

DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA (MODO I) EN EL HORMIGÓN CONVENCIONAL CON PROBETAS CILÍNDRICAS

A. C. Santos¹, J. L. A. O. Sousa², T. N. Bittencourt³, R. Gettu⁴

¹ Eng. Civil, M.Sc. , Doctorando de la Universidad de São Paulo -Brasil y investigador visitante en la Universitat Politècnica de Catalunya - Espanha. acds@usp.br

² Livre Docente, Profesor Doctor, Universidade Estadual de Campinas - Brasil. jls@fec.unicamp.br

³ Livre Docente, Profesor Doctor, Universidade de São Paulo - Brasil. tbitten@usp.br

⁴ Profesor Doutor, Universitat Politècnica de Catalunya - Espana. ravindra.gettu@upc.es

RESUMEN

En este trabajo se desarrolló la metodología para la determinación de la tenacidad a la fractura (K_{Ic}) del hormigón, a través de ensayos de la deformación controlados en probetas del tipo "short-rod", basándose en las recomendaciones de ISRM. Se ensayaron 72 probetas del tipo "short-rod" para la determinación de K_{Ic} , en cuatro grupos de 18 probetas, con diversas dosificaciones de hormigón, con resistencia y tamaño de agregado distinto. Cada grupo fue dividido en tres partes iguales y ensayadas en distintos momentos. Simultáneamente se ensayaron probetas para determinar la resistencia a la compresión y a la resistencia a la tracción. La metodología adoptada se encontró adecuada para la determinación de la tenacidad a la fractura del hormigón. Los resultados obtenidos indicaron dependencia de la tenacidad a la fractura con relación al tamaño del agregado grueso (grava), la resistencia a la compresión y la edad del hormigón.

ABSTRACT

In this work the methodology was developed for the determination from the tenacity to the fracture (K_{Ic}) of the concrete, through rehearsals of the deformation controlled in specimens of the type "short-rod", being based on the recommendations of ISRM. 72 specimens of the type "short-rod" were rehearsed for the determination of K_{Ic} , in four groups of 18 specimens, with diverse concrete dosages, with resistance and size of different attaché. Each group was divided in three equal parts and rehearsed in different moments. Simultaneously specimens were rehearsed to determine the resistance to the compression and the resistance to the traction. The adopted methodology was appropriate for the determination of the tenacity to the fracture of the concrete. The obtained results indicated dependence from the tenacity to the fracture with relationship to the thick attaché's size (it burdens), the resistance to the compression and the age of the concrete.

1. INTRODUCCIÓN

La mecánica de la fractura tenía su principio histórico con la publicación de GRIFFITH (1920), Pocos progresos pasaron en esa área, hasta la Segunda Guerra Mundial, cuando la ocurrencia de varios accidentes que involucran los buques de guerra motivó una atención más grande a la conducta de los materiales en la presencia de fisuras.

La mecánica de la fractura se aplica a un gran rango de materiales que pasan por los materiales dúctiles hasta los más casi-frágil. KAPLAN (1961) apud CATALANO (1983) fue el primero en analizar la conducta de los materiales cementosos con base en la mecánica de la fractura.

CATALANO (1983) se sirvió de la configuración geométrica (Short-rod – SR) propuesta por BARKER (1977) (1979) para los ensayos de

tenacidad a la fractura del hormigón. Entre sus conclusiones está, el que la mecánica de la fractura elástico-lineal es aplicable y caracteriza el comportamiento de los materiales hormigón y mortero.

Es relevante en la actualidad el desarrollo de metodologías del ensayo para la determinación de los parámetros de tenacidad a la fractura del material, así como el conocimiento de la influencia de la composición del material en esos parámetros.

2. EJECUCIÓN DE LAS PROBETAS

2.1 Los moldes, el dispositivo de aplicación de carga y el sistema de apoyo.

La ejecución de los moldes de encofrado para probeta tipo "short-rod" (SR) se basó en las recomendaciones de ISRM (1988), adaptó a la norma brasileña de amoldar y cura de probeta cilíndrica o prismática de hormigón (NBR-5738/84).

El dispositivo de aplicación de carga para el ensayo de tenacidad a la fractura en modo I fue desarrollado para que la fuerza aplicada por el equipo del ensayo sea transmitida a la probeta, perpendicularmente al plano de la fractura. La probeta es fija a la máquina del ensayo por dos barras de transmisión de carga (Ilustración 1), se ató al hormigón con tornillos. Los tornillos se pusieron durante el amoldamiento a través de la forma (Ilustración 2), garantizando un posicionamiento ortogonal al plano de la fractura. Se usaron dos tornillos para la fijación de las barras de transmisión, con el propósito de evitar la rotación durante la aplicación de la carga (Ilustración 2) y también para disminuir la concentración de las tensiones en el área, minimizando la probabilidad de ruptura localizada del hormigón.

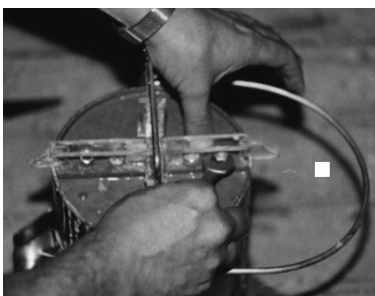


Ilustración 1: Posicionando los tornillos durante el hormigonado

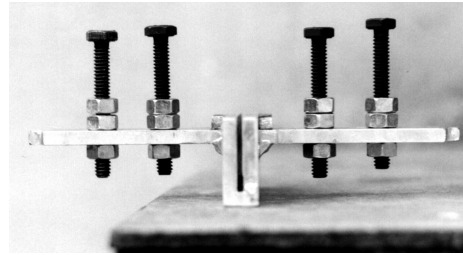


Ilustración 2: forma de posicionar de los tornillos

2.2 El hormigón

En la preparación y obtención de los hormigones usados (Tabla 1) en los ensayos, se intentó definir y caracterizar a todos sus componentes y de este modo garantizar que las propiedades del hormigón ensayado fueran las especificadas.

Tabla 1: Dosificación, en la masa del hormigón usada en los ensayos.

| Grupo | Resistencia (MPa) | Agregado Grueso (mm) | Relación a/c |
|-------|-------------------|----------------------|--------------|
| 1 | 20 | 4,8 – 6,3 | 0,65 |
| 2 | 20 | 6,3 – 9,5 | 0,64 |
| 3 | 50 | 4,8 – 6,3 | 0,36 |
| 4 | 50 | 6,3 – 9,5 | 0,34 |

2.3 Encofrado, Descofrado y Curado

Se encofraron 4 series, cada una conteniendo 18 probetas para el ensayo de tenacidad a la fractura (SR), 9 para la compresión axial (10x20cm) y 9 para la compresión diametral (prueba brasileña). Cada serie se amoldó con una de las dosificaciones de la Tabla 1.

La desconfrado de la probeta era hecha después de 24 horas, según las recomendaciones de NBR-5738. La lamina se destinó a la formación del "chevron" de la ranura que estaba alejada entre 2 y 4 horas después del encofrado, dependiendo de la dosificación. Es la atención importante por los casos en que la relación agua/cemento es bajo, porque el tiempo recomendó para la retirada de la lámina que es más pequeña.

Después del descofrado, las probetas fueron guardadas en un tanque con agua a temperatura ambiente, en la posición vertical respecto al plan preferencial de la ranura. Cada serie era dividido en tres partes iguales que se ensayaron respectivamente con las edades de 14, 28 y 56 días.

3. ENSAYO DE TENACIDAD A LA FRACTURA

3.1 Metodología experimental

Los ensayos de tenacidad a la fractura fueron hechos a una temperatura de 25°C, a los 14, 28 y 56 días de edad. La aplicación de carga fue hecha con una máquina de deformación controlada del tipo MTS modelan 810, programados para la aplicación del ciclo de carga en un intervalo de 100 a 150 segundos. Con este procedimiento se intenta minimizar el efecto de la tasa de aplicación de carga en el valor de la tenacidad a la fractura, de acuerdo con observaciones hechas por BAZANT (1990)

Se fija una de las barras de transmisión de carga a la máquina de la manera para garantizar la perpendicularidad entre la línea de aplicación de carga y el plano de la ranura. Después de fijar la probeta en las barras de transmisión de carga, un extensómetro del tipo MTS modelan 632.03C.20 es posicionado en la boca de la ranura de la probeta. Durante el ensayo, un diagrama de la apertura de la boca de la fisura (Crack Mouth Opening Displacement - CMOD) versus la carga aplicada es obtenido por un registrador del tipo X-Y. Durante el ensayo se observa la conducta del diagrama porque, cuando la línea de carga llega a una tangente en relación el yeso X, el sistema debe ser descargado para evitar propagación inestable de la fisura. La descarga debe hacerse, según las recomendaciones de ISRM (1988), entre 10 y 20% de la carga máxima alcanzada. Una vez descargada la probeta, un nuevo ciclo de carga empieza tomándose las mismas precauciones anteriores.

3.2 Procedimiento de Cálculo

3.2.1 Primero Caso: el Promedio entre los picos, superior al 98% de la carga máxima

En el gráfico obtenido en el ensayo se, apuntado los puntos de carga superior en los dos ciclos alcanzados más grandes (el punto A y B). Usándose como las ordenadas la mitad de los dos valores de carga más grandes, los puntos C y D son marcados en la línea de recarga subsiguiente a los puntos A y B (Ilustración 3).

Para seguir, se trazan dos líneas rectas que pasan por los puntos AC y BD (línea 1 y 2 respectivamente), que son prolongadas hasta que ellas crucen el eje de las abscisas; en estos puntos son marcados E y F (Ilustración 3).

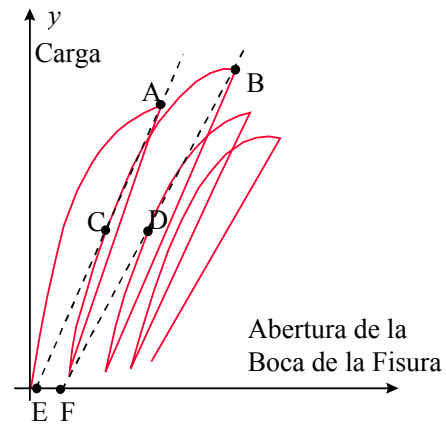


Ilustración 3: la Situación del cruce se apunta en el eje de las abscisas

Según ISRM (1988), la tenacidad a la fractura para los materiales inelásticos es dada por la expresión:

$$K_{SR} = \sqrt{\frac{1+p}{1-p} \cdot \frac{C_K \cdot 24 \cdot \bar{F}}{D^{1.5}}} \quad (1)$$

Donde “p” se obtiene por la relación $p = \Delta x_0 / \Delta x$, yendo Δx la proyección en el eje de las abscisas de la línea recta segmenta AB y Δx_0 la distancia EF; \bar{F} es el promedio entre los valores de las cargas de los puntos A y B; D es el diámetro nominal de la probeta; C_K es un factor de la corrección debido a la variación en las dimensiones de la probeta, obtenido a través de la ecuación (2).

$$C_K = \left(1 - \frac{0.60 \Delta W}{D} + \frac{1.40 \Delta a_0}{D} - 0.01 \Delta \theta\right) \quad (2)$$

Donde ΔW es la variación de altura, Δa_0 la posición inicial de la ranura y $\Delta \theta$ el ángulo de la ranura de la probeta.

3.2.2 Segundo Caso: el Promedio entre los picos inferiores al 98% de la carga máxima

Son marcados en el gráfico obtenido en el ensayo los puntos A, B, C, D, Y y F de acuerdo con el procedimiento descrito en el primer caso, rastreándose la línea recta 1 y 2 (Ilustración 3). En la línea 1 es marcado un punto G, para que el valor de la proyección en el eje de las abscisas del segmento EG sea igual a la proyección en el mismo eje, del segmento FB (Ilustración 4). En el punto medio del segmento GB macase el punto H (punto de carga F_c), empezando del punto H rastrear una línea recta (la línea 3 recta) con la inclinación igual al promedio entre las inclinaciones de las líneas recta 1 y 2. Donde la línea 3 recta cruce la curva obtenida durante el ensayo, se tiene el punto I (Ilustración 4).

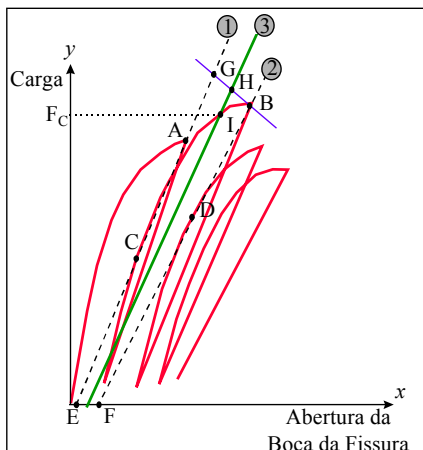


Ilustración 4: la Situación de los puntos en el gráfico para el segundo caso.

Se obtén la tenacidad a la fractura según ISRM (1988) a través de la expresión:

$$K_{SR}^C = \sqrt{\frac{1+p}{1-p}} \cdot K_{SR} \cdot \frac{F_C}{F} = \sqrt{\frac{1+p}{1-p}} \cdot \frac{C_K \cdot 24 \cdot \bar{F}}{D^{1.5}} \cdot \frac{F_C}{F} \quad (3)$$

La carga F_C se obtiene tomando se como su valor la ordenada del punto I.

4. RESULTADOS DE ENSAYOS

Tabla 2: Resistencia a la compresión y a la tracción de los grupos

| Edad (días) | Compresión (MPa) | | | Tracción (MPa) | | |
|-------------|------------------|------|------|----------------|-----|-----|
| | 14 | 28 | 56 | 14 | 28 | 56 |
| G 1 | 22,3 | 24,9 | 31,0 | 2,1 | 2,6 | 2,6 |
| G 2 | 19,0 | 22,2 | 27,0 | 2,0 | 2,2 | 2,5 |
| G 3 | 40,6 | 47,2 | 54,5 | 3,6 | 4,4 | 3,5 |
| G 4 | 47,0 | 46,9 | 51,2 | 4,2 | 4,3 | 3,9 |

Tabla 3: los Resultados de tenacidad a la fractura de los grupos.

| Edad (días) | K_{IQ} (MPa) | | | K_{Ic} (MPa) | | |
|-------------|----------------|------|------|----------------|------|------|
| | 14 | 28 | 56 | 14 | 28 | 56 |
| G 1 | 0,88 | 0,86 | 1,04 | 1,34 | 1,19 | 1,36 |
| G 2 | 0,79 | 0,90 | 1,01 | 1,21 | 1,33 | 1,47 |
| G 3 | 0,14 | 1,50 | 1,65 | 2,04 | 1,98 | 2,03 |
| G 4 | 0,15 | 1,66 | 1,58 | 2,09 | 2,49 | 2,35 |

5. CONCLUSIONES

Puede evidenciarse en este trabajo que los ensayos de tenacidad a la fractura, usándose probetas cilíndricas del tipo “short-rod”, son bastante simples no por lo que se refiere a las fases de fabricación y ensayo de las probetas. Se ha observado para las condiciones del ensayo y características del hormigón usadas, un nivel bajo de pérdidas y ninguna manera de ruptura que no sea la deseada (Modo I).

Los resultados de los ensayos tuvieron una baja desviación típica, demostrando que la metodología aplicada para poder obtener la dosificación del hormigón bien como él encofrado y ensayo de las probetas en los diversos ensayos, es fiable.

Entre las conductas observadas puede mencionarse que: el valor de la relación agua/cemento influye en la tenacidad a la fractura del hormigón de forma inversamente proporcional, cuanto más grande es el tamaño del agregado grueso, más grande el valor de la tenacidad a la fractura, la diferencia entre la tenacidad a la fractura aparente (K_{IQ}) y la tenacidad a la fractura (K_{Ic}), es más grande en los hormigones con los agregados gruesos más grandes, en otros términos, en estos casos el factor de la corrección inelástica (p) es más grande y por fin los valores de tenacidad a la fractura de los hormigones crecen con la edad de la probeta siendo que después de 56 días éstos presentan una tendencia a la estabilización.

AGRADECIMENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior (CAPES) y por el Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq). Agradezco también la ayuda prestada por mis compañeros José Luiz Rangel, Paulo César Correia e Guillermo Landa, doctorandos da Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “*Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou*

prismáticos de concreto", NBR-5738, Rio de Janeiro, (1991)

- [2] BARKER, L.M., "A simplified method for measuring plane strain fracture toughness", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 9, (1977), pp 361-369.
- [3] BARKER, L.M., "Theory for determining K_{Ic} from small, non-LEFM specimens, supported by experiments on aluminum", International Journal of Fracture, Vol 15, No 06, (1979), pp 515-536.
- [4] BAZANT, Z. P.; GETTU, R., "Size effect in concrete structures and influence of loading rate", Proceedings of the First Materials Engineering Congress, Denver , 1990.
- [5] CATALANO, D. M., "Concrete fracture: A linear elastic fracture mechanics approach", M.Sc. Dissertation, Cornell University, Ithaca, NY, (1983).
- [6] GRIFFITH, A. A., "The phenomena of rupture and flow in solids", Phil. Trans of the Royal of London, Series A, Vol. 221, pp. 163-197, 1920.
- [7] ISRM: "Suggested methods for determining the fracture toughness of rock", F. Ouchterlony, Working Group Coordinator, Int. J. Rock Mech Min. Sciences, vol.25, pp 71-96, (1988)
- [8] KAPLAN, M.F., "Crack propagation and the fracture of concrete", Journal of American Institute, Vol. 58 No 5, pp 591-610, (1961).