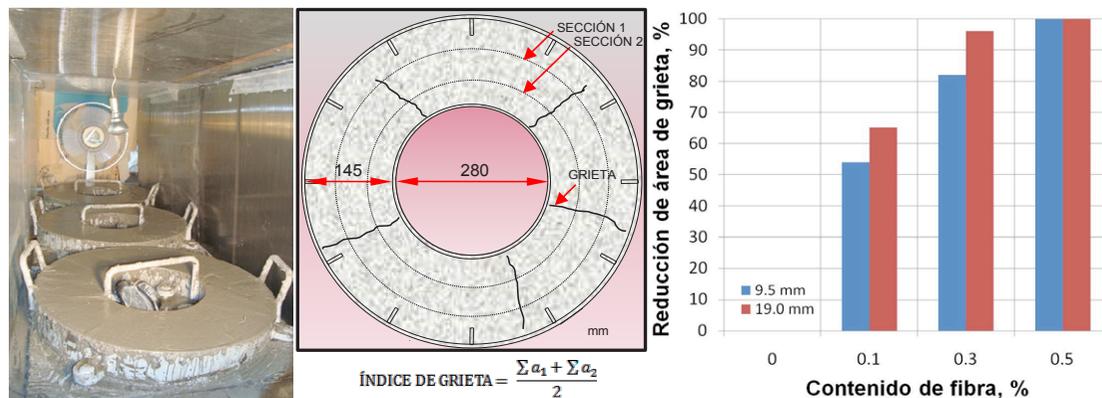


Figura 4. Ensayo de agrietamiento por contracción plástica - ACI544.2R.