

FISURACION DEL HORMIGON POR DESLIZAMIENTO DE BARRAS CORRUGADAS EN PIEZAS DE HORMIGON ARMADO

B. Tork, J. Gálvez, J. Planas, M. Elices

Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
 Departamento de Ciencia de Materiales
 E.T.S.I. Caminos, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid

Resumen: Este trabajo es resumen de una investigación en curso sobre la propagación de grietas en piezas de hormigón con una barra de acero corrugada embebida solicitada a tracción. Se presentan los resultados correspondientes a probetas con tres recubrimientos de hormigón distintos y dos diámetros de barra. Las probetas ensayadas han presentado una importante pérdida de rigidez por fisuración del hormigón y la aparición de las grietas radiales y transversales es prácticamente simultánea.

Abstract: This paper is a summary of an ongoing research project to study crack growth in concrete specimens with a embedded steel bar subjected to tension. The tests have been developed for three concrete covers and two bar diameters. A very important decrease in specimen stiffness is observed upon first cracking. Cracking is seen to occur simultaneously in the radial and transverse directions.

1. INTRODUCCION

El hormigón es un material que trabaja bien a compresión y mal a tracción, por lo que se arma con barras de acero en las zonas solicitadas a tracción; este material se conoce como hormigón armado. Para que el hormigón armado trabaje de forma óptima, es preciso que el hormigón se fisure para que el acero entre en carga, lo que conlleva fenómenos de deslizamiento relativo entre la barra de acero y el hormigón que la rodea. El deslizamiento relativo entre la barra de acero y el hormigón provoca la fisuración radial del hormigón debido a la existencia de resaltos en la barra (corrugas) [1 y 2], de acuerdo con lo que se observa en la Figura 1.

La ley tensión de adherencia-deslizamiento relativo entre la barra de acero y el hormigón que la rodea está relacionada con el fenómeno de fisuración radial del hormigón en torno a la barra. El conocimiento de estas leyes es importante para determinar la longitud de anclaje de las barras, la longitud de solapo entre barras y en general para optimizar la geometría de las barras y el diseño de las zonas de anclaje [3]. Con este fin se ha constituido el Comité TC 147 FMB (Fracture Mechanics to Anchorage and Bond) de la RILEM. En este trabajo se presentan los resultados experimentales del "Round Robin Analysis and Test on Bond" [4] convocado por este Comité para estudiar la propagación de grietas en una pieza de hormigón armado con una barra embebida, al traccionar la barra (Figura 2).

2. DESCRIPCION DE LAS PROBETAS

Se han confeccionado probetas en 3 amasadas de hormigón. La geometría de las probetas se presenta en la Figura 2 y sus dimensiones en la *Tabla 1*.

El hormigón se ha confeccionado con árido silíceo de diámetro máximo 10 mm, cemento Portland II-Z/35A, suministrado a granel para garantizar la homogeneidad, y una relación agua/cemento 0.52. La dosificación de las amasadas se detalla en la *Tabla 2*. El hormigón se vibró 12 segundos en mesa vibradora. El asiento medio del cono de Abrams para las 3 amasadas fue 80 mm aproximadamente. Las probetas fueron hormigonadas

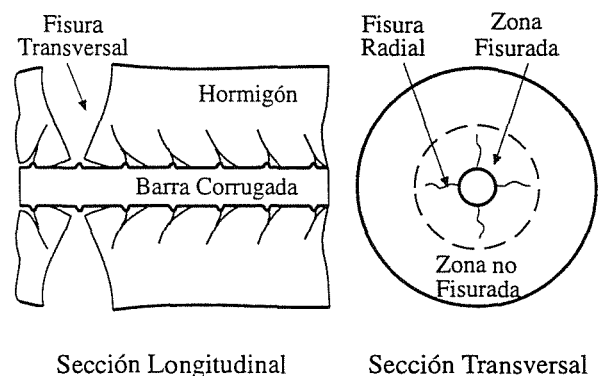


Figura 1. Fenómeno de agrietamiento por deslizamiento de una barra en el interior del hormigón.

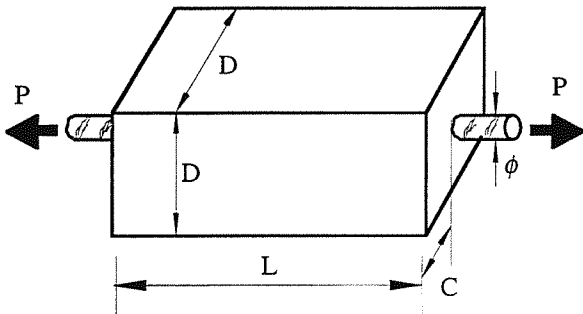
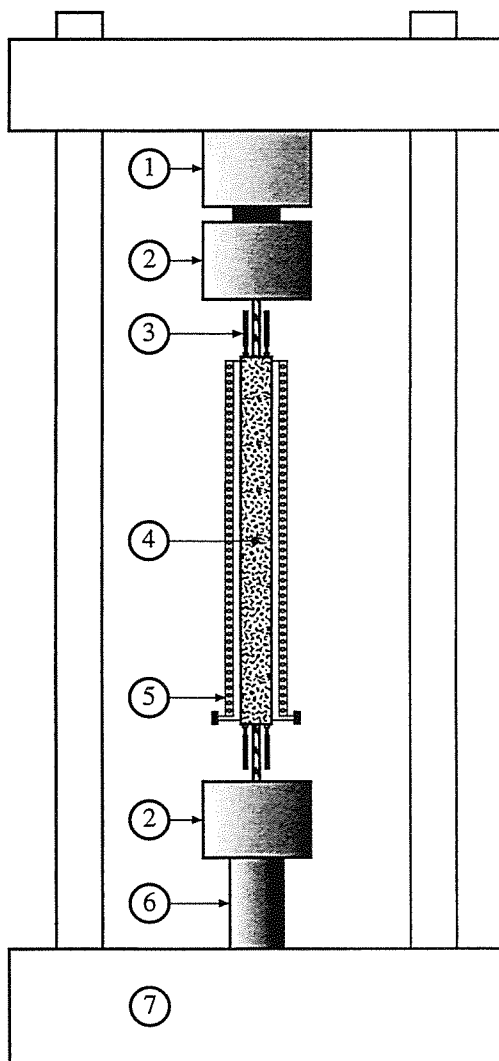


Figura 2. Geometría de las probetas de hormigón con una barra embebida



- | | |
|-----------------------|-----------------|
| 1. Célula de Carga | 5. Extensómetro |
| 2. Mordaza | 6. Actuador |
| 3. Captador Inductivo | 7. Bastidor |
| 4. Probeta | |

Figura 3. Disposición del ensayo de tracción de barras embebidas en un prisma de hormigón.

Tabla 1. Probetas prismáticas de hormigón.

| Denominación | ϕ mm | L mm | D mm | Nº de probetas |
|--------------|--------------|---------|---------|-------------------|
| 8.C2 | 8 | 480 | 40 | 8 |
| 16.C1 | 16 | 960 | 48 | 3 |
| 16.C2 | 16 | 960 | 80 | 5 |
| 16.C3 | 16 | 960 | 112 | 3 |

ϕ : Diámetro de la barra.

L: Longitud de la probeta (60ϕ).

D: Lado de la probeta (3ϕ , 5ϕ y 7ϕ).

Tabla 2. Dosificación del hormigón.

| Componente | Dosificación kg/m^3 | % del peso % |
|------------|---------------------------------|-----------------|
| Agua | 223 | 9.6 |
| Cemento | 429 | 18.6 |
| Arena | 929 | 40.6 |
| Grava | 730 | 31.6 |

horizontalmente.

Las probetas se desmoldaron a las 24 horas, manteniéndose hasta ese momento a temperatura ambiente de laboratorio cubiertas con tela de arpillera húmeda. A partir de ese instante y hasta su ensayo se mantuvieron sumergidas en piscina de agua a temperatura ambiente de laboratorio. Fueron ensayadas 5 meses después de haber sido hormigonadas.

Las propiedades mecánicas del hormigón se detallan en la Tabla 3. Las barras empleadas son de acero de dureza natural grado 500, con módulo de elasticidad $E = 210 \text{ GPa}$ y límite elástico $\sigma_y = 570 \text{ MPa}$.

La nomenclatura de las probetas ha sido: Amasada.Diámetrobarra.Recubrimiento.NºProbeta, así la probeta A1.8.C2.3 es la probeta 3, con recubrimiento 2 veces el diámetro de la barra, barra de diámetro 8 mm y perteneciente a la amasada nº 1.

3. DESCRIPCION DE LOS ENSAYOS

Las especificaciones de los ensayos han sido fijadas en la invitación al "Round Robin Analysis and Test on Bond" [4]. Los ensayos se han realizado mediante tracción de los extremos de la barra (Figura 3), empleando como variable de control del ensayo la velocidad de desplazamiento del pistón de la máquina. Las velocidades de ensayo han sido 0.03 y 0.12 mm/min hasta alcanzar el escalón de cedencia del acero y 0.12 y 0.48 mm/min hasta el final del ensayo, para las probetas con barras de diámetro 8 y 16 mm respectiva-

Tabla 3. Propiedades mecánicas del hormigón de cada amasada.

| Amasada | f_{ck} (MPa) | f_{ct} (MPa) | E (GPa) |
|---------|-------------------|-------------------|------------|
| 1 | 35 | 3.0 | 28 |
| 2 | 35 | 3.0 | 28 |
| 3 | 36 | 3.2 | 28 |

mente

Las variables registradas durante los ensayos han sido:

- Carga P de tracción.
- Desplazamiento del pistón de la máquina.
- Desplazamiento relativo de las caras superior e inferior de la probeta.
- Desplazamiento relativo entre la barra y las caras superior e inferior de la probeta; se ha medido respecto a la sección de barra situada inicialmente en el plano de la cara.
- Apertura de las fisuras radiales a la barra en la cara superior de la probeta.

Además se ha obtenido el mapa de grietas en las 6 caras de la probeta una vez finalizado el ensayo.

La carga P se aplicó con una máquina de ensayos servocontrolada INSTRON 1275. Las barras fueron unidas a la máquina mediante mordazas hidráulicas INSTRON. Para el control y la medida de la carga P se han utilizado dos células de carga INSTRON de 100 kN y 1000 kN, con un error a fondo de escala de $\pm 0.5\%$. La medida del desplazamiento relativo de las caras superior e inferior de la probeta y de la apertura de las fisuras radiales a la barra en las caras superior e inferior de la probeta se hizo con extensómetros INSTRON de ± 2.5 mm de recorrido nominal y $\pm 0.1\%$ de error a fondo de escala. La medida del desplazamiento relativo entre la barra y las caras superior e inferior de la probeta se hizo mediante transductores inductivos HBM e INSTRON de ± 1.0 mm de recorrido nominal y $\pm 0.1\%$ de error a fondo de escala. Las medidas de todos los desplazamientos se han hecho en caras simétricas y se ha obtenido la media. La Figura 4 presenta el dispositivo empleado para medir el desplazamiento relativo entre la barra y la cara de la probeta.

4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

La Figura 5 presenta las curvas carga P frente a la deformación unitaria de la probeta, medida entre las caras superior e inferior del prisma de hormigón, para las probetas con barra de diámetro 16 mm y recubrimientos de hormigón 1, 2 y 3 veces el diámetro de la barra. En cada familia de probetas aparece un punto a partir del cual la rigidez tangente de la probeta disminuye notablemente; este punto corresponde a la

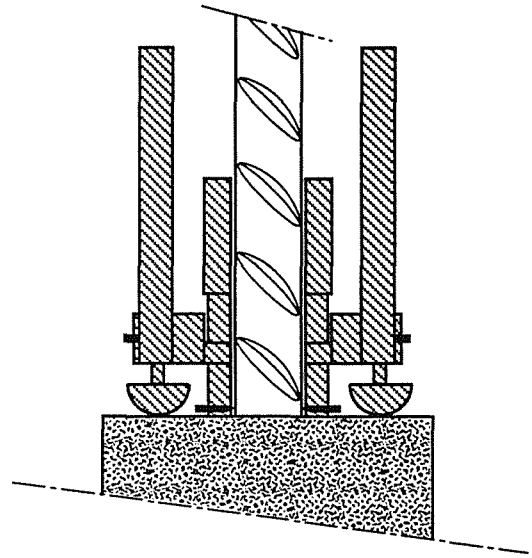


Figura 4. Dispositivo empleado para la medida de los desplazamientos relativos entre la barra y las caras superior e inferior del prisma de hormigón.

aparición de la primera fisura transversal en la probeta; en las probetas con recubrimiento 2 y 3 veces el diámetro de la barra, tras ese punto, aparece una zona sensiblemente horizontal con "dientes de sierra"; se ha podido comprobar durante los ensayos que cada "diente de sierra" se corresponde con la propagación inestable de una de las grietas transversales que aparecen en la probeta. Una vez que se han propagado todas las grietas transversales la rigidez tangente de la probeta es prácticamente la de la barra exenta. La dispersión de resultados ha sido muy pequeña.

Las Figuras 6 a y b representan las curvas carga P frente al deslizamiento relativo de la barra respecto de la cara de hormigón, para las caras superior e inferior, respecti-

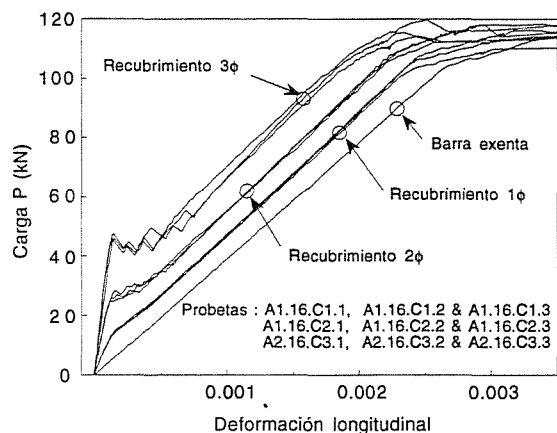


Figura 5. Curvas experimentales carga P frente a la deformación longitudinal de la probeta, medida entre las caras superior e inferior del prisma de hormigón, para probetas de diámetro de barra de 16 mm y recubrimientos 1, 2 y 3 veces el diámetro de la barra.

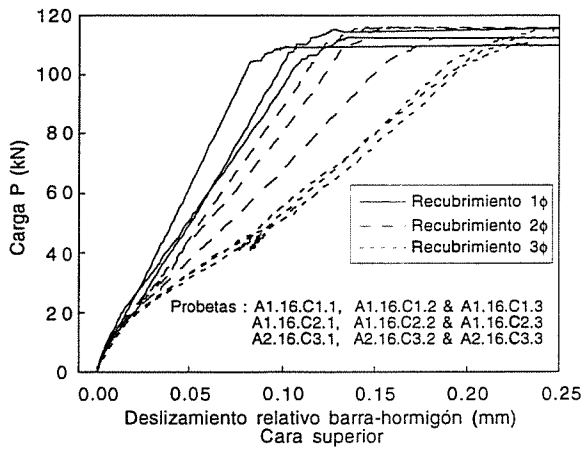


Figura 6 a. Curvas experimentales carga P frente al deslizamiento relativo de la barra respecto de la cara superior del prisma de hormigón, para probetas de diámetro de barra de 16 mm y recubrimientos 1, 2 y 3 veces el diámetro de la barra.

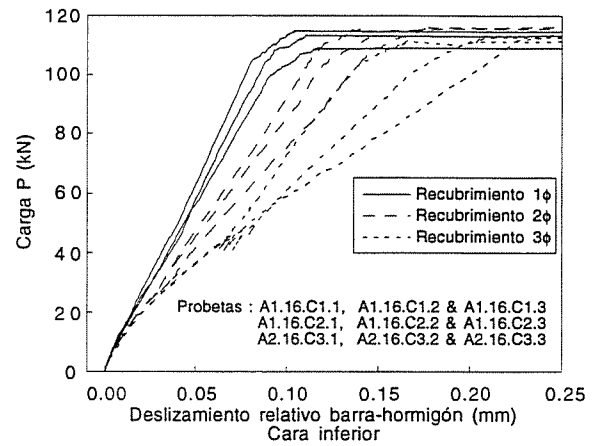


Figura 6 b. Curvas experimentales carga P frente al deslizamiento relativo de la barra respecto de la cara inferior del prisma de hormigón, para probetas de diámetro de barra de 16 mm y recubrimientos 1, 2 y 3 veces el diámetro de la barra.

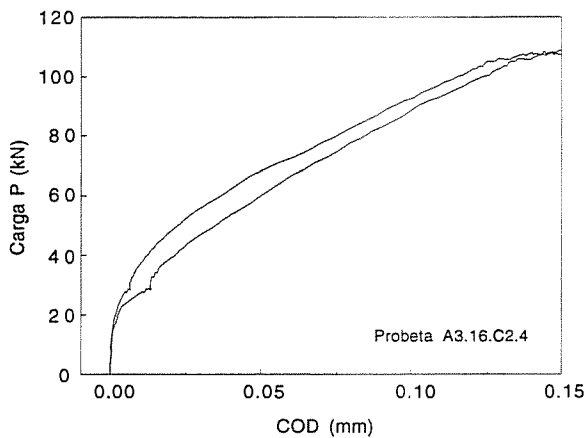


Figura 7. Curvas experimentales carga P frente a la apertura de las grietas radiales, medidas en la cara superior del prisma de hormigón, para la probeta A3.16.C2.4

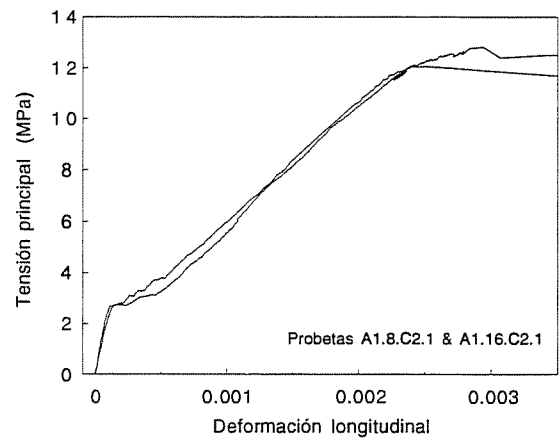


Figura 8. Curvas experimentales tensión principal de tracción frente a la deformación longitudinal de la probeta, medida entre las caras superior e inferior del prisma de hormigón, para probetas de diámetro de barra 8 y 16 mm y recubrimiento de hormigón 2 veces el diámetro de la barra.

vamente, de las probetas con barra de diámetro 16 mm y recubrimientos de hormigón 1, 2 y 3 veces el diámetro de la barra. La parte inicial de la curva es muy parecida para los tres recubrimientos, pero a medida que se propagan las grietas transversales se produce una liberación de tensiones en el hormigón que produce una disminución del deslizamiento relativo entre la barra y el hormigón que la embebe; esto explica que las curvas correspondientes a los recubrimientos mayores sean más tendidas que las que corresponden a los recubrimientos menores.

La Figura 7 representa las curvas carga P frente a apertura de las grietas radiales, medida en la cara superior de las probetas, de la probeta A3.16.C2.4 (diámetro de barra 16 mm y recubrimiento de hormigón

2 veces el diámetro de la barra). La parte inicial de la curva corresponde a la deformación elástica del hormigón, antes de producirse la grieta; el punto de quiebro que presenta la curva coincide sensiblemente con la carga en la que aparece la primera fisura transversal (28 kN, aproximadamente).

Resultados análogos se han obtenido para las probetas con barras de diámetro 8 mm; en este caso las especificaciones del Round Robin [4] sólo pedían ensayos para probetas con un recubrimiento de 2 veces el diámetro de la barra. La Figura 8 presenta las curvas tensión principal de tracción frente a la deformación medida entre las caras superior e inferior de la probeta para las probetas con recubrimiento 2 veces el diámetro de la barra y diámetros de barra 8 y 16 mm; como puede

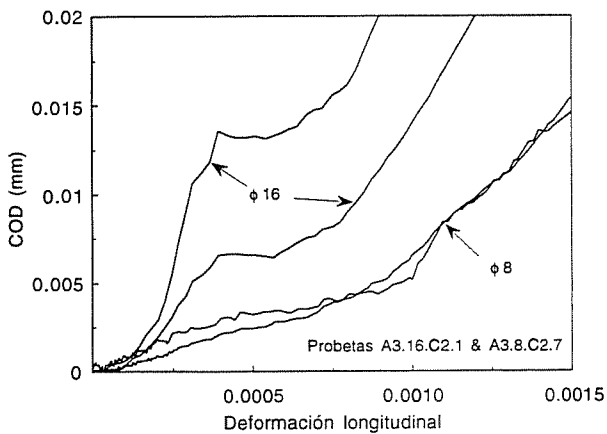


Figura 9. Curvas experimentales de apertura de las grietas radiales frente a la deformación longitudinal de la probeta (medida entre las caras superior e inferior del prisma de hormigón), para probetas de diámetro de barra 8 y 16 mm y recubrimiento de hormigón 2 veces el diámetro de la barra.

observarse los resultados son muy parecidos y en ambos casos aparece un punto con una fuerte caída de la rigidez de la probeta por fisuración del hormigón.

La Figura 9 presenta las curvas apertura de las fisuras radiales frente a la deformación de la probeta medida entre las caras superior e inferior de la probeta para las probetas con barras de diámetros 8 y 16 mm y recubrimientos de hormigón 2 veces el diámetro de la barra.

La Figura 10 presenta el mapa de fisuras de una de las probetas tras finalizar el ensayo. Las fisuras transversales son sensiblemente equidistantes y perpendiculares a la dirección de la tensión principal de tracción. Las fisuras radiales se han propagado según las direcciones de menor distancia a las superficies libres de las caras de la probeta, desde la barra hacia fuera. En las grietas radiales el frente de grieta se propaga desde las caras superior e inferior hacia el interior de la probeta; este aspecto es importante porque dificulta la modelización de la propagación de las grietas mediante un modelo bidimensional.



Figura 10. Mapa de fisuras de una probeta tras finalizar el ensayo.

5. CONCLUSIONES

De los ensayos realizados y de los resultados obtenidos se puede concluir:

- Se ha obtenido una colección completa de ensayos de propagación de grietas en probetas de hormigón con una barra embebida sometida a tracción. Los ensayos se han realizado con 2 diámetros de barra y 3 recubrimientos de hormigón. La dispersión experimental es pequeña y sirven de contraste para la verificación de modelos analíticos y numéricos.
- Se presenta una importante pérdida de rigidez en la probeta como consecuencia de la aparición de la primera grieta transversal. Las grietas transversales se propagan de forma inestable una a una, desarrollándose primero las de la parte superior de la probeta y después las de la parte inferior. Las grietas transversales son equidistantes y perpendiculares a la dirección de la barra. Una vez que se han propagado todas las grietas transversales, la rigidez de la probeta es prácticamente igual a la de la barra exenta.
- Las grietas radiales inician su desarrollo en las caras superior e inferior del prisma de hormigón, creciendo el frente de grieta desde los extremos (bases del prisma) hacia la sección central de la probeta. Las grietas radiales se detienen al ver cortado su avance por la grieta transversal más cercana.
- La aparición de las grietas transversales y radiales es prácticamente simultánea.

6. REFERENCIAS

- Goto, Yukimasa, "Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars", ACI Journal, Vol 68, pp. 244-251, (1971).
- Gerstle, W.H., Ingraffea, A.R., "Does Bond-Slip Exits?", Micromechanics of Failure of Quasi-Brittle Materials, Proc. Internat. Conference, New Mexico, (1991).

- [3] CEB (Comite Euro International du Beton) "Bond in Concrete" (Vol I) , Proc. of Intern. Conf., Riga, (1992).
- [4] RILEM TC 147-FMB, "Round Robin Analysis and Test on Bond-Invitation", (1995).

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología y a la Dirección General de Investigación Científica y Técnica la financiación de este trabajo a través de los proyectos MAT94-0120-003 y PB 93-0031; a la empresa Portland-Valderribas el suministro de cemento a granel para la elaboración de las probetas; a la empresa Aceros para la Construcción el suministro de las barras de acero y a la empresa CELSA el análisis químico de las barras de acero.