

CRITERIOS Y ALTERNATIVAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA TENACIDAD EN HORMIGONES CON FIBRAS DE ACERO

CRITERIA AND ALTERNATIVES FOR EVALUATING THE TENACITY OF STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE

RAÚL L. ZERBINO. Dr. en Ingeniería

Profesor, Facultad de Ingeniería UNLP e Investigador CONICET, LEMIT-UNLP, LEMIT, 52 y 122, 1900 La Plata, Argentina

RAVINDRA GETTU. Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Director del Laboratorio de Tecnología de Estructuras.

LUIS AGULLÓ FITE. Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Catedrático de Universidad, Departamento de Ingeniería de la Construcción

ANTONIO AGUADO DE CEA. Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Catedrático de Universidad, Departamento de Ingeniería de la Construcción

Universitat Politècnica de Catalunya, Edificio C1, c/. Jordi Girona, 08034 Barcelona

RESUMEN: Los Hormigones Reforzados con Fibras (HRF) constituyen una de las innovaciones más relevantes en el campo de los hormigones especiales. La presencia del refuerzo provoca una sustancial modificación de la respuesta mecánica del material confiriéndole mayor capacidad de absorción de energía; de este modo resulta especialmente adecuada para sobrellevar acciones dinámicas o prevenir situaciones donde se requiere el control de los procesos de fisuración. Es evidente que en el momento de evaluar al HRF serán insuficientes criterios basados únicamente en la resistencia, sino que resultará indispensable ponderar el comportamiento postpico y las ganancias en tenacidad. En este artículo se presentan distintos procedimientos para la evaluación de la tenacidad de HRF considerando el contexto normativo nacional e internacional. Se incluye la vigente normativa UNE y otras alternativas contempladas en distintas recomendaciones fundamentadas en diferentes indicadores de la tenacidad, para finalmente contemplar la última recomendación de RILEM actualmente en discusión.

PALABRAS CLAVE: HORMIGÓN, FIBRAS, TENACIDAD, ENSAYOS

ABSTRACT: Fiber reinforced concretes (FRC) can be considered as an important innovation with regards to special concretes. The presence of the fiber leads to a substantial modification of the mechanical response of the material with higher energy absorption capacity, which is favorable when the material subjected to dynamic loading or when cracking has to be controlled. It is clear that the characterization of FRC cannot be based only on strength criteria but also on the post-peak behavior, which reflects the toughening produced by the fibers. In the present work, several procedures for the evaluation of the toughness of FRC, specified in national and international recommendations, are reviewed. The current Spanish UNE standards and other possible alternatives in terms of different toughness measures are discussed in detail. Finally, a recent RILEM recommendation is also summarized.

KEYWORDS: CONCRETE, FIBERS, TOUGHNESS, TESTS

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos críticos, y a la vez bien conocido, que incide sobre el comportamiento del hormigón endurecido es la aparición de fisuras, la cual puede obedecer a causas de distinto origen; asimismo, otro aspecto de importan-

cia es su relativa fragilidad durante la rotura. Las tendencias actuales para mejorar la respuesta frente a la fisuración y reducir la fragilidad, o lo que es lo mismo, dotarle de tenacidad, se encaminan hacia la incorporación de fibras al hormigón. De este modo se provoca una sustancial modificación de la respuesta del material en la situación posterior a

Se admiten comentarios a este artículo, que deberán ser remitidos a la Redacción de la ROP antes del 30 de octubre de 2003. Rectificado: julio/2000, Aprobado: julio/2000

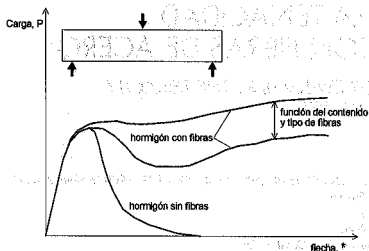


Figura 1.
Incidencia de las
fibras en el
comportamiento
a flexotracción
del hormigón.

la fisuración, presentando una mayor capacidad de carga y de absorción de energía. A modo de ejemplo, en la figura 1 se visualiza de forma cualitativa el efecto de la presencia de las fibras sobre la respuesta del hormigón en términos de las curvas carga-desplazamiento resultantes de un ensayo de flexotracción.

La resistencia de un hormigón con fibras no disminuye bruscamente a partir del inicio de la fisuración, conduciendo a una disipación progresiva de la energía durante el proceso de rotura. La tenacidad del material se puede definir como el parámetro que cuantifica esta capacidad de absorción de energía. Puede considerarse también como el inverso de la fragilidad teniendo en cuenta que un material frágil no posee capacidad de absorción de energía a partir de formación de la fisura y presenta una rotura brusca. Si bien la tenacidad como tal, no es usual que se utilice directamente como parámetro de cálculo, su caracterización es fundamental para representar el efecto de la incorporación de las fibras en el hormigón.

Para caracterizar la capacidad de absorción de energía de los hormigones con fibras se han desarrollado diversos métodos de ensayo empleando distintas configuraciones de carga como compresión, flexotracción y tracción uniaxial, de las cuales la más frecuentemente utilizada es el ensayo de flexotracción (Gopalaratnam y Gettu, 1995).

Considerando el contexto normativo nacional e internacional, existen distintos formas de evaluar la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras de acero, basadas principalmente en un ensayo de flexotracción con cargas a los tercios, que difieren fundamentalmente en los criterios de análisis y cálculo. Recientemente han aparecido recomendaciones que emplean otras configuraciones de carga.

En este artículo se realiza una revisión de las propuestas de ensayo a flexotracción contenidas en distintos códigos y recomendaciones para realizar la caracterización de la te-

nacidad de los hormigones reforzados con fibras, así como de los indicadores contemplados en cada una. Entre éstos se analizan la absorción absoluta de energía, los índices adimensionales relacionados con la capacidad de absorción de energía y la resistencia equivalente a flexotracción. En primer lugar se presenta el marco normativo de referencia en el ámbito español configurado por las normas UNE relativas a la evaluación mediante el ensayo de flexión con cargas a los tercios de la resistencia y la tenacidad hormigones con fibras de acero y/o polipropileno, indicando el objeto y las directrices generales de las mismas. A continuación se comentan otros criterios de análisis de distintas normativas basados en el mismo ensayo y se discuten sus ventajas y limitaciones. Finalmente, se presenta como alternativa el ensayo de flexión con carga en el centro de vigas entalladas y se comenta la última recomendación del comité RILEM TC 162-TDF actualmente en etapa de discusión.

2. CRITERIOS ESTABLECIDOS EN LAS NORMAS UNE

El marco normativo de referencia en el ámbito español está configurado por las normas UNE actualmente vigentes relativas a hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Se reseñan en este apartado las relativas a la rotura por flexotracción AENOR UNE 83-509-88 (1988) y a la determinación del índice de tenacidad y resistencia a primera fisura AENOR UNE 83-510-89 (1989).

La norma UNE 83-509 presenta el método de ensayo para determinar la tensión de rotura por flexotracción en hormigón con fibras (ver figura 2a). Utiliza probetas prismáticas con cargas a un tercio de la luz (también conocida como configuración de ensayo de flexión en cuatro puntos), con una longitud total mayor que el triple del canto de la probeta a ensayar. La relación entre el ancho y canto de la probeta no debe ser superior a 1,5. Se recomienda emplear las probetas de sección 100x100 mm o de 150x150 mm, siendo estas últimas obligatorias para el caso de pavimentos. La menor dimensión de la probeta nunca será inferior a tres veces el tamaño máximo del árido, ni a dos veces la dimensión máxima de la fibra. La norma indica el mecanismo y las velocidades para la aplicación de las cargas, calculando el módulo de rotura como la tensión máxima alcanzada por las fibras extremas.

La norma UNE 83-510 tiene por objeto especificar el método de ensayo para determinar la resistencia a primera fisura, tenacidad e índice de tenacidad mediante el análisis de la curva carga - flecha obtenida en un ensayo de flexión con cargas a los tercios. Las probetas empleadas deben ser las definidas en la norma UNE 83-509, con una longitud total mínima de tres veces el canto de la probeta a ensayar más 50 mm.

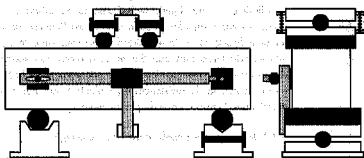
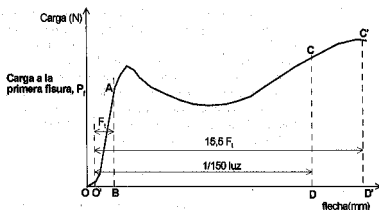


Figura 2a. Ensayo de flexotracción utilizando carga a los tercios.

La flecha se mide mediante dos transductores electrónicos o flexímetros mecánicos, colocados en el centro de la luz entre ejes de apoyos a ambos lados de la probeta. La carga se aplica de forma tal que se consiga una velocidad de aumento de la flecha comprendida entre 1/1000 y 1/3000 de la luz entre ejes por minuto. El ensayo se considera finalizado cuando la flecha supera en un 10% al valor mayor de los dos siguientes: a) 1/150 de la luz entre ejes de apoyos, ó b) 15,5 veces la flecha correspondiente a la primera fisura. La flecha se define como la media aritmética entre las dos lecturas tomadas en cada uno de los transductores electrónicos o flexímetros, para cada carga. Para la definición de la curva carga - flecha se determinan al menos cinco puntos desde el inicio del ensayo hasta que se produzca la primera fisura y veinticinco hasta que la flecha cumpla la condición relativa a la finalización del ensayo expuesta en el párrafo anterior.

En la figura 2b se muestra una curva tipo carga-flecha y las diferentes definiciones sobre la misma. Al comienzo del ensayo pueden producirse acoplamientos en la probeta, no eliminados por el equipo de medida del desplazamiento y que se detectan por la aparición de un tramo no lineal en la primera parte de la curva carga - flecha. Cuando esto sucede debe corregirse la posición del origen, para lo cual se

Figura 2b. Curva tipo carga-flecha en el ensayo de flexotracción (UNE 85-510).



prolonga la línea recta AT hasta su intersección con el eje de abscisas determinando el nuevo origen O'. A efectos de interpretación de resultados, la línea O'A sustituye a la OA y el origen de coordenadas pasa a ser el punto O'.

La primera fisura corresponde al punto en el cual la curva carga-flecha se aparta de la linealidad; aproximadamente en este punto el hormigón se fisura. Si es visible la primera fisura, debe indicarse en qué tercio de la luz entre ejes de apoyos se ha producido. La flecha de la primera fisura, designada por F_1 en la figura 2, viene indicada por el segmento O'B. La carga correspondiente a la primera fisura, P_1 , viene representada por el segmento BA en el diagrama carga-flecha.

La tenacidad se evalúa como la energía necesaria para que la probeta alcance una flecha igual a 1/150 de la distancia entre ejes de apoyos y viene representada por el área O'AC'D' de la figura 2b. Se calcula un índice de tenacidad, I_{30} , que resulta de dividir el área bajo la curva carga - flecha desde el origen hasta una flecha igual a 15,5 veces la flecha de primera fisura (O'ACD) por el área del triángulo O'AB.

3. EVALUACIÓN DE LA TENACIDAD EN FLEXOTRACCIÓN

Además de las normas UNE existen otros códigos internacionales que adoptan el ensayo de flexotracción con cargas a los tercios para caracterizar el comportamiento y tenacidad de los hormigones con fibras. Entre ellos se pueden citar los procedimientos de ensayo de Japón (JCI-SF4, 1984), Alemania (DBV, 1991, 1992a, 1992b), Bélgica (IBN, 1992), ASTM C 1018 (1992), entre otros. Las mayores diferencias entre ellos residen en su filosofía y el criterio o forma de cálculo utilizados para la valoración de la tenacidad. En este apartado se describen y analizan las normativas más importantes explicando los diversos indicadores adoptados por cada una de ellas. Finalmente se incluye un resumen de las más frecuentes observaciones sobre las dificultades o limitaciones encontradas en la aplicación de estos métodos.

3.1. Otras normativas que emplean flexotracción con carga en los tercios

Las distintas normas y recomendaciones utilizan probetas prismáticas cuyas dimensiones varían poco, y con frecuencia se indican secciones transversales iguales a 150 x 150 mm, una longitud mayor a 500 mm y una luz entre apoyos de 450 mm. Para hormigones con fibras cortas (longitud de fibra, $l_f < 30$ mm) se aceptan probetas con sección transversal igual a 100x100 mm. Para aplicaciones del hormigón proyectado con fibras se pueden utilizar probetas con secciones transversales de menor canto (EFNARC, 1993).

Esta disposición de ensayo se observa en la figura 2a. Para medir los desplazamientos se prefieren transductores

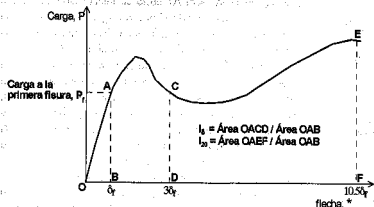


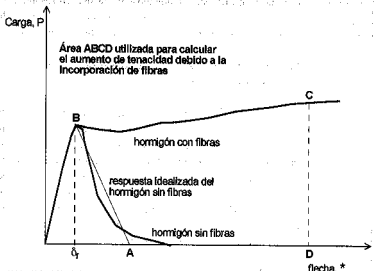
Figura 2c.
Índices de
tenacidad
según ASTM
C 1018.

electrónicos, pero algunas normas también permiten el uso de extensómetros mecánicos. La mayoría de las especificaciones indican la necesidad de utilizar algún marco o dispositivo que elimine la posibilidad de registrar deformaciones extrañas por deformación de los apoyos. La medida del desplazamiento neto (flecha) de la probeta en el centro de la luz se especifica en la mayoría de las normas y recomendaciones. Ello se debe a que es fácil de configurar y sólo se precisa un sensor colocado en el centro de una de las caras.

La carga se aplica a través de elementos interpuestos que permiten la libre rotación de la probeta. Los ensayos deben realizarse en una máquina de ensayos con suficiente rigidez con una velocidad de desplazamiento prescrita (normalmente se especifica el rango de velocidades de desplazamiento permitido). Usualmente la respuesta carga - desplazamiento se registra de forma continua, pero en el caso de usar extensómetros mecánicos se permiten los resultados punto a punto.

Aunque la geometría de las probetas y los procedimientos de ensayo son comparables en la mayoría de las normas, el

Figura 2d.
Medida de la
tenacidad
según las
recomendaciones
alemanas.



modo de emplear los resultados para evaluar la tenacidad puede diferir de forma significativa. Como se describirá a continuación estos resultados pueden tratarse en términos de diferentes indicadores de la tenacidad como son, entre otros, los índices adimensionales basados en la energía, la capacidad de absorción de energía, los índices adimensionales basados en la resistencia, la resistencia equivalente y los índices adimensionales basados en el desplazamiento.

3.1.1. Índices adimensionales basados en la energía

El índice de tenacidad contemplado en la recomendación ACI 544.2R [ACI, 1988], fundamentado en la propuesta de Henegar [1978], fue el primer índice adimensional basado en la energía utilizado para caracterizar el comportamiento de los hormigones reforzados con fibras de acero; ello constituyó el primer gran esfuerzo en reconocer que la absorción de energía podía ser un parámetro importante frente a la resistencia como propiedad más convencional usualmente asumida para caracterizar al hormigón. Dicho índice se define como el cociente entre el área bajo la curva carga - desplazamiento hasta una flecha de 1.9 mm y el área bajo la misma curva hasta la flecha de primera fisura, (δ_f). Uno de los inconvenientes de esta definición es precisamente la definición objetiva de la primera fisura, y otra que el límite de deformación establecido (1.9 mm) es totalmente arbitrario. En realidad los límites de flecha deberían basarse en requisitos de servicio o estados límites de servicio, y, por consiguiente ser específicos para cada aplicación.

La actual recomendación ASTM C 1018 [1992] utiliza esencialmente la misma idea básica, pero establece los límites de los desplazamientos como múltiplos del desplazamiento correspondiente a la primera fisura. Utiliza los índices de tenacidad I_2 , I_{10} e I_{30} que se calculan, respectivamente, considerando las áreas para los límites de desplazamiento correspondientes a $3\delta_f$, $5.5\delta_f$ y $10.5\delta_f$; para un material elasto-plástico ideal, los valores de estos índices serían, respectivamente, 5, 10 y 20 (ver figura 2.c).

La norma española UNE 83-510 requiere, tal como se ha expuesto, el cálculo de un índice adimensional que equivaldría a un I_{30} según ASTM C 1018 (determinado hasta un desplazamiento igual a $15.5\delta_f$) quizás asumiendo implícitamente que para límites menores de desplazamiento un índice como este no es una medida suficientemente sensible de la tenacidad. También, según la citada norma UNE, debe incluirse en el informe la resistencia a primera fisura y la tenacidad [capacidad de absorción de energía] al igual que en la norma japonesa [JCSF4, 1984].

3.1.2. Capacidad de absorción de energía

La definición de la tenacidad en términos de la capacidad de absorción de energía según el Instituto Japonés del

Hormigón (JCI-SF4, 1984), expresado por T_{JC1} , se calcula, para un tamaño estándar de probeta, como el área bajo la curva carga - desplazamiento hasta un límite de desplazamiento igual a $l/150$. En otras normas y procedimientos de ensayo de Bélgica (IBN, 1992), Alemania (DBV, 1991, 1992a, 1992b) y España (AENOR UNE 83-510) también se han propuesto índices similares. Gopalaratnam et al. (1989, 1991) han puesto de manifiesto que la capacidad de absorción de energía, definida como la energía absorbida por unidad de área transversal de la probeta, evaluada para cualquier límite de desplazamiento, tiene una alta sensibilidad para la caracterización de la tenacidad, así como la capacidad de poder correlacionarse con otros parámetros de fractura del material.

Una limitación de la medida de la tenacidad en términos de capacidad de absorción de energía es que ésta depende del tamaño de la probeta (Gopalaratnam et al., 1989, 1991; Troitier y Banthia, 1994). Sin embargo, para un tamaño determinado, este valor sirve de referencia, por ser más sensible al tipo y contenido de fibra que los índices dimensionales de la norma ASTM. La otra limitación de la definición de la tenacidad del JCI es que el desplazamiento límite es muy grande y no es representativo del desplazamiento en servicio correspondiente a la mayoría de las aplicaciones. Las recomendaciones belga, holandesa y alemana han superado, en parte, esta limitación al requerir el cálculo de la absorción de energía para desplazamientos más pequeños.

Es importante reseñar que las recomendaciones alemanas especifican la capacidad de absorción de energía de forma tal que se refleja explícitamente la influencia de la incorporación de fibras. La idea básica tiene algunas similitudes con el índice I_f del ACI 544.2R. En este sentido, se calcula la capacidad de absorción de energía de una probeta de hormigón con fibras hasta un límite especificado de desplazamiento y se resta la contribución idealizada de una probeta de hormigón sin fibras de igual tamaño, tal como se ilustra en la figura 2d. Así, se eliminan las limitaciones del índice I_f de ensayar las probetas hasta rotura.

3.1.3. Índices adimensionales basados en la resistencia

Mientras no se asuman de un modo generalizado los procedimientos o bases de cálculo basados en la energía puede resultar de interés implementar un cálculo basado en la resistencia post-fisuración. Existen diferentes normas y recomendaciones que contemplan índices adimensionales basados en la capacidad de carga en régimen de post-fisuración. La norma belga determina además de la tenacidad basada en la energía absoluta, cocientes adimensionales de carga para distintos desplazamientos; estos cocientes se definen, para cada desplazamiento en el post-pico, mediante la relación entre la carga correspondiente al

desplazamiento considerado y la carga de primera fisura. La norma francesa considera exclusivamente cocientes de carga a deformaciones prescritas para representar la tenacidad.

3.1.4. Resistencia residual

La norma ASTM C 1018 considera, además de índices dimensionales basados en la energía, el cálculo de índices de resistencia residual expresados por $R_{s,10}$ y $R_{10,20}$; éstos se evalúan, respectivamente, mediante las relaciones $20(l_{10} - l_s)$ y $10(l_{20} - l_{10})$ que representan los cocientes entre la resistencia media en el intervalo $3d_f$ y $5.5d_f$ y $5.5d_f$ y $10.5d_f$ (respectivamente), y la resistencia a primera fisura.

3.1.5. Resistencia equivalente

La norma JCI-SF4 (1984) contempla el empleo de la resistencia equivalente a flexotracción, expresada por la relación $T_{JC1} l/(d_{\text{limit}} bd^3)$, en donde T_{JC1} es el área bajo la curva carga-desplazamiento hasta el límite de desplazamiento $d_{\text{limit}} = l/150$, y l , b y d son la luz, espesor y canto de la viga, respectivamente. Las normas alemana y belga (DBV, 1991, 1992a, 1992b; IBN, 1992) también consideran resistencias equivalentes similares correspondientes a dos límites distintos de desplazamiento. La norma belga utiliza los límites de desplazamiento de $l/300$ y $l/150$ mientras que la norma alemana especifica límites de 1.5 y 3 mm.

3.2. Aspectos relevantes de la evaluación de la tenacidad

Después de presentar las distintas alternativas contempladas en los procedimientos que utilizan el ensayo de flexotracción con cargas a los tercios para evaluar la tenacidad de HRF, cabe puntualizar las principales observaciones o limitaciones de los mismos. Entre ellas se destacan: la precisión en la medida del desplazamiento, la inestabilidad después de la fisuración de la matriz y la identificación de la primera fisura. Estos hechos pueden ser origen de errores en la obtención y validación de los resultados o en la cuantificación de los diferentes indicadores.

3.2.1. Precisión en la medida del desplazamiento

La medición de la flecha y su influencia sobre la valoración de la tenacidad han sido analizados en varios estudios (Gopalaratnam et al., 1989, 1991; Troitier y Banthia, 1994; El-Shakra y Gopalaratnam, 1993). Los errores en la medición del desplazamiento correspondiente a la primera fisura (d_f) pueden traducirse en discrepancias importantes

de las medidas de tenacidad que se basan en el citado desplazamiento. Por ejemplo, la tenacidad a primera fisura, que es el denominador en el índice ASTM, se ve influenciada por imprecisiones en la medición de d_f . También, puesto que los límites de desplazamiento usados para el cálculo de los índices de tenacidad ASTM están definidos como múltiplos de d_f , el numerador en estos índices se ve también afectado de forma significativa.

3.2.2. Inestabilidad después de la fisuración de la matriz

En hormigones con bajos contenidos de fibras es frecuente que la fisuración de la matriz provoque una pérdida de carga que conduce a la pérdida temporal de estabilidad en el ensayo. En consecuencia, la respuesta carga - desplazamiento registrada en este régimen no puede ser considerada como la respuesta válida. En este sentido, debe tenerse en cuenta que valores de tenacidad calculados a niveles bajos de deformación (<1 mm) como los de $3d_f$ y $5.5d_f$ regularmente entran en este régimen de inestabilidad. Sin embargo, la capacidad de absorción de energía evaluada para límites de desplazamiento mayores (fuera del régimen de inestabilidad) se ve poco influenciada por este fenómeno. La realización de ensayos sobre probetas con entalla usando el control por apertura de fisura constituye una alternativa para garantizar la estabilidad en todo momento durante el ensayo [Batson y Elissa, 1992; Bryars et al., 1994a, 1994b; Khajuria et al., 1994] lo cual induce una mayor fiabilidad en los resultados obtenidos, obviando la problemática relativa a la inestabilidad temporal en la zona inmediatamente posterior al pico de carga.

3.2.3. Identificación de la primera fisura

Tal como se ha puesto de manifiesto anteriormente la identificación de la primera fisura puede no resultar objetiva. El punto de primera fisura se define generalmente como el punto de la curva carga - desplazamiento en el cual la forma de la curva se aparta de la linealidad. La determinación de este punto en la práctica es ambigua y depende, entre otros factores, de la resolución del equipo registrador y el juicio del operador [Trotter y Banthia, 1994]. Ello es particularmente cierto para probetas que muestran un aumento de la resistencia post-fisuración. Para dichas respuestas algunas recomendaciones (AFNOR P 18-409, 1993; DBV, 1991, 1992a, 1992b; IBN, 1992) adoptan una definición más objetiva de la primera fisura análoga a la especificación del límite de fluencia del acero donde el procedimiento se basa en el trazado de una línea paralela a la pendiente inicial de la curva que intercepte al eje horizontal a una distancia igual a 0.1 mm. Se asume como carga de primera fisura a la máxima carga observada antes de la intersección de la curva con esta paralela.

4. EL ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN CON CARGA CENTRAL SOBRE VIGAS ENTALLADAS

4.1. Antecedentes

El ensayo de vigas en tres puntos (carga al centro) constituye otra alternativa para caracterizar la tenacidad de los hormigones con fibras. Gopalratnam et al. [1989, 1991] han propuesto la utilización de este ensayo sobre probetas con una entalla en centro de la luz. El ensayo requiere de un sistema servohidráulico con capacidad de establecer un control por lazo cerrado, adoptando como variable de control la apertura de la fisura [CMOD por "crack mouth opening displacement"]. Un lazo cerrado significa que las acciones sobre la probeta dependen de la respuesta (deformación) del material ensayado. El sistema está alimentado y regulado por las señales de deformación de los extensómetros. En este caso la aplicación de la carga o los desplazamientos del cabezal de la máquina se realizan de una forma tal que provocan una velocidad prefijada de apertura de la entalla.

El uso de esta configuración [ver figura 3] tiene numerosas ventajas, pero una de las más importantes es garantizar la estabilidad de la respuesta a lo largo del ensayo incluso para hormigones sin fibras o para hormigones de alta resistencia con bajo contenido de fibras [Bryars et al., 1994a, 1994b; Khajuria et al., 1994]. A diferencia de las probetas sin entalla, la deformación se localiza siempre en el plano de la entalla y el resto de la probeta no experimenta deformaciones no lineales significativas; esto minimiza la energía disipada en todo el volumen de la probeta y, por tanto, toda la energía disipada puede atribuirse directamente a la propagación de la fisura. En consecuencia, la energía disipada puede correlacionarse directamente con la respuesta del material. Otra de las ventajas de la utilización de probetas con entalla radica en la posibilidad de caracterizar la tenacidad en términos de la CMOD en vez del desplazamiento de la probeta [Bryars et al., 1994a, 1994b; Gopalratnam y Gettu, 1995]. En principio, las medidas de tenacidad basadas en la respuesta carga-desplazamiento, pueden ser adaptadas a la respuesta carga-CMOD. Varios autores [Gopalratnam et al., 1989, 1991] han puesto de manifiesto que los índices de tenacidad así obtenidos son tan sensibles al efecto derivado de la incorporación de las fibras como los índices obtenidos en ensayos de flexión con cargas a los tercios, pero presentan una menor dispersión. Por otra parte, esta configuración supone, además de la pequeña complejidad operativa asociada a la materialización de la entalla, el empleo de un instrumental de mucho mayor costo.

4.2. La propuesta del comité RILEM TC 162-TDF

Recientemente el comité RILEM TC 162-TDF "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete" ha ele-

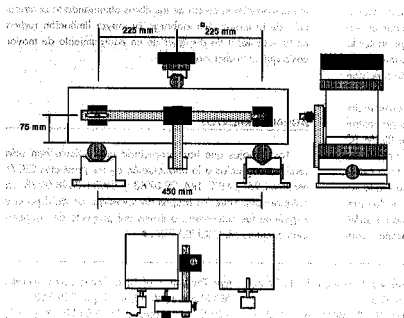


Figura 3. Ensayo de flexotracción utilizando carga centrada sobre probetas entalladas.

vado una nueva propuesta (RILEM, 2000) para el ensayo de flexión de HRF. Esta se basa en el uso del tipo de la viga tradicional con una sección de 150x150 mm pero ensayada con una luz algo mayor, igual a 500 mm. Sobre la zona traccionada se realiza mediante aserrado una entalla de 25 mm de profundidad.

El ensayo se realiza con carga central sobre la probeta girada 90° con respecto a la cara de moldeo. Debe utilizarse una velocidad constante de desplazamiento y se indica como opcional la medida del CMOD sobre la entalla.

Se obtiene la curva carga-desplazamiento y a partir de ella se calculan como resultados distintos valores de resistencia a flexotracción equivalente. Para ello se determina una "tensión en el límite de proporcionalidad" que representa de alguna manera la posible contribución del hormigón sin fibras, utilizando un concepto similar al empleado por la norma belga para HRF (Se traza una línea paralela a la pendiente inicial de la curva a una flecha igual a 0.05 mm y se adopta la máxima carga observada anterior a la intersección de la curva con esta línea como la carga en el límite de proporcionalidad).

Una vez obtenida la flecha en el límite de proporcionalidad se calculan las áreas para flechas proporcionales mayores ubicadas en el postpico. A partir de las mismas se pueden establecer las "cargas medias" que es capaz de soportar la probeta durante tales deformaciones para finalmente calcular los valores de resistencia a flexotracción equivalente que representan entonces la capacidad resistente del hormigón con fibras durante el régimen postpico. Es interesante notar que a los citados áreas se les resta la hipotética

contribución del hormigón sin fibras siguiendo un criterio similar al de la norma alemana.

Las resistencias a flexión equivalentes han sido concebidas con el propósito de aplicarlas directamente en el cálculo y en forma paralela el comité RILEM TC 162-TDF ha elevado una propuesta de diseño en estado último que utiliza estos conceptos.

Entre las ventajas que han motivado esta propuesta se puedan mencionar:

- el análisis en términos de tensión resulta más cómodo a los efectos del diseño y utilización de métodos de cálculo.
- el empleo de una entalla permite utilizar un control mediante lazo cerrado utilizando la apertura de fisura (CMOD) como parámetro de control, lo que reduce en la mayor estabilidad del ensayo.
- la propuesta utiliza un modo totalmente objetivo para la definición de la primera fisura evitando las apreciaciones del operador.
- el restar la posible contribución del hormigón sin fibras resulta de algún modo conservador. Sólo se evalúa el efecto de las fibras, lo que permite distinguir mejor entre fibras de diferente calidad.
- finalmente existiría en un futuro la alternativa de basar los cálculos y utilizar solamente la medida de CMOD sin necesidad de medir flechas, lo que evitaría la necesidad de disponer del marco de carga para la fijación de los transductores.

Como contrapartida debe indicarse que la mayor limitación para la propuesta radica en la necesidad de disponer de un sistema servohidráulico con lazo cerrado que resulta más costoso que el equipamiento tradicional.

5. CONSIDERACIONES FINALES

En este artículo se ha desarrollado una revisión de las diferentes alternativas empleadas para la valoración de la tenacidad en hormigones reforzados con fibras. La mayor parte de las recomendaciones, incluyendo la actual norma española, se basan en el ensayo de vigas con cargas a los tercios. Aunque no existen mayores diferencias en lo que respecta a la obtención de la curva carga-deformación, si las hay en lo referente a los criterios de valoración de la tenacidad.

Entre las normativas que utilizan cargas a los tercios parecen más objetivas aquellas que utilizan medidas absolutas de la tenacidad como las recomendaciones NBN, DBV o la JCI. La mayor ventaja de las normas que emplean índices adimensionales residiría en la posibilidad de comparar dife-

rentes geometrías pero esto no siempre se verifica. Como contrapartida se ha comentado algunas limitaciones en varias de las normativas actuales siendo las más importantes la falta de objetividad en la determinación de la primera fisura, la aparición de inestabilidad postfisuración y la precisión en la medida del desplazamiento.

Como solución alternativa a varias de estas observaciones aparece el ensayo de vigas entalladas con carga central y, en esa línea, la reciente propuesta del comité RILEM TC 162-TDF. Desde el punto de vista del ensayo, el empleo de una entalla permite utilizar un control mediante lazo cerrado, garantizando la estabilidad. En lo que se refiere a la valoración de la tenacidad, la propuesta utiliza un modo objetivo para la definición de la primera fisura, realiza un análisis en términos de tensión más cómodo para el diseño y evalúa únicamente el efecto de las fibras eliminando la contribución de la matriz. Sin embargo su mayor limitación radica en la necesidad de disponer de un equipamiento de mayor costo que el tradicional.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos que han propiciado este artículo han sido realizados gracias a la financiación de los proyectos CICYT MAT96-0967, MEC TRA 99-0788 y CICYT PB98-0928. La colaboración entre los grupos de investigación de España y Argentina fue solventada a través del proyecto de cooperación conjunta MEC-ICI IBA-706. ■

REFERENCIAS

- ACI 544 (1988) "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete", ACI Report 544.2R, ACI Mater. J., V. 85, n.º 6, pp. 583-593.
- AENOR UNE 83-509 (1988) "Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Rotura por flexotracción", Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid.
- AENOR UNE 83-510 (1989) "Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Determinación del índice de tenacidad de resistencia a primera fisura", Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid.
- AFNOR P 18-409 (1993) "Béton avec fibres métalliques - Essai de Flexion", Association Française de Normalisation, Paris, France.
- ASTM C 1018 (1992) "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete [Using Beam With Third-Point Loading]", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, EE.UU.
- BATSON, G.B. y EISSA, A.-B.H. (1992) "Fracture Toughness Measurements of High Strength Steel Fiber Concrete", High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, eds. H.W.Reinhardt and A.E.Naaman, E&FN Spon, Londres, pp. 325-336.
- BRYARS, L., GETTU, R., BARR, B. y ARIÑO, A. (1994a) "Size Effect in the Fracture of Fiber-Reinforced High-Strength Concrete", Fracture and Damage in Quasibrittle Structures (European Workshop, Praga), Eds Z.P. Bazant, Z. Bittnar, M. Jirásek y J. Mazars, E & FN Spon, Londres, pp. 319-326.
- BRYARS, L., GETTU, R., BARR, B. y AGUADO, A. (1994b) "Influence of a Low Volume Fraction of Steel Fibers on the Fracture of Silica Fume Concrete", Anales de Mecánica de la Fractura, V. 11, CEIT, San Sebastián, pp. 318-325.
- DBV (1991) "Grundlagen zur Bemessung von Industriefußböden aus Stahlfaserbeton", Deutschen Beton - Vereins, pp. 258-272.
- DBV (1992a) "Technologie des Stahlfaserbetons und Stahlfaserspritzbetons", Deutschen Beton-Vereins, pp. 3-18.
- DBV (1992b) "Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau", Deutschen Beton-Vereins, pp. 19-43.
- EFNARC (1993) "Specification for Sprayed Concrete", European Federation of National Associations of Specialist Contractors and Material Suppliers to the Construction Industry (EFNARC), Hampshire, Reino Unido, 35 pp.
- EL-SHAKRA, Z.M. y GOPALARATNAM, V.S. (1993) "Deflection Measurements and Toughness Evaluations for FRC", Cement and Concrete Research, V. 26, n.º 6, pp. 1455-1466.
- GOPALARATNAM, V.S., SHAH, S.P., BATSON, G.B., CRISWELL, M.E., RAMAKRISHNAN, V. y WECHARATANA, M. (1989) "Fracture Toughness of Fiber Reinforced Concrete", Report of the Task Group on CMRC/NSF Research, University of Missouri-Columbia, 70 pp.
- GOPALARATNAM, V.S., SHAH, S.P., BATSON, G.B., CRISWELL, M.E., RAMAKRISHNAN, V. y WECHARATANA, M. (1991) Fracture Toughness of Fiber Reinforced Concrete, ACI Mater. J., V. 88, n.º 4, pp. 339-353.
- GOPALARATNAM, V.S. y GETTU, R. (1995) "On the Characterization of Flexural Toughness in Fiber Reinforced Concretes", Cem. Concr. Composites, V. 17, pp. 239-254.
- HENEGAR, C. H. (1978) "Toughness Index of Fibre Concrete", Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites (RILEM Symposium), Construction Press Ltd., Lancaster, Reino Unido, pp. 79-86.
- IBN (1992) "Essais des bétons renforcés de fibres - Essai de flexion sur éprouvettes prismatiques", Norme Belge NBN B 15-238, Institute Belge de Normalisation (IBN), 1040 Bruselas, 9 pp.
- JCSF4 (1984) Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete, JCI Standards for Test Methods of Fiber Reinforced Concrete, Japan Concrete Institute.
- KHAJURIA, A., EL-SHAKRA, Z.M., GOPALARATNAM, V.S. y BALAGURU, P. (1994) "Influence of Test Control on the Load-Deflection Behavior of FRC", Fiber Reinforced Concrete - Developments and Innovations, eds. S.P. Shah y J.I. Daniel, ACI Special Publication SP-142, Detroit, EE.UU., pp. 167-179.
- RILEM TC 162-TDF (2000) "Test and Design Methods for Steel Fiber Reinforced Concrete", Materials and Structures, V. 33, pp. 3-5.
- TROTTIER, J.-F. y BANTHIA, N. (1994), "Toughness Characterization of Steel-Fiber Reinforced Concrete", Journal of Civil Engineering Materials, ASCE, V. 6, n.º 2, pp. 264-289.