

## INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES EXPERIMENTALES EN LA MEDIDA DE LA ENERGIA DE FRACTURA CON VIGAS ENTALLADAS

G.V. Guinea, J. Planas y M. Elices

Departamento de Ciencia de Materiales. E.T.S. Ingenieros de Caminos.  
Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria. 28040-Madrid.

**Resumen:** El presente artículo analiza el método de medida de la energía de fractura del hormigón mediante ensayos de flexión de vigas entalladas, y busca establecer la influencia que tienen las condiciones experimentales en el resultado final del valor de la energía de fractura. En particular se ha evaluado el efecto del peso propio de la probeta, del equipo experimental, del modo de obtención de la probeta y de los apoyos. Con el fin de calibrar estos efectos se han desarrollado nuevas técnicas experimentales que son descritas en el artículo, así como los resultados más importantes con ellas obtenidos. Como conclusión se demuestra que, de no tenerse en cuenta o evitar sus efectos, algunos de los fenómenos estudiados pueden originar un error significativo en el valor estimado de la energía de fractura del hormigón, que además dependerá del tamaño de la probeta ensayada.

**Abstract:** This paper analyses the three point bend test on notched beams as a method to measure the fracture energy of concrete, ascertaining the influence of experimental conditions on the experimental value of  $G_F$ . Specimen self weight, test equipment, specimen forming and bearings are analysed, and new experimental techniques have been developed to evaluate it. The main conclusion is that its advisory to take into account most of these phenomena in order to avoid a false estimation of fracture energy

### 1. INTRODUCCION

En los últimos diez años vienen siendo usados extensamente modelos de fisura cohesiva para describir la fractura del hormigón y de otros materiales similares. En estos modelos las propiedades básicas que gobiernan la propagación de fisuras en el hormigón son la resistencia a tracción y la energía de fractura, que es definida como la energía necesaria para fracturar totalmente una unidad de área (Planas y Elices, 1985).

Para su determinación se utilizan distintos tipos y sistemas de ensayo (véase Rokugo y otros, 1988) pero sin duda son los ensayos de flexión de vigas entalladas los más extendidos debido a su estabilidad y sencillez de ejecución. Prueba de ello es el hecho de que sean recomendados por la RILEM como método de determinación de la energía de fractura del hormigón (RILEM, 1985).

En este método se evalúa la energía de fractura hallando la relación entre el trabajo empleado en la fractura por flexión de una viga entallada y el área generada en el proceso. Para calcular correctamente esta relación se debe tener en cuenta sólo la energía disipada durante el proceso de fractura, y tiene que descontarse el trabajo disipado por otras causas, como por ejemplo las debidas al aplastamiento del hormigón bajo los apoyos, y añadirse el trabajo efectuado por el peso de la probeta.

El hecho de que en la inmensa mayoría de los ensayos realizados con este procedimiento los resultados obtenidos para  $G_F$  dependan del tamaño de la probeta (Hillerborg, 1985) parece indicar que no se calcula de forma adecuada el trabajo de fractura, o bien que  $G_F$  no es un parámetro del material, hipótesis, esta última, que cuesta aceptar si no se investiga en profundidad la otra alternativa.

Este artículo profundiza en las causas de error producidas por las condiciones experimentales, y es continuación de un artículo anterior en el que analizábamos como posible causa del efecto de tamaño de  $G_F$  la disipación plástica en el volumen de la probeta (Guinea y otros, 1990). A continuación se estudia el efecto del equipo experimental, de los apoyos y del método de conformado de la probeta de hormigón sobre los resultados de ensayos sobre series de probetas geométricamente homotéticas, y se presentan las conclusiones más importantes que hemos obtenido.

### 2. INFLUENCIA DEL EQUIPO EXPERIMENTAL DE MEDIDA

El equipo de ensayo juega un papel fundamental en la evaluación de la energía disipada en los ensayos de flexión en tres puntos al ser el medio de medida y control con el que realizamos los experimentos. Por ello deben estar aseguradas

ciertas características de comportamiento global del sistema como son la linealidad y la ausencia de histéresis, ambas imprescindibles si se desea tener un registro fidedigno del ensayo.

Estas propiedades pueden evaluarse mediante un ensayo específico de calibración sobre un material que garantice una respuesta lineal. El ensayo de calibración debe reproducir en lo posible el ensayo habitual, y, en particular, deben medirse de igual manera y en su totalidad las magnitudes experimentales que intervienen.

Hemos hecho en nuestro Departamento la calibración del sistema de ensayos de flexión mediante ciclos de carga-descarga sobre una probeta de aluminio solicitada en tres puntos. Las dimensiones de esta probeta responden a las de una de las probetas de hormigón utilizadas, lo que ha permitido utilizar la misma instrumentación que en los ensayos de flexión en tres puntos sobre hormigón.

El resultado directo de estos ensayos es la curva de calibración del sistema. Esta curva proporciona el trabajo disipado aparente  $W_{Dap}^D$  en un proceso cíclico de carga-descarga en función de la carga máxima alcanzada. Este trabajo no se disipa en la probeta y su origen se debe a la histéresis del equipo de ensayo.

La forma en que  $W_{Dap}^D$  modifica el valor de  $G_F$  medido en un ensayo de flexión depende del tamaño de probeta ya que  $G_F$  se obtiene como el trabajo total dividido por el área de ligamento, y durante el ensayo  $W_{Dap}^D$  se añade de forma indistinguible al verdadero trabajo de fractura. Esta influencia puede verse en la figura 1, en la que, para una serie de probetas geoméricamente homotéticas de 100 mm de espesor, se ha representado la variación de  $G_{Dap}$  con el tamaño, caracterizado por el canto de la viga. Para ello se ha calculado  $W_{Dap}^D$  para cada tamaño de probeta haciendo uso de la curva de calibración y del valor promedio de la fuerza máxima registrada en cada ensayo, y se ha dividido  $W_{Dap}^D$  por el área de ligamento a fin de calcular  $G_{Dap}$ . El valor de referencia que hemos tomado para la energía de fractura ha sido de 75 N/m, que corresponde al valor medio obtenido de los ensayos de las probetas de hormigón.

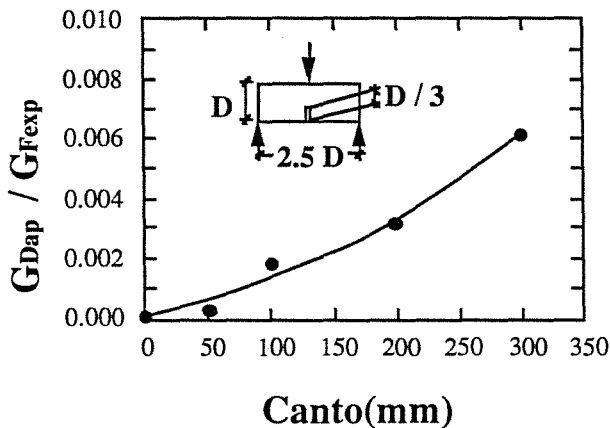


Figura 1. Variación de  $G_{Dap}$  relativa con el tamaño

Como se puede comprobar, el efecto de la histéresis experimental produce un ligero efecto de tamaño en valores absolutos, cuyo valor es a lo sumo del 0,6% del valor de referencia de la energía de fractura (75 N/m).

### 3. INFLUENCIA DEL MODO DE OBTENCION DE LA PROBETA

Existen dos métodos básicos de obtención de probetas de hormigón para cualquier tipo de ensayos de fractura. Uno es el moldeado directo de la probeta, que permite conseguir con facilidad las dimensiones y tolerancias geométricas deseadas,

aunque puede originar inhomogeneidades en el contorno de la probeta en contacto con el molde. El otro método consiste en conformar la probeta mediante corte por sierra a partir de una pieza de mayores dimensiones. Muchas veces se utiliza un procedimiento mixto en el que se moldea la probeta sin entalla y ésta se ejecuta por serrado. La principal desventaja del procedimiento de serrado es que el material en las inmediaciones del corte puede verse afectado por golpes y vibraciones que lo dañen. Además, y puesto que el corte suele hacerse por vía húmeda, se altera sustancialmente el contenido y distribución de humedad en el hormigón, y con ellos las propiedades físicas, por lo que sólo se suele usar este procedimiento en piezas cuya conservación y ensayo se hace en condiciones de saturación de humedad.

La aparición de zonas de segregación de áridos en el contorno de una probeta de hormigón moldeada puede dar lugar a que existan zonas de la probeta que desarrollen un valor de la energía de fractura netamente diferente al medio del material. Estas zonas de segregación tienen espesor sensiblemente constante e independiente del tamaño de la probeta siempre que su fraguado se haga en un molde en el que la dirección vertical coincida con la del espesor de la probeta, lo que es habitual en la inmensa mayoría de las situaciones. De este modo puede introducirse una inhomogeneidad en el material que afecta de manera distinta según el tamaño, y que, en consecuencia, puede originar un efecto de tamaño en la energía de fractura  $G_F$ . Esto se ha puesto claramente de manifiesto por los autores como posible justificación del modelo de ligamento perturbado, que hoy por hoy es el único que da cuenta perfectamente del efecto de tamaño en  $G_F$  (Planas y otros, 1988).

Para analizar cuantitativamente hasta qué punto la inhomogeneidad del material introducida por el moldeado puede originar el efecto de tamaño en  $G_F$  hemos procedido al ensayo de probetas obtenidas por moldeado y por serrado, en ambos casos en condiciones de saturación de humedad. En principio cabe pensar que en una probeta obtenida por serrado el valor de  $G_F$  será muy próximo al real del hormigón, mientras que en las probetas moldeadas el valor de  $G_F$  medido se verá reducido por la aparición de inhomogeneidades. En las probetas moldeadas de mayor tamaño será en donde el valor de  $G_F$  estará más próximo al verdadero ya que en estas probetas el tamaño relativo de la zona segregada es menor. Por el contrario la perturbación será máxima en las probetas más pequeñas.

Se han realizado ensayos de flexión en tres puntos, para determinar el efecto que juega la ejecución de la probeta y de la entalla sobre el trabajo de fractura. El material escogido ha sido una probeta de gran tamaño cuya confección fue hecha mediante moldeado. Con la intención de evitar en lo posible desviaciones en la composición del hormigón, obtuvimos probetas geoméricamente homotéticas de menor tamaño mediante corte por vía húmeda con sierra de diamante de los dos trozos resultantes de esta probeta. Las dimensiones de las vigas respetaron siempre las proporciones geométricas: entalla/canto = 1/3, canto/luz = 1/2,5, espesor = 100 mm. El esquema de corte se muestra en la figura 2 en la que se comprueba que fueron evitadas las zonas más solicitadas en el primer ensayo de flexión.

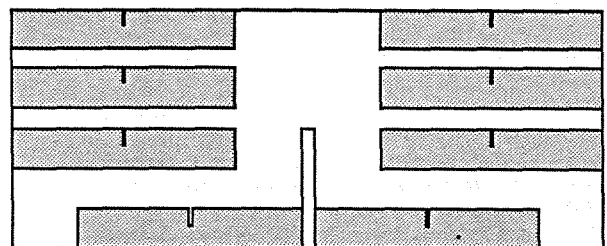


Figura 2. Esquema de corte



En la figura 3 se muestran las energías de fractura relativas que resultaron para la probeta moldeada (canto=300 mm) y para las probetas cortadas (canto=50 mm). También se ha representado el resultado de las energías de fractura relativas de ensayos de flexión de probetas moldeadas de hormigón de la misma serie ensayadas en nuestro Departamento.

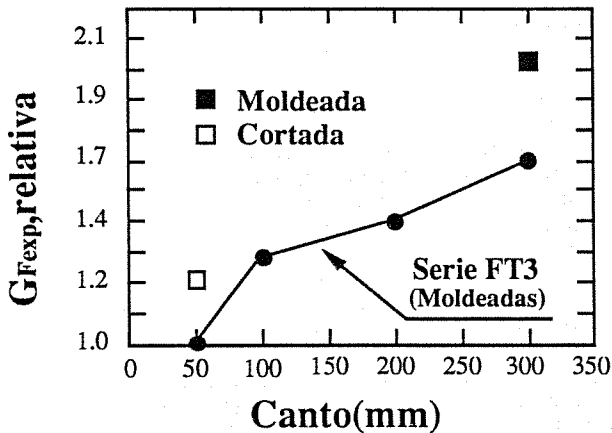


Figura 3. Resultados de los ensayos de flexión

Si se comparan los valores obtenidos, vemos que el efecto de tamaño en  $G_F$  no ha disminuido, y que el incremento entre tamaños extremos se sitúa en el entorno del 160%, similar al de los ensayos de la serie FT3 en los que todas las probetas fueron moldeadas. Estos resultados muestran que no ha habido acercamiento entre los valores de la energía de fractura obtenida para ambos tipos de probetas, moldeadas y cortadas, como sería lógico esperar si la perturbación se debiese al efecto de la segregación en el material.

#### 4. TRABAJO DISIPADO BAJO LOS APOYOS

El valor del trabajo disipado en los apoyos depende sustancialmente del tipo de apoyo. Con relación al ensayo que nos ocupa, hemos distinguido en nuestro estudio el apoyo central de los apoyos laterales, y dentro de estos últimos se han estudiado por separado los apoyos fijos de los móviles. En todos los casos se ha calculado el valor del trabajo disipado por fricción, penetración o rodadura, según el caso, y la influencia del mismo sobre el valor experimental de  $G_F$ , resultados que exponemos a continuación.

##### Trabajo disipado bajo el apoyo central

Durante la ejecución de un ensayo de flexión en tres puntos el apoyo central actúa sobre la probeta causando en menor o mayor medida el aplastamiento del hormigón de su entorno. El estudio teórico de este fenómeno es muy complejo y aún no ha sido satisfactoriamente resuelto, pues en él aparecen involucrados no sólo el comportamiento plástico del hormigón en compresión si no también el comportamiento en tracción y en fractura.

Por ello hemos diseñado una serie de ensayos de penetración que han tenido por objeto estimar de forma directa la energía que se disipa bajo el apoyo central de la probeta de flexión debido al aplastamiento del hormigón.

Hemos realizado los experimentos sobre trozos de material que fue ensayado previamente a flexión para evitar en lo posible dispersiones debidas al cambio de composición, condiciones de moldeado y factores afines. Esto ha sido posible gracias a que la zona afectada por los ensayos de penetración está muy localizada, y no ha sido necesario tomar otras precauciones salvo alejar los apoyos del ensayo de penetración de las zonas presumiblemente más dañadas por el ensayo de flexión previo.

En la figura 4 se representa de forma esquemática la disposición de los ensayos de penetración.

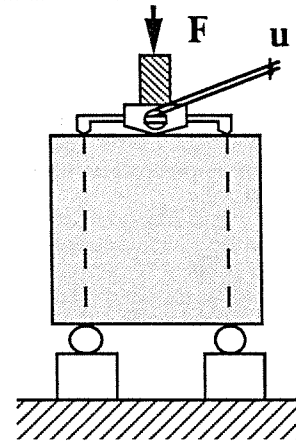


Figura 4. Ensayo de penetración

El actuador empleado fue el mismo que se utilizó como punto de carga en los ensayos de flexión de hormigón, y la separación entre los apoyos laterales estuvo limitada de forma que en la probeta de menor canto las tensiones de tracción máximas no sobrepasasen el valor de un tercio de la resistencia a tracción, evitando así la posibilidad de daño por tracción de la probeta y asegurando que no existirían deformaciones inelásticas por flexión.

La medida del desplazamiento del punto central se hizo con el dispositivo representado en la figura 4. El desplazamiento del punto de carga se refirió a la vertical de los soportes laterales, ya que de esta manera, al no existir otro acortamiento inelástico entre el punto de carga y los puntos de referencia que la propia penetración del actuador, el trabajo medido por el área bajo la curva fuerza-desplazamiento durante un ciclo de carga-descarga nos proporciona directamente la energía disipada por el aplastamiento del hormigón bajo el apoyo central.

Las probetas fueron sometidas a ciclos carga-descarga para distintos valores de la carga máxima, y durante los mismos se midieron la fuerza y la deformación inelástica bajo el apoyo central. Estas curvas fuerza-desplazamiento sirvieron para calcular el trabajo realizado, con lo que se obtuvo la curva de calibración del fenómeno, que relaciona carga máxima aplicada y trabajo disipado por penetración. La curva de calibración obtenida con estos ensayos se da en la figura 5.

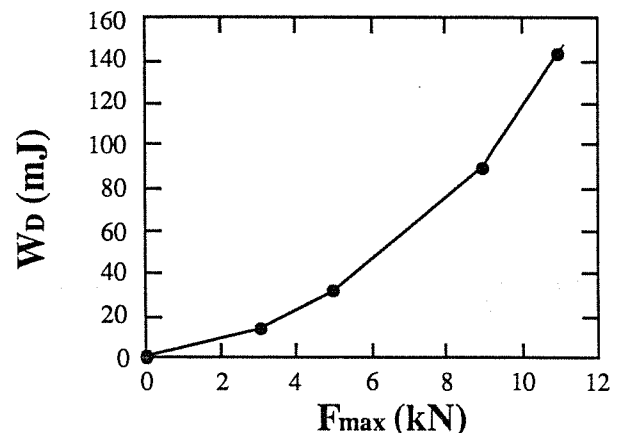


Figura 5. Curva de calibración

Con el fin de poner de manifiesto el efecto de la energía disipada por penetración bajo el apoyo central, se ha dibujado en la figura 6 el trabajo específico relativo disipado frente al tamaño de probeta. Para ello se ha procedido de igual manera que en el apartado 2, calculando  $W_D$  para cada tamaño de probeta de flexión mediante la carga máxima alcanzada en promedio con dicho tamaño durante los ensayos, y haciendo uso de la curva de calibración. El valor específico relativo del trabajo disipado se ha calculado dividiendo el trabajo disipado por el área de ligamento de la probeta de flexión, y por el valor promedio de la energía de fractura medida en los ensayos de flexión, que ha sido tomado como referencia (75 N/m).

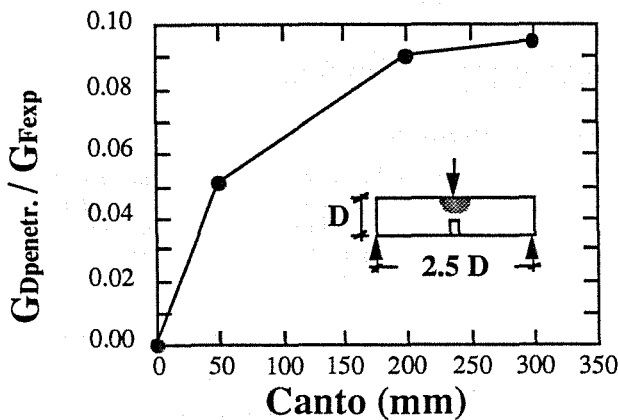


Figura 6. Variación del trabajo específico disipado por penetración con el tamaño

Observando la figura vemos que la penetración del apoyo central supone en promedio una oscilación del 10% en los valores  $G_F$ , con un efecto de tamaño global muy débil, pues aunque su variación intrínseca es del orden del 50%, su importancia se ve muy mermada por la pequeña contribución en valores absolutos a la energía aparente de fractura.

**Trabajo disipado en los apoyos laterales**

Los apoyos laterales son uno de los puntos más delicados en la ejecución de un ensayo de flexión para medir la energía de fractura. En ellos no sólo aparecen fenómenos de aplastamiento similares al del punto de carga central, sino que además al desplazarse lateralmente la probeta durante el ensayo se originan fuerzas horizontales de fricción, cuya importancia depende en gran medida de la materialización del apoyo y que sólo podemos presumir que serán pequeñas si se usan rodillos móviles. Aún en este caso, siempre aparecerá en los apoyos laterales un proceso disipativo de penetración en rodadura que puede afectar a un volumen mayor que la penetración simple bajo el apoyo central. Por ello es necesario calibrar éstos fenómenos de forma aparte de los ensayos de penetración, teniendo en cuenta la combinación de esfuerzos verticales y horizontales que se producen en el contacto.

Comenzaremos estudiando el caso de apoyos laterales fijos, en los será de esperar que se desarrollen con su valor máximo los esfuerzos de fricción. Aunque esta no es una situación deseable, aún en numerosos laboratorios se realizan experiencias con este tipo de sustentación.

Para estimar el valor del trabajo disipado por las fuerzas de fricción hemos hecho una simulación numérica mediante el programa ANSYS® de los ensayos de fractura para diversos tamaños de probeta y geometrías homotéticas. Se consideró un modelo de fricción tipo Coulomb, que permite el deslizamiento en los apoyos cuando se alcanza una fuerza tangente igual al producto del coeficiente de fricción ( $\mu$ ) por la fuerza normal. El valor adoptado para  $\mu$  fue de 0,3. La

modelización de la fractura se hizo a través del modelo de fisura cohesiva, con ablandamiento bilineal, tomando para el resto del material un comportamiento elástico-lineal (véase Guinea, 1990). Las dimensiones de las vigas respetaron siempre las proporciones geométricas: entalla/canto = 1/3, canto/luz = 1/2,5, espesor = 100 mm.

En todos los ensayos se calcularon las curvas fuerza de fricción-desplazamiento del punto de apoyo, con el fin de evaluar el trabajo disipado por rozamiento. El porcentaje que el trabajo de fricción representó frente al total realizado fue en todos los tamaños del 23%.

Se puede realizar un análisis muy simplificado del problema del rozamiento en un ensayo de flexión haciendo la hipótesis de movimiento de sólido rígido de ambos trozos de probeta. Este estudio muestra que la relación de la energía disipada por fricción frente a la energía total medida viene dada por  $2\mu D / s$ , siendo  $D$  el canto de la probeta y  $s$  su luz entre apoyos, y resulta independiente del tamaño. Con una relación canto/luz igual a 1/2.5 y un coeficiente de fricción de 0.3 el valor de la energía disipada por fricción se sitúa en el 24% del trabajo total realizado. Como observamos el método simplificado de cálculo constituye una excelente aproximación al problema ya que las diferencias con los resultados del análisis numérico son irrelevantes.

A la vista de estos datos podemos concluir que el rozamiento con los apoyos laterales puede variar notablemente el valor aparente de  $G_F$ , con errores relativos importantes, del orden del coeficiente de rozamiento. Sin embargo al ser este error uniforme para todos los tamaños de probeta no se produce efecto de tamaño alguno.

El análisis anterior muestra lo importante que será en los ensayos de medida de la energía de fractura reducir o anular la fricción en los apoyos laterales con rodillos que permitan el libre movimiento de la pieza. Como veíamos antes, aún así existirá un proceso disipativo que es necesario estudiar. De ello daremos cuenta seguidamente.

Para evaluar el fenómeno de la disipación por rodadura que tiene lugar en los apoyos laterales constituidos por rodillos móviles hemos diseñado y construido un dispositivo de ensayo en dos ejes con el que hemos determinado las fuerzas horizontal y vertical y sus desplazamientos conjugados que actúan en los apoyos laterales durante un ensayo de flexión. Con estos datos se ha podido calcular por separado el trabajo de ambas fuerzas.

Al igual que para los ensayos de penetración, hemos utilizado en los ensayos de rodadura trozos de probetas previamente ensayadas a flexión.

El sistema de ensayo se representa en la figura 7. Tiene como base una máquina servohidráulica INSTRON modelo 1275. Mediante un actuador vertical se ejerce en la probeta una fuerza en todo momento igual a la registrada por uno de los apoyos durante la ejecución de un ensayo de flexión. La fuerza se transmite a través de un sistema de rodamientos que garantiza su verticalidad, sin componente horizontal.

Gracias a un dispositivo de carga horizontal, se controla el desplazamiento lateral de la probeta de forma que corresponda al movimiento de dicho apoyo congruente con la fuerza vertical aplicada. Recordemos que en un ensayo de flexión en tres puntos, al cargar la probeta se producen desplazamientos de los apoyos laterales, que pueden estimarse gracias a la medida de la apertura de la boca de la entalla (CMOD). La fuerza horizontal se aplica en el plano de contacto rodillo-probeta, de forma que pueda equipararse a la ejercida por el rodillo sobre la probeta en el ensayo de flexión.

El equipo de apoyo ha estado formado por uno de los soportes laterales con los que se realizan los ensayos de flexión en tres puntos. La probeta apoyaba en el rodillo y estaba actuada en su plano de contacto. En la parte superior se colocó una placa de reparto para la carga vertical, sobre la que apoyamos una pista de rodadura y sobre ella un patín de rodillos que garantizaba la no existencia de fuerzas horizontales de fricción significativas inferiores al 0.3% de la carga vertical

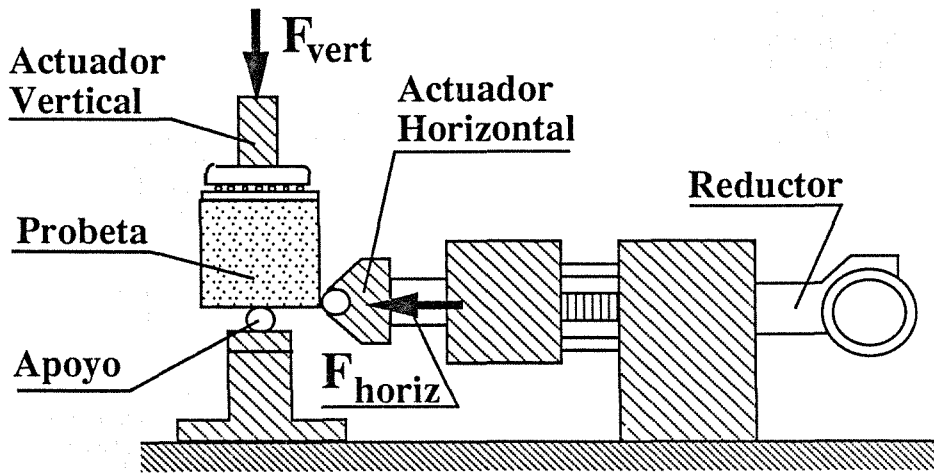


Figura 7. Esquema general de los ensayos de rodadura

aplicada. Los detalles pueden consultarse en Guinea, 1990. Las probetas para el ensayo de rodadura fueron cúbicas, de 100 mm de arista, y se obtuvieron mediante corte con sierra de diamante por vía húmeda de trozos de probetas ensayadas a flexión. Se tomó como cara de contacto con el rodillo de apoyo una cara lateral que hubiese estado en contacto con el molde, para garantizar igual textura que la del apoyo en el ensayo de flexión. Se han reproducido las fuerzas y movimientos de los apoyos, para varios tamaños de probeta de flexión ensayadas en tres puntos. Para ello fue preciso obtener la curva promedio que representase la fuerza aplicada sobre el apoyo lateral frente al tiempo y también la correspondiente al desplazamiento lateral del apoyo frente al tiempo. Para estimar esta última se consideró en primera aproximación el movimiento de sólido rígido de los dos trozos de la probeta de flexión, y se hizo uso de las curvas fuerza - CMOD registradas en los ensayos de flexión. En la figura 8 se muestra la representación de la fuerza vertical frente a la horizontal para uno de los ensayos. En ella se comprueba que la relación entre ambas fuerzas no superó el 1%, valor típico del coeficiente de rozamiento para un dispositivo de apoyo con rodillos.

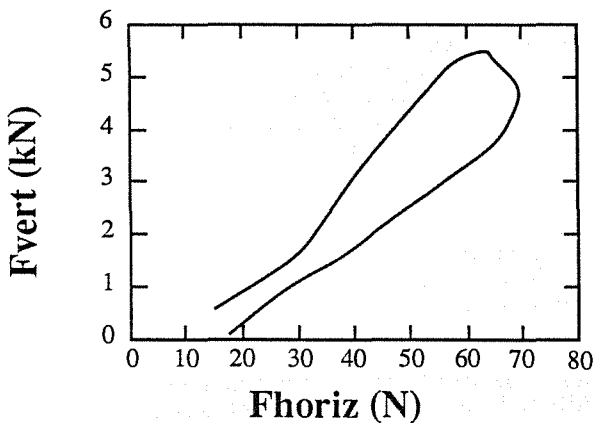


Figura 8. Representación de la fuerza vertical frente a la fuerza horizontal

En la figura 9 se reproduce el trabajo total disipado (vertical+horizontal) medido en los ensayos de rodadura para los dos rodillos laterales representado frente al tamaño de la probeta. El trabajo aparece como trabajo específico relativo al ser dividido por el área del ligamento inicial de la probeta y por el valor de referencia de la energía de fractura (75 N/m).

La curva dibujada en la figura 9 presenta una dependencia con el tamaño similar a la de los ensayos de penetración, que ronda el 50% de variación intrínseca entre los tamaños extremos. Sin embargo su participación en la energía específica aparente de fractura es pequeña, del orden de 15%.

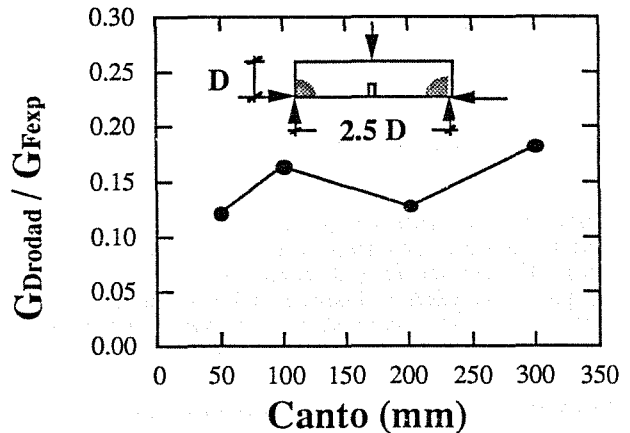


Figura 9. Variación del trabajo específico disipado por rodadura con el tamaño

5. CONCLUSIONES

Como resultado de las investigaciones desarrolladas podemos establecer las conclusiones siguientes:

1.- Hemos estimado numéricamente por primera vez el trabajo disipado por rozamiento de la probeta con los apoyos laterales, y hemos probado que la energía disipada en este proceso supone una fracción importante del total de la energía consumida en el ensayo. Ha sido demostrado que el error cometido en la estimación de la energía de fractura es constante en todos los tamaños (no hay efecto de tamaño) y resulta del orden del valor del coeficiente de rozamiento. Como consecuencia práctica, será muy importante procurar que el dispositivo experimental no impida el libre movimiento de los apoyos laterales. Además hemos comprobado que la evaluación de este efecto haciendo uso de la hipótesis de movimiento de sólido rígido de ambos trozos de la probeta da una muy buena aproximación, y proporciona un método sencillo y práctico de cálculo.

2.- Hemos encontrado que el efecto de tamaño sobre la energía de fractura inducido por la histéresis del sistema de ensayo es muy reducido. En ningún caso su valor ha llegado al 1% del valor aparente de la energía de fractura. No obstante debemos señalar la importancia que tiene hacer este tipo

de comprobaciones antes de realizar ningún ensayo de medida de la energía de fractura.

3.- Los ensayos realizados con probetas moldeadas y con probetas cortadas han mostrado igual efecto de tamaño que aquellos que se hicieron sólo con probetas moldeadas. Este hecho prueba que la influencia del sistema de obtención de la probeta (moldeado o corte) en los valores de la energía de fractura no es significativa.

4.- Ha sido desarrollada y aplicada una técnica específica de ensayos de penetración sobre probetas de hormigón para evaluar la energía disipada bajo el apoyo central.

5.- Se ha diseñado, construido y puesto a punto un sistema de ensayo en dos ejes con el que se han reproducido por vez primera las condiciones de carga y movimiento de los apoyos laterales durante la realización de un ensayo de flexión en tres puntos. Con este equipo se ha medido de forma independiente la disipación que tiene lugar en los apoyos laterales y que es originada por esfuerzos verticales y horizontales.

6.- Hemos encontrado que no es significativo el efecto de tamaño en la energía de fractura producido por no descontar el trabajo disipado en la penetración del apoyo central. Sin embargo este fenómeno provocará un error apreciable en la estimación de la energía de fractura, cuyo valor medio para los ensayos de flexión considerados ha sido del 10% del valor aparente de la energía de fractura.

7.- El valor del trabajo disipado por rodadura en los apoyos laterales es significativo y ronda el 15% de la energía aparente de fractura. Pese a ello, hemos encontrado que el efecto de tamaño inducido por este fenómeno es reducido, de igual manera que ocurre con la penetración bajo el apoyo central.

8.- Como conclusión final podemos establecer que la consideración de las condiciones experimentales no resulta suficiente para justificar el efecto de tamaño que aparece al evaluar experimentalmente la energía de fractura del hormigón, del que se da cuenta por ejemplo en Hillerborg, 1985. Aunque ciertamente hemos demostrado que, si no se tienen en cuenta todos los aspectos reseñados anteriormente, puede acumularse un error importante en el valor estimado de  $G_F$  de hasta el 30% o incluso superior, .

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la CICYT por la ayuda económica prestada para realizar este trabajo, a través de los proyectos de investigación PA85-0092 y PB86-0494.

## 7. REFERENCIAS

Guinea, G. V. (1990), Medida de la Energía de Fractura del Hormigón. Tesis Doctoral. Departamento de Ciencia de Materiales, Universidad Politécnica de Madrid.

Guinea, G. V., Planas, J. y Elices, M. (1990), Influencia de la disipación volúmica en la energía específica de fractura del hormigón. Anales de Mecánica de la Fractura, 7, pp 211-217.

Hillerborg, A. (1985), Results of three comparative test series for determining the fracture energy  $G_F$  of concrete. Materials and Structures, 18, No.107, pp 407-413.

Planas, J. y Elices, M. (1985), Fractura de hormigones. Anales de Mecánica de Fractura, 2.

Planas, J., Elices, M., y Guinea, G. V. (1989), Variación de la energía de fractura con el tamaño en modelos de fisura cohesiva: Modelo de Ligamento Perturbado. Anales de Mecánica de la Fractura, 6, pp 110-114.

RILEM-Draft-Recommendation (50-FMC) (1985) Determination of Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of three-Point Bent test on Notched Beams. Materials and Structures, 18, pp 285-290.

Rokugo, K., Iwasa, M., Suzuki, T. y Koyanagi, W. (1988), Testing Methods to determine tensile strain softening curve and fracture energy of concrete. Int. Workshop on Fracture Toughness and Fracture Energy -Test Methods for Concrete and Rock-, Sendai, Japon.