

FRACTURA EN MODO MIXTO DE PROBETAS DE HORMIGÓN CON DOBLE ENTALLA BAJO SOLICITACIÓN DE COMPRESIÓN: RESULTADOS EXPERIMENTALES

D.A. Cendón^{*}, J.C. Gálvez^{**}, J. Planas^{*}, M. Elices^{*}

^{*}Universidad Politécnica de Madrid
Departamento de Ciencia de Materiales
E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. c/ Prof. Aranguren s/n, 28040 Madrid

^{**}Universidad de Castilla la Mancha
Departamento de Ciencia de Materiales
E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos.
Edificio Fermín Caballero, Paseo de la Universidad 4, 13071 Ciudad Real

Resumen. Este trabajo presenta el resumen de una campaña experimental realizada para estudiar la fractura del hormigón en modo mixto. Se emplea un tipo de probeta recientemente propuesto en el que, según algunos autores, se pueden propagar fisuras de hormigón en modo II (fisuración bajo tensiones tangenciales exclusivamente). Durante los ensayos se ha realizado un análisis exhaustivo de las fisuras que aparecen en las probetas, que ha permitido identificar la presencia de grietas de tracción y compresión. Además, para estudiar la trayectoria de la grietas de tracción, se ha realizado un conjunto de ensayos sobre probetas de polimetilmetacrilato (PMMA). Los resultados de la experimentación permiten concluir que las fisuras no se propagan bajo modo II, sino bajo modo I local (tensiones de tracción únicamente), tanto en el hormigón como en el PMMA. Se ha comprobado que la trayectoria de las grietas proporcionada por la fractura elástica lineal constituye una aproximación adecuada de las trayectorias de fisura en materiales cuasifrágiles.

Abstract. This paper is a summary of an experimental benchmark made to study mixed mode fracture of concrete. A novel kind of specimen is used which, following some researchers, is able to propagate cracks under mode II (cracking under shear stresses only). In order to prove this, an exhaustive analysis of the appearing cracks has been made. It was concluded that cracking and crushing cracks appeared in the tests. To study the crack paths, polymethyl-methacrylate (PMMA) specimens have been also tested. From these results, is concluded that in this kind of test, cracks are propagated under local mode I conditions (tensile stresses only) instead of mode II conditions. Anyway, a good correlation between linear elastic crack trajectories and quasifragile materials trajectories has been found.

1. INTRODUCCIÓN

La fractura del hormigón en modo I (bajo solicitación de tracción) está relativamente bien caracterizada, pero no puede decirse lo mismo de la fractura en modo II (solicitación de cortante). La principal dificultad radica en la inexistencia de una técnica experimental fiable para propagar fisuras en hormigón en modo II puro.

Se han propuesto muchas geometrías, por ejemplo las presentadas en [1-3], pero después de estudiarlas con detalle, se ha concluido que en todas ellas la grieta se propaga bajo un modo I predominante.

En los últimos años, una nueva geometría ha sido propuesta por Reinhardt y sus colaboradores [4, 5]: la probeta de hormigón de doble entalla solicitada a compresión. Esta geometría se basa en la solución dada por Tada [6] al problema de una placa infinita con dos grietas semiinfinitas como se muestra en la figura 1.

Este tipo de probeta ha sido utilizado para el estudio del modo II en materiales como la madera [7]. Sin embargo la madera es un material claramente anisótropo, mientras que el hormigón es isótropo. De esta manera, su aplicación al estudio del modo II en hormigón no es inmediata.

Los primeros estudios realizados sobre este tipo de probetas han llevado a conclusiones distintas según los autores. Mientras Reinhardt [5] y Cedolin [8] sostienen que las probetas presentan fisuración en modo II y que, por tanto, permiten medir la energía de fractura en modo II, di Prisco [9] afirma que la fisuración se produce bajo un modo I predominante.

Aparentemente, el motivo de la discrepancia reside en la identificación de las fisuras que aparecen en el hormigón, ya que además de la fisuración que se propaga a partir de las entallas, las altas compresiones en la mitad de la probeta cargada, motivan la aparición de fisuras de compresión cuando

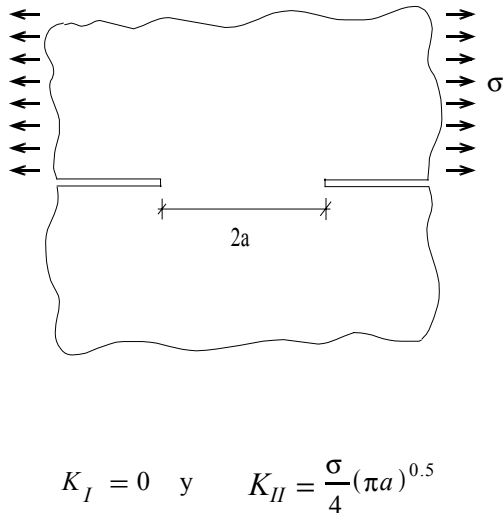


Figura 1. Problema de la placa infinita con doble grieta semiinfinita, y su solución según Tada et al [6].

la probeta está cerca del colapso.

En el presente trabajo se han ensayado probetas de doble entalla de tres tamaños homotéticos, fabricadas con hormigón. Durante los ensayos se ha monitorizado la propagación de fisuras a partir de la punta de la entalla, a fin de caracterizarlas y distinguirlas de las fisuras generadas por la compresión. Paralelamente se han realizado ensayos sobre probetas de PMMA, material también isótropo, pero con comportamiento casi elástico y lineal.

Los resultados experimentales permiten concluir que, aparte de la fisuración por compresión, en las fisuras propagadas a partir del ligamento, el modo I es dominante sobre el modo II.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS PROBETAS

2.1 Probetas de hormigón

Las probetas se confeccionaron a partir de una única amasada de hormigón. La ref^a [3] recoge los detalles relativos a la composición.

Las probetas se obtuvieron mediante corte a partir de prismas de hormigón de dimensiones mayores y espesor 50 mm. Dichos prismas se mantuvieron sumergidos en agua con cal a temperatura ambiente de laboratorio hasta el momento del corte, una vez realizado se volvieron a sumergir en agua hasta el momento de su ensayo. El corte de las probetas, incluidas las entallas, se hizo por vía húmeda con sierra circular de diamante a baja velocidad. Las entallas resultantes tenían 2 mm de espesor. La figura 2 muestra la geometría de las probetas.

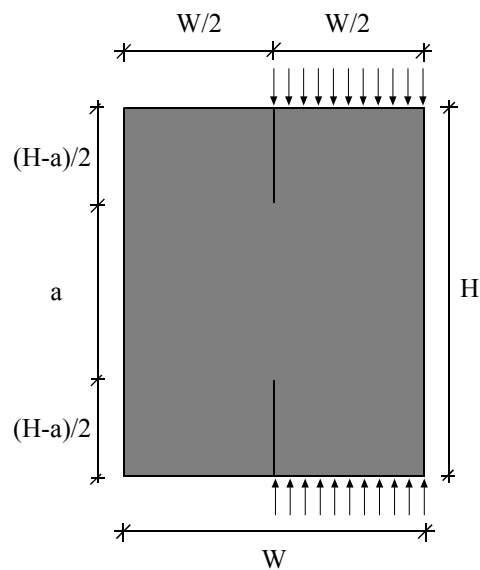


Figura 2. Geometría de las probetas compactas de doble entalla.

Puede apreciarse la similitud entre la geometría ensayada (figura 2), con dimensiones finitas, y la geometría presentada por Tada (figura 1), con dimensiones infinitas. La aplicación de una tensión de compresión en lugar de tracción se debe a que el signo de las tensiones tangenciales es irrelevante, y así el ensayo es más sencillo de realizar.

Se ensayaron probetas homotéticas de tres tamaños distintos. La nomenclatura, dimensiones y número de probetas ensayadas figuran en la tabla 1. El espesor de las probetas fue, para todos los tamaños, 50 mm.

Los valores medios de los ensayos de caracterización del hormigón (módulo de elasticidad, energía de fractura y resistencia a tracción y compresión) se muestran en la tabla 2.

Tabla 1. Denominación, dimensiones, material y número de probetas ensayadas.

Nombre	Material	Nº de probetas ensayadas	W (mm)	a (mm)	H (mm)
H75	Hormig.	3	56,25	37,5	75
H150	Hormig.	3	112,5	75,0	150
H300	Hormig.	3	225,0	150,0	300
PM75	PMMA	3	56,25	37,5	75

Tabla 2. Propiedades mecánicas medias del hormigón ensayado.

E (GPa)	G _f (N/m)	f _t (MPa)	f _c (MPa)
39	69	3,0	65

2.2 Probetas de PMMA

Se ensayó un solo tamaño probetas de metacrilato. Sus dimensiones y número figuran en la tabla 1. El espesor de las probetas fue 20 mm.

Dado que el PMMA es un material con un comportamiento en fractura asimilable a elástico y lineal, las entallas realizadas con sierra convencional no son equivalentes a fisuras desde el punto de vista matemático. Para conseguir una punta de entalla matemáticamente equivalente a una fisura, se ejecutaron las entallas en toda su longitud con una sierra de 1 mm de espesor, salvo los últimos 5 mm. Estos últimos 5 mm se realizaron presionando una cuchilla afilada contra el fondo de la entalla. Más detalles de esta técnica pueden encontrarse en [10].

No se realizaron ensayos de caracterización del PMMA utilizado, debido a que únicamente se buscaba estudiar las trayectorias de fisura. No obstante, más información acerca del material puede encontrarse en [11].

3. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

3.1 Dispositivo experimental

Los ensayos se llevaron a cabo con una máquina hidráulica servocontrolada, marca INSTRON, modelo 1275. Se empleó una rótula bloqueable, con el fin de aplicar la compresión uniformemente. La compresión se aplicó a la probeta a través de chapas de acero de 10 mm de espesor. En el contacto entre las chapas y la probeta se introdujo una fina lámina de teflón, con el fin de minimizar el rozamiento entre el acero y el PMMA.

Las probetas se instrumentaron mediante dos extensómetros, uno de ellos situado en el borde libre de la cara comprimida, y el otro situado en el borde de la cara descomprimida. La base de medida de ambos extensómetros era exactamente igual al ligamento de la probeta. La figura 3 muestra el dispositivo experimental utilizado.

Tal como se ha comentado en la introducción, uno de los principales objetivos de la presente investigación era el de distinguir entre las fisuras propagadas a partir de las entallas, y las fisuras de compresión. Para ello se emplearon dos técnicas diferentes: en una de las caras de las probetas se espolvoreó fluoresceína, mientras que la entalla inferior de la otra cara se filmó enfocando la punta de la entalla mediante el dispositivo óptico QUESTAR®.

La fluoresceína es un polvo que cambia de color en contacto con el agua. Dicho polvo se extendió sobre una de las caras previamente secada con un paño. Así, durante el transcurso del ensayo, al formarse las grietas, el agua contenida en el interior de las probetas salía al exterior, con lo cual las fisuras podían ser localizadas a

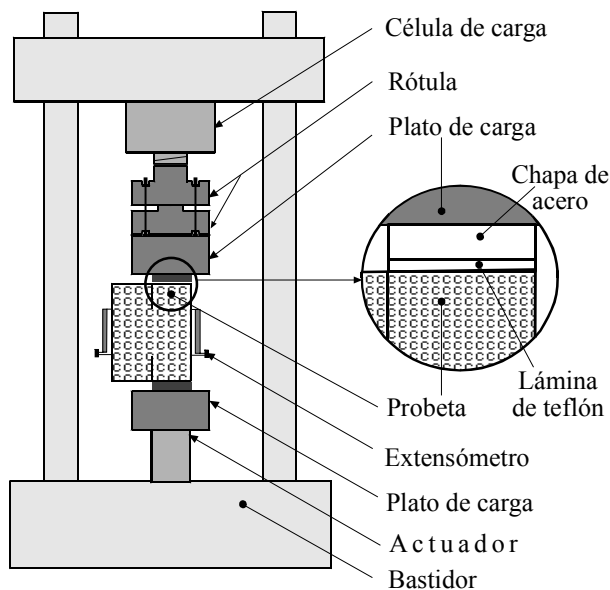


Figura 3. Croquis del dispositivo experimental mecánico. Detalle del contacto entre la chapa y el PMMA.

medida que aparecían y se propagaban.

El QUESTAR®, por su parte, es un dispositivo óptico que, acoplado a una cámara de adquisición de imágenes, permite amplificar las mismas. Con ayuda del QUESTAR® se enfocó la cámara a la punta de la entalla inferior de una de las caras de la probeta. De esta forma, el proceso de aparición y posterior propagación de las fisuras, pudo ser observado y grabado con un videocasete.

3.2 Procedimiento de ensayo en las probetas de hormigón

Las probetas se sacaron de la solución de agua con cal en el momento de su ensayo. Se secaron superficialmente con la ayuda de un paño y se espolvoreó la fluoresceína en una de sus caras. Posteriormente, se situaron en la máquina de ensayos y se colocaron los extensómetros. Con la rótula del actuador inicialmente libre, se aplicaba una pequeña compresión hasta que la chapa superior se acomodaba completamente sobre la probeta. En este instante se bloqueaba la rótula, y se comenzaba a aplicar carga sobre la probeta hasta el momento del colapso.

Los ensayos se realizaron con control del desplazamiento del pistón de aplicación de carga. La velocidad de descenso del pistón fue de 0,04 mm/min para las probetas pequeñas, 0,06 mm/min para las medianas y 0,08 mm/min para las probetas grandes.

Para el seguimiento de las fisuras propagadas desde el ligamento, al inicio del ensayo se enfocaba la cámara del QUESTAR® al entorno de la punta de la entalla. Según avanzaba el ensayo, la cara espolvoreada con fluoresceína era observada con atención hasta que se

localizaba una fisura. En este momento, se localizaba con precisión la fisura aparecida por medio del QUESTAR®, con el fin de registrarla en la videocasete. La razón de hacerlo así es porque la amplitud de campo del QUESTAR® es muy pequeña y, pese a comenzar el ensayo con el dispositivo enfocando a la punta de la fisura, la probabilidad de que la fisura comenzase justo en el punto donde se tenía enfocado el QUESTAR® era muy pequeña.

En los tramos finales del ensayo, la fluoresceína permitió también localizar y observar el desarrollo de las grietas formadas en el lado de compresión.

El ensayo se detenía cuando la probeta fallaba por rotura de la cara comprimida al agotar su resistencia a compresión.

3.3 Procedimiento de ensayo en las probetas de PMMA

Para las probetas confeccionadas en PMMA, se siguió exactamente el mismo procedimiento de ensayo que para las probetas de hormigón, sólo que en este caso no se utilizó ni la fluoresceína, ni el dispositivo QUESTAR® ya que, con las superficies pulidas, las fisuras son perfectamente visibles a simple vista en el PMMA.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Descripción de las fisuras propagadas en las probetas de hormigón

La fluoresceína permitió observar y caracterizar las fisuras de las probetas a medida que éstas fueron apareciendo y creciendo.

Durante el ensayo, en primer lugar aparecieron y se propagaron las fisuras desde la punta de la entalla hacia el lado descomprimido de la probeta. Estas fisuras se propagaron hasta que las compresiones en la mitad comprimida de la probeta fueron muy elevadas, momento en el cual comenzaron a aparecer fisuras de compresión en dicha zona. El QUESTAR® permitió observar como al aparecer las grietas de compresión las grietas de tracción se cerraban. Esto es debido a que al colapsar la parte comprimida de la probeta (aparición de las grietas de compresión) se producía una descarga de la probeta y por tanto disminuía la carga transmitida a la mitad de probeta no comprimida. Finalmente, la probeta fallaba por compresión de la mitad cargada, pudiendo visualizarse en la mayoría de las probetas ensayadas las típicas bandas de fallo por compresión.

La figura 4 muestra una secuencia de cuatro fotos en un mismo ensayo en orden creciente de carga. La fotografía 4a) muestra la aparición de las primeras fisuras de tracción partiendo de la entalla. Como puede verse, las fisuras surgen formando un ángulo apreciable con la entalla, buscando la orientación que propicia un modo I

local. En la figura 4b) se aprecia como, en un estado posterior del ensayo, con una mayor carga, aparece la primera fisura de compresión. Paralelamente puede observarse que respecto a la figura 4a) las fisuras de tracción han crecido apreciablemente. En la fotografía 4c) se aprecia que en la mitad de la probeta cargada, ha surgido una nueva fisura (muy pequeña) debida a la compresión. Es de destacar que las fisuras de tracción casi no han crecido. La figura 4d) muestra el estado final de la probeta. Se aprecia que las fisuras de tracción siguen apenas han crecido respecto a como estaban en la secuencia 4b), mientras que las fisuras de la zona comprimida se han desarrollado hasta romper la probeta.

4.2 Descripción de las fisuras propagadas en las probetas de PMMA

Las probetas de PMMA fueron ensayadas con el fin de comparar experimentalmente las trayectorias de fisura obtenidas en un material de comportamiento asimilable a elástico y lineal, como es el PMMA, con las trayectorias obtenidas en el hormigón.

La ventaja de utilizar PMMA es que, además de tener un comportamiento casi elástico y lineal en fisuración a tracción, permite ver las fisuras a simple vista si sus caras están pulidas. Además, el PMMA, frente a compresión elevada, colapsa plásticamente sin presentar fisuras de compresión. De esta forma, las únicas fisuras que se producen son fisuras de tracción.

La figura 5 muestra una secuencia de cuatro fotos durante el ensayo de una probeta de PMMA. La figura 5a) muestra la probeta al inicio del ensayo. Las figuras 5b) a 5d) muestran cómo crecen las grietas de tracción durante el ensayo. Finalmente la zona comprimida falla por colapso plástico sin aparición de grietas.

4.3 Comparación entre las trayectorias de las fisuras de las probetas de hormigón y las de PMMA

Las probetas ensayadas de PMMA y las de tamaño pequeño de hormigón (H75) tienen iguales dimensiones (salvo el espesor). En trabajos anteriores [12,13] los autores han comprobado que las trayectorias numéricas proporcionadas por la fractura elástica lineal son una buena aproximación de las trayectorias experimentalmente obtenidas en materiales cuasifrágiles como el hormigón. Para comprobarlo experimentalmente, se han comparado las trayectorias de fisura obtenidas en las probetas de PMMA, con las trayectorias obtenidas en las probetas de hormigón de menor tamaño.

En la figura 6 puede apreciarse la concordancia entre las fisuras de tracción obtenidas en las probetas de hormigón y las obtenidas en las probetas de PMMA. En esta figura, dada la simetría de las probetas respecto a su plano medio horizontal, se han representado las fisuras de la entalla superior junto con las de la entalla inferior, arrancando desde ésta última.

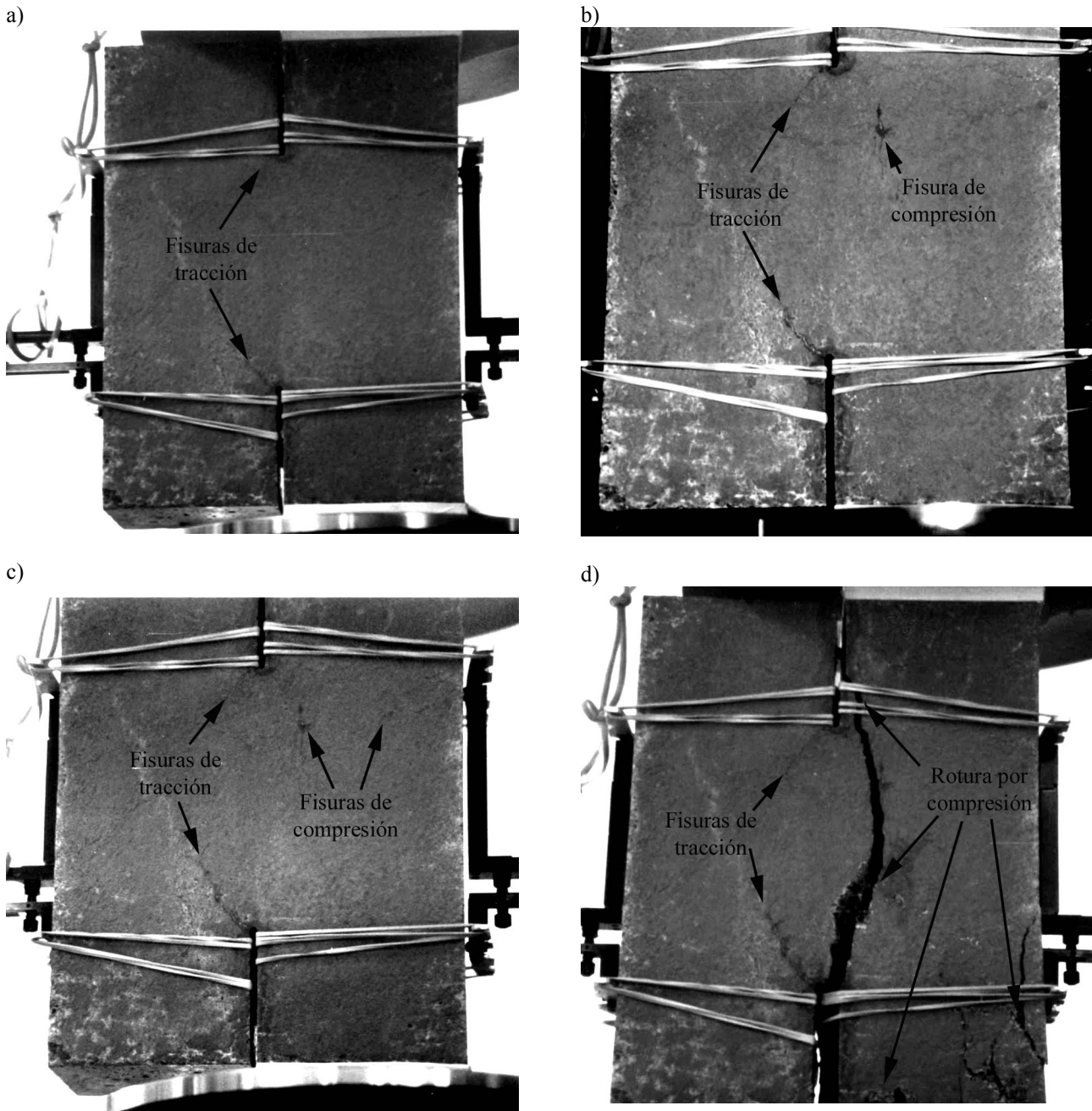


Figura 4. Secuencia de cuatro fotos de la cara espolvoreada con fluoresceína en el ensayo de una probeta de hormigón: a) aparición de las primeras fisuras de tracción, b) aparición de la primera fisura de compresión, c) aparición más fisuras de compresión, d) colapso y estado final de la probeta (las fisuras de tracción apenas han avanzado, mientras que en la zona de compresión se ha roto la probeta formando el equivalente al cono de rotura de las probetas cilíndricas).

4.4 Resultados experimentales de las probetas de hormigón

Como se ha señalado anteriormente, durante los ensayos de las probetas de hormigón se registraron la carga aplicada, el desplazamiento del extensómetro acoplado en el borde de la cara descargada, y el desplazamiento del extensómetro del borde de la carga comprimida.

La figura 7 se muestran los registros experimentales de la carga aplicada frente al desplazamiento de ambos extensómetros, para los 3 tamaños de hormigón ensayados.

Las figuras 7b), 7d) y 7f) muestran los registros de la carga aplicada frente a la lectura del extensómetro comprimido, para los tamaños de probeta pequeño, mediano y grande, respectivamente. En todas ellas se aprecia una zona inicial aproximadamente recta, hasta

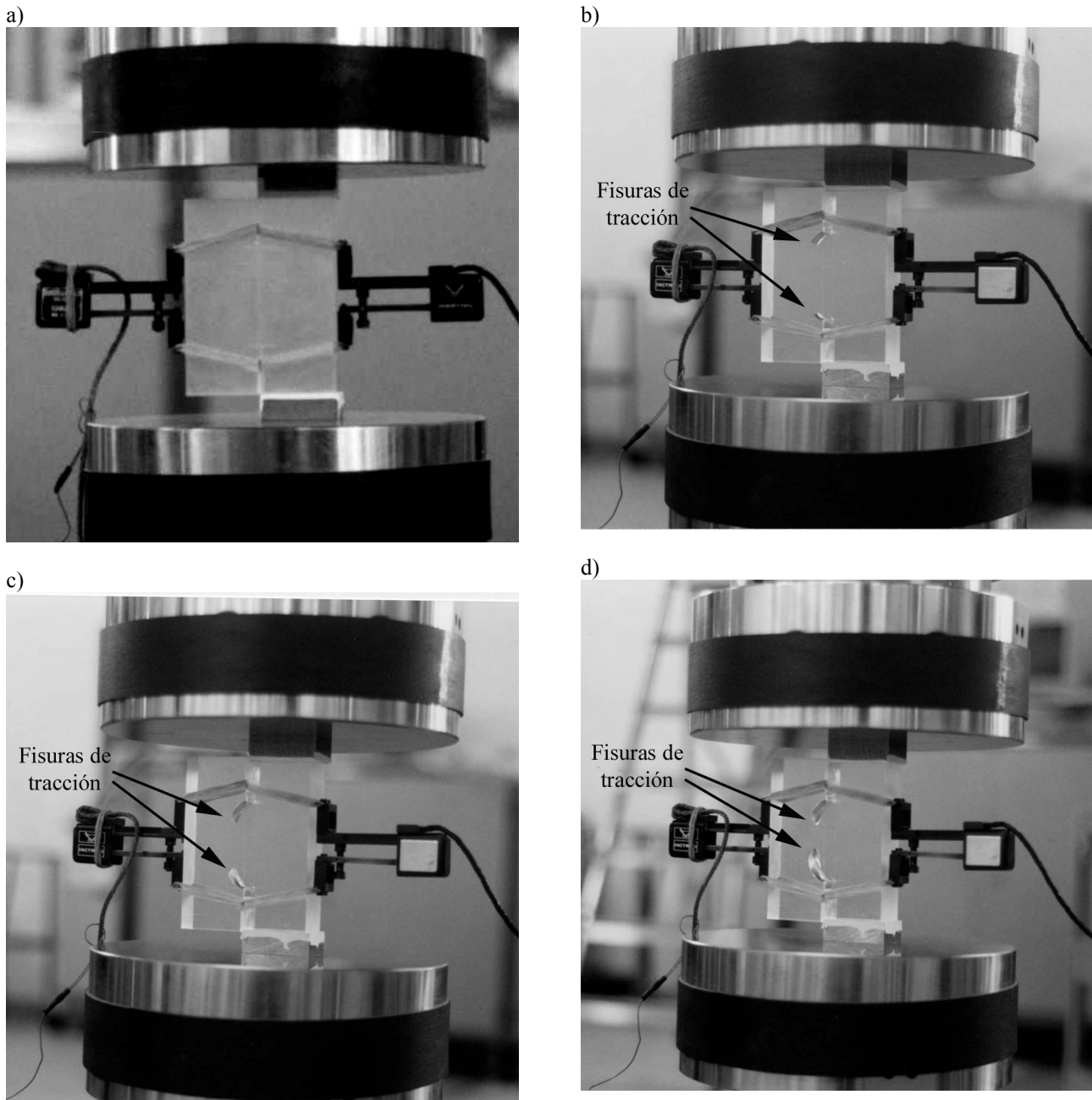


Figura 5. Secuencia de cuatro fotos del ensayo de una probeta de PMMA: a) inicio del ensayo, b) la carga aumenta y las fisuras de tracción son perfectamente visibles, c) las fisuras de tracción están mucho más desarrolladas, d) estado final del ensayo con las fisuras de tracción muy desarrolladas. Puede observarse que en la zona comprimida de la probeta no se observa la aparición de ninguna fisura.

que se alcanza un cierto límite pasado el cual se pone de manifiesto una marcada no-linealidad.

Las curvas 7a), 7c) y 7e) muestran los registros de la carga aplicada frente a la lectura del extensómetro situado en el lado descargado, para los tamaños de probeta pequeño, mediano y grande, respectivamente. En todos los tamaños se observa cómo las curvas muestran inicialmente un crecimiento hacia valores positivos que va siendo cada vez menor hasta que, pasa-

do cierto punto, se convierte en un decrecimiento hacia valores de desplazamiento nulos. Esto indica que, a medida que crece la carga en la parte comprimida de la probeta, se produce un alargamiento del lado descargado donde está acoplado el extensómetro, hasta el momento en que parecen las grietas de tracción. A partir de ese momento, y a medida que crecen las grietas de tracción, el lado al que no se aplica la carga se va relajando y tiende a recuperar la forma inicial, de ahí que la lectura del extensómetro situado en ese lado tienda hacia valores del desplazamiento nulos.

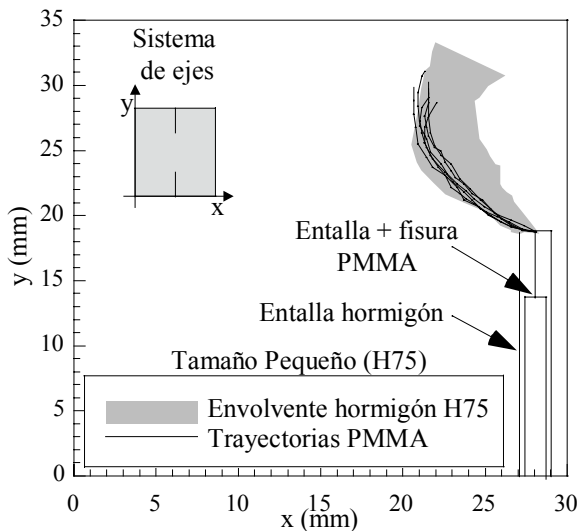


Figura 6. Comparación de las trayectorias de las fisuras de tracción obtenidas en los ensayos de las probetas de PMMA y las probetas pequeñas (H75) de hormigón.

5. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en la campaña experimental, se puede concluir:

- Las probetas compactas de doble entalla de hormigón, presentan dos tipos de fisura completamente diferenciados: fisuras de tracción, que aparecen en primer lugar; y fisuras de compresión, que aparecen en el tramo final de los ensayos. En materiales que no son frágiles, como el PMMA, únicamente aparecen las fisuras de tracción.
- Las fisuras de tracción se inician formando un cierto ángulo con respecto a la fisura/entalla inicial, alejándose del ligamento (entendiendo por éste a la línea que une las entallas iniciales) a medida que se propagan. Parece claro, por tanto, que dichas fisuras se producen bajo un modo I local dominante, en contra de la opinión de algunos autores que sostienen que la propagación se produce a lo largo del ligamento, gobernada por un modo II puro.
- Experimentalmente se comprueba que las trayectorias de fisura obtenidas en materiales con comportamiento asimilable al elástico y lineal, son casi iguales a las obtenidas en un material cuasifrágil como el hormigón.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Educación y Cultura la Beca FPI concedida a D. David Angel Cendón Franco), a la DGES, a la CICYT y a la JJ.CC. de Castilla La Mancha las ayudas económicas

concedidas a través de los proyectos PB97-0579, 1FD-1641 y NC4/2000, respectivamente.

7. REFERENCIAS

- Iosipescu, N. "New accurate procedure for single shear testing of metals", *Journal of Materials*, 2, 537-566 (1967).
- Bazant, Z. P. y Pfeiffer, P. A. "Shear fracture tests of concrete", *Materials and Structures*, 19, 111-121 (1986).
- Gálvez, J.C., Planas, J. y Elices, M. "Propagación de grietas en modo mixto en vigas de hormigón", *Anales de Mecánica de la Fractura*, 14, 480-485 (1997).
- Reinhardt, H., Ozbolt, J., Xu, S. y Dinku, A. "Shear of structural concrete members and pure mode II testing ", *Adv. Cement Based Mat.*, 5, 75-85 (1997).
- Reinhardt, H. y Xu, S. "Experimental determination of K_{IIc} of normal strength concrete", *Materials and Structures*, 31, 296-302 (1997).
- Tada, H., Paris, P. e Irwin, G. "The Stress Analysis of Cracks Handbook ", 2nd ed., Paris Productions Incorporated, St. Louis, p. 4.13, (1985).
- Xu, S., Reinhardt, H. y Gappoev, M. "Mode II fracture testing method for highly orthotropic materials like wood", *International Journal of Fracture*, 75, 185-214 (1996).
- Cedolin, L., Bisi, G. y Nardello, P. A. "Mode II fracture resistance of concrete", *Concrete Science and Engineering, RILEM*, 1, 1-9 (1999).
- di Prisco, M. Y Ferrar, L. "On the evaluation of mode II fracture energy in high strength concrete", *Computational Modelling of Concrete Structures*, de Borst et al. (editores), Balkema, 409-418 (1998).
- Chi-Kwai Lau. "Fractura del Polimetilmetacrilato (PMMA)", Tesis Doctoral, UPM (1992).
- Gómez, F. J. "Un criterio de rotura en sólidos entallados", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid (1998).
- Cendón, D.A., Gálvez, J.C., Planas, J. y Elices, M. "Fractura del hormigón en modo mixto: resultados experimentales y predicción numérica", *Anales de Mecánica de la Fractura*, 15, 169-174 (1998).
- Gálvez, J.C., Cervenka, J., Saouma, V. y Cendón, D.A. "A discrete crack approach to normal/shear cracking of concrete", *Cement and Concrete Research*, (enviado), (2000).

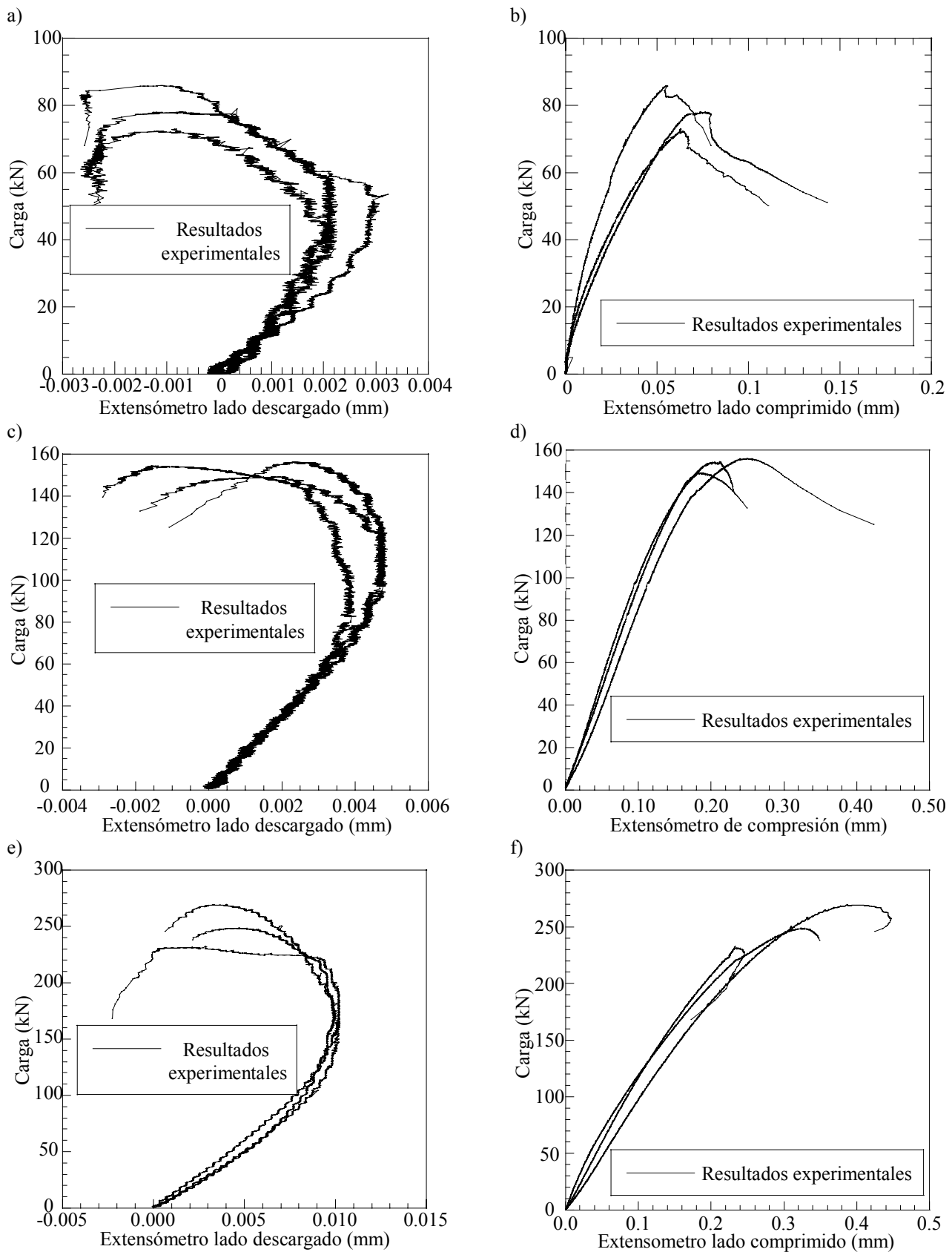


Figura 7. Registros de los ensayos de las probetas de hormigón: a), c) y e) carga aplicada frente a lectura del extensómetro de la zona descomprimida, para los tamaños pequeño (H75), mediano (H150) y grande (H300) respectivamente. b), d) y f) carga aplicada frente a lectura del extensómetro de la zona comprimida, para los tamaños pequeño (H75), mediano (H150) y grande (H300) respectivamente.