

INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN EN EL COMPORTAMIENTO EN FRACTURA DEL HORMIGÓN

K. M. El-Sayed, C. Rocco, G.V. Guinea y M.Elices

Departamento de Ciencia de Materiales
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. U.P.M.
Ciudad Universitaria s/n. 28040 Madrid

Resumen. Como en todo material compuesto, el comportamiento en fractura del hormigón depende de las propiedades y características de sus fases constitutivas. En este comportamiento la fase dispersa, constituida por áridos de diferentes tamaños juega un papel muy importante. En los últimos años, se han realizado distintos trabajos de investigación tendentes a evaluar la incidencia del árido en el comportamiento en fractura del material. En la mayoría de los casos los trabajos se han limitado a estudiar el efecto del tamaño del árido. En este trabajo se presenta un estudio experimental sobre el efecto de diferentes variables geométricas del árido en las propiedades en fractura del hormigón. Para tal fin, se realizaron ensayos de fractura estable (flexión y brasileños) de hormigones elaborados con áridos de diferente tamaño máximo (10mm, 12.5mm y 20mm), forma (redondeada e irregular) y granulometría (continua y uniforme). Las principales propiedades estudiadas fueron la resistencia a la tracción, la energía específica de fractura, y el valor de abertura crítica de fisura de acuerdo con el modelo de fisura cohesiva. Los resultados muestran claramente el efecto de las variables estudiadas.

Abstract. Like in any composite material, the fracture behaviors of concrete depend on the properties of his constitutive phases. The dispersed phase, that is constituted by different size of aggregate, plays an important role in this behavior. In the last years different experimental programs were oriented to evaluate the influence of the aggregate properties in the fracture concrete behavior. In the main cases, the aggregate size was the most studied variable. This work studies the influence of the geometric properties of aggregate in the fracture concrete properties. Stable fracture test of concrete elaborated with different aggregate characteristics (different size, shape and grading) were performed. Tensile strength, fracture energy and critical crack open displacement according to the cohesive crack model, were the principal variables studied. The results clearly show the effect of the aggregate geometric characteristics.

1. INTRODUCCION

El hormigón es un material heterogéneo, constituido por una fase dispersa de áridos de diferentes formas y tamaños, embebidos en una matriz cementante. Una de las características del comportamiento en fractura de este material, íntimamente relacionada con la heterogeneidad de su estructura interna, es el complejo sistema de fisuras y microfisuras desarrollado durante la rotura. Se ha observado, que este proceso está básicamente controlado por las características y propiedades de los áridos e interfases, y afecta a las propiedades macroscópicas que dependen del comportamiento en fractura del material.

Uno de los modelos macroscópicos con los que se puede describir de manera más adecuada, el comportamiento en fractura del hormigón, es el *modelo de fisura cohesiva*. En este modelo, la zona del material que se microfisura durante la fractura, se representa mediante una fisura ficticia llamada fisura cohesiva, entre cuyos labios se pueden transferir tensiones. La magnitud de estas tensiones depende de la abertura de la fisura y varía según una ley o función que se denomina *función de ablandamiento*, (figura 1). Esta función, es una propiedad macroscópica del material que depende de su estructura interna, y por lo tanto de las propiedades y características de las fases que lo constituyen.

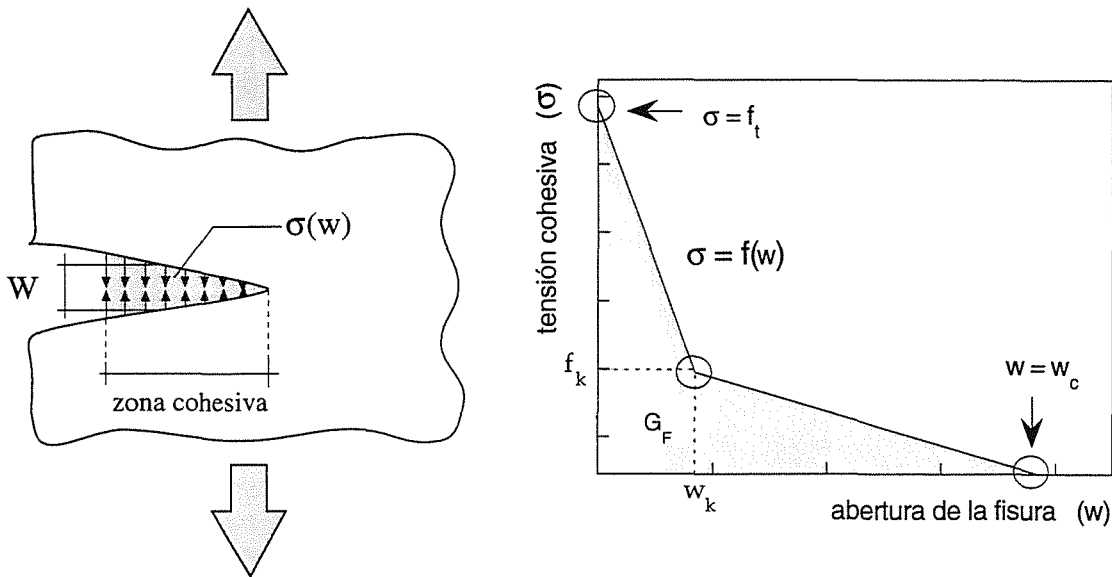


Figura 1. Fisura cohesiva y función de ablandamiento

Para el caso del hormigón, se ha demostrado que la forma de la función de ablandamiento, se puede aproximar mediante una curva bilineal [1], tal como se muestra en la figura 1. Algunos de los parámetros más importantes de esta función son: la resistencia a la tracción f_t , la energía específica de fractura G_F , y el valor crítico de abertura de fisura w_c .

En los últimos años se han realizado estudios experimentales tendentes a evaluar el efecto de las fases componentes del hormigón en su comportamiento en fractura [1-6]. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos se han centrado en analizar básicamente la incidencia del tamaño máximo del árido. Prueba de ello, es que en el Código Modelo del Comité Europeo del Hormigón CEB-90 [7], se incluyen fórmulas empíricas para la energía específica de fractura y para la función de ablandamiento, que sólo tienen en cuenta la incidencia del tamaño del árido.

En este trabajo se presenta un estudio experimental sobre el efecto del tamaño, la forma y la distribución granulométrica del árido en el comportamiento en fractura del hormigón. El análisis se ha centrado en la evaluación de la incidencia de tales variables sobre los parámetros de fractura de la función de ablandamiento.

En la sección 2 se describen los materiales y mezclas empleadas, los ensayos realizados y los resultados obtenidos. En el apartado 3 se presenta el análisis de los resultados y finalmente en la sección 4 se incluyen las conclusiones finales del trabajo.

2. EXPERIMENTACIÓN

Para evaluar el efecto de las características geométricas del árido sobre los parámetros de fractura de la función de ablandamiento, se hicieron ensayos de fractura de hormigones con distintos tamaños, formas y granulometrías de áridos. El estudio de estas variables se extendió a la fracción de los áridos mayores de 5mm (árido grueso). Los áridos de menor tamaño (arena) se mantuvieron constantes en todos los hormigones y a los efectos del estudio se los considera como parte constitutiva de la matriz cementante (mortero).

Para poder comparar los resultados obtenidos con los diferentes hormigones, en todas las mezclas se mantuvo constante la composición de la matriz y el volumen total del árido grueso.

2.1 Materiales y Mezclas

Los hormigones se fabricaron con cemento portland ordinario 45A y áridos silíceos de un mismo yacimiento y procedentes de la misma partida.

Para estudiar el efecto de la forma del árido, se emplearon áridos redondeados y triturados. Estos últimos se obtuvieron por trituración a partir de las fracciones de mayor tamaño del árido redondeado. Para su almacenamiento en laboratorio, los áridos fueron separados mediante cribado, según distintas fracciones de tamaños (5-10mm, 10-12.5mm y 12.5-20mm). A partir de estas fracciones se reconstruyeron las distintas

Tabla 1. Identificación de las mezclas y variables estudiadas del árido grueso

| Mezcla | Características del árido grueso | | | | |
|--------------------|----------------------------------|---------------|---|-------|---|
| | Tamaño máximo (mm) | Granulometría | | Forma | |
| | | C | U | R | T |
| R ₁ (*) | 10 | X | X | X | |
| T ₁ (*) | 10 | X | X | | X |
| RC ₂ | 12.5 | X | | X | |
| TC ₂ | 12.5 | X | | | X |
| RU ₂ | 12.5 | | X | X | |
| TU ₂ | 12.5 | | X | | X |
| RC ₃ | 20 | X | | X | |
| TC ₃ | 20 | X | | | X |
| RU ₃ | 20 | | X | X | |
| TU ₃ | 20 | | X | | X |

T=triturado, R=redondeado, C=continua, U=uniforme (*) En estas mezclas las granulometrías continua y uniforme son coincidentes

granulometrías correspondientes a los diferentes tamaños máximos estudiados. Estos tamaños fueron 10mm, 12.5mm y 20mm.

Para cada tamaño máximo y forma del árido se estudiaron dos tipos de distribución del tamaño de partículas: una continua (C) según las recomendaciones de la norma ASTM C33 y una uniforme (U) en donde prácticamente todas las partículas del árido fueron de un mismo tamaño.

En total se fabricaron 10 hormigones diferentes en los que se variaron, la forma, el tamaño y la granulometría del árido grueso. Las proporciones de la mezcla fue la misma en todos los hormigones. Las relaciones agua/cemento, arena/cemento y árido grueso/cemento fueron 0.48, 1.78 y 2.63 respectivamente. Para caracterizar las propiedades de la matriz, se elaboró también una mezcla de mortero con similares relaciones agua/cemento y arena/cemento que los hormigones. En la tabla 1, se indica la identificación de los hormigones y las variables estudiadas.

2.2 Ensayos

Para determinar los parámetros de la función de ablandamiento bilineal se realizaron ensayos estables de flexión en tres puntos y ensayos brasileños estables.

Los ensayos de flexión se realizaron sobre vigas entalladas de 100mm de canto y 100mm de espesor, con una entalla central de 50mm de

profundidad y 2mm de espesor. La relación entre la luz de ensayo y el canto fue igual a 4. Los ensayos se realizaron controlando la velocidad de abertura de la entalla, siguiendo las recomendaciones de la norma RILEM TC50 [8], con los ajustes recomendados en [9], [10] y [11]. Para los ensayos brasileños se emplearon probetas cilíndricas de 150x300mm ensayadas de manera estable mediante el control de la velocidad de abertura de fisura. En estos ensayos se empleó un ancho de apoyo de 12mm. Por cada mezcla se ensayaron un total de 5 vigas y 4 cilindros. Las probetas de todos los hormigones se ensayaron a la misma edad (90 días) y en condiciones saturadas.

Los parámetros de la función de ablandamiento bilineal se calcularon siguiendo el procedimiento de ajuste general recomendado por Guinea, Planas y Elices [12]. Complementariamente se realizaron también ensayos de compresión de probetas cilíndricas de 150x300mm para la determinación de la resistencia a la compresión y del módulo de elasticidad.

2.3 Resultado de los ensayos.

En la tabla 2, se muestran los resultados de las propiedades medidas en cada hormigón. Se incluyen los valores medios de la resistencia a la compresión f_c , del módulo de elasticidad E_c y de los parámetros de la curva de ablandamiento: la resistencia a la tracción f_t , la energía específica de fractura G_F , el valor crítico de abertura de fisura w_c y los valores f_k y w_k del codo de la curva. En la misma tabla se incluyen los valores correspondientes a la matriz o mortero (M).

Tabla 2. Propiedades y parámetros de fractura de los hormigones

| Mezcla | f_c | E_c | f_t | G_F | f_k | w_k | w_c |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|---------------|
| | MPa | GPa | MPa | N/m | MPa | μm | μm |
| M | 49.5 | 28.4 | 3.55 | 58 | 0.35 | 16.0 | 174 |
| R ₁ | 45.9 | 38.4 | 3.11 | 74 | 0.51 | 15.9 | 197 |
| T ₁ | 48.8 | 38.3 | 3.48 | 100 | 0.71 | 16.5 | 198 |
| RC ₂ | 47.4 | 38.6 | 3.11 | 93 | 0.51 | 21.9 | 231 |
| TC ₂ | 53.5 | 38.9 | 3.59 | 106 | 0.69 | 18.8 | 210 |
| RU ₂ | 46.6 | 38.7 | 3.15 | 91 | 0.48 | 21.9 | 240 |
| TU ₂ | 52.4 | 38.8 | 3.46 | 116 | 0.82 | 15.6 | 219 |
| RC ₃ | 44.3 | 36.6 | 2.91 | 74 | 0.32 | 25.0 | 262 |
| TC ₃ | 48.9 | 38.6 | 3.23 | 119 | 0.69 | 24.9 | 229 |
| RU ₃ | 43.5 | 39.8 | 2.62 | 84 | 0.45 | 30.4 | 294 |
| TU ₃ | 46.6 | 39.6 | 3.98 | 141 | 0.87 | 34.2 | 234 |

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En las figuras 2a a 2e, se representan los resultados de los parámetros de la función de ablandamiento de los diferentes hormigones, en función del tamaño máximo del árido. En las figuras, cada curva corresponde a los diferentes tipos de granulometría (U=uniforme, C=continua) y diferentes formas del árido (R=redondeado, T=triturado). En las mismas se indican como puntos de referencia, los valores de los parámetros de la función de ablandamiento correspondientes a la matriz o mortero.

En la figura 2a se muestra el efecto de las características del árido sobre la resistencia a la tracción del hormigón. Si se toma como referencia la resistencia de la matriz, se puede ver

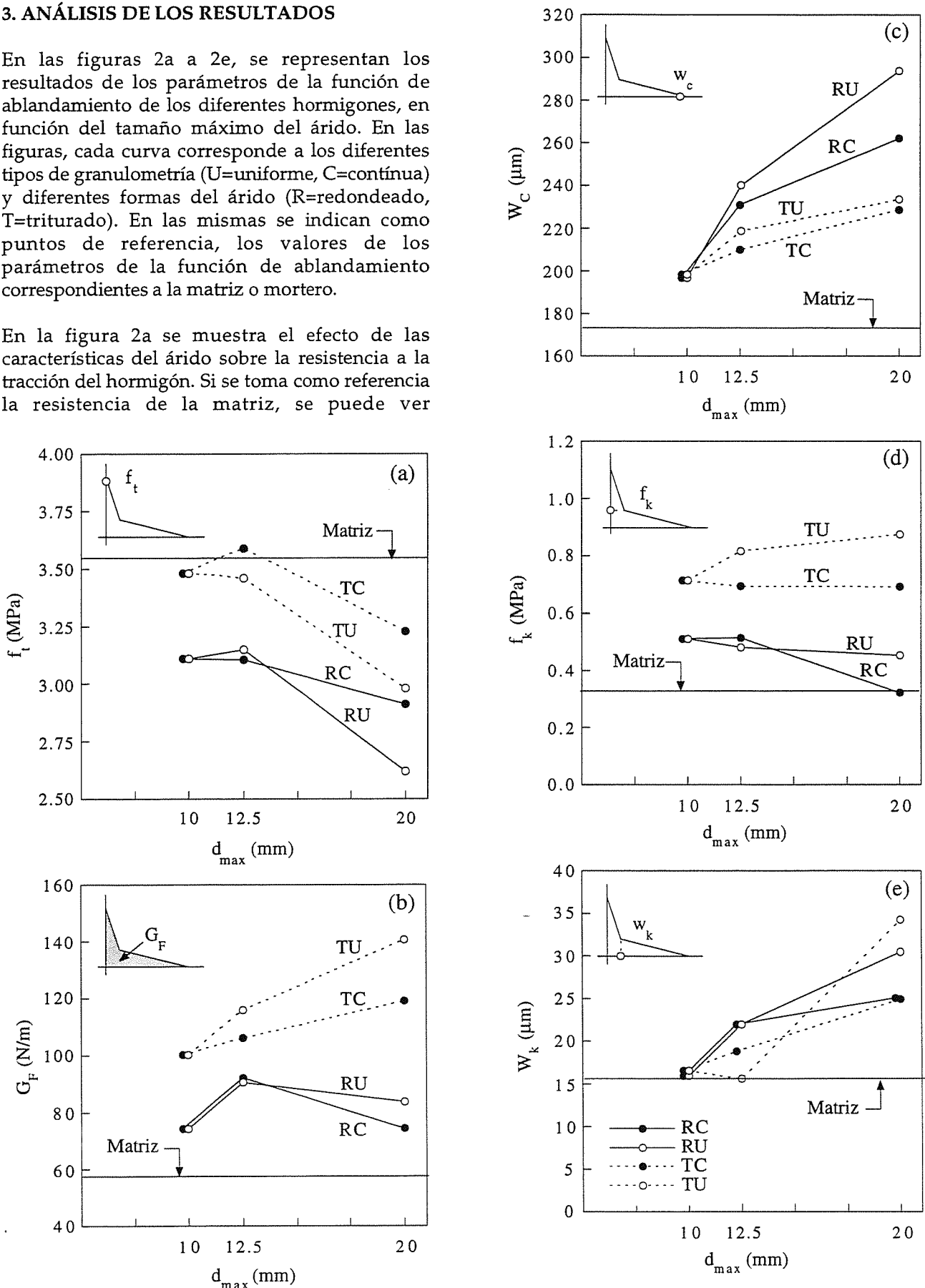


Figura 2. Variación de los parámetros de la función de ablandamiento en función del tamaño del árido. R=árido redondeado, T=árido triturado, U= granulometría uniforme y C= granulometría continua.

claramente, que la inclusión del árido provoca una reducción en la resistencia del material. Esta disminución de la resistencia es más significativa cuanto mayor es el tamaño del árido y depende sensiblemente de la forma de las partículas. En los hormigones con áridos de partículas redondeadas la reducción de la resistencia es más importante notándose claramente el efecto de la inclusión, aún para los tamaños de partículas más pequeños ($d_{\text{máx}}=10\text{mm}$). Respecto a la incidencia de la granulometría, la inclusión de partículas con tamaños uniformes resulta más desfavorable, especialmente cuando mayor es el tamaño del árido.

La incidencia de la forma y del tamaño del árido sobre la resistencia a la tracción del material, está íntimamente relacionada con el comportamiento de la interfase matriz/árido. Analizando las superficies de fractura de los distintos hormigones, se ha podido observar que la superficie de interfases despegadas resultó mayor en los hormigones con áridos de mayor tamaño. Sin embargo el efecto más notable se observa

cuando se comparan entre sí los hormigones con partículas redondeadas y trituradas. En este caso, la cantidad de áridos despegados en las superficies de fractura fue significativamente menor en los hormigones con áridos triturados, en donde se ha podido observar una mayor proporción de áridos fracturados. En las fotos de la figura 3 se comparan las superficies de fractura de un hormigón con áridos redondeados y un hormigón con áridos triturados donde se puede observar este efecto.

Esta diferencia en el tipo de rotura, afecta al resto de las propiedades del material que dependen de su comportamiento en fractura. En el caso de la energía específica de fractura (figura 2b), se puede ver que la inclusión del árido produce un incremento en la G_F del material que depende sensiblemente de la forma de la partícula. Los valores mayores de G_F se obtienen con la inclusión del árido triturado (en este caso se observó una menor cantidad de roturas a través de la interfase matriz/árido). En los hormigones con este tipo de árido, se observa además que la energía específica de fractura aumenta con el incremento del tamaño de la inclusión. Esta tendencia al incremento de la G_F con el tamaño del árido no se ha observado en los hormigones con áridos redondeados.

En la figura 2c, se muestran los valores críticos de abertura de fisura (w_c) en función del tamaño del árido. Se puede observar, que dicho valor aumenta a medida que se incrementa el tamaño de las partículas, siendo este efecto mucho más pronunciado en los hormigones con árido redondeado y con granulometría uniforme. Este aumento de w_c con el incremento del tamaño de los áridos ha sido observado por otros investigadores [1 y 4]. Se debe mencionar que el valor de w_c , está controlado básicamente por los mecanismos que hacen posible la transferencia de tensiones en la zona de fractura. En general el desarrollo de superficies de fractura más tortuosas producidas por efecto del despegue de áridos o por áridos de mayor tamaño, favorece estos mecanismos, lo que conlleva a un incremento en w_c .

Finalmente en las figuras 2d y 2e, se muestra el efecto del árido sobre los parámetros f_k y w_k que se corresponden con el codo de la función bilineal de ablandamiento. Se puede observar que los valores de f_k son independientes del tamaño de árido y resultan mayores en los hormigones con áridos triturados. En cuanto a w_k , su valor crece a medida que se incrementa el tamaño del árido, no

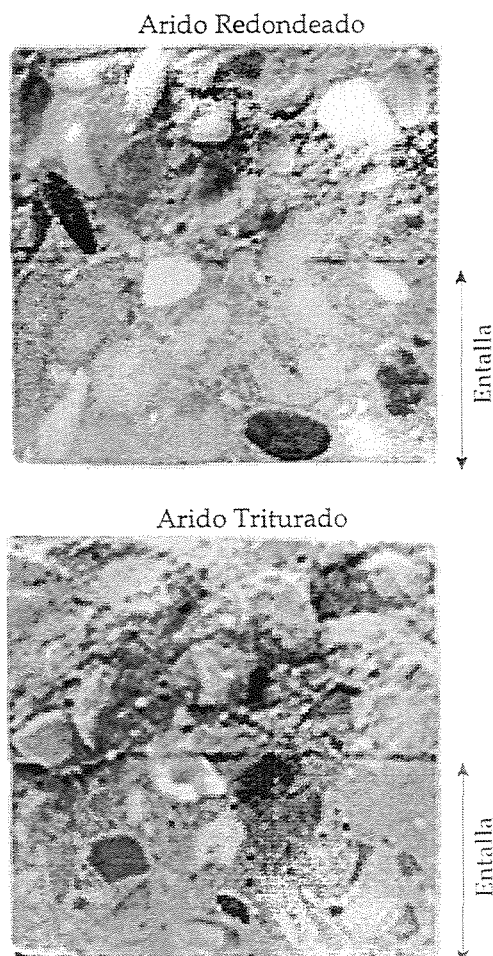


Figura 3. Superficies de fractura de hormigones con árido triturado y árido redondeado

habiéndose observado en este caso un efecto significativo de la forma de la partícula.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de los ensayos realizados en el presente trabajo muestran que los parámetros que gobiernan el comportamiento en fractura del hormigón dependen de las características geométricas de los áridos que lo constituyen.

La inclusión de áridos de mayor tamaño ($d_{max} > 10\text{mm}$) dentro de la matriz cementante, provoca una reducción en la resistencia a la tracción del material que depende del tamaño y de la forma de las partículas. La resistencia disminuye con el incremento del tamaño del árido, siendo este efecto más pronunciado cuando las partículas son de forma redondeada.

La energía específica de fractura G_F de la matriz se incrementa con la inclusión de partículas rígidas de mayor tamaño. Este efecto es más importante cuando se emplean áridos triturados de forma irregular y de granulometría uniforme. En este caso G_F aumenta a medida que se incrementa el tamaño del árido. Esta tendencia de incremento de G_F con el tamaño no se ha observado con los áridos de forma redondeada.

Los valores de la abertura crítica de fisura w_c , crecen a medida que se incrementa el tamaño máximo de los áridos. Este efecto ha sido más notable en los hormigones con áridos de forma redondeada.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Investigaciones Científicas y Técnicas la ayuda recibida a través del proyecto de investigación PB93-0031, y al Ministerio de Educación y Ciencia por el programa de Estancias Temporales para Científicos y Tecnólogos Extranjeros.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Petersson, P.E., "Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials", Report TVBM-1006, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden (1981).

[2] Hillerborg, A., "Result of three comparative test series for determining the fracture energy G_F

of concrete", *Materials and Structures*, **18**, 407-413 (1985).

[3] Wolinski, S., Hordijk, D.A., Reinhardt, H.W. y Cornelissen, H.A.W., "Influence of aggregate size on fracture mechanics parameters of concrete", *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, **9**, N° 2, 95-103 (1987).

[4] Mihashi, H., "Material structure and tension softening properties of concrete", en *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, ed. Zdenek P. Bazant, Elsevier Science Publishers LTD, Colorado, USA, 239-250 (1992).

[5] Otsuka, K., "Size effect in fracture process zone of concrete", en *JCI International Workshop on Size Effect in Concrete Structures*, preprints, Sendai, Japan, 41-50 (1993).

[6] Perdikaris, P.C. y Romeo, A., "Size effect on fracture energy of concrete and stability issues in three-point bending fracture toughness testing", *ACI Materials Journal*, **92**, N° 5, 483-496 September-October (1995).

[7] Comité Euro-International du Béton, CEB-FIP Model Code 1990-Final Draft, *Bulletin d'Information*, **203** (1991).

[8] RILEM 50-FMC (Draft Recommendation), "Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams", *Materials and Structures*, **18** (106), 285-290 (1985).

[9] Guinea, G.V., Planas, J. y Elices, M., "Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 1-Influence of experimental procedures", *Materials and Structures*, **25**, 212-218 (1992).

[10] Planas, J., Elices, M. y Guinea, G.V., "Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 2-Influence of bulk energy dissipation", *Materials and Structures*, **25**, 305-312 (1992).

[11] Elices, M., Guinea, G.V. y Planas, J., "Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 3-Influence of cutting the p- δ tail", *Materials and Structures*, **25**, 327-334 (1992).

[12] Guinea, G.V., Planas, J. y Elices, M., "A general bilinear fit for the softening curve of concrete", *Materials and Structures*, **27**, 99-105 (1994).