

LA RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE, LA RESISTENCIA A TRACCION Y EL MODULO DE DEFORMACION DE HORMIGONES FABRICADOS CON CEMENTO PA-350

Bernardo Perepérez Ventura
Dr. Arquitecto

Profesor de Construcción III en la ETS de Arquitectura de Valencia. Tesis doctoral para la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia

Tutor de tesis:

José Calavera Ruiz
Dr. Ingeniero de Caminos

Presidente-director general de INTEMAC, profesor de Edificación y Prefabricación en la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.

450-14

Objetivos y aplicación práctica

Se investigaron las siguientes propiedades de hormigones fabricados con cemento PA-350: **resistencia a compresión simple, resistencia a tracción y módulo de deformación**, con la intención de ceñirse al campo de los hormigones estructurales corrientes en edificación.

Una aplicación práctica de este estudio es la **previsión de la edad de descimbrado**. En efecto, para poder fijar esta edad es necesario conocer, entre otros datos, qué propiedad resulta más exigente. Según J. CALAVERA (1) dicho criterio, para hormigones de cementos portland, es el desarrollo de la resistencia a la tracción y el de la adherencia. Con los hormigones de cementos PA cabía la posibilidad de que, caso de producirse un proceso más lento de endurecimiento, resultase más restrictiva la deformabilidad, cuantificada en función del módulo de deformación reiterativo y secante.

CUADRO I

Características de los hormigones fabricados

Tipo de hormigón	Arena de corrección 0/0,63 mm kg/m ³	Arena triturada 0/5 mm kg/m ³	Grava caliza 5/20 mm kg/m ³	Cemento PA-350 kg/m ³	Agua de amasado kg/m ³	Módulos granulométricos hormigones	Relación A/C en peso efectiva	Conos cm
H-I	158	674	1.050	300	205	5,21	0,68	9
H-II	145	621	1.058	350	215	5,29	0,61	9
H-III	131	560	1.080	400	220	5,41	0,55	9

CUADRO II

Fabricación, curado y ensayo de las probetas

Por cada hormigón	Número de probetas	Tipos de ensayos	Edades de ensayo (días)	Curado
Amasada 1	8 cilíndricas 15 × 30 cm	Tracción indirecta (NLT 309-69)	3, 7, 28, 60	En agua 20 ± 2° C
	8 prismáticas 10 × 10 × 40 cm	Flexotracción (ISO 4013-78) "Cubo modificado" (ASTM C116-68/74)		
Amasada 2	8 cilíndricas 15 × 30 cm	Compresión simple (UNE 7242)	3, 7, 28, 60	En agua 20 ± 2° C
	8 cilíndricas 15 × 30 cm	Módulo deformación (ASTM C459-65/75) Compresión tras módulo (UNE 7242)		

Plan experimental

El acotamiento deliberado al campo de la edificación se concretó en la fabricación de tres hormigones distintos (Cuadro 1):

Con cada uno de estos tres hormigones se programaron como se indica en el Cuadro II.

Estado de la cuestión, resultados y aportaciones

Las resistencias a compresión simple del mortero normalizado y de los hormigones.— A. M. NEVILLE (2), MARKESTAD y RUDJORD (3) proponen, para casos prácticos y edades comprendidas entre 3 y 28 días, relaciones lineales. Se han podido establecer relaciones de este tipo, muy satisfactoriamente, para cada relación A/C (fig. 1).

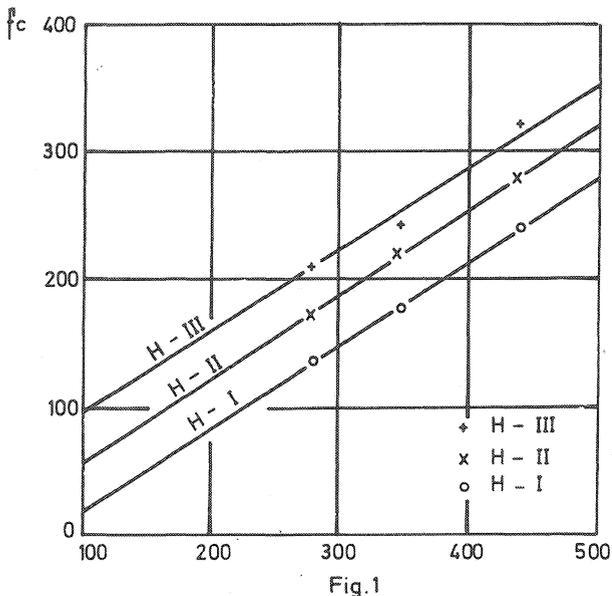


Fig. 1

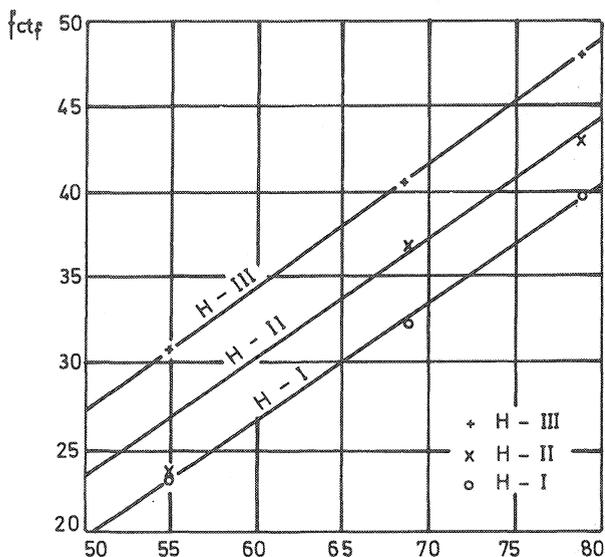


Fig. 2

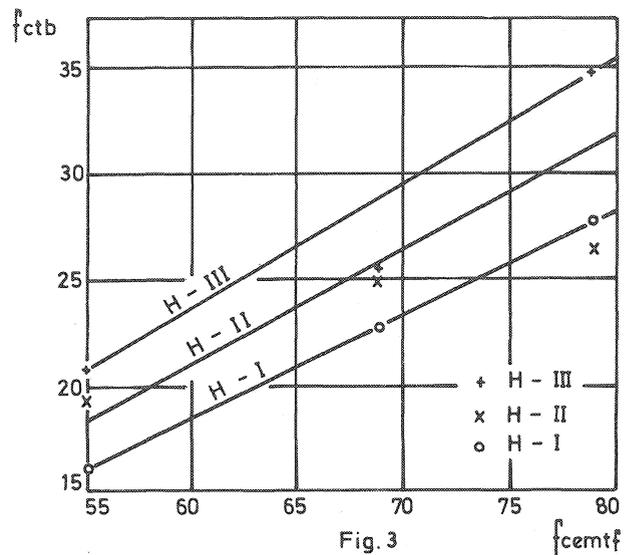


Fig. 3

La resistencia a flexotracción del mortero normalizado y las resistencias a tracción de los hormigones.—Es considerada (3) como una relación difícil de establecer y poco fiable. En nuestro caso, en cambio, se pudieron establecer buenas relaciones lineales con la resistencia a tracción, particularmente al estimarla mediante ensayos de flexotracción (figs. 2 y 3).

Evoluciones con la edad.—Se analizan las influencias reconocidas de diversos factores: características fisicoquímicas del cemento, método de curado y temperatura durante el mismo, y relación A/C. Tomando como unitarios los resultados a 28 días se pudo construir el Cuadro III.

De todas las relaciones analizadas, para la resistencia a compresión resultó ser la más apropiada la anotada por DAN E. BRANSON (5) para hormigones fabricados con cemento USA del tipo III:

$$f_{c_j} / f_{c_{28}} = j / (2,30 + 0,92 j) \quad (j \text{ en días})$$

a consecuencia, probablemente, de la superficie específica BLAINE del cemento utilizado (4.580 cm²/g) (6).

Se comprobó la relación inversa entre velocidad de endurecimiento y relación A/C (7), la inviabilidad de la propuesta de PLOWMAN (8) de relación lineal entre módulos de deformación y logaritmos de las madureces respectivas y, a partir de la propuesta genérica de WEBER (9), se obtuvo la siguiente expresión:

$$E_{c_j} / E_{c_{28}} = 1,0605 \times 1,155^{(-3/j^{0,6})} \quad (j \text{ en días})$$

La relación A/C.—Se analizó con cierto detalle este parámetro que, aisladamente, es el que

CUADRO III
Evolución con la edad*

Edad (días)	Resultados Experimentales				Coeficientes Inst. EH-80 (4)		
					Compresión simple		Tracción
	Compresión simple	Tracción indirecta	Flexotracción	Módulo de deformación	Endurecimiento normal	Endurecimiento rápido	Endurecimiento normal
3	0,62	0,64	0,59	0,84	0,40	0,55	0,40
7	0,77	0,84	0,85	0,94	0,65	0,75	0,70
28	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
60	1,09	1,08	1,06	1,02	—	—	—
90	—	—	—	—	1,20	1,15	1,05

en mayor grado determina la resistencia del hormigón (10). Al aplicar la fórmula de G. DREUX (11):

$$f_{c28} = f_{cem} \cdot (C/A - 0,5) \cdot k \quad (0,67 \geq A/C \geq 0,40)$$

se observó que para f_{cem} = categoría real del cemento = constante, el coeficiente granular k se hizo independiente de la relación A/C , tomando un valor sensiblemente constante e igual, en este caso, a 0,57 para la edad de 28 días.

Con las resistencias a tracción se establecieron estas dos ecuaciones:

$$f_{ctf} = k_1 \cdot f_{cem,tf} \cdot (C/A)$$

$$\text{con } k_1 = 0,34 = \text{cte. para } j = 28$$

$$f_{ctb} = k_2 \cdot f_{cem,tf} \cdot (C/A)$$

$$\text{con } k_2 = 0,24 = \text{cte. para } j = 28$$

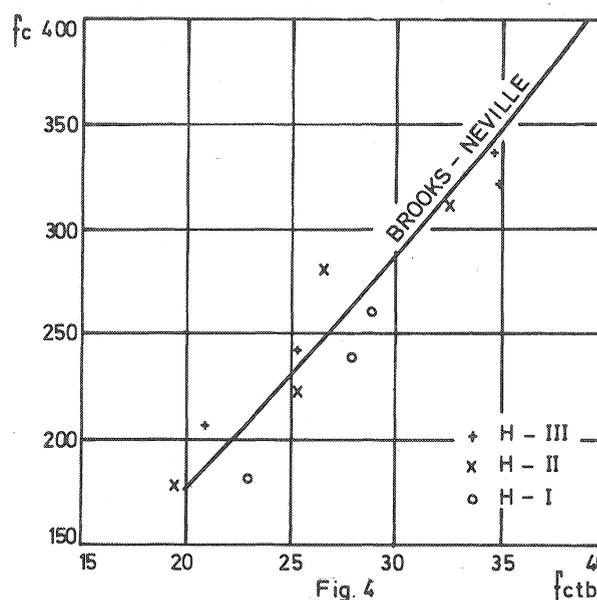
Las resistencias a compresión y a tracción.—

El cociente entre estas dos resistencias aumenta con el contenido y la categoría real del cemento (12); disminuye con la relación C/A (10); depende de la granulometría (2) (6), la naturaleza, las características superficiales, el tamaño máximo o medio y la concentración volumétrica del árido (13); de la humedad de curado (6) (13), y de la oclusión voluntaria de aire y/o una compactación incompleta (2).

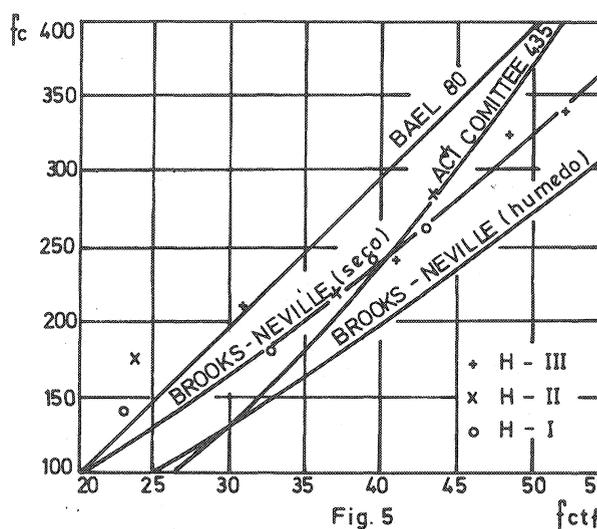
Se compararon con los resultados experimentales diversas propuestas. Se manifestó para la tracción indirecta, f_{ctb} , como más adecuada la propuesta de BROOKS y NEVILLE (14) (fig. 4).

Por lo que respecta a la resistencia a flexotracción, se destacan aquí las relaciones siguientes (fig. 5).

* Por lo que respecta a los datos experimentales, los resultados que se ofrecen son la media aritmética de los tres hormigones en estudio para cada edad y tipo de ensayo.



$$f_{ctb} = 0,32 \cdot f_c^{0,80} \quad (\text{en } \text{kp/cm}^2)$$



$$f_{ctf} = 10,20 + 0,10 \cdot f_c \dots \dots \dots (\text{BAEL } 80)$$

$$f_{ctf} = 2,59 \cdot f_c^{0,50} \dots \dots \dots (\text{ACT. COMITEE } 435)$$

$$f_{ctf} = 1,05 \cdot f_c^{0,69} (\text{húmedo})$$

$$f_{ctf} = 0,55 \cdot f_c^{0,78} (\text{seco}) \quad (\text{BROOKS y NEVILLE})$$

y se propuso, como más aproximada, la siguiente ley propia:

$$f_{ctf} = 13,70 + 0,10 \cdot f_c$$

Las resistencias a tracción indirecta y a flexotracción.—Algunos autores (13) han propuesto relaciones lineales entre estos dos parámetros para homigones fabricados con los mismos materiales. Estos mismos tratadistas han puesto de manifiesto la diferente influencia que sobre estas dos propiedades ejercen el tipo de árido y su tamaño máximo, y el tipo de curado y la duración del mismo, por ejemplo. Se analizaron, entre otras, las dos propuestas de BROOKS y NEVILLE (14) (fig. 6):

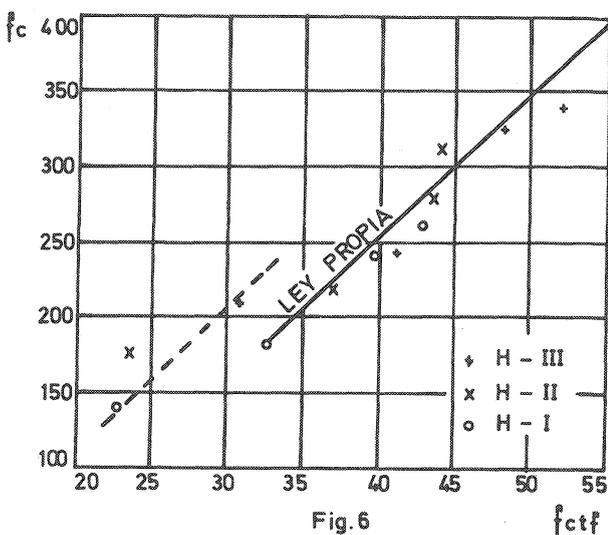


Fig. 6

$$f_{ctb} = 6,55 \cdot f_{ctf}^{0,62} \dots \dots \text{(húmedo)}$$

$$f_{ctb} = 2,33 \cdot f_{ctf}^{0,87} \dots \dots \text{(seco)}$$

y se llegó a la siguiente ley propia (fig. 7):

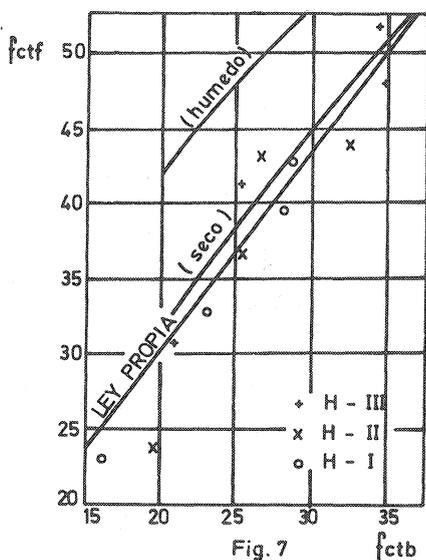


Fig. 7

$$f_{ctf} = 3,40 + 1,33 \cdot f_{ctb}$$

La resistencia a compresión y el módulo de deformación.—El conocimiento del módulo de deformación es vital en diversos problemas prácticos tales como la predicción de deformaciones, de ahí la importancia que tiene su evaluación a partir de propiedades normalmente conocidas del hormigón como su resistencia a compresión. Ambos parámetros tienen en común su dependencia del módulo de elasticidad de la pasta de cemento. No obstante, diversos factores influyen de modo diferente, haciendo incierta su correlación; cabe citar el contenido de humedad; el módulo de elasticidad, la forma y textura superficial, la concentración volumétrica y el tamaño máximo del árido; la humedad de curado, y la edad.

Tras unas breves notas históricas sobre la evolución del concepto de módulo de elasticidad aplicado al hormigón, criticando el caso omiso hecho por las sucesivas Instrucciones Españolas a los progresos en este campo, se analizaron, entre otras, las expresiones siguientes (fig. 8):

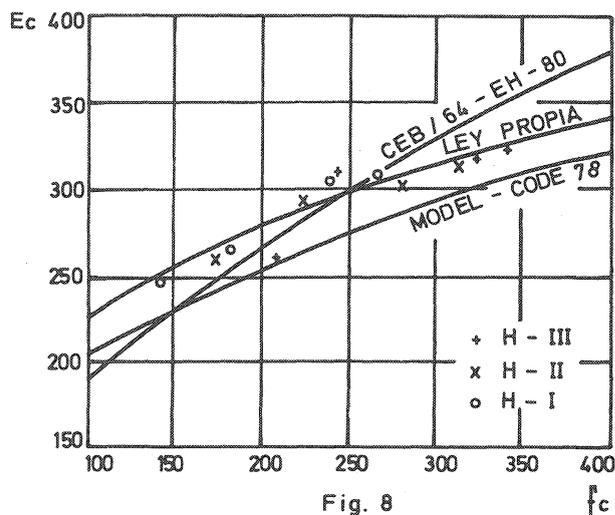


Fig. 8

$$E_{cj} = 48.000 \cdot f_{cj}^{1/3} \text{ (kp/cm}^2\text{)}$$

G. DREUX (11)

$$E_c = 0,1365 \cdot w^{3/2} \cdot f_c^{1/2} \text{ (kg/m}^3\text{ y kp/cm}^2\text{)}$$

A. PAUW (15)

$$E_{cj} = 19.000 \cdot f_c^{1/2} \text{ (kp/cm}^2\text{)}$$

EH-80 (4)

$$E_{cj} = 44.000 \cdot (f_{ck} + 80)^{1/3} = 44.000 \cdot f_{cj}^{1/3} \text{ (kp/cm}^2\text{). MODEL CODE (16)}$$

Obteniéndose la mejor correlación con la del MODEL CODE y la peor con la de la EH-80.

Utilizando el exponente 0,30, considerado por PAUW (15) como el más apropiado para $f_c \geq 2.000$ psi (146 kp/cm²), se propuso la siguiente ley:

$$E_{c_j} = 56.630 \cdot f_c^{0.30} \dots \dots \dots (\text{kp/cm}^2)$$

El problema del descimbrado.—A la vista del cuadro III resulta evidente que en los tres tipos de hormigones ensayados también resulta ser más restrictiva la resistencia a tracción y, en particular, la de flexotracción para edades inferiores a los siete días*.

BIBLIOGRAFIA SELECCIONADA

- (1) CALAVERA RUIZ, J.: «Cálculo, construcción y patología de forjados de edificación». *INTEMAC*. Madrid. 1981.
- (2) NEVILLE, A. M.: «Properties of Concrete». *Pitman Publishing Corporation*. London, 1978.
- (3) MARKESTAD, A., y RUDJORD, A.: «Investigation into Cement Testing Methods and into the Correlation between the Strength of Cement and that of Concrete». *Bulletin RILEM*, n.º 26. March, 1965.
- (4) MOPU.: «Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado». *Servicio de Publicaciones del MOPU*. Madrid. 1980.
- (5) BRANSON, D. E.: «Deformation of Concrete Structures». *McGraw-Hill International Book Company, Inc.* New York. 1977.

* Esta afirmación, así como todas las anteriores, particularmente las que hacen referencia a la resistencia a flexotracción y al módulo de deformación, sólo son válidas para hormigones curados en condiciones idénticas a la de la presente investigación (en agua) o muy similares (HR \geq 95 %) de humedad y de temperatura (20 \pm 2° C).

- (6) SAUL, A. G. A.: «A Comparison of the Compressive, flexural and Tensile Strengths of Concrete». *Cement and Concrete Association, Technical Report*. June, 1960.
- (7) PELLICER DAVIÑA, D.: «Análisis de Control del hormigón en cuarenta edificios». *Hormigón y Acero*. n.º 135. Abril-mayo-junio, 1980.
- (8) PLOWMAN, J. M.: «Young's Modulus and Poisson's Ratio fo Concrete Cured at Various Humidities». *Magazine of Concrete Research*, vol. 15, n.º 44. July, 1963.
- (9) WEBER, J. W.: «Empirical Formulas for Describing the Strength Development of the Modulus of Concrete». *Betonwerk + Fertigteil-Technik*. Heft 12. 1979.
- (10) SOROKA, I.: «Portland Cement Paste and Concrete». *The Mac Millan Press Limited*. London. 1979.
- (11) DREUX, G.: «Nouveau Guide du Béton». *Editions Eyrolles*. Paris. 1979.
- (12) GARDNER, N. J. y POON, S. M.: «Time and Temperature Effects on Tensile Bond and Compressive Strengths». *ACI Journal*. July, 1976.
- (13) GRIEB, W. E. y WERNER, G.: «Comparison of Splitting Tensile Strength of Concrete with Flexural and Compressive Strengths». *Proceedings ASTM*, vol. 62, págs. 972/990. 1962.
- (14) BROOKS, J. J. y NEVILLE, A. M.: «A Comparison of Creep, Elasticity and Strength of Concrete in Tension and in Compression». *Magazine of Concrete Research*, vol. 21, n.º 100. September, 1977.
- (15) PAUW, A.: «Influence de la Densité du Béton sur le Module d'Elasticité». *Béton Armé*. Avril, 1963.
- (16) CEB/FIP.: «Model Code for Concrete Structures». *Comité Euro-International du Béton*. Paris. 1978.

* * *

próxima publicación del IETcc

BASES PARA EL DISEÑO SOLAR PASIVO

Equipo de Investigación de Ahorro de Energía en el Edificio (IETcc)

Las dificultades de suministro y el alto coste de los productos energéticos convencionales han despertado la atención de los usuarios, técnicos e industriales de la edificación hacia los procedimientos y sistemas en que se basa el aprovechamiento de otras fuentes alternativas de energía, principalmente la solar. Esto ha generado un rápido desarrollo industrial y comercial que, en opinión de los autores de este libro, arrastran los siguientes defectos: un mimético tecnologismo respecto de los sistemas convencionales que violenta las peculiaridades de la energía solar (baja densidad y variabilidad en el tiempo), y una escasa selectividad en la aplicación de los sistemas y procedimientos pasivos dando origen a un ecumenismo arquitectónico solar, al margen de las condiciones climáticas y funcionales específicas de cada caso y lugar.

En este libro, utilizando criterios y metodología pedagógicos, se dan los fundamentos e instrumentos teórico-prácticos necesarios para el planteamiento de todo proyecto arquitectónico solar pasivo, de acuerdo con los principios éticos y económicos de conservación y ahorro de energía. Es decir: respeto de los presupuestos bioclimáticos, búsqueda de la máxima captación y acumulación de la radiación solar, y esmero en el aislamiento térmico de los cerramientos.

Este libro contendrá los siguientes capítulos: Situación energética en el sector edificación. El hombre y el clima. El edificio. Cálculo del soleamiento. Captación solar. Acumulación de calor. Aislamiento térmico. Análisis económico. Fichas de recomendaciones prácticas. Anexos. Bibliografía.