

**PROPAGACION DE GRIETAS EN MODO MIXTO EN VIGAS DE HORMIGON****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.** El presente trabajo es un resumen de la investigación desarrollada sobre la propagación de grietas en modo mixto (tensiones de tracción y tangenciales en el fondo de la grieta) en vigas de hormigón en masa. Se han ensayado vigas a flexión entalladas, bajo la acción de cargas proporcionales y no proporcionales, y condiciones de contorno diferentes a fin de obtener una colección de ensayos con trayectorias de grietas muy distintas; los ensayos se han realizado para tres tamaños homotéticos de vigas. Además se ha verificado la validez de adoptar la trayectoria de fisura proporcionada por un modelo de fisura elástica y lineal, y se acompañan los resultados preliminares correspondientes a implementar un modelo de fisura cohesiva en dicha trayectoria.

**Abstract.** This paper is a summary of a research project in mixed mode fracture of unreinforced concrete beams. Notched concrete beams have been tested, in asymmetric three and four point bending, under proportional and non-proportional loading and different boundary conditions in order to get different crack trajectories; the tests have been developed for three homotetic sizes of beam. Besides, we have verified the validity of the linear elastic fracture crack trajectory for this cohesive material, and we show the preliminary results of a cohesive fracture model implemented on the linear elastic trajectory of the crack.

**1. INTRODUCCION**

En la actualidad no se dispone de una herramienta de cálculo para estudiar la propagación de grietas en modo mixto (tensiones de tracción y tangenciales en el fondo de la grieta) para materiales pétreos, morteros y hormigones; en estos materiales el empleo de los criterios de fractura elástica lineal suele conducir a soluciones del lado de la inseguridad.

En el campo experimental existen varias colecciones de ensayos de propagación de fisuras en modo mixto, pero los resultados que aportan no son suficientes para verificar y contrastar los modelos y programas que se desarrollen [1].

El objetivo de la investigación ha sido generar un conjunto de resultados experimentales estables y repetitivos para contrastar modelos analíticos y numéricos de propagación de fisuras en modo mixto en hormigón. Los resultados constituyen un banco de pruebas -hasta ahora inexistente- para los modelos

numéricos que se desarrollen. Además, se ha verificado la validez de suponer que la trayectoria de la grieta coincide con la predicha por la fractura elástica lineal y se presentan los resultados preliminares correspondientes a implementar un modelo de fisura cohesiva con dicha trayectoria.

**2. DESCRIPCION DE LAS PROBETAS**

Se han confeccionado probetas de 5 amasadas de hormigón. La *Tabla 1* presenta las probetas prismáticas que componen cada amasada; además, en cada amasada, se confeccionaron 8 probetas cilíndricas de 75 mm de diámetro para la caracterización del material mediante ensayos de compresión uniaxial y de tracción indirecta (brasileño).

Los detalles correspondientes a la confección, curado y preparación de las probetas se encuentran en la ref. [1]. Las propiedades mecánicas del material empleado se detallan en la *Tabla 2*.

fractura (30 % respecto al aragonito monolítico), siendo los mecanismos iv) y v) los responsables del aumento de la tenacidad de fractura en más de un orden de magnitud. Ambos procesos son posibles gracias a la estructura de la componentes biológica y a la naturaleza de la intercara entre las componentes biológica e inorgánica, ya que se basan en la existencia de una fase muy deformable (componente biológica) unida muy estrechamente a la componente rígida.

#### 4. CONCLUSIONES

Los datos presentados en este resumen indican que los materiales biológicos presentan una gran variedad en cuanto a microestructuras y propiedades mecánicas, siendo una importante fuente de inspiración para la producción de nuevos materiales.

El actual interés se refleja en el acuñamiento de los términos *material biomimético* para referirse a materiales que reproduzcan la estructura de los biológicos y *material bioduplicado*, para el que además se fabrique siguiendo métodos que simulen los medios de producción encontrados en la naturaleza.

El camino que va a ser necesario seguir para poder copiar a la naturaleza va a ser largo y complicado, como se pone de manifiesto al estudiar el comportamiento del hilo de araña frente a la fractura, sin embargo los datos mostrados aquí indican que hay grandes recompensas al final de este camino.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la colaboración prestada por el Dr. Christopher Viney, Universidad de Oxford, (Gran Bretaña) en la realización de este trabajo.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

- [1]. Viney C., " Processing and microstructural control: lessons from natural materials", Mater. Sci. Eng. R, **10**, pp 187-236 (1993).
- [2]. "Biomaterials. Novel Materials from biological sources". Editado por D. Byrom. Stockton Press. N.Y. (1991), pp 18.
- [3]. "Introduction to protein structure", Branden C. y Tooze J., Garland Publishing Inc, N.Y. (1991) pp 15- 18.

[4]. Gosline J., Guerette P. y Ortlepp C., "Functional Design of spider's silk", SPIE Proceedings series volume 2716, pp 296-299 (1996).

[5]. Simmons A.H., Michal C.A. y Jelinski L.W., "Molecular orientation and two-component nature of the crystalline fraction of spider dragline silk", Science, **271**, pp 84-87 (1996).

[6]. Thiel B.L. y Viney C., "A non-periodic lattice model for crystals in *Nephila clavipes* major ampullate silk", MRS Bulletin, Septiembre 1995, pp 52-56.

[7]. Cunniff P.M., Fossy S.A., Auerbach M.A. y Song J.W., "Mechanical properties of Major Ampullate gland silk fibers extracted from *Nephila clavipes* spiders", en "Silk polymers. Materials Science and biotechnology", ACS Symposium series, **544**, pp 235-251, (1993).

[8]. Tirrell D.A., "Putting a new spin on spider silk", Science, **271**, pp 39 (1996).

[9]. "Mecánica de la fractura aplicada a sólidos elásticos bidimensionales", Elices M., Servicio de Publicaciones ETSI Caminos, Canales y Puertos (Madrid), pp 94 (1995).

[10]. *ibid* pp 93.

[11]. Sarikaya M. y Aksay I.A., "Nacre of abalone shell: a natural multifunctional nanolaminated ceramic-polymer composite material" en " Structure, cellular synthesis and assembly of biopolymers", Springer-Verlag, Berlin, pp 1-26 (1992).

[12]. Mann S., " Molecular recognition in biomineralization", Nature, **332**, pp 119-124 (1988).

[13]. Falini G., Albeck S., Weiner S. y Addadi L., "Control of aragonite or calcite polymorphism by mollusk shell macromolecules", Science, **271**, pp 67-69 (1996).

Tabla 3. Probetas ensayadas en modo mixto

| Probeta | Amasada | Canto <i>D</i><br>mm | Tipo de<br>ensayo | Observa-<br>ciones |
|---------|---------|----------------------|-------------------|--------------------|
| A1.D1.1 | 1       | 75                   | 1                 | Estable            |
| A1.D1.2 | 1       | 75                   | 1                 | Estable            |
| A1.D1.3 | 1       | 75                   | 2                 | Estable            |
| A1.D1.4 | 1       | 75                   | 1                 | Estable            |
| A1.D2.1 | 1       | 150                  | 2                 | Estable            |
| A1.D2.2 | 1       | 150                  | 2                 | Estable            |
| A1.D2.3 | 1       | 150                  | 1                 | Estable            |
| A1.D2.4 | 1       | 150                  | 1                 | Estable            |
| A1.D3.1 | 1       | 300                  | 2                 | Inestable          |
| A1.D3.2 | 1       | 300                  | 2                 | Estable            |
| A2.D1.1 | 2       | 75                   | 1                 | Estable            |
| A2.D1.2 | 2       | 75                   | 1                 | Estable            |
| A2.D1.3 | 2       | 75                   | 1                 | Estable            |
| A2.D1.4 | 2       | 75                   | 1                 | Estable            |
| A2.D2.1 | 2       | 150                  | 2                 | Inestable          |
| A2.D2.2 | 2       | 150                  | 2                 | Inestable          |
| A2.D2.3 | 2       | 150                  | 1                 | Estable            |
| A2.D2.4 | 2       | 150                  | 1                 | Estable            |
| A2.D3.1 | 2       | 300                  | 2                 | Estable            |
| A2.D3.2 | 2       | 300                  | 2                 | Estable            |
| A3.D2.1 | 3       | 150                  | 2                 | No válido          |
| A3.D2.2 | 3       | 150                  | 2                 | Estable            |
| A3.D2.3 | 3       | 150                  | 2                 | Estable            |
| A3.D2.4 | 3       | 150                  | 2                 | Estable            |
| A3.D3.1 | 3       | 300                  | 2                 | Estable            |
| A3.D3.2 | 3       | 300                  | 2                 | Estable            |
| A4.D2.1 | 4       | 150                  | 1                 | Estable            |
| A4.D2.2 | 4       | 150                  | 1                 | Estable            |
| A4.D2.3 | 4       | 150                  | 2                 | Estable            |
| A4.D2.4 | 4       | 150                  | 2                 | Inestable          |
| A4.D3.1 | 4       | 300                  | 1                 | Estable            |
| A4.D3.2 | 4       | 300                  | 1                 | Estable            |
| A5.D1.1 | 5       | 75                   | 2                 | Estable            |
| A5.D1.2 | 5       | 75                   | 2                 | Estable            |
| A5.D1.3 | 5       | 75                   | 2                 | Estable            |
| A5.D1.4 | 5       | 75                   | 2                 | Estable            |
| A5.D2.1 | 5       | 150                  | 2                 | Inestable          |
| A5.D2.2 | 5       | 150                  | 2                 | Inestable          |
| A5.D2.3 | 5       | 150                  | 2                 | Estable            |
| A5.D2.4 | 5       | 150                  | 2                 | Estable            |
| A5.D3.1 | 5       | 300                  | 1                 | Estable            |
| A5.D3.2 | 5       | 300                  | 1                 | Estable            |

Las figuras 8a y 8b muestran, respectivamente, los envolventes de las trayectorias experimentales de las fisuras correspondientes a las probetas *D2* y *D3* para los dos tipos de ensayo; se ha añadido la previsión de trayectoria de la fisura hecha con *FRANC2D* [2] (fractura elástica lineal) para cada familia de ensayos. Se observa una clara diferencia en las trayectorias correspondientes a cada tipo de ensayo; la dispersión experimental es pequeña y las trayectorias experimentales se adecúan bien a la predicción hecha por el modelo elástico lineal.

### 5. MODELO DE FISURA COHESIVA

Sobre la trayectoria obtenida a partir de un modelo de fractura elástica lineal se ha introducido un modelo de fisura cohesiva, para lo cual se han situado 100 muelles perpendiculares a los labios de la fisura cuya ley de ablandamiento reproduce la obtenida experimentalmente a partir de los ensayos en modo I. Las figuras 9a y 9b comparan los resultados experimentales con los numéricos correspondientes a las probetas *D3* en el ensayo *tipo 2*; como puede observarse el ajuste es bueno.

### 6. CONCLUSIONES

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

- Se ha obtenido una colección de ensayos de hormigón en modo mixto, con dos familias de trayectorias claramente distintas. Los ensayos son estables y repetitivos, bien caracterizados y pueden servir de referencia para verificar y comprobar modelos analíticos y numéricos de propagación de fisuras en modo mixto en hormigón y morteros.
- La trayectoria de la fisura en modo mixto se adecúa bien a la predicha por un modelo elástico lineal, siendo, además, la dispersión experimental pequeña.
- Se ha presentado un nuevo tipo de ensayo (probeta prismática solicitada a flexión en cuatro puntos, con cargas asimétricas y no proporcionales) que permite modificar la trayectoria de la fisura al variar las condiciones de contorno e introducir cargas no proporcionales; los ensayos de la literatura se han realizado con cargas proporcionales, sin la posibilidad de modificar la trayectoria de la fisura para una geometría y disposición de cargas fijada.
- Se ha presentado un método de cálculo que permite predecir el comportamiento de las vigas ensayadas en modo mixto mediante la introducción de una zona cohesiva a lo largo de la trayectoria obtenida mediante fractura elástica lineal; los resultados preliminares son satisfactorios.

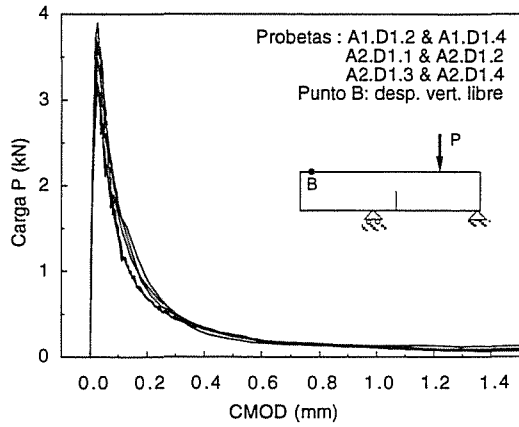


Figura 2a. Curvas experimentales carga-CMOD de los ensayos *tipo 1* con probetas *D1*.

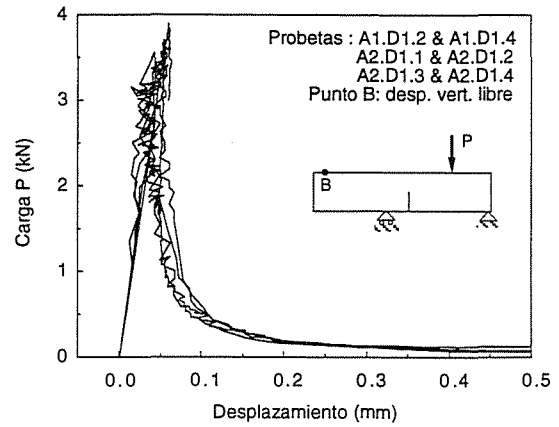


Figura 2b. Curvas experimentales carga-desplazamiento de los ensayos *tipo 1* con probetas *D1*.

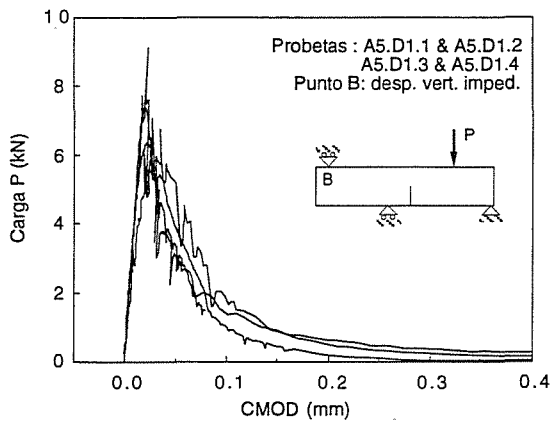


Figura 3a. Curvas experimentales carga-CMOD de los ensayos *tipo 2* con probetas *D1*.

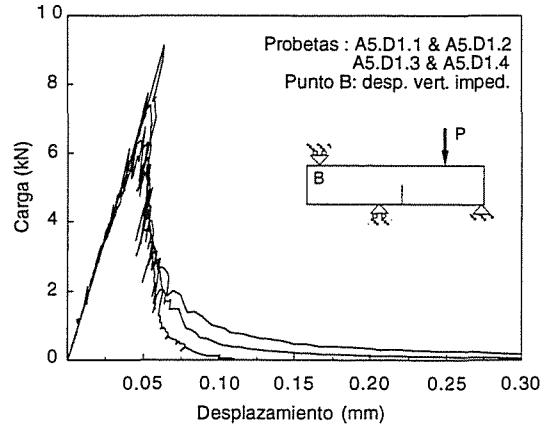


Figura 3b. Curvas experimentales carga-desplazamiento de los ensayos *tipo 2* con probetas *D1*.

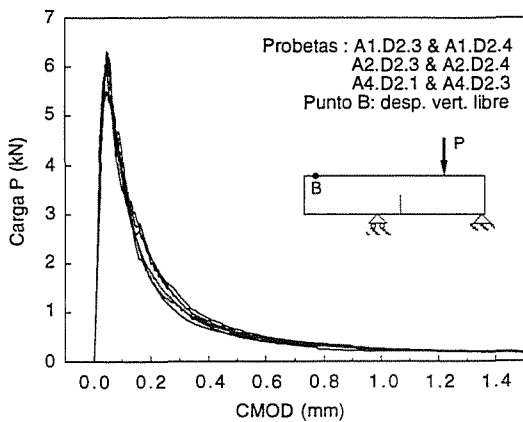


Figura 4a. Curvas experimentales carga-CMOD de los ensayos *tipo 1* con probetas *D2*.

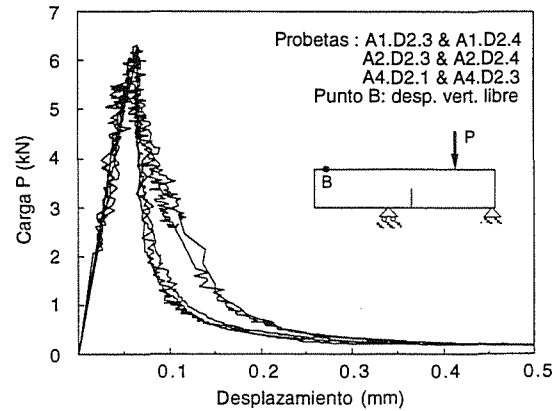
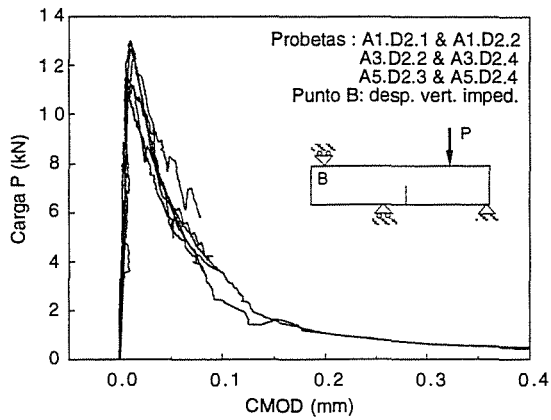
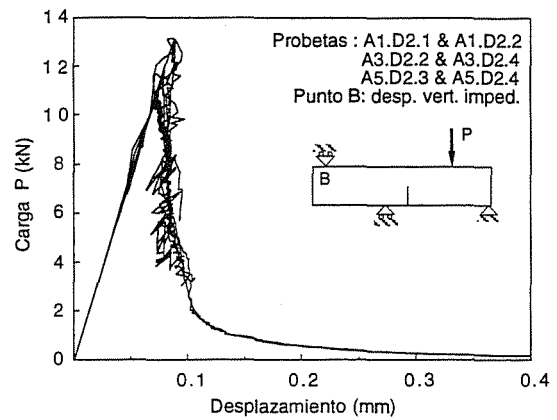


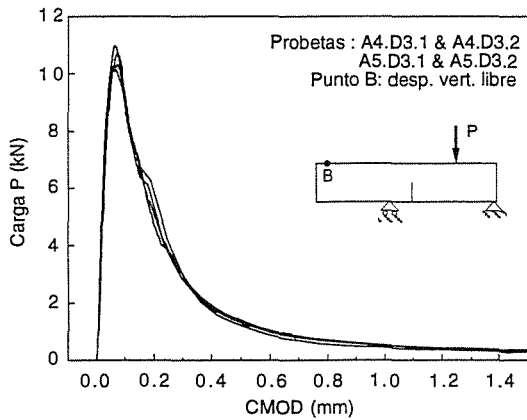
Figura 4b. Curvas experimentales carga-desplazamiento de los ensayos *tipo 1* con probetas *D2*.



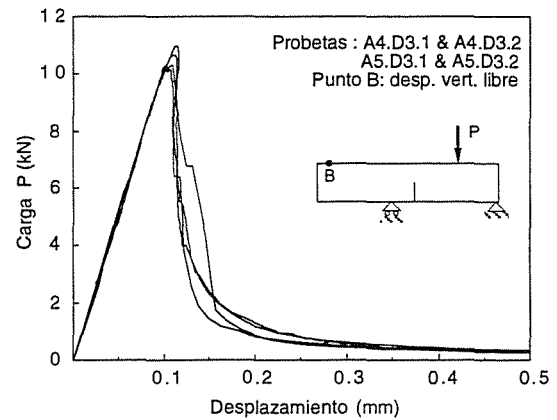
**Figura 5a.** Curvas experimentales carga-CMOD de los ensayos *tipo 2* con probetas *D2*.



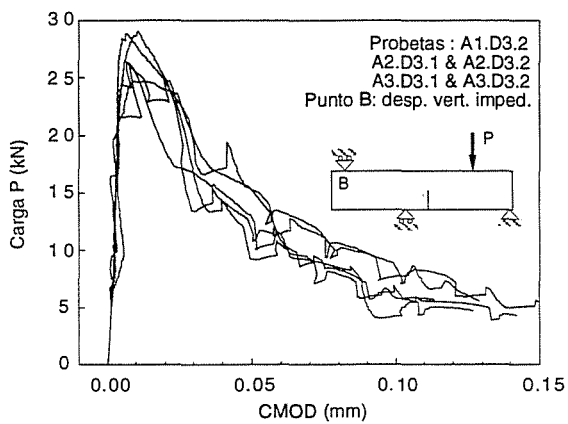
**Figura 5b.** Curvas experimentales carga-desplazamiento de los ensayos *tipo 2* con probetas *D2*.



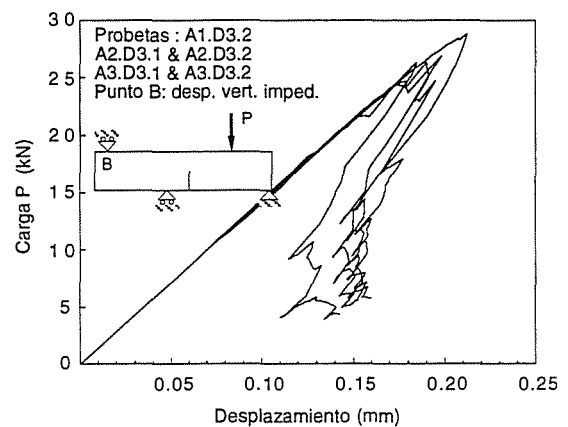
**Figura 6a.** Curvas experimentales carga-CMOD de los ensayos *tipo 1* con probetas *D3*.



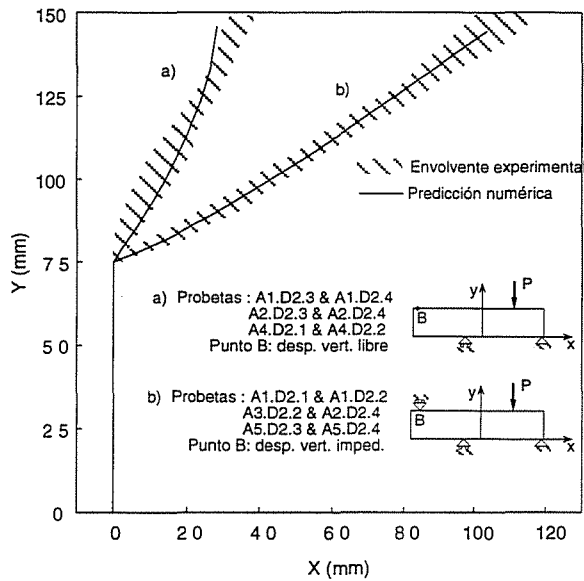
**Figura 6b.** Curvas experimentales carga-desplazamiento de los ensayos *tipo 1* con probetas *D3*.



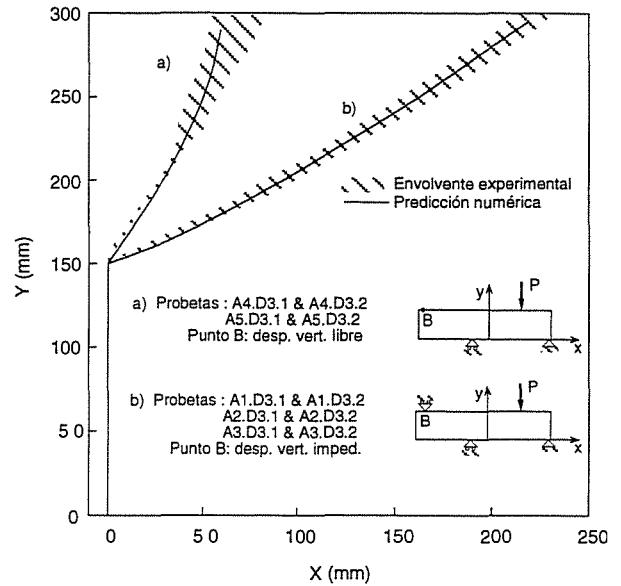
**Figura 7a.** Curvas experimentales carga-CMOD de los ensayos *tipo 2* con probetas *D3*.



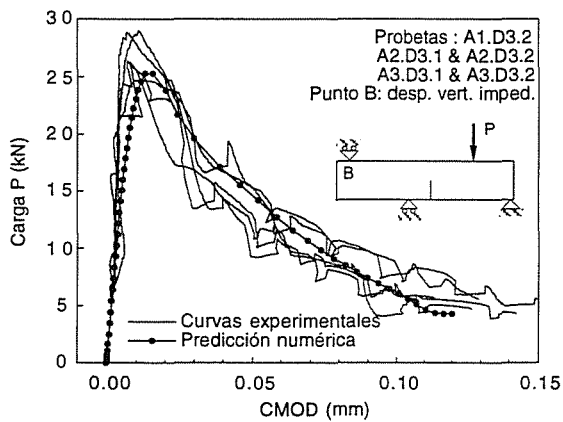
**Figura 7b.** Curvas experimentales carga-desplazamiento de los ensayos *tipo 2* con probetas *D3*.



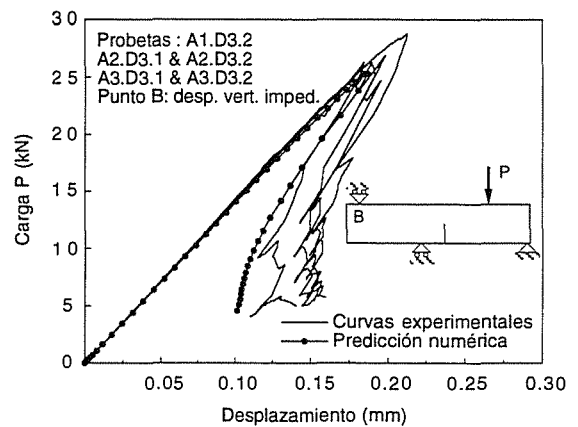
**Figura 8a.** Envolvente de las trayectorias experimentales de los ensayos *tipo 1* y *2* correspondientes a las probetas *D2*. Se incluye predicción con *FRANC2D* (fractura elástica lineal).



**Figura 8b.** Envolvente de las trayectorias experimentales de los ensayos *tipo 1* y *2* correspondientes a las probetas *D3*. Se incluye predicción con *FRANC2D* (fractura elástica lineal).



**Figura 9a.** Curvas experimentales carga-CMOD de los ensayos *tipo 2* con probetas *D3* y predicción numérica.



**Figura 9b.** Curvas experimentales carga-desplazamiento de los ensayos *tipo 2* con probetas *D3* y predicción numérica.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Gálvez, J., G.V. Guinea, M. Elices, "Fisuración del Hormigón en Modo Mixto", *Anales de Mecánica de la Fractura* 13, pp.130- 135, (1996).
- [2] "FRANC2D: A Two-Dimensional Crack Propagation Simulator", Version 2.7, NASA, 1994.
- [3] Elices, M. "Mecánica de la Fractura", ETSICCP de UPM, 198 pp. , (1995).

## 8. 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 MAT 94-0120-003 y PB 93-0031; a la empresa Portland-Valderribas el suministro de cemento Portland 1-55-A a granel para la elaboración de las probetas, y al Prof. A. Ingraffea, de la Universidad de Cornell, el uso del programa FRANC2D.