

## FRACTURA DEL HORMIGÓN EN MODO MIXTO: RESULTADOS EXPERIMENTALES Y PREDICCIÓN NUMÉRICA

D.A. Cendón, J.C. 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.** En el presente trabajo se presenta una nueva modalidad de ensayos para la propagación de grietas en modo mixto en hormigón: el ensayo de flexión en cuatro puntos sobre vigas entalladas, bajo la acción de dos actuadores independientes. Frente a los ensayos clásicos, esta tipología permite cargas no proporcionales y la modificación de las trayectorias de fisura cambiando la sollicitación de uno de los actuadores. Aquí se presentan distintas trayectorias de fisuras experimentales, ensayadas en modo mixto bajo cargas no proporcionales, junto con sus correspondientes curvas carga-CMOD y carga-desplazamiento. Los ensayos se han realizado para tres tamaños de probetas homotéticas. Estos resultados son de gran interés para verificar la validez y exactitud de programas de simulación numérica de fractura en modo mixto. Los programas deberían ser capaces de predecir la trayectoria de la fisura y una gran cantidad de datos experimentales complementarios para tres tamaños de probetas distintos. Finalmente, el modelo de fisura cohesiva ha sido incorporado a un programa de elementos finitos con resultados satisfactorios.

**Abstract.** A novel testing procedure for mixed crack propagation in concrete is presented: four-point bending of notched beams under the action of two independent force actuators. In contrast to classical procedures, this method allows non-proportional loading and crack trajectory modifications by changing the action of one actuator. Different experimental crack trajectories, under mixed mode and non-proportional loading, are presented together with the corresponding curves of load-CMOD and load-displacement. The tests have been developed for three sizes of geometrically similar beams. These results are very useful for checking the accuracy of mixed mode propagation numerical programs. The programs should predict the crack trajectory and a very complete group of experimental records for three different sizes of beam. The Cohesive Crack Model is incorporated into a finite element method with satisfactory results.

### 1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha realizado un importante esfuerzo de investigación de la fractura del hormigón en modo mixto I/II con objeto de desarrollar herramientas analíticas y numéricas capaces de predecir la nucleación y propagación de grietas en el hormigón.

Como se ha puesto de manifiesto [1-3] no hay un *banco de pruebas* adecuado que permita verificar de forma fiable los modelos numéricos y analíticos que se desarrollen. En [2] se presentó un conjunto de resultados experimentales, basado en la propagación de grietas en modo mixto en vigas de hormigón bajo la acción de dos actuadores independientes. Esto permitió

la aplicación de cargas no proporcionales y la modificación de las trayectorias de las grietas.

En el presente trabajo se presenta un modelo numérico que permite predecir la trayectoria de las grietas en modo mixto I/II en el hormigón y los registros experimentales carga-CMOD y carga-desplazamiento. El modelo es una extensión del modelo de la fisura cohesiva [4] a la fractura del hormigón en modo mixto.

### 2. RESUMEN DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL

La Figura 1 muestra la geometría y disposición de los ensayos realizados. Se adoptaron dos tipos de ensayos

con el fin de obtener trayectorias de fisuras muy distintas:

Tipo 1: Flexión en tres puntos de una viga entallada bajo carga no simétrica.

Tipo 2: Flexión en cuatro puntos de una viga entallada bajo carga no simétrica y desplazamiento impedido de un extremo (punto B).

Los detalles correspondientes a la confección, curado y preparación de las probetas se describen en [1]. Se confeccionaron cinco amasadas idénticas. Las dimensiones y número de probetas de cada amasada se detallan en la Tabla 1. Las propiedades mecánicas del material ensayado se detallan en la Tabla 2.

Los ensayos fueron realizados en control de CMOD a una velocidad de 0.004 mm/min hasta el 40 % de la carga máxima en la rama de descarga y 0.08 mm/min desde ese instante hasta el final del ensayo. En los ensayos tipo 2 se impidió el desplazamiento del punto B. En [1] se recogen los detalles relativos a las máquinas de ensayos y la instrumentación empleada en la investigación.

Tabla 1. Dimensiones y número de probetas por amasada.

	$D$ (mm)	$L$ (mm)	$B$ (mm)	Nº probetas	Objetivo
$D1$	75	340	50	8	PM y MM
$D2$	150	675	50	4	MM
$D3$	300	1350	50	2	MM

$D$ : Canto,  $L$ : Longitud,  $B$ : Espesor

PM: Propiedades mecánicas; MM: Ensayos modo mixto

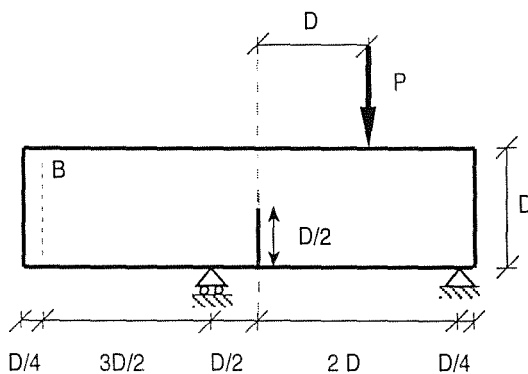


Fig. 1a. Geometría y disposición de los apoyos en los ensayos *tipo 1*, con los movimientos verticales del punto B libres (cargas proporcionales).

### 3. LA FISURA COHESIVA EN MODO MIXTO

El modelo de fisura cohesiva se ha incorporado a un código de elementos finitos. Los pasos importantes del proceso son: determinación de la trayectoria de la grieta para cada tamaño de probeta y tipo de ensayo, e incorporación de la fisura cohesiva en el camino de grieta calculado.

La trayectoria de la fisura se ha calculado mediante el criterio de la tensión principal máxima. La predicción numérica se ha hecho con el código FRANC2D [5].

El modelo de fisura cohesiva se ha incorporado mediante cien muelles de comportamiento no lineal para poder modelizar la curva de ablandamiento del hormigón. Estos muelles se posicionaron perpendicularmente a las trayectorias de las fisuras. Los cálculos se realizaron mediante el programa de elementos finitos ABAQUS®.

En los modelos de fisura cohesiva, la curva de ablandamiento del hormigón es un parámetro fundamental. Esta curva proporciona la relación entre la abertura de la fisura en un punto y la tensión transferida por el hormigón dañado, en ese mismo punto. Para la realización de este trabajo se ha

Tabla 2. Propiedades mecánicas del material ensayado.

Amasada	$f_{ck}$ (MPa)	$f_{ct}$ (MPa)	$G_c$ (N/m)	$E$ (GPa)
1	54	3.0	69	38
2	56	3.2	70	38
3	56	2.8	61	38
4	61	3.0	75	39
5	57	3.0	69	39

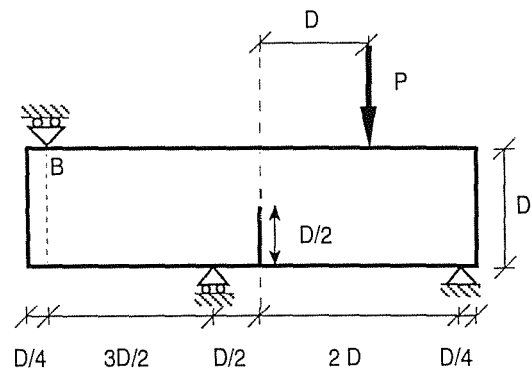


Fig. 1b. Geometría y disposición de los apoyos en los ensayos *tipo 2*, con los movimientos verticales del punto B impedidos (cargas no proporcionales).

utilizado una curva de ablandamiento bilineal cuyos parámetros se determinaron mediante el método de la *General Bilinear Fit*, desarrollado por Guinea et al. [6], utilizando los datos obtenidos en los ensayos de caracterización del hormigón sobre probetas de 75 mm de canto.

**4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y PREDICCIÓN NUMÉRICA**

La figura 2 muestra las envolventes experimentales de las trayectorias de fisura junto con la predicción numérica. Puede apreciarse que la aproximación de la predicción es bastante buena. Estos resultados indican

que utilizar trayectorias de fisuras obtenidas mediante un modelo elástico y lineal resulta una buena aproximación para el hormigón, a pesar de que su comportamiento en fractura es claramente no lineal. Con respecto a la predicción de las curvas carga-CMOD y carga-desplazamiento, las figuras 3 y 4 muestran la comparación entre las curvas obtenidas experimentalmente y las curvas obtenidas de la predicción numérica, utilizando el modelo de elementos finitos. Se puede observar que la predicción que se ha obtenido es, también, bastante buena, tanto para las curvas de carga-CMOD, como para las de carga-desplazamiento, especialmente para los tamaños pequeño ( $D=75$  mm) y mediano ( $D=150$  mm), con una buena aproximación del pico de carga e incluso de la

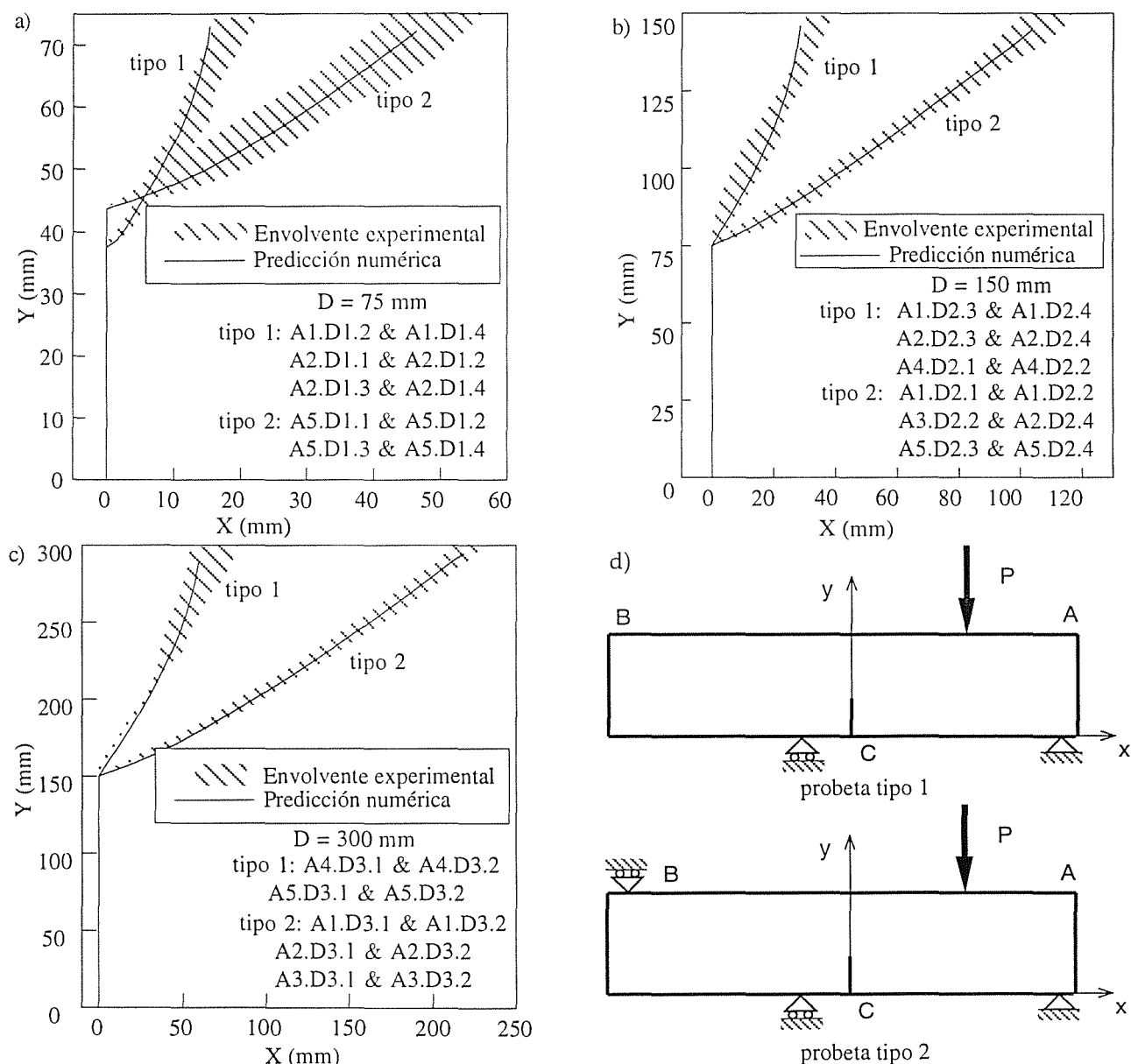


Fig. 2. Trayectorias de fisura experimentales y la correspondiente predicción numérica. (a) D=75 mm. (b) D=150 mm. (c) D=300 mm. (d) Ejes de referencia.

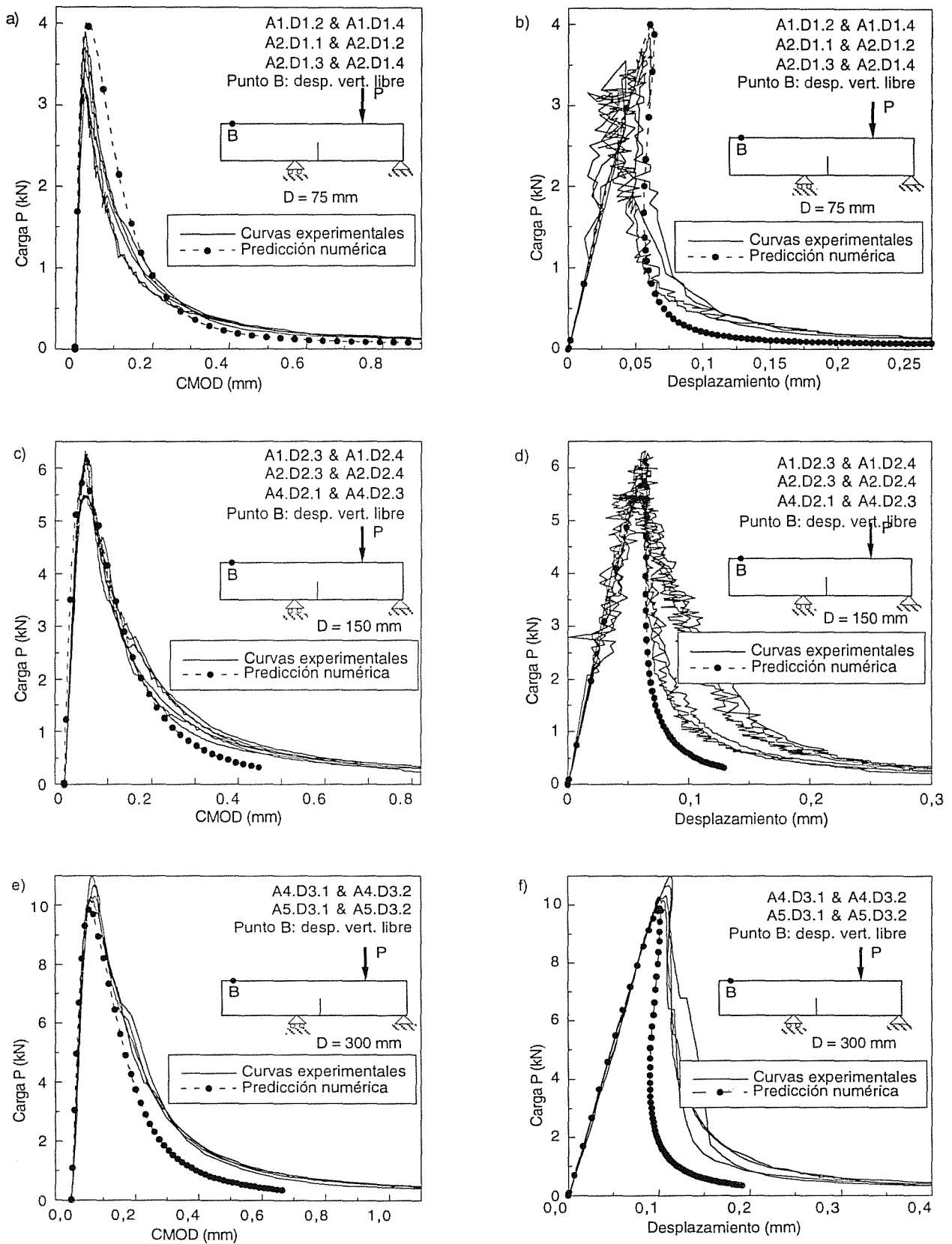


Fig. 3. Curvas carga-CMOD y carga-desplazamiento para los ensayos *tipo I*, en tamaños D1 (D=75 mm), D2 (D=150 mm) y D3 (D=300 mm).

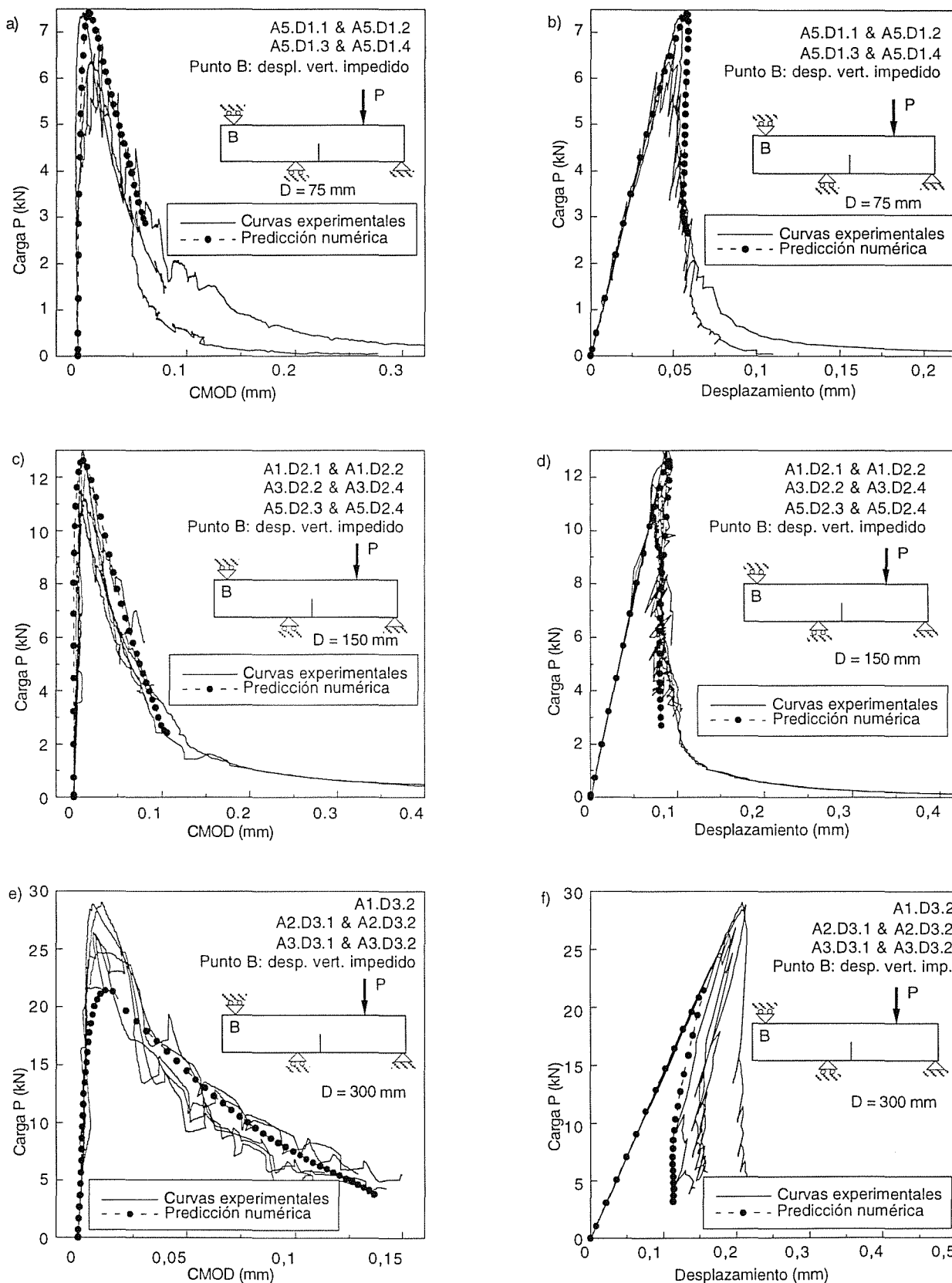


Fig. 4. Curvas carga-CMOD y carga-desplazamiento para los ensayos *tipo 2*, en tamaños D1 (D=75 mm), D2 (D=150 mm) y D3 (D=300 mm).

rama de descarga (post-pico). Para el tamaño grande ( $D=300$  mm) la aproximación no ha sido tan buena, quedando la predicción numérica por debajo de los resultados experimentales. Este resultado hace pensar que la energía de fractura de las probetas mayores ensayadas era mayor que la medida en las probetas pequeñas que se ensayaron para determinar la energía de fractura en modo I.

## 5. CONCLUSIONES

- a) Se ha verificado la validez de asumir la hipótesis de fractura elástica y lineal para predecir la trayectoria de fisura en hormigón, pese a ser su comportamiento en fractura claramente no lineal.
- b) El modelo de fisura cohesiva se ha implementado en la trayectoria de las fisuras por medio de muelles de comportamiento no lineal, sobre un modelo de hormigón de comportamiento elástico y lineal. La predicción numérica obtenida muestra una aproximación a los resultados experimentales bastante buena.

**Agradecimientos:** los autores agradecen a la empresa Portland Valderribas el suministro de cemento Portland I-55A a granel para la elaboración de las probetas, al Prof. A. Ingraffea, de la Universidad de Cornell por el uso del programa FRANC2D y a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT), por la financiación de este trabajo a través de los proyectos MAT 97-1022 y MAT 97-1007-C02-2.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Gálvez, J., Guinea, G.V. y Elices, M., "Fisuración del hormigón en modo mixto", *Anales de Mecánica de la Fractura* 13, 130-135 (1996)
- [2] Gálvez, J., 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)
- [3] Gálvez, J., Cendón D.A., Planas, J., Guinea, G.V. and Elices, M., "Fracture of concrete under mixed loading. Experimental results and numerical prediction", (para ser publicado en *Proc. Fracture Mechanics of Concrete Structures*, 3)
- [4] Hilleborg, A., Modéer, M. and Petersson, P., "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements", *Cement and Concrete Research* 6, 773-782 (1976)
- [5] FRANC2D: A Two-Dimensional Crack-Propagation Simulator, Version 2.7, P. Wawryzynek and A. Ingraffea.

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