

MICROFISURACION DEL HORMIGON POR COMPRESION ¿ESTAMOS DEL LADO DE LA SEGURIDAD? (*)

(MICROCRACKING OF CONCRETE UNDER COMPRESSION; ARE WE ON THE SAFE SIDE?)

A. Delibes

Dr. Ingeniero de Caminos, Director de Laboratorio de INTEMAC

464-5

RESUMEN

Se analiza el DAÑO producido al hormigón por cargas de compresión inferiores a la de Rotura aplicadas durante plazos variables. El daño se identifica con la PERDIDA DE RESISTENCIA A TRACCION que experimentan probetas previamente comprimidas. La pérdida es apreciable bajo cargas de compresión que se consideran habitualmente como suficientemente seguras.

SUMMARY

DAMAGE produced by compressive loading of concrete without reaching the ultimate level is studied. Damage is related a significant LOSS OF TENSILE STRENGTH in specimens previously loaded in compression during different time intervals. Tensile strength lose is also significant after compressive loadings considered usually on the safe side.

1. ROTURA A COMPRESION Y A TRACCION

Durante el proceso de rotura del hormigón a compresión se distinguen las siguientes etapas (véanse las figuras 1 y 2):

- Fase elástica y prácticamente lineal hasta un cierto valor de la sollicitación del orden del 40% de la resistencia. El limite de esta fase se ha establecido por algunos autores en el punto en que se alcanza una deformación transversal del orden de 10^{-4}
- Fase de microfisuración inicial, en la que desciende el valor del módulo de deformación pero se mantiene prácticamente constante el coeficiente de Poisson.
- Fase de microfisuración anisótropa o fisuración del mortero, en que el módulo de deformación longitudinal desciende a la mitad de su valor inicial y el de Poisson aumenta hasta tres veces aquel valor.
- Al final de la fase anterior las fisuras del mortero se hacen inestables produciéndose la rotura bajo carga mantenida.

(*) Tesis doctoral leida el 15 de octubre de 1985, en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de Madrid.
Calificación obtenida: Apto cum laude.
Director de tesis: José Calavera Ruiz, Profesor Dr. Ingeniero de Caminos.

En tracción el comportamiento es casi lineal hasta la rotura, que ocurre bajo una deformación del mismo orden de magnitud que la detectada transversalmente al final de la fase de «compresión elástica».

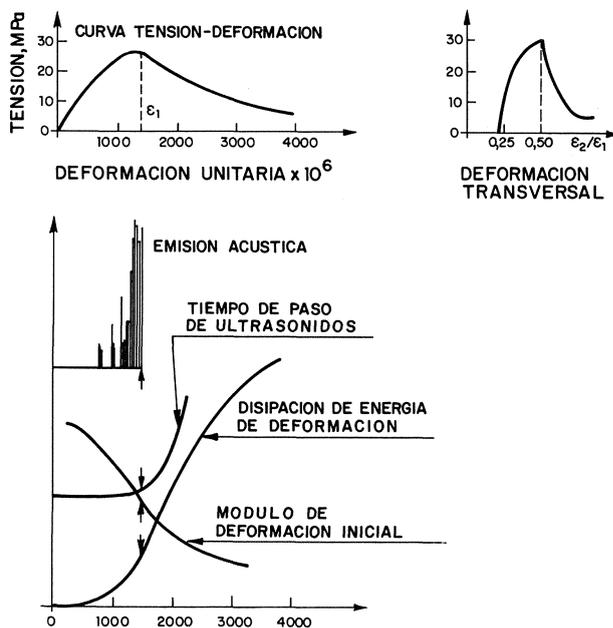


Fig. 1 DEFORMACION UNITARIA x 10⁶

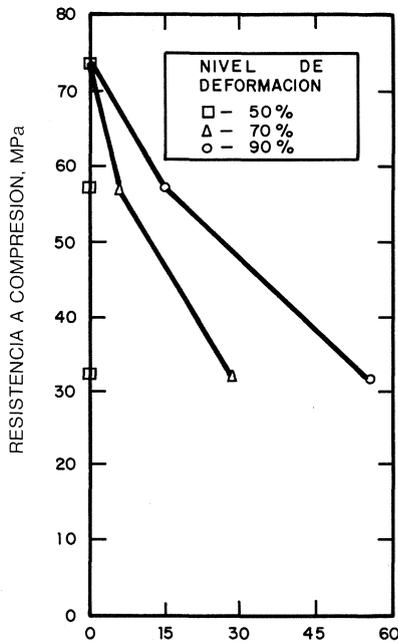


Fig. 2. LONGITUD TOTAL DE FISURAS COMBINADAS TIPO II (mm)

Tanto la posible definición de un alargamiento máximo («deformación límite») en procesos de carga multiaxial que incluyan alargamiento en alguna de las direcciones principales, como teorías de la mecánica de la fractura y del daño, inspiran la hipótesis de que el comportamiento mecánico del hormigón está dominado por su resistencia a tracción en todos estos casos, que son los más habituales. Sin embargo, puede comprobarse de forma más directa el efecto de la microfisuración: se produce una sensible pérdida de resistencia a la tracción; tal pérdida es el objeto de esta investigación experimental.

En consecuencia, llamaremos DAÑO a la pérdida de resistencia a tracción debida a sollicitaciones previas de compresión.

2. INVESTIGACION EXPERIMENTAL

Se ha estudiado la pérdida de resistencia a tracción producida por cargas de compresión axil, determinándose la influencia de las siguientes variables:

- Intensidad de la carga de compresión, entre el 50% y el 95% de la de rotura.
- Duración de la carga de compresión, entre 1 minuto y 7 días.
- Dosificación del hormigón y, en particular, tipo de árido empleado: rodado o de machaqueo.
- Proceso de curado del hormigón.
- Dirección de la compresión previa en relación con la tracción posterior.

La técnica experimental es sumamente sencilla, habiéndose aplicado procesos de carga previa por compresión en una prensa de ensayo y en marco de fluencia, con posterior ensayo a trac-

Cuadro n.º 1 RESUMEN DEL PLAN DE ENSAYOS

FASE	SERIE	PRECOMPRESION (x = σH ₀)	DURACIONES (T)	HORMIGON TIPO	CURADO TIPO
PRELIMINAR	SERIE 0	0 = PATRON	0 min.	H-400R	AIRE
		0,65 0,75 0,85 0,95	5 min. 15 min.		
FASE I	SERIE A I	0 = PATRON	1 min.	H-200R H-200M H-400R H-400M	CAMARA
		0,50 0,70 0,80	15 min. 60 min.		
	SERIE B I	0 = PATRON	15 min.	H-200R	CAMARA
	SERIE C I	0 = PATRON	1 dia 7 dias	H-200R	CAMARA-AIRE
FASE	SERIE A II	0 = PATRON	1 min.	H-400R H-400M	CAMARA AIRE
		0,50 0,60 0,70 0,80 0,90	15 min.		
	SERIE C II	0 = PATRON	1 min. 15 min. 2 horas 8 horas 7 dias	H-400R H-400M	CAMARA
		0,60 0,70 0,70 0,82 *			

(*) TENSION RELATIVA A LA RESISTENCIA (f_c) EN PROBETA CUBICA.

ción por el método brasileño (Cuadro n.º 1), y se completan las medidas realizadas con la determinación de la velocidad de ultrasonidos, lo que permite relacionar los resultados con los obtenidos paralelamente por el autor en ensayos hasta rotura de soportes de hormigón armado a escala natural, así como con el estudio por observación microscópica directa de la microfisuración (figura 3).

La Serie BI permitió confirmar que el DAÑO es orientado, en la dirección de las microfisuras de compresión. En planos paralelos a las mismas la pérdida de resistencia a tracción resultó inapreciable.

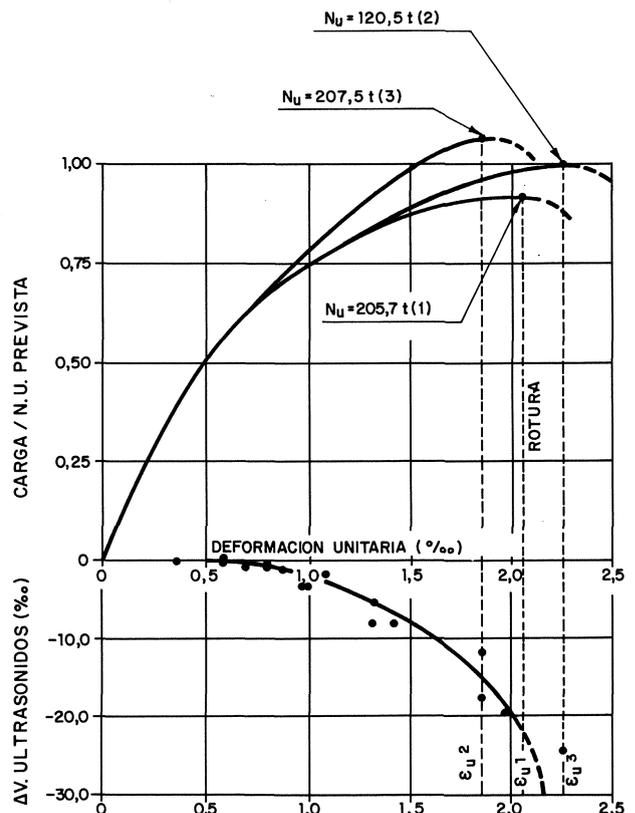


Fig. 3. RELACION ENTRE LA PERDIDA DE VELOCIDAD DE ULTRASONIDOS Y LA DEFORMACION EN SOPORTES

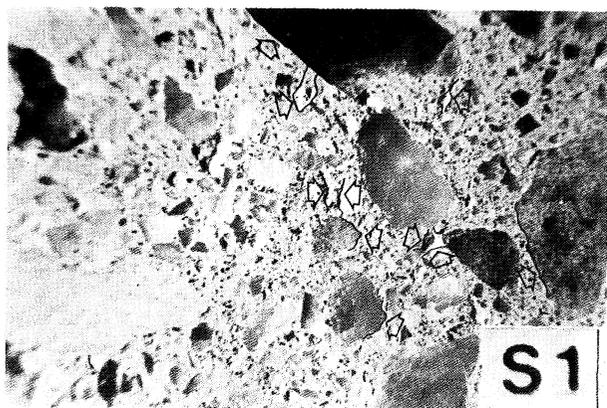


Foto 1.-Microfisuras observadas en una probeta-testigo.

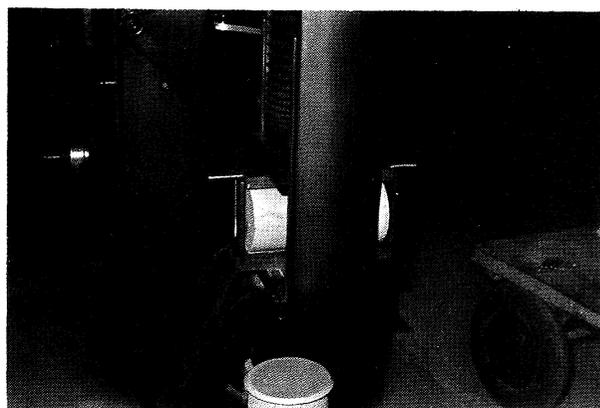


Foto 2.-Ensayo a traccion; metodo brasileño.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

Se detectan pérdidas de resistencia a tracción hasta un máximo no superior al 50% de la inicial. El daño tiene lugar a partir de intensidades de la compresión del orden del 45% de la resistencia y se estabiliza cerca del 65% de aquélla.

El daño es creciente con el plazo de carga; la inestabilidad y rotura puede producirse bajo

compresión mantenida igual o superior al 75% de la resistencia.

Las figuras 4, 5 y 6 representan el ajuste estadístico de los resultados mediante parábolas cúbicas en función del nivel de compresión previa, mantenido durante 1 minuto.

Las figuras 7, 8 y 9 expresan resultados análogos para carga mantenida durante 15 minutos.

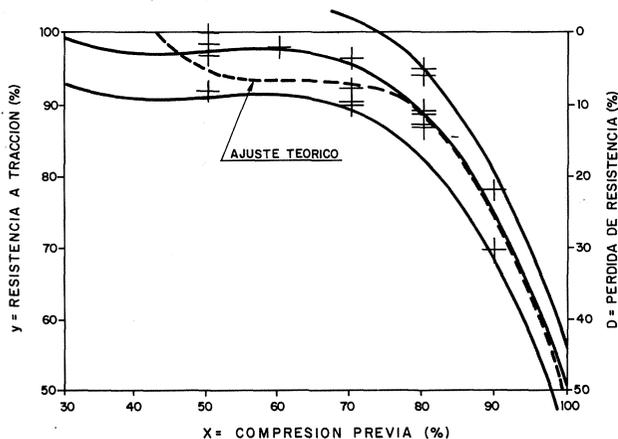


Fig. 4

AJUSTE ESTADISTICO Y LIMITES DE ERROR	CORRELACION $f_t \div x$	CASO ESTUDIADO
		1 mIn. CAMARA

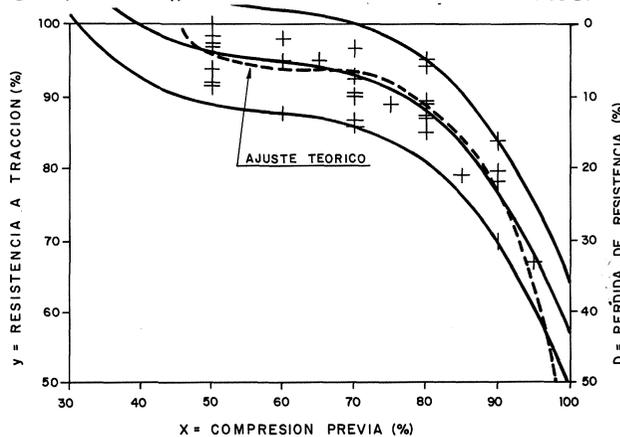


Fig. 6

AJUSTE ESTADISTICO Y LIMITES DE ERROR	CORRELACION $f_t \div x$	CASO ESTUDIADO
		1 mIn. CAMARA + AIRE

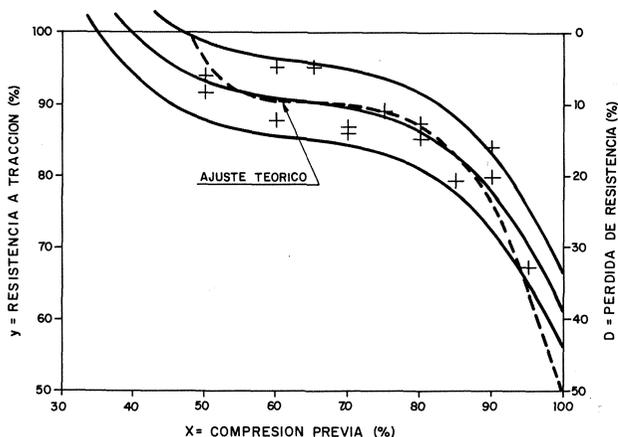


Fig. 5

AJUSTE ESTADISTICO Y LIMITES DE ERROR	CORRELACION $f_t \div x$	CASO ESTUDIADO
		1 mIn. AIRE

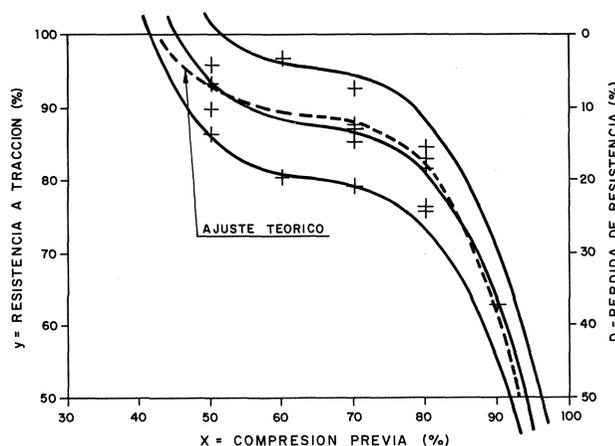


Fig. 7

AJUSTE ESTADISTICO Y LIMITES DE ERROR	CORRELACION $f_t \div x$	CASO ESTUDIADO
		15 mIn. CAMARA

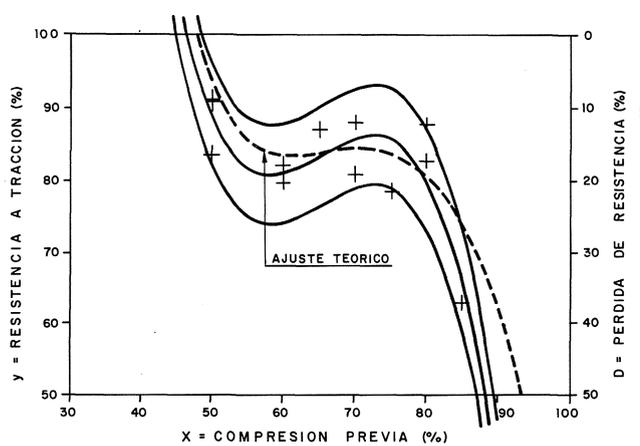


Fig. 8

AJUSTE ESTADISTICO Y LIMITES DE ERROR	CORRELACION $f_t \rightarrow X$	CASO ESTUDIADO 15 m'n. AIRE
---------------------------------------	---------------------------------	-----------------------------

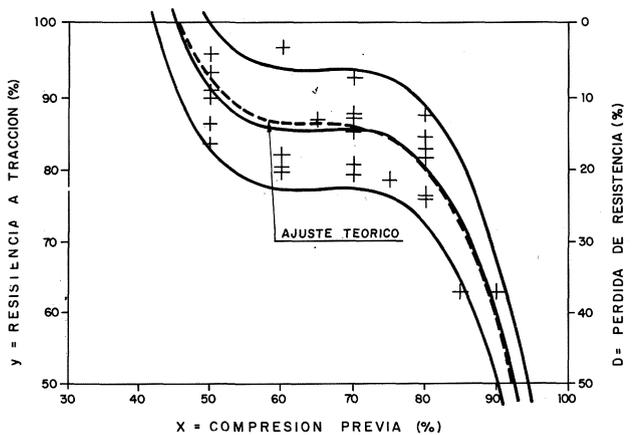


Fig. 9

AJUSTE ESTADISTICO Y LIMITES DE ERROR	CORRELACION $f_t \rightarrow X$	CASO ESTUDIADO 15 m'n. CAMARA + AIRE
---------------------------------------	---------------------------------	--------------------------------------

Cada uno de los puntos representados corresponde a la media de 2 a 6 ensayos.

La figura 10 permite estudiar la influencia del plazo de carga hasta el máximo, de 7 días, estudiado. La última de ellas representa un ajuste logarítmico del nivel de daño alcanzado en función de dicho plazo. Parece observarse una estabilización final del daño que, en cualquier caso, deberá confirmarse.

Finalmente, la figura 11 representa el daño en función del nivel y duración de la carga de compresión.

Los resultados de medidas ultrasónicas confirman los datos anteriores, deduciéndose pérdidas de velocidad que son pequeñas aunque significativas para compresiones del orden del 60% de la resistencia. Para cargas crecientes se obtienen pérdidas cada vez mayores, que aumentan también con la duración de las mismas. En la fase de «fisuración del mortero» las pérdidas de velocidad pueden alcanzar hasta un 5 ó 10%. Para pérdidas de velocidad superiores puede alcanzarse la rotura bajo carga manteni-

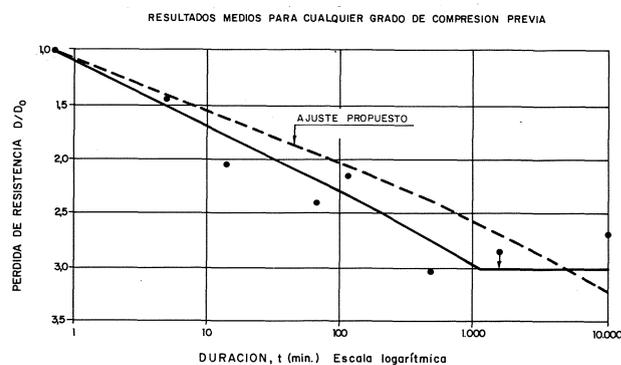
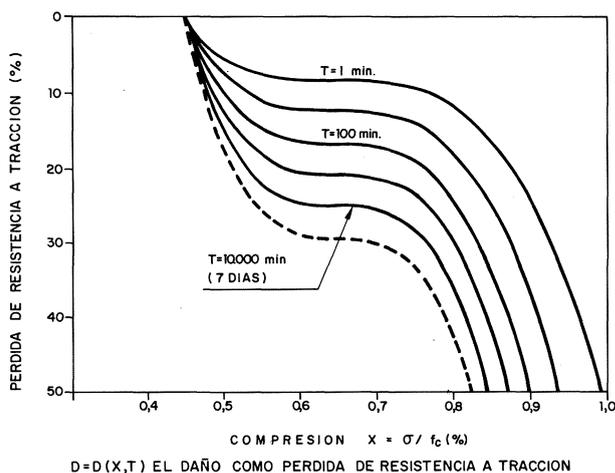


Fig. 10 CRECIMIENTO DEL DAÑO CON EL PLAZO DE CARGA



D=D(X,T) EL DAÑO COMO PERDIDA DE RESISTENCIA A TRACCION

Fig. 11 CASO GENERAL

da, con bajas de velocidad apreciablemente superiores al 25%.

4. CONCLUSIONES

La aportación más original de esta investigación la constituye la definición de un nuevo parámetro del «daño» producido al hormigón por sollicitaciones de compresión comprendidas entre intensidades próximas a las de servicio y la de rotura. Los datos experimentales aportados permiten cuantificar con bastante aproximación el valor del daño según la intensidad y duración de la precompresión, teniendo en cuenta el proceso de curado del hormigón y, de forma cualitativa, su composición.

Por otro lado, las medidas del tiempo de paso de los ultrasonidos resultan una técnica experimental auxiliar de fácil aplicación y gran importancia, pues permiten detectar la proximidad de la rotura por compresión y evitar un número importante de ensayos nulos. La futura aplicación tendrá relevancia en ensayos de fatiga y bajo cargas cíclicas de tipo sísmico.

Se confirma la necesidad de limitar las tensiones de compresión en los elementos estructurales a niveles máximos del 60% de la resistencia del hormigón.

La limitación debe ser aplicada estrictamente en zonas de la estructura sometidas a solicitaciones elevadas de adherencia o enclaje de armaduras, donde la seguridad puede ser precaria.

También debe estudiarse la posible reducción de las tensiones máximas de compresión en zonas de hormigón que constituyan una protección contra la corrosión, pues la microfisuración existe para compresiones inferiores al 60% de la resistencia como se deduce de las pérdidas de resistencia a tracción obtenidas.

En estudios de patología y auscultación de obras en servicio podrían ser de aplicación futuros desarrollos de las enseñanzas obtenidas por esta investigación.

Deben revisarse las hipótesis en vigor sobre el comportamiento del hormigón en fatiga y bajo cargas de tipo sísmico, considerando la probable reducción de resistencia bajo solicitaciones de signo alternativo.

BIBLIOGRAFIA

- AOYAMA, H. y NOGUCHI, H.: «Mechanical properties of concrete under load cycles idealizing seismic actions». CEB Bull. n.º 131, 1979.
- CALAVERA, J.; GONZALEZ VALLE, E. y GONZALEZ ISABEL, G.: «La influencia de los esfuerzos previos de compresión sobre la resistencia a tracción del hormigón». Hormigón y Acero, n.ºs 119-120, 1977.
- CARRASQUILLO, R. L. y SLATE, F. O.: «Microcracking and definition of failure of high and normal strength concretes». Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP. Vol. 5, n.º 1, verano 1983.
- COOK, D. J. y CHINDAPRASIRT, P.: «Influence of loading history upon the tensile properties of concrete». Magazine of Concrete Research. Vol. 33, n.º 116, septiembre 1981.
- DELIBES, A.: «Estudio de la microfisuración del hormigón sometido a cargas de compresión mediante técnicas de ultrasonidos». Hormigón y Acero, n.º 136, 1980.
- DURAND, A. y DURAND, G.: «Etude de la variation de la vitesse longitudinale V_L des ultrasons dans une éprouvette normalisée de béton soumise a de charges croissantes». Matériaux et Constructions. Vol. 11, n.º 63, RILEM (1979).
- FERRY BORGES, J.: «Structural behaviour under repeated loading». European Committee for Earthquake Engineering. Diciembre 1973.
- HSU, T.T.C.: «Fatigue and microcracking of concrete». Matériaux et Constructions. RILEM, vol. 17, n.º 97, enero-febrero 1984.
- KNAB, L. I.; BLESSING, G. V. y CLIFTON, J. R.: «Laboratory evaluation of ultrasonics for crack detection in concrete». ACI Journal, enero-febrero 1983.
- KOTSOVOS, M. D.: «Concrete. A Brittle fracturing material». Matériaux et Constructions, vol. 17, n.º 98, 1984.
- LORRAIN, M. y LOLAND, K. E.: «Damage theory applied to concrete». F.M. of Concrete, Elsevier, 1983.
- MAZARS, J.: «Les fissurations des betons». I.2. Evolution de la microfissuration dans les betons: formation de fissures. Annales ITBTP, n.º 398, octubre 1981.
- NEVILLE, A. M.: «Properties of concrete». 3ª Edition. PITMAN 1981.
- SHAH, S. P.: «Predictions of cumulative damage for concrete and reinforced concrete». Matériaux et Constructions, RILEM, vol. 17, n.º 97, enero-febrero 1984.
- TEPFERS, R.: «Fatigue of plain concrete subjected to stress reversals». A.C.I. Publication SP-75. 1982.
- WITTMAN, F. H.: «Fracture mechanics of concrete». Elsevier 1983.

AGRADECIMIENTOS

El autor quiere expresar su agradecimiento al Instituto Técnico de Materiales y Construcciones, INTEMAC, que realizó los ensayos y especialmente a José Calavera que dirigió la Tesis Doctoral a que dio origen la investigación, a Juan Antonio Rueda que realizó los cálculos estadísticos y a Fernando Arrechea y Germán González Isabel que coordinaron los ensayos.