Resistencia química del hormigón
XXVI. Influencia de la adición de escoria a un cemento portland. Estudio de la concentración iónica (del sistema cemento 3/escoria-agua) de mar artificial

DEMETRIO GASPAR-TEBAR y JOSE LUIS SAGRERA-MORENO
IETcc-CSIC

RESUMEN

En el presente trabajo, continuación de otros, se estudia la evolución de la cantidad de nueva fase sólida formada en el agua de mar artificial ASTM D 1141-75 en donde han estado sumergidas las series de probetas de mortero (1 : 3) hechas con cemento portland (cemento 3/escoria = 85/15-65/35-40/60 y 30/70, en peso, durante 56-90-180 y 360 días (períodos de conservación-ataque), en esta etapa, después del período de curado (1 día en cámara húmeda y 21 días bajo agua potable filtrada). Así mismo, se estudia la variación del pH y de la concentración de iones Ca (II), Mg (II), SO_4 (II) y Cl (I) de dicha agua de mar artificial ASTM, así como del contenido de iones Ca (II), Mg (II) y SO_4 (II) de las mencionadas nuevas fases sólidas formadas.

En los casos estudiados se ha puesto de manifiesto que en la disolución se ha producido un aumento de la concentración de Ca (II) y del valor del pH, una disminución del contenido de Mg (II), SO_4 (II) y Cl (I), así como la formación de una nueva fase sólida, que son función de la mezcla utilizada para fabricar las mencionadas series de probetas y del tiempo de conservación-ataque. Por otra parte, se ha probado que la evolución de los contenidos de Ca (II) y de Mg (II) están íntimamente ligados; cuando los del primero aumentan, los del segundo disminuyen y viceversa, existiendo un punto que corresponde al equilibrio iónico Ca (II) ⇌ Mg (II).

Las cantidades de Ca (II) en la disolución y en la nueva fase sólida, que proceden de los compuestos disueltos del cemento hidratado experimentan un incremento según lo hace el tiempo de conservación-ataque de cada serie de probetas fabricadas con una mezcla cemento 3/escoria y disminuyen exponencialmente conforme lo hace el contenido de Ca (II) en el agua de mar artificial ASTM, el proceso de disolución de los compuestos de Ca (II) del cemento (valores medios) es aditivo.

El ion Mg (II) ha desaparecido, prácticamente, del agua de mar artificial ASTM en donde han estado sumergidas las series de probetas de mortero hechas con cemento 3 y con la mezcla que tiene 15 % de escoria, en peso; en estos medios ha precipitado en parte, como brucita. En los medios restantes se encuentra, dicho ion, en cantidades diversas, según la mezcla y el tiempo de conservación-ataque.

Los contenidos de SO_4 (II) y Cl (I) del agua de mar artificial experimentan una disminución que depende de la mezcla cemento 3/escoria utilizada para fabricar las series de probetas de mortero. Las mayores cantidades desaparecidas corresponden a los medios en donde han estado las probetas de mortero hechas con cemento 3 y con las mezclas que tienen 15 y 35 %, en peso, de escoria para los iones SO_4 (II) y con las mezclas con 35-60 y 70 %, en peso, de escoria para los iones Cl (I).

SUMMARY

This work, which is a follow-up of others, studies the development of the solid-stage quantity formed in ASTM D 1141-75 artificial seawater, in which the series of samples of mortar (1 : 3), made up of a portland cement (cement 3 <> P-450) and the mixtures cement 3/slag = = 85/15 - 65/35 - 40/60 and 30/70, in weight, were submerged during 56 - 90 - 180 and 360 days (periods of conservation-attack) in this stage, after the curing period (1 day in a curing chamber and 21 days under drinking filtered water). The changes in the pH value and the concentration of Ca (II), Mg (II), SO_4 (II) and Cl (I) ions in this ASTM artificial sea-water are likewise studied, so as the content of Ca (II), Mg (II) and SO_4 (II) ions of the new solid phase formed.

In the studied cases it has been shown that an increase of Ca (II) in the solution and of the pH value is produced, the Mg (II), SO_4 (II) and Cl (I) content is reduced and a solid phase is formed, these being a function of the mixture used for making the series of samples mentioned and of the conservation-attack period. Furthermore, it has been proved that the evolution in the Ca (II) and Mg (II) content is closely linked: when it increases in the first one, that of the second decreases and vice versa, being there a point which corresponds to the Ca (II) ⇌ Mg (II) ionic equilibrium.

Quantities of Ca (II) into the solution and in the new solid phase, from the compounds of hydrated cement, show an increase, in accordance with the conservation-attack period of each serie of samples made up with a cement 3/slag mixture, and decrease sharply in accordance with the reduction of cement 3 content in the mixture. If moreover the Ca (II) content in the ASTM artificial sea-water is taken into account, the dissolving process of the Ca (II) compounds of the cement (average values) may be added.

The Mg (II) ion has practically disappeared from the artificial sea-water where the series of mortar samples made up of cement 3 and the mixture which has 15 % slag in weight, have been submerged; in these means it has precipitated, in a part, as brucite. In the other means this ion is found in diverse quantities, according to the mixture and to the conservation-attack time.

The content of SO_4 (II) and Cl (I) in the artificial sea-water has, in likewise experience, a decrease which depends on the mixture used in the manufacture of the mortar samples and the time of conservation-attack. The greatest quantities that have disappeared correspond to the means containing the mortar samples made with cement 3 and the mixtures with 15 % and 35 % slag, in weight, for the SO_4 (II) ions and the mixtures with 35 %, 60 % and 70 % slag for the Cl (I) ions.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

1. INTRODUCCION

En otros trabajos anteriores (1) (2) (3) (4) se estudió:

a) La evolución que experimenta la resistencia química por el método de Koch-Steinegger y las modificaciones sufridas por las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero (1 : 3) de 1 × 1 × 6 cm hechas con el cemento portland (cemento 3 <> P-450), objeto del presente artículo, y con las mezclas cemento 3/escoria = 85/15 - 65/35 - 40/60 y 30/70, en peso, sumergidas en agua potable filtrada (*), unas series de 12 probetas, y en agua de mar artificial ASTM D 1141-75 (**), otras series análogas de 12 probetas, durante 56 - 90 - 180 y 360 días, en esta etapa, después de haberlas curado 24 horas en un recinto saturado de humedad y, a continuación, bajo agua potable filtrada durante 21 días (1).

b) La composición estructural de las nuevas fases sólidas formadas en los medios de curado y de conservación (agua potable filtrada) (2), así como de conservación-ataque (agua de mar artificial ASTM) (3), en donde las mencionadas series de probetas han estado sumergidas.

c) La evolución de las características estructurales de la fracción enriquecida (cemento 3 hidratado e hidratado-atacado) extraída de uno de los prismas de cada serie de probetas de mortero de los sistemas mencionados anteriormente (2) (3).

d) La variación de la concentración de los iones calcio y sulfato en los medios de curado y de conservación (agua potable filtrada), en donde han estado sumergidas las diversas series de probetas de mortero, así como de las fases sólidas formadas, y la evolución del pH de dichos medios (4).

En el presente artículo, continuación de los anteriores y que se ampliará con otros, se estudia la variación de la concentración de los iones calcio, magnesio, sulfato y cloruro del agua de mar artificial (ASTM D 1141-75) en donde han estado sumergidas diversas series de probetas de mortero, así como de las fases sólidas formadas (los tres primeros); así mismo, se estudia la variación del pH de dichos medios y de las cantidades de las nuevas fases sólidas.

(*) Sistema: cemento 3/escoria-agua potable filtrada.
(**) Sistema: cemento 3/escoria-agua de mar artificial.

2. PARTE EXPERIMENTAL

En el agua de mar artificial (ASTM D 1141-75) en donde han estado sumergidas las distintas series de probetas de mortero (1 : 3) hechas con cemento 3 y con las mezclas cemento 3/escoria = 85/15 - 65/35 - 40/60 y 30/70 (en peso), una vez separada la nueva fase sólida formada como se señaló en (5), se ha determinado el contenido de los iones Ca (II) y Mg (II) complexométricamente con EDTA, el de los iones SO_4 (II) gravimétricamente al estado de sulfato de bario, el de los iones Cl (I) volumétricamente por el método de Mohr y el valor del pH por medio de un pH-metro, marca Crison, modelo 501. Cada serie de probetas de mortero se ha sumergido, después de curadas como se ha señalado en el apartado anterior, en 800 ml de agua de mar artificial ASTM durante 56 - 90 - 180 y 360 días (períodos de conservación-ataque).

En la nueva fase sólida, una vez separada (5) y puesta en disolución por ataque con una disolución de ácido clorhídrico (1 + 1), se ha determinado el contenido de los iones Ca (II), Mg (II) y SO_4 (II).

De los materiales utilizados (cemento 3, escoria, arena, agua de mar artificial y agua potabable filtrada) y características, de la técnica operatoria seguida para preparar las mezclas cemento 3/escoria, así como para curar y conservar las probetas de mortero (1 : 3) de las diversas series en agua potable filtrada y en agua de mar artificial se dio cuenta en (1).

3. RESULTADOS Y DISCUSION

En la tabla 1 se encuentran las cantidades de las nuevas fases sólidas formadas en los medios (agua de mar artificial ASTM D 1141-75) en donde han estado sumergidas las diversas series de probetas de mortero hechas con cemento 3 y con las mezclas cemento 3/escoria = 85/15 - 65/35 - 40/60 y 30/70 (en peso), durante 56 - 90 - 180 y 360 días, así como los compuestos cristalinos identificados por DRX, los valores del pH y las cantidades de Ca (II), Mg (II), SO_4 (II) y Cl (I) en dichos medios. Ademas, se incluyen los contenidos de Ca (II), Mg (II) y SO_4 (II) de las mencionadas fases sólidas.

En las figuras 1 a 11, que se discuten en los apartados siguientes, se han representado dichos valores en función de la edad (tiempo de conservación-ataque) y de la mezcla cemento 3/escoria utilizada para fabricar las mencionadas series de probetas de mortero.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

TABLA 1

Sistema: cemento 3/escoria-agua de mar artificial ASTM

Evolución de la fase sólida formada, del pH y de los contenidos de Ca (II), Mg (II), SO_4 (II) y Cl (I)

Agua de mar ASTM (D 1141-75); contenidos en 800 ml de:

Ca (II) = $1{,}04 \times 10^{-2}$ moles
Mg (II) = $4{,}43 \times 10^{-2}$ moles
SO_4 (II) = $2{,}44 \times 10^{-2}$ moles
Cl (I) = $44{,}2 \times 10^{-2}$ moles, y
pH = 6,5

Mezcla cemento 3 / Escoria	Edad días	Fase sólida		Disolución pH	Ca (II); moles × 10^{-2}			Mg (II); moles × 10^{-2}			SO_4 (II); moles × 10^{-2}			Cl (I); moles × 10^{-2}
		g	DRX		Disolución	Fase sólida	Suma	Disolución	Fase sólida	Suma	Disolución	Fase sólida	Suma	Disolución
100/0	56	1,35	Cc↑-Ag-B↑	11,8 a 12,5	3,86	1,13	4,99	n.d.	0,22	0,22	1,39	0,03	1,42	42,74
	90	1,57	Cc↑-Ag-B↑		4,59	1,17	5,76	n.d.	0,45	0,45	1,33	0,03	1,36	43,70
	180	1,79	Cc↑-Ag-B↑		4,48	1,52	6,00	n.d.	0,27	0,27	1,11	0,03	1,14	44,10
	360	4,35	Cc↑-Ag-B↑		3,29	3,39	6,68	n.d.	0,43	0,43	0,76	0,04	0,80	44,18
85/15	56	0,85	Cc↑-Ag-B	11,7 a 12,0	3,57	0,58	4,15	n.d.	0,19	0,19	1,51	0,02	1,53	40,72
	90	1,07	Cc↑-Ag-B		3,28	0,94	4,22	0,01	0,09	0,10	1,35	—	1,35	42,72
	180	1,42	Cc↑-Ag-B		3,65	1,31	4,96	n.d.	0,15	0,15	1,07	0,03	1,10	42,74
	360	3,15	Cc↑-Ag-B		3,05	2,87	5,92	0,18	0,07	0,25	0,77	0,05	0,82	44,10
65/35	56	0,31	Cc-Ag↑	7,5 a 10	2,30	0,27	2,57	0,50	n.d.	0,50	1,70	ind.	1,70	38,85
	90	0,86	Cc-Ag		2,61	0,70	3,31	0,11	0,04	0,15	1,57	0,01	1,58	41,34
	180	1,22	Cc↑≃Ag		2,64	1,11	3,75	0,08	0,02	0,10	1,51	0,02	1,53	41,24
	360	1,77	Cc↑≃Ag		2,75	1,55	4,30	0,16	0,03	0,19	1,56	0,03	1,59	44,06
40/60	56	0,27	Cc-Ag↑	7,8 a 8,3	1,49	0,24	1,73	2,03	n.d.	2,03	2,10	ind.	2,10	39,63
	90	0,47	Cc-Ag↑		1,44	0,37	1,81	2,05	0,05	2,10	2,08	ind.	2,08	41,50
	180	0,75	Cc-Ag↑		1,42	0,65	2,07	2,05	0,04	2,09	1,99	ind.	1,99	40,86
	360	1,46	Cc-Ag↑		1,33	0,80	2,13	2,30	0,10	2,40	2,13	ind.	2,13	44,00
30/70	56	0,23	Cc-Ag↑	7,5 a 8,5	1,52	0,19	1,71	2,66	n.d.	2,66	2,33	0,01	2,34	40,56
	90	0,41	Cc-Ag↑		1,34	0,36	1,70	2,51	0,01	2,52	2,25	n.d.	2,25	42,07
	180	0,71	Cc-Ag↑		1,04	0,64	1,68	2,35	0,02	2,37	2,25	ind.	2,25	41,23
	360	1,19	Cc-Ag↑		1,07	0,89	1,96	2,43	0,10	2,53	2,23	n.d.	2,23	43,29

n.d. = no detectado. ind. = indicios

3.1. Evolución de la cantidad de fase sólida

En las figuras 1 y 2 se ha representado la cantidad de fase sólida formada en los medios mencionados anteriormente en donde han estado sumergidas las series de probetas hechas con una misma mezcla, en función del tiempo de conservación-ataque, en la primera, y de la edad de conservación-ataque para cada mezcla utilizada en la fabricación de las distintas series de probetas, en la segunda, en las que se puede apreciar que dicha cantidad de fase sólida es:

a) función del tiempo de conservación-ataque para cada mezcla. Dicha cantidad de fase sólida aumenta conforme lo hace la edad (figura 1) y la cantidad de cemento 3 en la mezcla.

b) función de la mezcla utilizada en la fabricación de las probetas de mortero, disminuyendo para cada edad conforme lo hace la cantidad de cemento en dicha mezcla (figura 2).

En la mencionada fase sólida, que en ciertos casos se encuentra impurificada por pequeñas fracciones desprendidas de las probetas, se han identificado por difracción de rayos X (3) los picos de los compuestos cristalinos calcita, aragonito y brucita.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

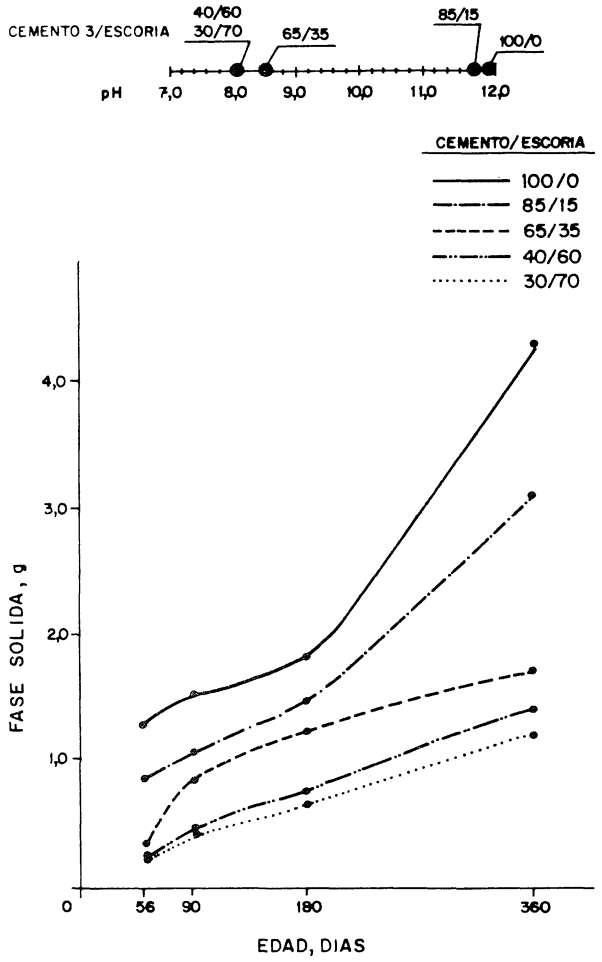


Fig. 1.—Sistema: cemento 3/escoria - agua de mar artificial ASTM. Evolución de la cantidad de fase sólida y del pH.

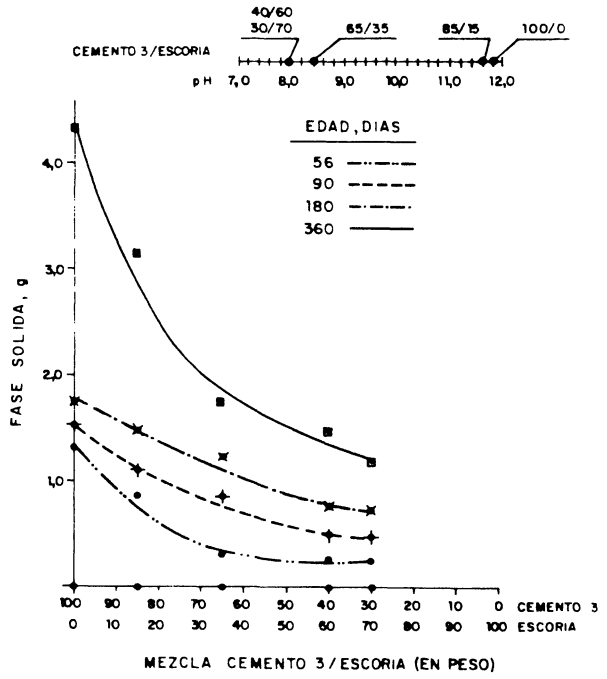


Fig. 2.—Sistema: cemento 3/escoria - agua de mar artificial ASTM. Evolución de la cantidad de fase sólida y del pH.

Los picos de la calcita y del aragonito, con intensidad variable, se han detectado en todos los DRX y los de la brucita, sólamente, en las fases sólidas formadas en el agua de mar artificial en donde han estado sumergidas las series de probetas de mortero hechas con cemento 3, con la máxima intensidad, y con la mezcla que tiene el 15 % de escoria (en peso), con la mínima intensidad.

La máxima intensidad de los picos de la calcita, análoga entre si, corresponde a los DRX de las fases sólidas que se han formado en los medios de conservación-ataque (agua de mar artificial) en donde han estado sumergidas, durante las cuatro edades, las diversas series de probetas de mortero fabricadas con cemento 3 y con las mezclas cemento 3/escoria = 85/15 (en peso), para todas las edades, y 65/35 (en peso), para t = 22 + 180 días y 22 + 360 días; la mínima intensidad corresponde a los diagramas de las fases sólidas que aparecen en el agua de mar artificial en donde se han conservado las probetas hechas con las mezclas cemento 3/escoria = 65/35 (en peso), para t = 22 + 56 y 22 + 90 días, 40/60 y 30/70 (en peso), para todas las edades. Por el contrario, la máxima intensidad de los picos del aragonito se encuentra en los DRX que presentan la mínima intensidad para los picos de la calcita y viceversa.

3.2. Evolución del pH

El pH del agua de mar artificial ASTM D 1141-75 (6,5) ha experimentado un incremento en todos los casos, encontrándose comprendido en los entornos 11,8 a 12,5 - 11,7 a 12,0 - 7,5 a 10 y 7,5 a 8,5 según se trate de los medios en donde han estado las series de probetas hechas con las mezclas cemento 3/escoria = = 100/0 (en peso) el primero, 85/15 (en peso) el segundo, 65/35 (en peso) el tercero, 40/60 y 30/70 (en peso) el cuarto (figs. 1 y 2).

3.3. Evolución del contenido de Ca (II)

En las figuras 3 y 4 se ha representado el contenido de Ca (II) disuelto [Ca (II) en la fase líquida + Ca (II) en la fase sólida] —procedente, de un modo especial, del $Ca(OH)_2$ del cemento hidratado— en función del tiempo de conservación-ataque para las diversas series de probetas de mortero hechas con cada una de las mezclas cemento 3/escoria estudiadas, en la primera figura, y en función de la mezcla utilizada para fabricar las diversas series de probetas de mortero para cada edad (tiempo de conservación-ataque), en la segunda.

En la figura 3 se aprecia que la cantidad de dicho Ca (II) disuelto, para cada mezcla, au-

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

menta con el tiempo de conservación-ataque; los mayores incrementos experimentados por las diversas series de probetas de mortero sumergidas durante 56 y 360 días ($1,69 \times 10^{-2}$ - $1,77 \times 10^{-2}$ y $1,73 \times 10^{-2}$ moles) y los menores ($0,40 \times 10^{-2}$ y $0,25 \times 10^{-2}$) corresponden a los medios en donde han estado las diversas series de probetas de mortero hechas con cemento 3 y con las mezclas que tienen los menores contenidos de escoria (15 y 35 % de escoria, en peso) los primeros y con los mayores contenidos de escoria (60 y 70 % en peso) los segundos.

En la figura 4 se observa que, para cada edad, la cantidad de Ca (II) <> $Ca(OH)_2$ disuelto, que se encuentra en la disolución y en la fase sólida, disminuye bruscamente conforme lo hace el contenido de cemento 3 en la mezcla cemento 3/escoria utilizada para fabricar las diversas series de probetas de mortero. Si además del mencionado Ca (II) se considera el Ca (II) que existe en el agua de mar artificial ASTM ($1,04 \times 10^{-2}$ moles/800 ml), es decir, el

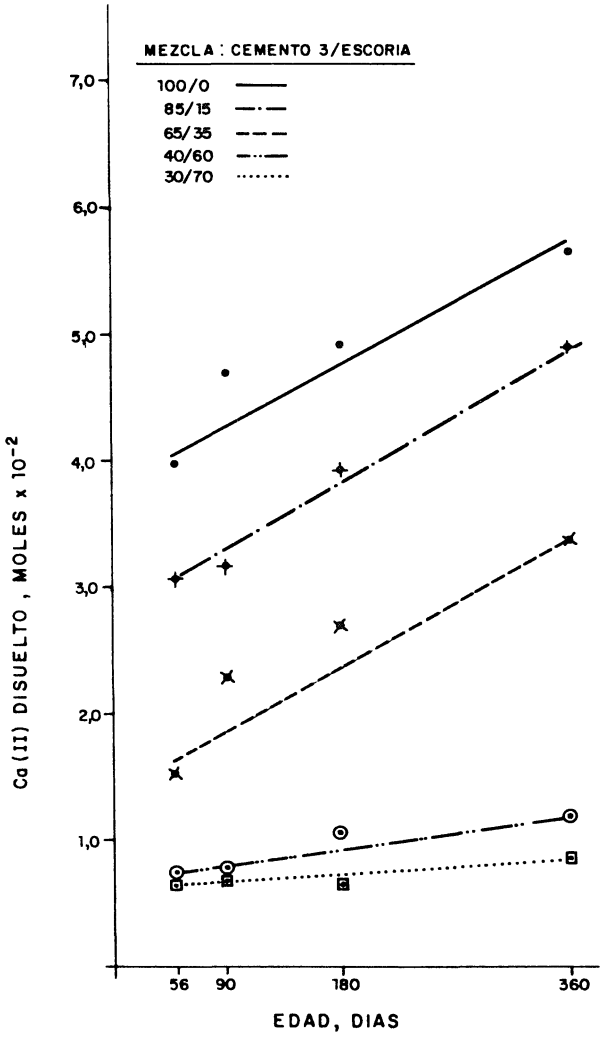


Fig. 3.—Sistema: cemento 3/escoria - agua de mar artificial ASTM. Evolución del contenido de Ca (II) disuelto.

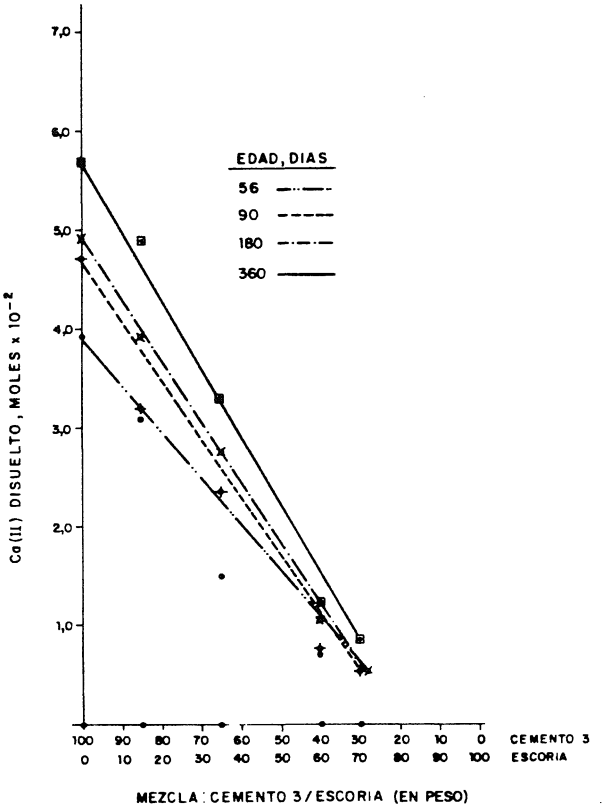


Fig. 4.—Sistema: cemento 3/escoria - agua de mar artificial ASTM. Evolución del contenido de Ca (II) disuelto.

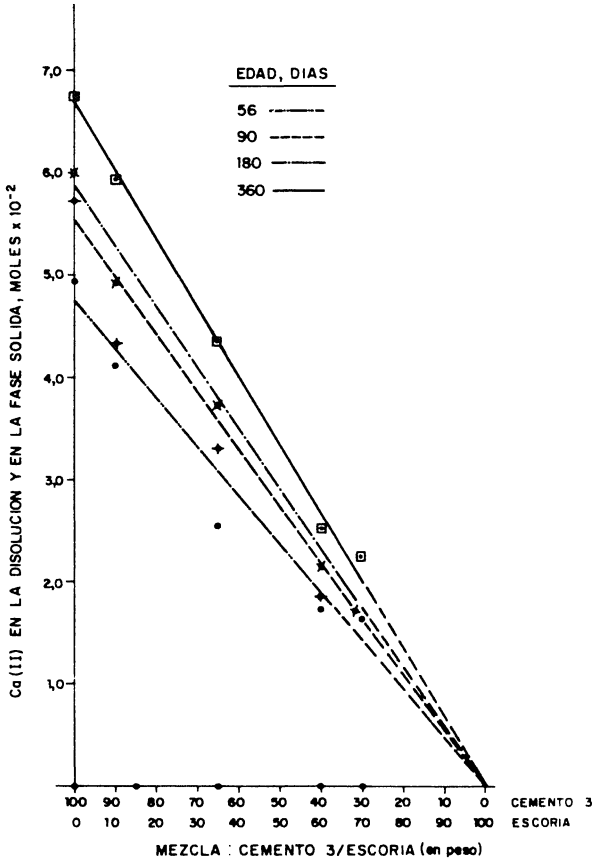


Fig. 5.—Sistema: cemento 3/escoria - agua de mar artificial ASTM. Evolución del contenido de Ca (II) total.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

Ca (II) total que existe en la disolución y el Ca (II) que se encuentra en la fase sólida (figura 5), se aprecia que, para cada edad, dichas cantidades se encuentran alineadas, prácticamente, en una recta que une los puntos correspondientes al $Ca(OH)_2$ disuelto de las series de probetas hechas con cemento 3 sin adición de escoria, más el del agua de mar, en ordenadas, y el de la mezcla teórica cemento 3/escoria = 0/100, es decir cuando no existe cemento 3, en abscisas.

3.4. Evolución del contenido de Mg (II)

En las figuras 6 y 7 se ha representado el contenido de Mg (II) en el agua de mar artificial (ASTM D 1141-75), en donde han estado sumergidas las diversas series de probetas de mortero, junto con el correspondiente a las nuevas fases sólidas que se han formado en dichos medios, en función de la edad (primera figura) y de la mezcla cemento 3/escoria utilizada para fabricar dichas series de probetas (segunda figura).

El contenido de Mg (II) del agua de mar artificial ($4{,}43 \times 10^{-2}$ moles/800 ml) experimenta, en todos los casos estudiados, una disminución que es función del tiempo de conservación-ataque y, de un modo especial, de la mezcla utilizada en la fabricación de las diversas series de probetas de mortero (figuras 6 y 7); hecho que influye en las condiciones del medio modificando, de un modo especial, la concentración de los grupos OH (I), es decir, el valor del pH.

El ion Mg (II) ha desaparecido, prácticamente, de los medios (agua de mar artificial ASTM) en donde han estado sumergidas las series de probetas de mortero hechas con cemento 3 y con la mezcla que tiene el 15 %, en peso, de escoria, en donde se ha encontrado en cantidades menores de $0{,}2 \times 10^{-2}$ moles, en el caso de la segunda mezcla, para las edades de 22 + 90 y 22 + 360 días; en los casos restantes no se ha detectado. En los medios correspondientes a las series de probetas elaboradas con la mezcla cemento 3/escoria = = 65/35 (en peso), dicho ion se ha encontrado en cantidades inferiores a $0{,}6 \times 10^{-2}$ moles, mientras que en aquellos en donde han estado las series de probetas fabricadas con las mezclas que tienen los mayores contenidos de escoria (60 y 70 %, en peso) se ha encontrado en cantidades superiores a 2×10^{-2} moles.

Por otra parte, el ion Mg (II) se ha encontrado en las nuevas fases sólidas formadas en el agua de mar artificial en donde han estado sumergidas las distintas series de probetas de mortero hechas con cemento 3 y con la mezcla cemento 3/escoria = 85/15, en peso, (en cantidades comprendidas entre $0{,}22 \times 10^{-2}$ moles y $0{,}45 \times 10^{-2}$ moles, en el primer caso, y $0{,}07 \times 10^{-2}$ moles y $0{,}19 \times 10^{-2}$ moles, en el

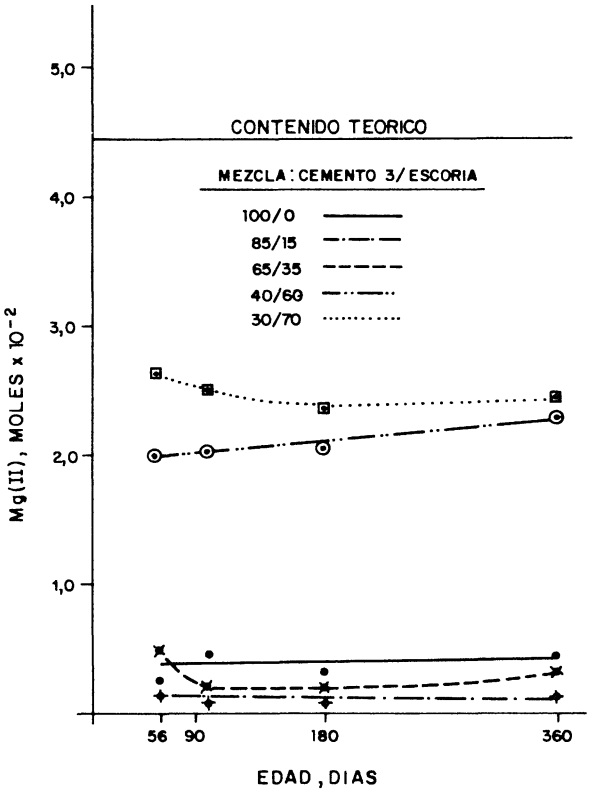


Fig. 6.—Sistema: cemento 3/escoria - agua de mar artificial ASTM. Evolución del contenido de Mg (II) en la disolución más en la fase sólida.

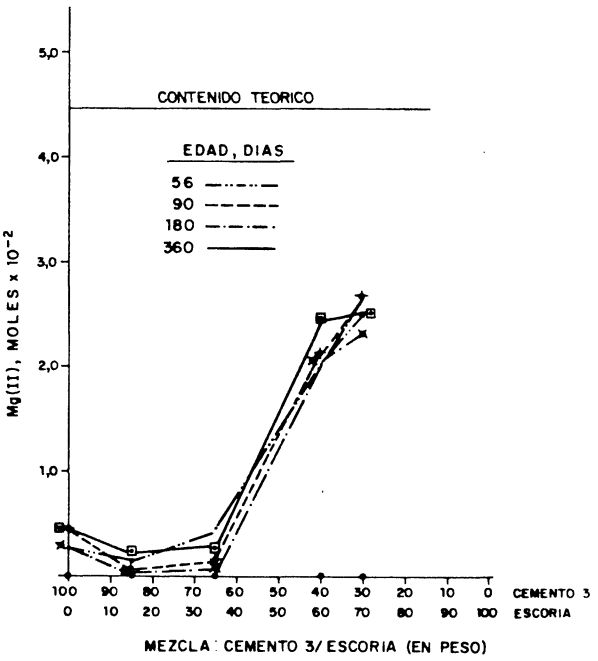


Fig. 7.—Sistema: cemento 3/escoria - agua de mar artificial ASTM. Evolución del contenido de Mg (II) en la disolución más en la fase sólida.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

segundo), en donde ha precipitado como $Mg(OH)_2$, en forma de brucita (3). En los casos restantes (probetas elaboradas con las mezclas que tienen 35, 60 y 70 % de escoria) no se ha detectado o se ha encontrado en cantidades inferiores a $0{,}15 \times 10^{-2}$ moles.

En los DRX de las fracciones enriquecidas extraídas de las diversas series de probetas fabricadas con las mezclas cemento 3/escoria se han detectado por DRX los picos del compuesto cristalino brucita (3).

En la figura 6 se observa que la evolución del contenido de Mg (II) en las disoluciones en donde han estado sumergidas las series probetas de mortero, más el de las fases sólidas formadas, en función del tiempo de conservación-ataque sigue un hábito análogo en el caso de las series hechas con cemento 3 y con las mezclas cemento 3/escoria = 85/15 y 65/35 (en peso).

Las cantidades de Mg (II) que existen en la disolución en donde han estado las distintas series de probetas, junto con las de la fase sólida, siguen una evolución análoga en las cuatro edades (figura 7), de tal modo que las cantidades de dicho Mg (II) en los medios de conservación-ataque de las series de probetas fabricadas con cemento 3 y con las mezclas cemento 3/escoria = 85/15 y 65/35 (en peso) son menores de $0{,}6 \times 10^{-2}$ moles, para las cuatro edades estudiadas, mientras que para los otros dos casos (medios correspondientes a las probetas elaboradas con 60 y 70 % de escoria) son mayores de $2{,}0 \times 10^{-2}$ moles para dichas edades, como se ha señalado anteriormente.

3.5. Evolución del contenido de SO_4 (II)

En las figuras 8 y 9 se ha representado la evolución del contenido de iones sulfato, en la disolución y en la fase sólida, en función del tiempo de conservación-ataque para las series de probetas hechas con una mezcla, en la primera figura, y de la mezcla utilizada en la elaboración de las probetas de mortero, para cada edad, en la segunda figura.

El contenido de SO_4 (II) en el agua de mar artificial ASTM D 1141-75 ($2{,}44 \times 10^{-2}$ moles/800 ml) ha experimentado, en todos los casos estudiados, una disminución que depende del tiempo de conservación-ataque y de la mezcla cemento 3/escoria utilizada para fabricar las distintas series de probetas de mortero.

En la figura 8 se aprecia que el contenido de iones SO_4 (II) en el agua de mar y en la fase sólida en donde han estado sumergidas las diversas series de probetas de mortero hechas con las mezclas cemento 3/escoria = 65/35, 40/60 y 30/70 (en peso) permanece prácticamente constante a lo largo del tiempo, habiendo experimentado la mayor disminución con relación al contenido del agua de mar —del orden de $0{,}7 \times 10^{-2}$ moles— en el primer caso; en los dos casos restantes dicha disminución se encuentra comprendida entre $0{,}1 \times 10^{-2}$ y

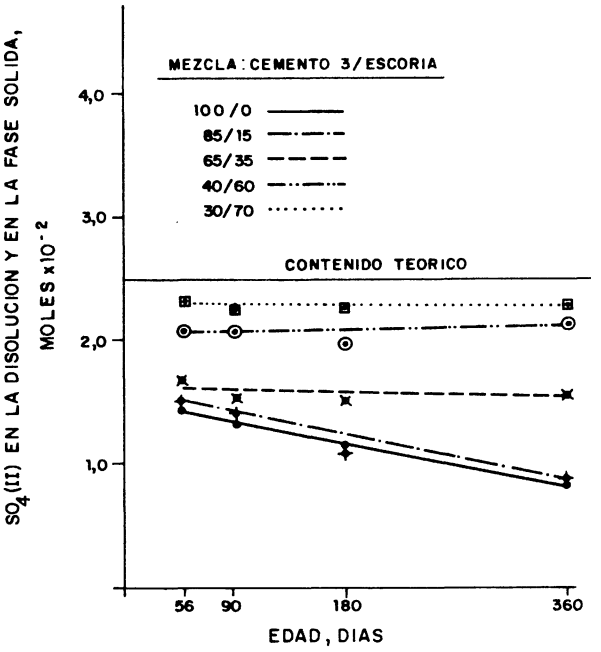


Fig. 8.—Sistema: cemento 3/escoria - agua de mar artificial ASTM. Evolución del contenido de SO_4 (II) en la disolución y en la fase sólida.

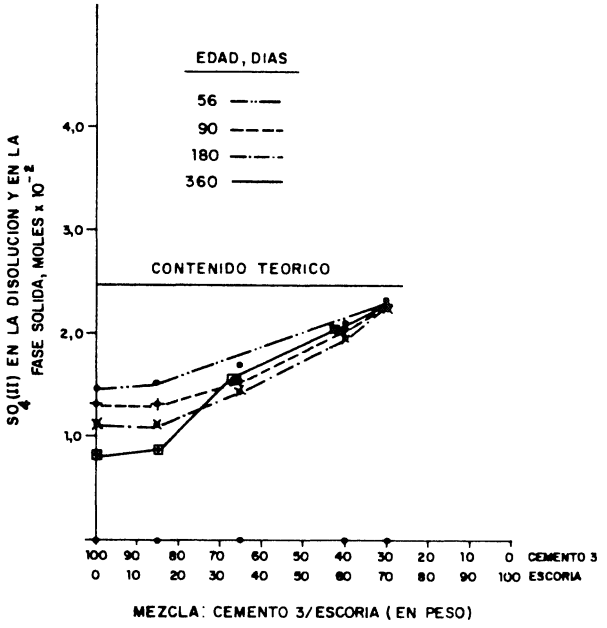


Fig. 9.—Sistema: cemento 3/escoria - agua de mar artificial ASTM. Evolución del contenido de SO_4 (II) en la disolución y en la fase sólida.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

0,4 × 10^{-2} moles. Por el contrario, en los medios en donde han estado las probetas elaboradas con cemento 3 y con la mezcla que tiene el menor contenido de escoria (15 %) disminuye conforme aumenta el tiempo de conservación-ataque (figuras 8 y 9).

Las cantidades mayores desaparecidas de iones SO_4 (II) del agua de mar artificial, fijadas por las probetas de mortero en donde se han formado los compuestos correspondientes, corresponden a las series hechas con cemento 3, seguidas de las series elaboradas con las mezclas cemento 3/escoria = 85/15 y 65/35 (en peso), respectivamente; hechos que están de acuerdo con la intensidad de los picos de la ettringita (3) y con las cantidades de iones SO_4 (II) encontradas en la disolución y en la nueva fase sólida (0,80 × 10^{-2} a 1,53 × 10^{-2} moles, en los dos primeros casos, y 1,59 × 10^{-2} a 1,70 × 10^{-2} moles, en el tercer caso).

En las fracciones enriquecidas extraídas de una de las probetas de mortero de las distintas series hechas con cemento 3 y con las mezclas cemento 3/escoria mencionadas se han detectado por DRX, entre otros, los picos del compuesto cristalino ettringita y, en determinados casos, los del yeso secundario (3); la intensidad de dichos picos depende de la mezcla utilizada para fabricar las diversas series de probetas de mortero. La mayor intensidad de dichos picos corresponde a los diagramas de las muestras extraídas de las probetas hechas con cemento 3, seguida de las elaboradas con la mezcla que tiene 15 % de escoria, y la menor intensidad a los DRX de las mezclas que tienen los mayores contenidos de escoria (60 y 70 %); fenómenos que están de acuerdo con las determinaciones analíticas efectuadas.

3.6. Evolución del contenido de Cl (I)

El contenido de iones Cl (I) del agua de mar artificial ASTM D 1141-75 (44,2 × 10^{-2} moles en 800 ml, por serie de probetas) ha disminuído en todos los casos, excepto para los medios en donde han estado sumergidas durante 180 y 360 días las series de probetas hechas con cemento 3 y durante 360 días las restantes series elaboradas con las diversas mezclas cemento 3/escoria (Tabla 1), que es del mismo orden.

Dicho contenido de iones Cl (I) es función de la mezcla cemento 3/escoria utilizada en la fabricación de las series de probetas de mortero y del tiempo de conservación-ataque (figuras 10 y 11). Las mayores cantidades se han encontrado en el agua de mar artificial en donde han estado las series de probetas de mortero hechas con cemento 3, en donde en algunos casos es del mismo orden que el contenido del agua de mar, y con la mezcla que tiene 15 % de escoria; las cantidades menores, que son del mismo orden, se han encontrado en los medios en donde han estado las series de probetas de mortero fabricadas con las mezclas cemento 3/escoria = 65/35, 40/60 y 30/70 (en peso).

En las fracciones enriquecidas, extraídas de una probeta de cada serie —hecha con las diversas mezclas cemento 3/escoria estudiadas— sumergida en agua de mar artificial (800 ml por serie y por edad) en los períodos de tiempo mencionados, se han identificado por DRX entre otros, los picos del compuesto cristalino sal de Friedel (3) con intensidad variable; la mayor intensidad corresponde a los diagramas de las muestras extraídas de las probetas elaboradas con las mezclas cemento 3/escoría = 65/35, 40/60 y 30/70 (en peso), para

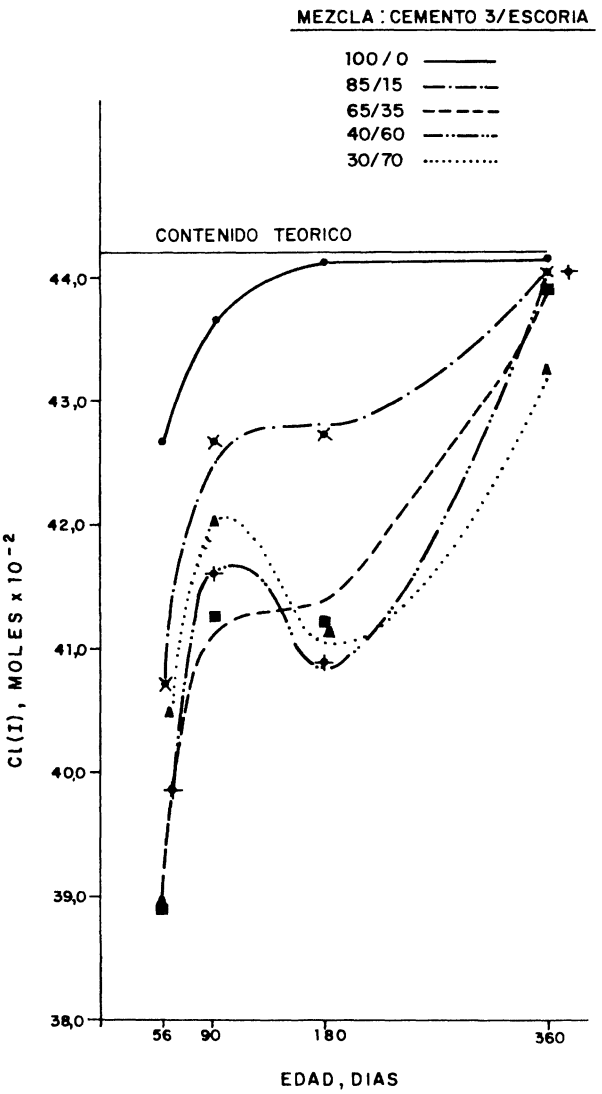


Fig. 10.—Sistema: cemento 3/escoria - agua de mar artificial ASTM. Evolución del contenido de Cl (I) en la disolución.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

todas las edades; fenómenos que están de acuerdo con las determinaciones analíticas realizadas.

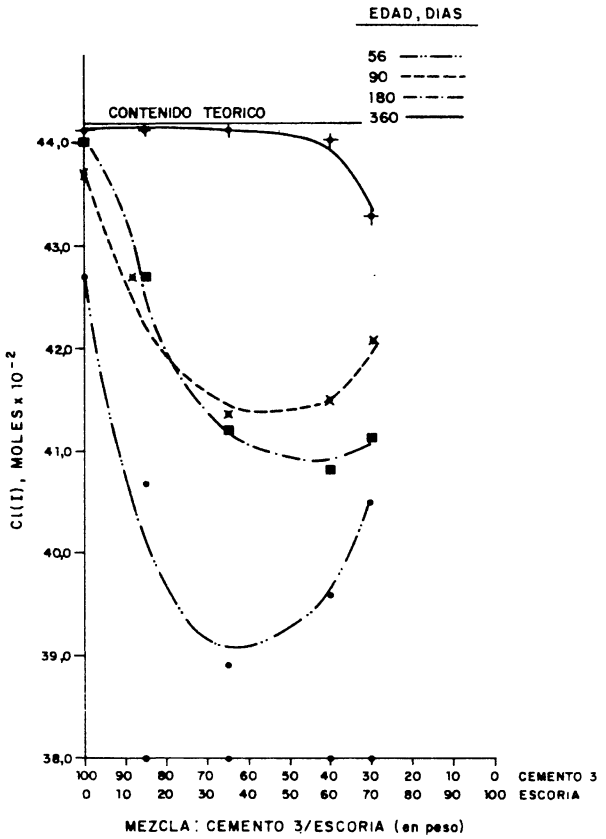


Fig. 11.—Sistema: cemento 3/escoria - agua de mar artificial ASTM. Evolución del contenido de Cl (I) en la disolución.

4. INTERPRETACION DE RESULTADOS

En el agua de mar artificial ASTM D 1141-75, en donde han estado sumergidas las diversas series de probetas de mortero (800 ml por serie y por edad) hechas con cemento 3 y con las mezclas cemento 3/escoria = 85/15, 65/35, 40/60 y 30/70 (en peso) se han producido una serie de fenómenos como son: formación de una nueva fase sólida que ha precipitado en el medio, incremento de la cantidad de Ca (II) y del valor del pH, y disminución del contenido de Mg (II), de SO_4 (II) y de Cl (I).

El incremento de Ca (II), con relación al contenido de dicho ion en el agua de mar artificial ($1{,}04 \times 10^{-2}$ moles/800 ml) es producido, fundamentalmente, por la disolución de parte del $Ca(OH)_2$ (*) —formado como consecuencia de las reacciones de hidratación de los compuestos del cemento (C_3S, C_2S y CaO libre)— según:

$$\text{(A)}\ Ca(OH)_2.\text{sólido} \underset{\text{mar}}{\overset{H_2O}{\rightleftharpoons}} Ca(OH)_2.\text{disuelto} \underset{\text{mar}}{\overset{H_2O}{\rightleftharpoons}} Ca\,(II) + 2\,OH\,(I)$$

dando lugar, además, a un incremento de iones OH (I) y, por consiguiente, del valor del pH, llegando a alcanzar valores superiores a 12.

La cantidad de $Ca(OH)_2$ disuelto es función del que se forme en las reacciones de hidratación que, a su vez, depende de la mezcla cemento 3/escoria empleada en la fabricación de las diversas series de probetas; parte del $Ca(OH)_2$ formado reacciona con la escoria para dar los compuestos de calcio correspondientes, como se señaló en (3).

Las cantidades totales de Ca (II) en las fases disueltas [Ca (II) del agua de mar artificial ASTM + Ca (II) procedente de la disolución del $Ca(OH)_2$] de cada uno de los sistemas parciales —es decir, de cada serie de probetas fabricadas con una misma mezcla cemento 3/escoria, sumergidas durante 56 - 90 - 180 y 360 días en agua de mar artificial ASTM (800 ml)—, junto con el correspondiente a las nuevas fases sólidas (Tabla 1), se encuentra en el entorno representado en la figura 12, presentando los valores medios, para todas las edades, que se reseñan en la tabla 2, en donde figuran, junto a los valores medios anteriores, las cantidades de Ca (II) teóricas, calculadas a partir del valor medio que corresponde al sistema parcial cemento 3 (100 %)-agua de mar artificial ASTM (para las cuatro edades). En la figura 12, en donde se han representado dichos valores medios, se puede apreciar que la cantidad de Ca (II) es, prácticamente, función lineal de la cantidad de cemento 3 presente en las mencionadas mezclas, en las cuales se produce un aporte de Ca (II) <> $Ca(OH)_2$ disuelto, que se ha designado como aditivo, de tal modo que en la disolución más en la nueva fase sólida se encuentran las cantidades experimentales obtenidas en el caso de las probetas hechas con cemento 3 sin adición de escoria ($5{,}86 \times 10^{-2}$ moles en 800 ml; valor medio) y cero moles cuando no existe cemento; este fenómeno se ha puesto de manifiesto en el caso de otros dos cementos, de características estructurales distintas entre sí y a las del cemento 3, y de sus mezclas con las mismas cantidades de escoría, objeto de las publicaciones (7) (8).

El equilibrio (A) se ve afectado, en este caso, por la presencia de los iones presentes en el agua de mar artificial no comunes, distintos

(*) La solubilidad, a 20° C, del $Ca(OH)_2$ en agua es 1,230 g/l (6) <> $1{,}66 \times 10^{-2}$ moles/litro <> $1{,}33 \times 10^{-2}$ moles en 800 ml.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

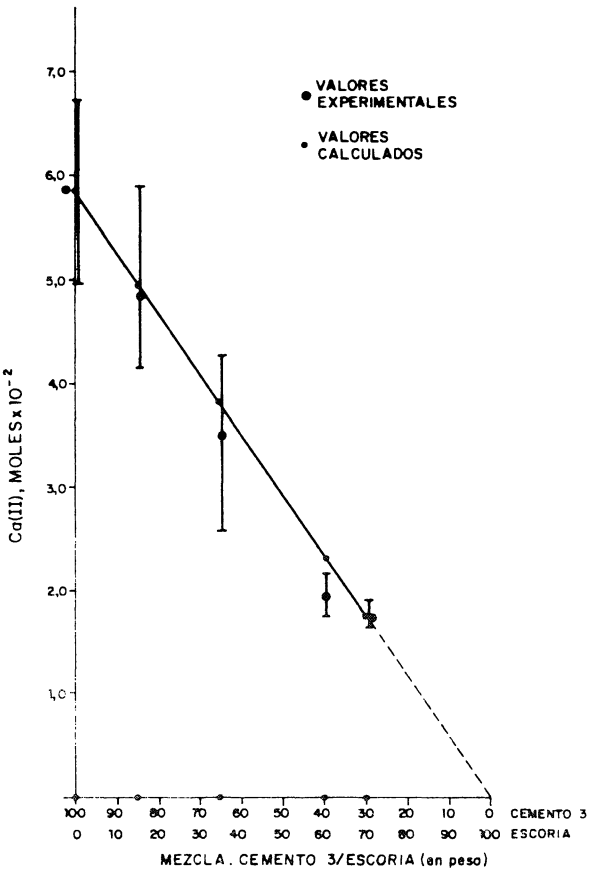


Fig. 12.—Sistema: cemento 3/escoria - agua de mar artificial ASTM. Evolución del contenido de Ca (II) total.

TABLA 2

Sistema: cemento 3/escoria-agua de mar artificial ASTM.
Cantidades de Ca (II) en la fase líquida y en la fase sólida: valores medios experimentales y calculados

Mezcla: cemento / escoria	Ca (II); moles × 10^{-2}	
	$\bar{X}$ experimental	$\bar{X}$ calculado
100/0	5,86	5,86
85/15	4,81	4,98
65/35	3,48	3,81
40/60	1,96	2,34
30/70	1,76	1,76

del Ca (II), que no producen otras reacciones —efecto salino— y, además, por la existencia de otros iones o compuestos que dan lugar a reacciones de precipitación con los iones Ca (II) o con los iones OH (I) del mencionado equilibrio (A), como son las siguientes:

$$\text{(B)}\quad Ca\,(II) + 2\,OH\,(I) + CO_2 \overset{H_2O}{\rightleftharpoons} CaCO_3.\text{sólido} + H_2O$$

$$\text{(C)}\quad Ca\,(II) + SO_4\,(II) \overset{H_2O}{\rightleftharpoons} CaSO_4.2\,H_2O.\text{sólido}$$

$$\text{(D)}\quad Mg\,(II) + 2\,OH\,(I) \overset{H_2O}{\rightleftharpoons} Mg(OH)_2.\text{sólido}$$

las cuales producen, en un determinado grado, la disminución de iones Ca (II) —equilibrios (B) y (C)— y OH (I) —equilibrios (B) y (D)— favoreciendo, así mismo, la disolución del $Ca(OH)_2$ y el avance de las reacciones de hidratación.

El pH del agua de mar artificial ASTM (6,5) alcanza valores superiores a 11,5 en los medios en donde han estado las series de probetas de mortero hechas con cemento 3 y con la mezcla que tiene el 15 % de escoria (en peso) y superiores a 7,5 e inferiores a 10 en los casos restantes, que corresponden a las series de probetas fabricadas con las mezclas que tienen los mayores contenidos de escoria (35, 60 y 70 %), como consecuencia de la menor cantidad de $Ca(OH)_2$ puesta en juego.

El CO_2 disuelto en el agua de mar ASTM reacciona, en medio básico fuerte, con el Ca (II) que se encuentra en la fase disuelta, para dar carbonato de calcio, según (E):

$$\text{(E)}\quad CO_2 + Ca\,(II) + 2\,OH\,(I) \rightleftharpoons CaCO_3.\text{sólido} + H_2O$$

compuesto que ha precipitado como calcita y como aragonito, como se probó en (3) por DRX, dando lugar a una nueva fase sólida, produciéndose también una disminución de la concentración de iones OH (I) y, por lo tanto, del valor del pH. Para que esta reacción tenga lugar se ha de cumplir:

$$[CO_3\,(II)]\,[Ca\,(II)] > P_s\,(4{,}8 \times 10^{-9})$$

teniendo en cuenta que:

$$CO_2 + 2\,OH\,(I) \rightleftharpoons CO_3\,(II) + H_2O$$

El Mg (II) presente en el agua de mar artificial ASTM, a pH básico fuerte (pH > 10), reacciona con los iones OH (I) precipitando como brucita según:

$$\text{(F)}\quad Mg\,(II) + 2\,OH\,(I) \rightleftharpoons Mg(OH)_2.\text{sólido}$$

por cumplirse:

$$[Mg\,(II)]\,[OH\,(I)]^2 > P'_s\,(1{,}8 \times 10^{-11})$$

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

Esta reacción lleva consigo una disminución del pH. La precipitación del $Mg(OH)_2$ ha tenido lugar en los medios en donde han estado sumergidas las diversas series de probetas (a todas las edades) hechas con cemento 3 y con la mezcla que tiene el 15 % de escoria, en donde existía un pH > 11,5, habiéndose detectado por DRX (3) en la fase sólida el compuesto cristalino brucita, en donde el Mg (II) se encuentra en cantidades inferiores a $0,5 \times 10^{-2}$ moles, habiendo desaparecido de la fase líquida; el resto ($\sim 4 \times 10^{-2}$ moles) ha precipitado en el seno de las probetas de mortero como brucita (3), según:

$$\text{(G)} \qquad Mg\,(II) + \underbrace{Ca(OH)_2.\text{disuelto}}_{\text{(Probeta)}} \rightleftharpoons$$

$$\rightleftharpoons \underbrace{Mg(OH)_2.\text{sólido}}_{\text{(probeta)}} + Ca\,(II)$$

de tal modo que por cada mol de iones Mg (II) que ha precipitado, queda libre otro de Ca (II), el cual reacciona con los compuestos de la escoria o se encuentra en la disolución y en la nueva fase sólida.

Por el contrario, en el agua de mar artificial en donde han estado sumergidas las probetas de mortero fabricadas con las mezclas cemento 3/escoria = 40/60 y 30/70 (en peso) no ha precipitado el ion Mg (II), por no darse las condiciones adecuadas; dicho ion se ha encontrado en la disolución en cantidades superiores a $2,0 \times 10^{-2}$ moles e inferiores a $2,7 \times 10^{-2}$ moles, el resto se encuentra en las probetas de mortero en donde ha precipitado como brucita (3), de acuerdo con la reacción (G).

En el agua de mar artificial ASTM, en donde han estado las series de probetas hechas con la mezcla cemento 3/escoria = 65/35 (en peso), se ha encontrado Mg (II) tanto en la nueva fase sólida (en determinadas edades y en cantidades inferiores a $0,1 \times 10^{-2}$ moles) como en la disolución (en cantidades comprendidas entre $0,1 \times 10^{-2}$ y $0,5 \times 10^{-2}$ moles) por no darse las condiciones adecuadas para que tenga lugar la reacción de precipitación; el resto ha precipitado en el seno de las probetas de mortero como brucita (3), según la reacción (G).

En la figura 13 se ha representado la evolución de los contenidos de Mg (II) y de Ca (II) en la disolución [Ca (II) que procede del $Ca(OH)_2$ disuelto + Ca (II) del agua de mar artificial ASTM] más en la nueva fase sólida, gráficas 1 y 3 respectivamente, además de la del Ca (II) en la disolución más en la nueva fase sólida, que procede del $Ca(OH)_2$ disuelto, gráfica 2, en función de la mezcla cemento 3/escoria utilizada para fabricar las diversas series de probetas de mortero, para cada período de

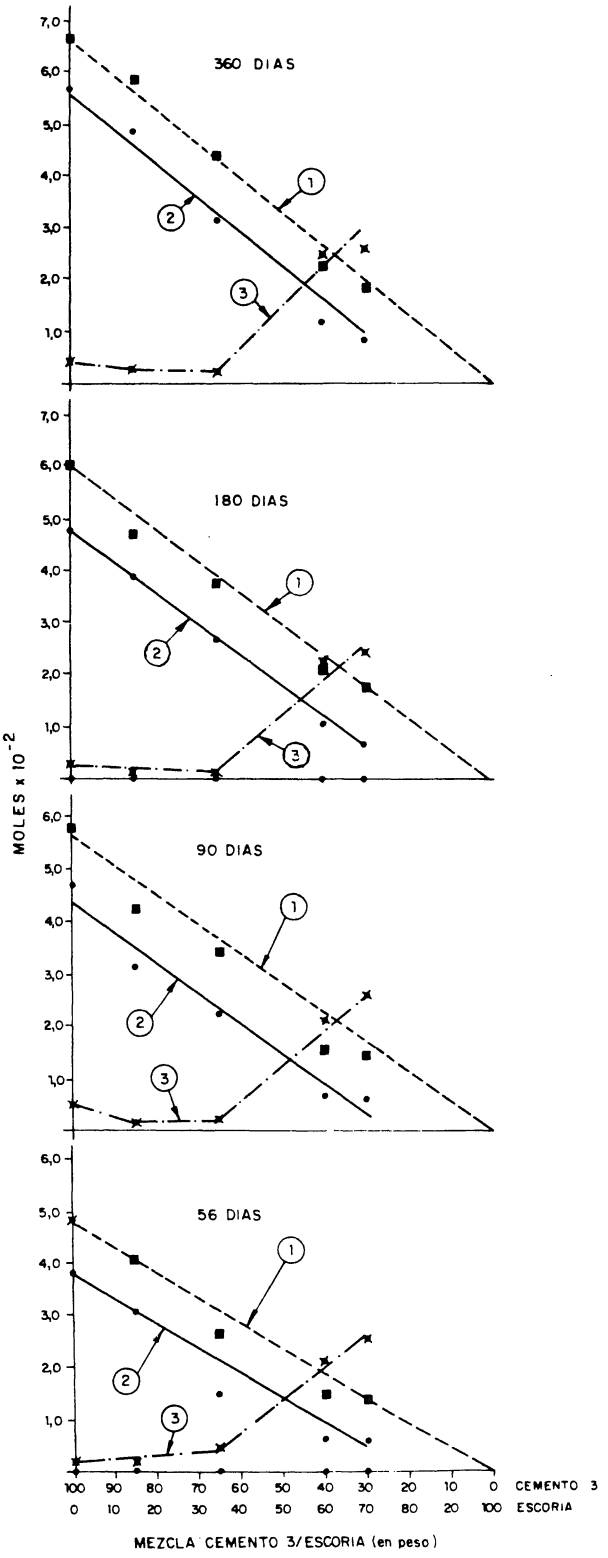


Fig. 13.—Sistema: cemento 3/escoria - agua de mar artificial ASTM. Evolución de los contenidos de Ca (II) y de Mg (II).

Gráfica 1.—Ca (II) en la disolución + Ca (II) en la fase sólida. Ca (II) en la disolución = Ca (II) que procede del $Ca(OH)_2$ disuelto + Ca (II) del agua de mar.

Gráfica 2.—Ca (II) en la disolución que procede del $Ca(OH)_2$ disuelto + Ca (II) en la fase sólida = Ca (II) total disuelto.

Gráfica 3.—Mg (II) en la disolución + Mg (II) en la fase sólida.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

conservación-ataque. En dicha figura se puede observar que ambos contenidos [de Ca (II) y de Mg (II)] están íntimamente relacionados, existiendo un punto de cruce en las gráficas 2 y 3, que corresponde a la mezcla cemento 3/escoria = 50/60 (en peso), en donde tiene lugar el equilibrio de intercambio iónico:

Ca (II)	⇌	Mg (II)
(que pase a la disolución)		(que desaparece de la disolución)

que responde al equilibrio (G), al reaccionar los iones Mg (II) con los iones OH (I) en la interfase del equilibrio $Ca(OH)_2$.sólido ⇌ ⇌ Ca(OH).disuelto, según:

$$Ca(OH)_2.\text{sólido} \rightleftharpoons Ca(OH)_2.\text{disuelto} \rightleftharpoons$$

$$\rightleftharpoons \underbrace{Ca\ (II) + 2\ OH\ (I)}_{+\ Mg\ (II)} \Updownarrow Mg(OH)_2.\text{sólido} + Ca\ (II)$$

en donde, se puede apreciar, que por cada mol de iones Ca (II) puesto en juego desaparece otro de Mg (II). En los casos de las probetas hechas con mezclas que tienen cantidades de escoria inferiores al 60 %, las cantidades de Ca (II) en el agua de mar —en donde han estado sumergidas— son superiores a las de Mg (II), ya que durante la hidratación del cemento se genera más $Ca(OH)_2$, quedando parcialmente libre mayor cantidad que facilita la precipitación del Mg (II), por una parte, y la disolución del $Ca(OH)_2$, por otra. Por el contrario, en los casos de las probetas fabricadas con mezclas que tienen cantidades de escoria iguales o superiores al 60 % se invierte el fenómeno, quedando en la disolución, fundamentalmente, y en la nueva fase sólida contenidos mayores de Mg (II) que de Ca (II) por no darse las condiciones para que precipite el ion Mg (II), al no existir cantidad suficiente de iones OH (I), ya que no se ha generado la cantidad suficiente de $Ca(OH)_2$. Los hechos mencionados, puestos de manifiesto en (7) (8), influyen en el grado de resistencia química de los cementos.

La disminución que experimenta el contenido de iones SO_4 (II) en el agua de mar artificial ASTM, en donde han estado sumergidas las diversas series de probetas de mortero, está íntimamente ligada a las características del cemento y de la escoria, así como a la mezcla utilizada para fabricar dichas series de probetas de mortero y al tiempo de conservación-ataque, que influyen en la formación de compuestos a base de sulfatos (yeso secundario y, de un modo especial, ettringita) en las probetas de mortero, como se probó por DRX (3), al reaccionar con los iones Ca (II), procedentes del $Ca(OH)_2$, y con el aluminato de calcio hidratado del cemento, equilibrios (H) (I), por una parte

$$\text{(H)}\quad Ca\ (II) + SO_4\ (II) + 2\ H_2O \rightleftharpoons CaSO_4.2\ H_2O$$

$$\text{(I)}\quad \underbrace{3\ Ca\ (II) + 3\ SO_4\ (II)}_{3\ (CaSO_4.2\ H_2O)} +$$

$$+ 3\ CaO.Al_2O_3.6\ H_2O + 25\ H_2O \rightleftharpoons$$

$$\rightleftharpoons 3\ CaO.Al_2O_3.3\ CaSO_4.31\ H_2O$$

y, por otra, con los aluminatos de la escoria, procedentes del posible desdoblamiento de la gehelenita presente en la misma al reaccionar con el $Ca(OH)_2$ del cemento hidratado, equilibrio (J), que se ha representado en función del contenido de clínker, según:

$$\text{(J)}\ \underbrace{2\ (2\ CaO.Al_2O_3.SiO_2)}_{\text{escoria vítrea}} + Ca(OH)_2 + n\ H_2O \rightarrow$$

$$\begin{array}{l} \xrightarrow{\text{poco clinker}} 2\ (2\ CaO.Al_2O_3.7\ H_2O) \xrightarrow{+\ Ca(OH)_2} \\ \xrightarrow{\text{bastante clinker}} 4\ CaO.Al_2O_3.13\ H_2O \xrightarrow{-\ Ca(OH)_2} \end{array}$$

$$\rightarrow 3\ CaO.Al_2O_3.\eta\ H_2O$$

lo que hace que, para un clínker y una escoria dados, la cantidad de ambos en la mezcla influya en la de iones SO_4 (II) fijados para formar ettringita; a veces, se presentan valores de la misma magnitud que en el caso de utilizar cemento 3 sin adición de escoria, como sucede en los sistemas parciales que corresponden a las series de probetas hechas con las mezclas que tienen 15 %, fundamentalmente, y 35 % de escoria.

La disminución de iones Cl (I) del agua de mar artificial ASTM, en donde han estado sumergidas las probetas de mortero hechas con las diversas mezclas del cemento 3 con la escoria utilizadas en este trabajo, se debe a la formacíon de la sal de Friedel en las mencionadas probetas de mortero (3), por reacción de dichos iones con los iones Ca (II), que proceden del $Ca(OH)_2$, y con los aluminatos de calcio hidratados del cemento, como con los generados en el posible desdoblamiento de la gehelenita de la escoria, mencionado anteriormente; la reaccón que tiene lugar es:

$$3\ CaO.Al_2O_3.6\ H_2O + \underbrace{Ca\ (II) + 2\ Cl\ (I)}_{CaCl_2} + 4\ H_2O \rightleftharpoons$$

$$\rightleftharpoons 3\ CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10\ H_2O$$

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

5. CONCLUSIONES

Primera:

En el agua de mar artificial ASTM (D 1141-75) en donde han estado sumergidas las diversas series de probetas de mortero (1 : 3), hechas con un cemento portland (cemento 3) y con las mezclas cemento/escoria estudiadas en este trabajo (85/15 - 65/35 - 40/60 y 30/70, en peso), se produce un aumento de la concentración de iones Ca (II) y del valor del pH, una disminución de la concentración de iones Mg (II), SO_4 (II) y Cl (I), así como la formación de una nueva fase sólida, que son función de la mezcla utilizada para fabricar las mencionadas series de probetas y del tiempo de conservación-ataque.

Segunda:

La cantidad de fase sólida formada en el agua de mar en donde han estado sumergidas las diversas series de probetas de mortero (800 ml), hechas con una misma mezcla, aumenta con el tiempo de conservación-ataque y disminuye, para una misma edad, según lo hace la cantidad de cemento en la mezcla utilizada para fabricar las mencionadas series de probetas.

Tercera:

El contenido de Ca (II) en la fase líquida más en la nueva fase sólida, que procede de un modo especial del $Ca(OH)_2$ disuelto del cemento hidratado, para cada mezcla (cemento 3/escoria) utilizada en la fabricación de las distintas series de probetas de mortero, aumenta con el tiempo de conservación-ataque y, para cada edad, disminuye bruscamente conforme lo hace el contenido de cemento 3 de la mencionada mezcla.

Los valores medios de los contenidos totales de Ca (II) —que se encuentra en la disolución más en la nueva fase sólida, es decir Ca (II) del agua de mar más Ca (II) procedente del $Ca(OH)_2$ disuelto— de cada conjunto de probetas hechas con cemento 3 y con las diversas mezclas cemento 3/escoria para cada edad corresponde, prácticamente, a las cantidades teóricas, calculadas a partir del valor medio del contenido total de Ca (II) del agua de mar artificial, en donde han estado sumergidas las series de probetas elaboradas solo con cemento 3.

Cuarta:

El contenido de Mg (II) del agua de mar artificial ASTM, en donde han estado sumergidas las distintas series de probetas de mortero, experimenta una disminución que es función de la mezcla utilizada para fabricar las diversas series de dichas probetas y del tiempo de conservación-ataque.

En el agua de mar, en donde han estado las series de probetas de mortero hechas con cemento 3 y con la mezcla que tiene el menor contenido de escoria (15 %), el ion Mg (II) ha desaparecido; ha precipitado como brucita en la nueva fase sólida y en la probeta. En los otros casos, dicho ion Mg (II), se encuentra en la fase líquida en cantidades diversas, y en la nueva fase sólida en cantidades del orden de miligramos; el resto ha precipitado como brucita en la probeta.

Quinta:

La evolución del contenido de Ca (II) está íntimamente ligada con la de Mg (II), de tal modo que cuando el de uno aumenta, el del otro disminuye y viceversa. En este sistema existe un punto de corte que corresponde al equilibrio iónico Ca (II) $\rightleftharpoons$ Mg (II).

Sexta:

El contenido de los iones SO_4 (II) y Cl (I) del agua de mar, en donde han estado sumergidas las distintas series de probetas de mortero, experimenta una disminución que es función de la mezcla utilizada para fabricar dichas series de probetas de mortero y del tiempo de conservación-ataque. Dicha disminución es más pronunciada en los medios en donde han estado las probetas hechas con cemento 3 y con las mezclas que tienen 15 y 35 % de escoria (en peso), para los iones SO_4 (II), y en los medios en donde han estado las probetas elaboradas con las mezclas que tienen los tres mayores contenidos de escoria (35, 60 y 70 %, en peso), para los iones Cl (I).

6. BIBLIOGRAFIA

(1) SAGRERA-MORENO, J. L. y GASPAR-TEBAR, D. (1980): Resistencia química del hormigón: VIII. Accíon del agua de mar: influencia de la adición de escoria a un cemento portland. Evolución de las resistencias mecánicas a flexotracción y del coeficiente de corrosión. Materiales de Construcción, octubre-noviembre-diciembre, *180*, 99-120.

(2) GASPAR-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L. (1981): Resistencia química del hormigón: XII. Influencia de la adición de escoria a un cemento portland. Estudio por DRX del sistema cemento 3/escoria-agua potable filtrada. Materiales de Construcción, julio-agosto-septiembre, *183*, 33-44.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es

(3) GASPAR-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L. (1983): Resistencia química del hormigón: XX. Acción del agua de mar: influencia de la adición de escoria a un cemento portland. Estudio por DRX. Materiales de Construcción, abril-mayo-junio-julio-agosto-septiembre, *190-191*, 3-24.

(4) GASPAR-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L. (1986): Resistencia química del hormigón: XXV. Influencia de la adición de escoria a un cemento portland. Estudio de la concentración iónica del sistema cemento 3/escoria-agua potable filtrada. Materiales de Construcción, abril-mayo-junio, *202*, 49-55.

(5) GASPAR-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L. (1982): Resistencia química del hormigón: XVI. Acción del agua de mar: influencia de la adición de escoria a un cemento portland de alta resistencia inicial. Estudio por DRX. Materiales de Construcción, abril-mayo-junio,*186*, 40.

(6) BICZOK, I. (1972): Corrosión y Protección del Hormigón. Ed. Urmo. Bilbao, pág. 211.

(7) GASPAR-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L. (1984): Resistencia química del hormigón: XXII. Influencia de la adición de escoria a un cemento portland de alta resistencia inicial. Estudio de la concentración iónica del sistema cemento 1/escoria-agua de mar artificial. Materiales de Construcción, abril-mayo-junio, *193*, 51-68.

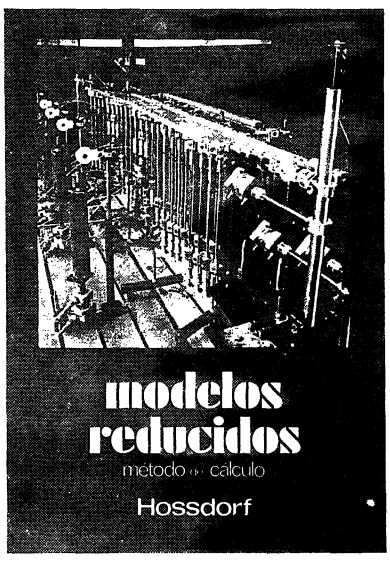
(8) GASPAR-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L. (1984): Resistencia química del hormigón: XXIV. Influencia de la adición de escoria a un cemento portland resistente al yeso. Estudio de la concentración iónica del sistema cemento 2/escoria-agua de mar artificial. Materiales de Construcción, octubre-noviembre-diciembre, *196*, 49-66.

7. RECONOCIMIENTO

Nuestro más sincero agradecimiento a las personas del Equipo de Durabilidad del IETcc: Amalia Rodríguez Pereíra, Lucila López Solana, M.ª Soledad Cid Fernández y Felipe Cantero Palacios, así como a M.ª Isabel Jiménez, por su valiosa colaboración en la realización de este trabajo.

* * *

publicaciones del i.e.t.c.c.



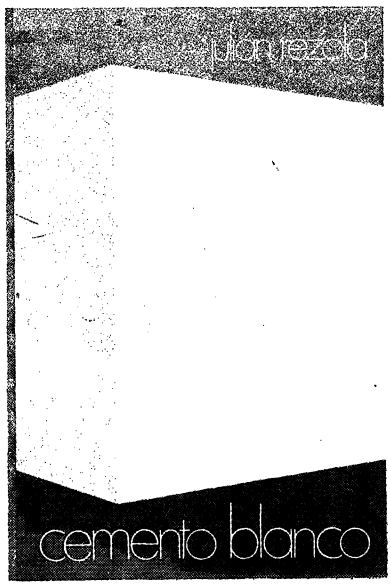
Modelos reducidos. Método de cálculo

H. Hossdorf, Ingeniero Civil

La técnica de los ensayos en modelos reducidos de estructuras sufre hoy día una decisiva metamorfosis. Hasta hace poco era un medio más bien de artesanía, que no siempre era tomado en serio por los académicos teorizantes para comprender el comportamiento resistente de las estructuras complejas y al que se acudió las más de las veces, como a un último remedio debido a sus indiscutibles insuficiencias. Sin embargo, en poco tiempo y gracias a su conexión con los ordenadores digitales, se ha transformado en un instrumento científicamente valioso, que no puede quedar a un lado en la práctica diaria del Ingeniero Proyectista.

Un volumen encuadernado en cartoné plastificado con lomo de tela, de 17 × 24 cm, compuesto de 250 páginas, 158 figuras y fotografías.

Precios: 1.800 ptas.; $ USA 26.00.



Cemento blanco

Julián Rezola
Ingeniero Químico Dipl. I. Q. S.

Sabido es que existe una extensa y documentada bibliografía sobre el cemento gris: en cambio, no puede decirse lo mismo acerca del cemento portland blanco, ya que los escritos existentes se refieren tan sólo a algunas peculiaridades que le distinguen de aquél.

El autor nos ofrece sus profundos conocimientos y su larga experiencia tanto en laboratorio como en fabricación.

La parte descriptiva del libro se complementa con gráficos, diagramas y fotografías de gran utilidad, destinados a conseguir la aplicación apropiada de este aglomerante.

Un volumen encuadernado en cartoné policerado, de 17,4 × 24,3 cm, compuesto de 395 páginas, numerosas figuras, tablas y ábacos.

Precios: España, 1.700 ptas.; extranjero, $ 24.00.

La presa bóveda de Susqueda

A. Rebollo,
Dr. Ingeniero de Caminos

El esfuerzo del constructor de presas se sitúa, por su pretensión de perennidad, a contracorriente de las tendencias de la civilización actual, caracterizada por lo fungible. Pueden evocarse las 10.000 grandes presas en funcionamiento o en construcción que están envejeciendo y reclaman los cuidados gerontológicos para mantener y perfeccionar su servicio y garantizar su inalienable pretensión de perennidad. En la medida en que todas nuevas obras, grandes o pequeñas, son portadoras de riesgos ecológicos y, a veces, catastróficos, que aumentan con el envejecimiento, la gerontología de las presas es todo un emplazo. La acción adelantada de Arturo Rebollo en este terreno marca un camino a seguir para todos los que aman su propia obra con la devoción paternal que él ha puesto en Susqueda.

Un volumen encuadernado en cartoné plastificado con lomo de tela, de 18 × 24,5 cm, compuesto de 408 páginas, 330 figuras y fotografías y 39 tablas.

Precios: 1.700 ptas.; extranjero, $ USA 24.00.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://materconstrucc.revistas.csic.es