

Influencia de la adición de rocas carbonáticas en el comportamiento mecánico de la pasta endurecida de cemento Portland (*)

Por JESUS SORIANO CARRILLO
CARLOS DE LA PEÑA QUEVEDO
Laboratorio Central de Estructuras y Materiales

Se estudia la influencia que la adición de rocas carbonáticas molidas, caliza y dolomía, ejercen sobre la resistencia a compresión de la pasta endurecida de cemento Portland.

Se discute la evolución de las resistencias mecánicas en función de la cinética textural de las fases y especies mineralógicas presentes en los conglomerados estudiados.

1. INTRODUCCION

El hormigón endurecido es, como se sabe, un sólido compuesto de fragmentos de roca, de dimensiones variables, englobados en una pasta de cemento. Sus propiedades mecánicas y, más concretamente, las condiciones de rotura por la acción de fuerzas exteriores han sido objeto de numerosos trabajos de investigación.

Hasta 1950 estaban admitidas, por la mayoría de los autores, las hipótesis de Feret (1), según las cuales la naturaleza mineralógica de los áridos no tenía ninguna influencia en el comportamiento del hormigón endurecido. Sin embargo, Farran (2), en 1956, puso de manifiesto que «diversos factores ligados a la naturaleza mineralógica de los áridos pueden tener una influencia decisiva sobre las resistencias mecánicas del hormigón».

En anteriores trabajos (3) hemos puesto de manifiesto la acción ejercida por minerales de arcilla, montmorillonita y sepiolita, sobre la pasta endurecida de cemento Portland, por lo que hemos considerado de interés estudiar el efecto que producen sobre la pasta endurecida de cemento, la adición de rocas carbonáticas, caliza y dolomía, molidas hasta alcanzar una superficie específica igual a la del cemento.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de agosto de 1983.

2. METODOS EXPERIMENTALES

2.1. Respecto a los materiales

El estudio del cemento se ha realizado de acuerdo con lo establecido en el vigente Pliego de Condiciones para la Recepción de Conglomerados Hidráulicos (4).

La caracterización de las adiciones se ha realizado mediante difracción de rayos X y su análisis químico de acuerdo con la norma NELC 3.02-a (5).

2.2. Fabricación y curado de probetas cemento-adición

Se ha utilizado para la realización de este trabajo miniprobetas prismáticas de 1 X 1 X 3 centímetros. Las ventajas de la utilización de este tipo de probetas ya ha sido expuesta en los trabajos anteriores (3).

Tanto la adición como el conglomerante se han dosificado con un error menor de 1/1.000 y la homogenización de la mezcla se llevó a cabo, durante dos horas, en un molino rotatorio con bolas de caucho blando. Se comprobó la homogenización por un ensayo de uniformidad de color, con distintas partidas de una misma mezcla, y por una dosificación de sulfatos, en tres muestras diferentes de cada serie fabricada.

Debido a las diferente naturaleza estructural

de las adiciones empleadas, todas las probetas se fabricaron con la misma consistencia (15 por 100 de escurrimiento).

Con respecto a las condiciones de curado, hay que señalar que la mitad de las probetas se conservaron en agua a $21 \pm 2^\circ \text{C}$ y la otra mitad al aire, manteniendo la temperatura de la sala de conservación de $21 \pm 2^\circ \text{C}$, y el grado de humedad en 93 ± 2 por 100.

El tiempo de curado de las probetas ha sido el mismo para todas, procediéndose a realizar los ensayos de rotura a 3, 7, 28, 90, 365 y 730 días.

En la tabla adjunta se indica la notación utilizada, así como la composición de las diferentes mezclas estudiadas.

TABLA 1

Notación	Adición utilizada	% cemento	% adición
PP		100	
CC1	Caliza	95	5
CC2	Caliza	90	10
CC3	Caliza	80	20
CD1	Dolomía	95	5
CD2	Dolomía	90	10
CD3	Dolomía	80	20

2.3. Ensayos de rotura

Se han utilizado una máquina de la firma Instron, modelo 1190.

Tanto la prensa como los platos de la citada máquina cumplen con las normas establecidas, (6), (7). La velocidad de carga empleada en los ensayos comprendida entre 4 y 6 kgf/cm². seg, valor que se encuentra dentro de los límites aceptados por la normalización vigente (7).

La temperatura de la sala de ensayo ha permanecido constante a $20 \pm 2^\circ \text{C}$.

2.4. Exámen de las superficies de fractura

Inmediatamente después de la rotura de las probetas, se procedió al examen de las superficies de fractura, mediante un microscopio electrónico de barrido, de la firma I.S.I. modelo Super III, equipado con es espectrómetro de dispersión de energía de rayos X, KEVEX modelo 5100.

Finalmente, hay que señalar que se evitó la carbonatación de las muestras mediante el empleo de los desecadores adecuados.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION DE LOS MISMOS

3.1. Caracterización de los materiales

3.1.1. Cemento

El cemento utilizado en la realización del presente trabajo ha sido un cemento Portland de alta resistencia inicial (P-ARI).

Los resultados de los ensayos realizados, sobre el cemento empleado, son los siguientes (4).

Fraguado (en agua): Principio, dos horas quince minutos; fin, tres horas cero minutos.

Peso específico real: 3,12 gr/cm³.

Finura de molido: Residuo en el tamiz de 4.900 mallas por cm², en tanto por ciento 0,32.

Estabilidad de volumen: Ensayo de autoclave: 0,09 por 100 de expansión.

Resistencia del mortero normal:

Edad	Valores medios de las cargas máximas unitarias, en kg/cm ²	
	Flexo-tracción	Compresión
3 días	63,90	325,00
7 días	70,90	397,00
28 días	83,70	492,00

Análisis químico: Resultados referidos a la muestra desecada a 105-110° C.

Sílice (SiO ₂) %	19,30
Alúmina (Al ₂ O ₃) %	6,10
Oxido férrico (Fe ₂ O ₃) %	3,50
Cal (CaO) %	61,40
Magnesia (MgO) %	1,50
Trióxido de azufre (SO ₃) %	3,60
Oxido sódico (Na ₂ O) %	0,50
Oxido potásico (K ₂ O) %	0,82
Pérdida al fuego %	2,40
Insolubles %	1,00
Sin dosificar %	0,88
Total	100,00

INFLUENCIA DE LA ADICION DE ROCAS CARBONATICAS EN EL CEMENTO PORTLAND

Humedad a 105-110° C	0,24
Cal libre %	1,30

La composición mineralógica, deducida de los datos del análisis químico, de acuerdo con la aplicación de las fórmulas de Bogue (8) es la siguiente:

Silicato tricálcico (C ₃ S) %	42,87
Silicato bicálcico (C ₂ S) %	23,99
Aluminato tricálcico (C ₃ A) %	10,25
Ferritoaluminato tetracálcico (C ₄ AF) %	10,64
Sulfato cálcico (SO ₃ Ca) %	6,12

Superficie específica (Blaine): 4.593 cm²/gr.

Calor de hidratación (Cal/gr.):

3 días	7 días	28 días
46	63	76

TABLA N.º 2

Muestra: PP

Curado Aire

Resultado edad (días)	3	7	28	90	365	730
Media (kg/cm ²)	702	812	847	947	1.021	1.148
Desviación típica (kg/cm ²)	22,4	32,7	27,8	28,6	68,53	47,63
Coefficiente de variación	0,03	0,04	0,03	0,03	0,06	0,04
Número de probetas	12	12	12	12	12	12

TABLA N.º 3

Muestra: PP

Curado: Agua

Resultado edad (días)	3	7	28	90	365	730
Media (kg/cm ²)	716	838	972	1.121	1.378	1.511
Desviación típica (kg/cm ²)	26,7	35,4	59,7	47,9	105,02	85,38
Coefficiente de variación	0,03	0,04	0,06	0,04	0,07	0,05
Número de probetas	12	12	12	12	12	12

TABLA N.º 4

Muestra: CC 1

Curado: Aire

Resultado edad (días)	3	7	28	90	365	730
Media (kg/cm ²)	646	685	707	731	932	948
Desviación típica (kg/cm ²)	47,4	28,3	63,1	68,6	63,4	74,13
Coefficiente de variación	0,07	0,04	0,08	0,09	0,06	0,07
Número de probetas	12	12	12	12	12	12

TABLA N.º 5

Muestra: CC 1

Curado: Agua

Resultado edad (días)	3	7	28	90	365	730
Media (kg/cm ²)	721	803	828	881	1.084	1.103
Desviación típica (kg/cm ²)	49,8	39,8	40,5	41,7	59,5	62,1
Coefficiente de variación	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05
Número de probetas	12	12	12	12	12	12

3.1.2. Adiciones

Los resultados del análisis químico de las adiciones utilizadas son los siguientes (5):

	Caliza	Dolomía
Sílice (SiO ₂) %	0,81	3,60
Alúmina (Al ₂ O ₃) %	0,00	0,80
Oxido férrico (Fe ₂ O ₃) %	0,64	0,80
Cal (CaO) %	54,90	29,70
Magnesia (MgO) %	0,15	20,50
Trióxido de azufre (SO ₃) %	0,11	0,08
Pérdida al fuego %	43,21	44,50
Sin dosificar %	0,19	0,04
Total	100,01	100,02

3.2. Ensayos de rotura

En las tablas 2 a 15 se indican los valores de la resistencia a la compresión de los diferentes conglomerantes estudiados.

INFLUENCIA DE LA ADICION DE ROCAS CARBONATICAS EN EL CEMENTO PORTLAND

TABLA N.º 6

Muestra: CC 2

Curado: Aire

Resultado edad (días)	3	7	28	90	365	730
Media (kg/cm ²).	612	720	729	733	922	938
Desviación típica (kg/cm ²).	51,3	35,7	12,8	43,4	54,11	90,03
Coefficiente de variación	0,08	0,04	0,02	0,05	0,05	0,09
Número de probetas	12	12	12	12	12	12

TABLA N.º 7

Muestra: CC 2

Curado: Agua

Resultado edad (días)	3	7	28	90	365	730
Media (kg/cm ²).	620	717	775	874	993	1.060
Desviación típica (kg/cm ²).	46,1	48,9	29,7	59,6	73,1	78,4
Coefficiente de variación	0,07	0,06	0,04	0,06	0,07	0,07
Número de probetas	12	12	12	12	12	12

TABLA N.º 8

Muestra: CC 3

Curado: Aire

Resultado edad (días)	3	7	28	90	365	730
Media (kg/cm ²).	551	607	615	629	807	833
Desviación típica (kg/cm ²).	36,1	29,1	29,7	52,5	70,7	69,31
Coefficiente de variación	0,06	0,04	0,04	0,08	0,08	0,08
Número de probetas	12	12	12	12	12	12

TABLA N.º 9

Muestra: CC 3

Curado: Agua

Resultado edad (días)	3	7	28	90	365	730
Media (kg/cm ²).	567	625	695	796	849	943
Desviación típica (kg/cm ²).	20,8	13,6	41,1	62,2	80,8	71,1
Coefficiente de variación	0,03	0,02	0,05	0,07	0,09	0,07
Número de probetas	12	12	12	12	12	12

TABLA N.º 10

Muestra: CD 1

Curado: Aire

Resultado edad (días)	3	7	28	90	365	730
Media (kg/cm ²).	636	664	680	868	896	892
Desviación típica (kg/cm ²).	59,3	43,3	38,5	28,9	53,4	119,4
Coefficiente de variación	0,09	0,06	0,05	0,03	0,05	0,13
Número de probetas	12	12	12	12	12	12

TABLA N.º 11

Muestra: CD 1

Curado: Agua

Resultado edad (días)	3	7	28	90	365	730
Media (kg/cm ²).	669	710	773	933	1.015	1.119
Desviación típica (kg/cm ²).	48,6	62,6	79,7	59,5	98,9	192,5
Coefficiente de variación	0,07	0,08	0,09	0,06	0,09	0,17
Número de probetas	12	12	12	12	12	12

TABLA N.º 12

Muestra: CD 2

Curado: Aire

Resultado edad (días)	3	7	28	90	365	730
Media (kg/cm ²).	633	637	653	736	847	917
Desviación típica (kg/cm ²).	30,5	47,5	35,2	38,7	74,2	136,2
Coefficiente de variación	0,04	0,07	0,05	0,05	0,09	0,14
Número de probetas	12	12	12	12	12	12

INFLUENCIA DE LA ADICION DE ROCAS CARBONATICAS EN EL CEMENTO PORTLAND

TABLA N.º 13

Muestra: CD 2

Curado: Agua

Resultado edad (días)	3	7	28	90	365	730
Media (kg/cm ²)	635	670	711	808	949	1.109
Desviación típica (kg/cm ²)	42,1	47,5	37,6	18,6	57,4	156,3
Coefficiente de variación	0,06	0,07	0,05	0,03	0,06	0,14
Número de probetas	12	12	12	12	12	12

TABLA N.º 14

Muestra: CD 3

Curado: Aire

Resultado edad (días)	3	7	28	90	365	730
Media (kg/cm ²)	539	636	654	710	742	849
Desviación típica (kg/cm ²)	53,5	25,9	34,8	29,4	71,9	95,7
Coefficiente de variación	0,09	0,04	0,05	0,04	0,09	0,11
Número de probetas	12	12	12	12	12	12

TABLA N.º 15

Muestra: CD 3

Curado: Agua

Resultado edad (días)	3	7	28	90	365	730
Media (kg/cm ²)	584	647	695	780	860	1.070
Desviación típica (kg/cm ²)	20,7	36,4	41,7	39,1	34,9	122,8
Coefficiente de variación	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03	0,11
Número de probetas	12	12	12	12	12	12

Hay que señalar que el coeficiente de variación de las probetas fabricadas con adición de dolomía, a edades de dos años, es algo superior a lo normal. Ahora bien, la experiencia de laboratorio demuestra que este hecho es relati-

vamente frecuente en probetas con edades de dos a cinco años, sin que, generalmente, esta circunstancia pueda imputarse, con seguridad, a ningún fenómeno concreto.

En las figuras 1 y 2 se muestran la represen-

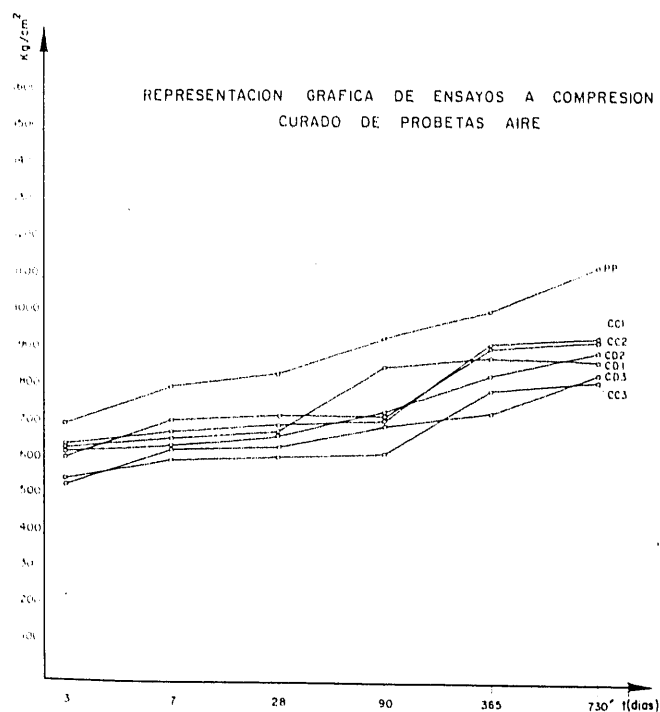


Fig. 1.—Representación gráfica de ensayos a compresión. Curados de probetas: Aire.

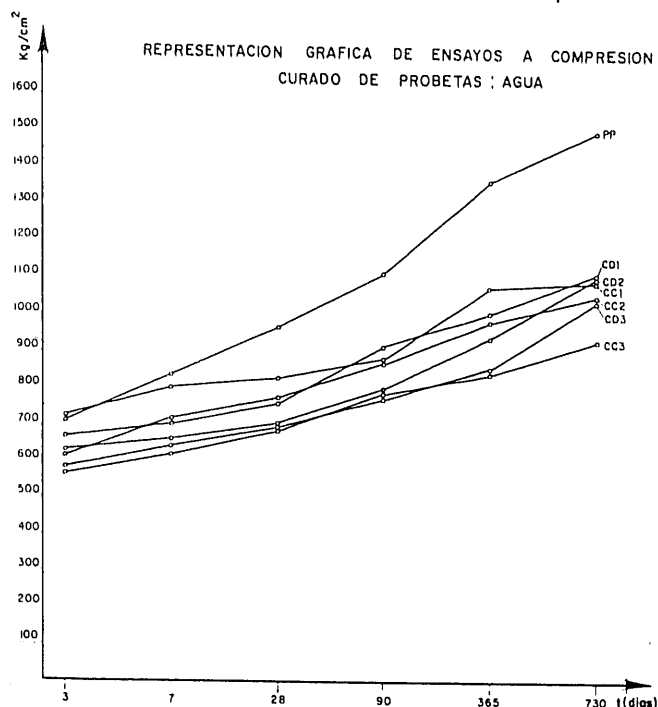


Fig. 2.—Representa gráfica de ensayos a compresión. Curado de probetas: Agua.

tación gráfica de los datos reflejados en la tablas anteriores, pudiendo observarse la caída de resistencia que sufren las probetas con adición, frente a las probetas de referencia de pasta pura.

4. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

El mero análisis estadístico de los resultados precedentes, no indica nada del porqué de esa caída de resistencias. Para explicarla hemos de tener en cuenta que, por una parte, diversos factores ligados a la naturaleza mineralógica de las adiciones, entre los que destaca la adherencia entre la pasta de cemento y la adición, pueden alterar, sensiblemente, los valores de las resistencias mecánicas de los conglomerantes (2) (9), y por otra parte que, en definitiva, son los procesos de hidratación-endurecimiento los que van a dar lugar a la evolución de la textura del conglomerante y, por tanto, a su resistencia mecánica.

El primero de estos factores, adherencia pasta de cemento-rocas carbonáticas, tiene que ser eliminado, ya que trabajos de Farran (2), Maso (9), Bertacchi (10), Dupuy *et al.* (11) y Duffaut *et al.* (12), en los que se estudia la adherencia entre la pasta de cemento y las rocas carbonáticas es tan estrecha que, incluso, han llegado a observarse crecimientos epitáxicos.

El segundo de los factores, proceso de hidratación-endurecimiento del conglomerante, creemos que es el que puede explicar la caída de resistencias observadas en las probetas con adición estudiadas. El estudio de la evolución de los procesos de hidratación-endurecimiento o, lo que es lo mismo, de la cinética de texturación de los conglomerantes, se ha realizado de dos modos diferentes. Por una parte, se ha seguido, en los correspondientes difractogramas de rayos X, la evolución del pico a $4,92 \text{ \AA}$ de la portlandita, mientras que, por otra parte, se estudiaron, mediante microscopia electrónica de barrido, las superficies de fractura de los diferentes conglomerantes fabricados.

El estudio de la evolución del pico de la portlandita ha confirmado, de acuerdo con la teoría de Le Chatelier (13), que el modo de curado de las probetas incide en el valor de las

resistencias mecánicas alcanzadas. Así, se ha observado que las probetas conservadas en agua, con mayores resistencias, presentaban una mayor evolución en el citado pico, como consecuencia de un mayor desarrollo de los procesos de hidratación.

El estudio mediante microscopia electrónica de barrido ha mostrado la existencia de un importante retraso en la evolución textural de los conglomerantes fabricados con adición.

Las fotos 1 a 4 muestran algunos aspectos de la superficie de fractura de los conglomerantes estudiados.

La foto 1 muestra pequeños cristales de silicato cálcico hidratado, CSH, en el interior de un poro. El apenas incipiente desarrollo de dichos cristales, en edades de veintiocho días, indica un importante retraso en la cinética textural del conglomerante.

En la foto 2 pueden observarse plaquetas hexagonales de portlandita. Estas plaquetas no presentan, como correspondería a la edad del conglomerante, ningún fenómeno de degradación por solución, lo que indica la existencia de un importante retraso en la evolución textural del conglomerante.

La foto 3 muestra otro aspecto morfológico de las plaquetas de portlandita. Esta morfología creemos que se debe al desarrollo de los cristales en espacios intergranulares, por similitud con crecimientos cristalinos, aparentemente análogos, que han podido observarse en el caso de hormigones armados (14).

En la foto 4 se aprecian plaquetas hexagonales perfectamente desarrolladas, en un conglomerante fabricado con la adición de dolomía.

Resumiendo, y de acuerdo con lo anteriormente expuesto, creemos que la bajada de resistencias en los conglomerantes fabricados con la adición de caliza y dolomía molidas, puede explicarse por el hecho de que las citadas adiciones están ocupando un «espacio físico» que impide la evolución de la textura de dichos conglomerantes.



Foto 1.—M.E.B., CSH. Muestras CC1. Edad: Veintiocho días. Curado: Aire.



Foto 2.—M.E.B. Portlandita, Muestra CC2. Edad: noventa días. Curado: Agua.

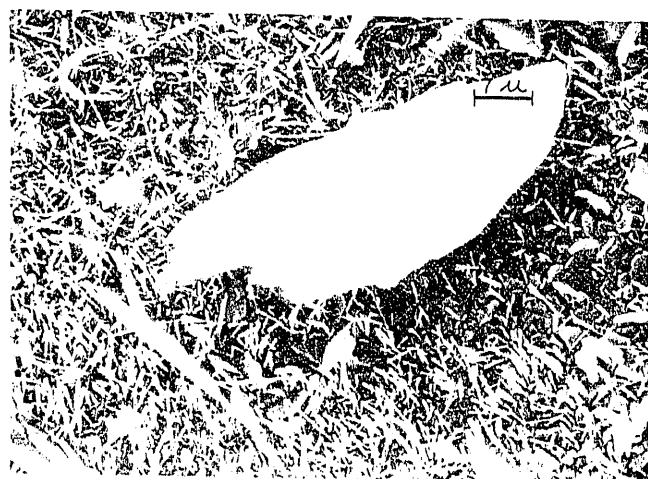


Foto 3.—M.E.B. Portlandita y CSH. Muestra CD1. Edad: siete días. Curado: Agua.



Foto 4.—M.E.B. Portlandita. Muestra CD3. Edad: noventa días. Curado: Agua.

4. CONCLUSIONES

De los estudios y ensayos realizados con los diferentes conglomerantes utilizados, se deducen las conclusiones siguientes:

1. Se ha puesto a punto un método experimental que permite la comparación significativa de las resistencias mecánicas de miniprobetas prismáticas (1 X 1 X 3 cm.) de conglomerantes fabricados con cemento Portland, amasado con caliza y dolomía molidas.
2. La presencia de rocas carbonáticas en probetas de pasta pura, hace que se

alteren los procesos de fraguado y endurecimiento de las mismas, provocando importantes caídas en los valores de su resistencia mecánica.

3. El efecto de la presencia de rocas carbonáticas en probetas de pasta pura se pone de manifiesto con un 5 por 100 de adición.
4. La mayor resistencia que, en general, presentan las probetas con adición de caliza molida, frente a la de las probetas con adición de dolomía molida, puede deberse al menor desarrollo de estructu-

ras macladas en la dolomita, lo que impide una mayor absorción de agua.

5. El modo de curado incide en los valores de las resistencias alcanzadas por las probetas, presentando mayor resistencia las probetas conservadas en agua que las conservadas al aire.

BIBLIOGRAFIA

1. FERET, R.: «Sur le forme et l'état de surface des éléments inertes des betons». Annales I.T.B.T.P., Mars-Avril, 1937.
2. FARRAN, J.: «Contribution mineralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydrates des ciments et les matériaux enrobés». Rev. Mat. Cons. 490-491, 155-172 y 492, 191-209. 1956.
3. SORIANO, J.: «Influencia de la naturaleza mineralógica de las adiciones en el comportamiento de la pasta endurecida del cemento Portland. II Ensayos de rotura a compresión». Revista de Obras Públicas, agosto, 1981.
4. BOLETIN OFICIAL DEL ESTADO: «Pliego general de condiciones para la recepción de conglomerantes hidráulicos en las obras de carácter oficial (RC-75)», 206, 18197-18311, 1975.
5. NELC 3.02-a: «Métodos para el análisis químico de calces y calizas del Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción». Madrid, 1950.
6. INSTITUTO NACIONAL DE RACIONALIZACION DEL TRABAJO: «Determinación de la dureza Rockwell en los materiales metálicos». Norma UNE 7053. 1952.
7. INSTITUTO NACIONAL DE RACIONALIZACION DEL TRABAJO: «Ensayo de rotura por compresión de probetas de hormigón». Norma UNE 7242. 1971.
8. BOGUE, R. H.: «La chimie du ciment Portland» Eyrolles Ed. Paris, 1952.
9. MASO, J. C.: «La nature minéralogique des agrégats facteur essentiel de la résistance des bétons à la rupture et à l'action du gel». Rev. Mat. Cons. 647-648, 247-276, 1969.
10. BERTACCHI, P.: «Adherence entre agrégats et ciment et son influence sur les caractéristiques des bétons». Rev. Mat. Cons. 659, 243-249, 1970.
11. DUPUY, C.; FARRAN, J.; GARNIER, G., y MASO, J. C.: «Influence de la nature mineralogique des granulats sur les deformations des mortiers». Rev. Mat. Cons. 659, 251-266, 1970.
12. DUFFAUT, J.; FARRAN, J.; MASO, J. C.; DUSSEL, J., GAUTIER, C.: «Importance de la pétrographie des agrégats. Influence de la nature minéralogique des sables fins sur les propriétés des bétons». VII Congrès des Grands Barrages, Roma paper Q-24, 1961.
13. LE CHATELIER, H.: «Recherches experimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques». Dunod Editeurs, Paris, 1918.
14. REGOURD, M., y HORNAIN, H.: «Applications de la microscopie électronique à balayage». Rev. Mat. Cons. 693, 73-87, 1975.