

Resistencia química del hormigón

V.- Acción del agua de mar: Influencia de la adición de escoria a un cemento portland resistente al yeso.

Evolución de las resistencias mecánicas a flexotracción y del coeficiente de corrosión

DEMETRIO GASPAR-TEBAR y JOSE LUIS SAGRERA-MORENO

Drs. en Ciencias Químicas

IETcc

RESUMEN

En el presente trabajo (segundo de otro amplio en el que se estudia la influencia que ejercen diversas adiciones a tres cementos portland, desde un punto de vista de su comportamiento químico-resistente, frente a la acción de distintos medios potencialmente agresivos y que será objeto de otras publicaciones) se da cuenta de la evolución que experimenta la resistencia química por el método de Koch-Steinegger y de las variaciones de las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero (1:3) de $1 \times 1 \times 6$ cm hechas con un cemento portland industrial resistente al yeso (cemento 2 <> P-450-Y) y con las mezclas cemento 2/escoria granulada (vítrea) = 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, durante 56-90-180 y 360 días, después de haberlas curado 24 horas en un recinto saturado de humedad y hasta 21 días bajo agua potable filtrada.

1. INTRODUCCION

En otras publicaciones (1) (2) se estudió el comportamiento de dos cementos portland industriales (cemento 1 <> P-550-ARI y cemento 2 <> P-450-Y) de fabricación española y de las mezclas, en peso, cemento (1 ó 2)/escoria = 70/30 y 30/70 frente al agua de mar dando cuenta de los resultados obtenidos sobre:

- a) La evolución de las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero (1:3) de $1 \times 1 \times 6$ cm, sumergidas durante 56 y 90 días en agua potable filtrada, unas series, y en agua de mar natural, otras series análogas a las anteriores, una vez curadas (1 día en cámara húmeda y 21 días bajo agua potable filtrada).

- b) La resistencia química de los cementos y de las mezclas cemento (1 ó 2)/escoria, por el método de Koch-Steinegger, frente a la mencionada agua de mar.
- c) La variación de la concentración iónica de las disoluciones en donde han estado sumergidas las probetas de mortero.
- d) Las características químicas y estructurales de las fases sólidas formadas en los medios de curado y de conservación-ataque.
- e) Las modificaciones estructurales experimentadas por las fracciones enriquecidas (cemento hidratado-atacado) extraídas de uno de los prismas de cada serie de probetas de mortero de los sistemas cemento (1 ó 2)/escoria-agua potable filtrada y cemento (1 ó 2)/escoria-agua de mar natural.

En el presente artículo, continuación de la serie iniciada en (3), se da cuenta de la evolución de las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero (1:3) de $1 \times 1 \times 6$ cm fabricadas con el cemento 2 <> P-450-Y, objeto de las publicaciones (1) y (2) y con las mezclas de dicho cemento 2 con la escoria siderúrgica vítrea de (1) (2) y (3) en las siguientes proporciones: cemento 2/escoria = 85/15 - 65/35 - 40/60 y 30/70 (en peso), sumergidas durante 56-90-180 y 360 días, una vez curadas (1 + 21 días), en agua potable filtrada, unas series, y otras en agua de mar artificial, así como de la resistencia química del cemento 2 y de las mezclas mencionadas frente al agua de mar artificial por el método de Koch-Steinegger.

2. PARTE EXPERIMENTAL

En este trabajo se estudia la influencia que ejerce la adición de distintas cantidades de una escoria granulada y molida (1) al cemento 2 <> P-450-Y de fabricación española, objeto de las publicaciones (1) y (2), en su comportamiento químico-resistente frente a la acción del agua de mar artificial determinando, en esta primera etapa, las siguientes características:

- a) La evolución de las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero (1:3) de $1 \times 1 \times 6$ cm, fabricadas con dicho cemento 2 y con cuatro mezclas cemento 2/escoria, sumergida en agua potable filtrada, unas series, y en agua de mar artificial, otras series análogas, durante 4 edades (período de conservación-ataque), después del período de curado (24 horas en un recinto con una atmósfera saturada de humedad y 21 días bajo agua potable filtrada). Las edades consideradas (tiempo de conservación-ataque) han sido 56-90-180 y 360 días.

Las probetas de mortero se han fabricado con las mezclas siguientes, en peso:

Cemento 2: 100 - 85 - 65 - 40 - 30

Escoria: 0 - 15 - 35 - 60 - 70

de acuerdo con las conclusiones obtenidas en (5).

- b) La resistencia química del cemento 2 y de las cuatro mezclas cemento 2/escoria anteriores frente al agua de mar artificial, por el método de Koch-Steinegger (4).

Estos trabajos, como se señaló en (3), se ampliarán y complementarán con otros de los que se dará cuenta en sucesivas publicaciones.

TABLA 1

Composición química del cemento 2 y de la escoria. Composición potencial calculada (Bogue) del cemento 2

Valores expresados en % en peso, referidos a la muestra seca a 105-110°C

Determinaciones	Cemento 2	Escoria
Pérdida por calcinación, P.F.	1,1	0,4
Residuo insoluble, R.I.	0,2	0,0
Dióxido de silicio, SiO ₂	22,0	35,2
Oxido de hierro (III), Fe ₂ O ₃	4,1	0,7
Oxido de aluminio, Al ₂ O ₃	1,8	17,0
Oxido de calcio, CaO	67,9	37,3
Oxido de magnesio, MgO	0,5	6,3
Trióxido de azufre, SO ₃	2,3	0,0
Manganeso (II), Mn (II)	n.d.	0,8
Suma	99,9	97,7
Oxido de calcio libre, CaO libre	1,8	n.d.
Composición potencial calculada (Bogue) del cemento		
Silicato tricálcico, C ₃ S	75,6	
Silicato bicálcico, C ₂ S	6,1	
Aluminato tricálcico, C ₃ A	0,0	
Ferrito aluminato tetracálcico, C ₄ AF	10,8	
Sulfato de calcio, CaSO ₄	3,9	

n.d. = no determinado.

TABLA 2

Características físicas y mecánicas del cemento 2

Determinaciones	Cemento 2
Superficie específica (Blaine), cm ² /g	3.553
Peso específico, g/cm ³	3,12
Expansión en autoclave, %	0,02
Resistencias mecánicas, kp/cm²	
Flexotracción	
2 días	36
3 días	52
7 días	73
28 días	83
Compresión	
2 días	203
3 días	285
7 días	473
28 días	542

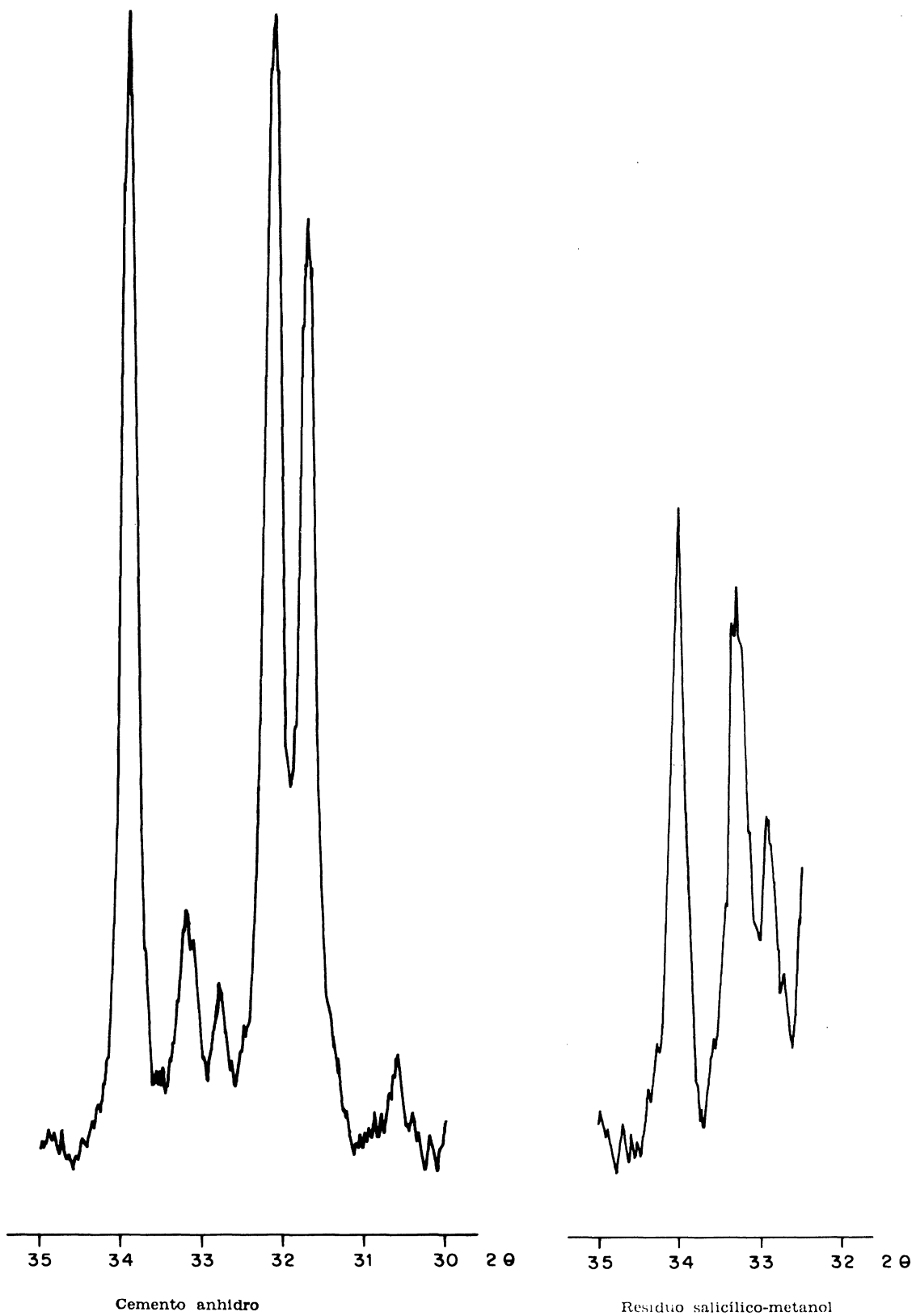


Fig. 1.—DRX del cemento 2 anhidro y del residuo de dicho cemento anhidro atacado con ácido salicílico-metanol.

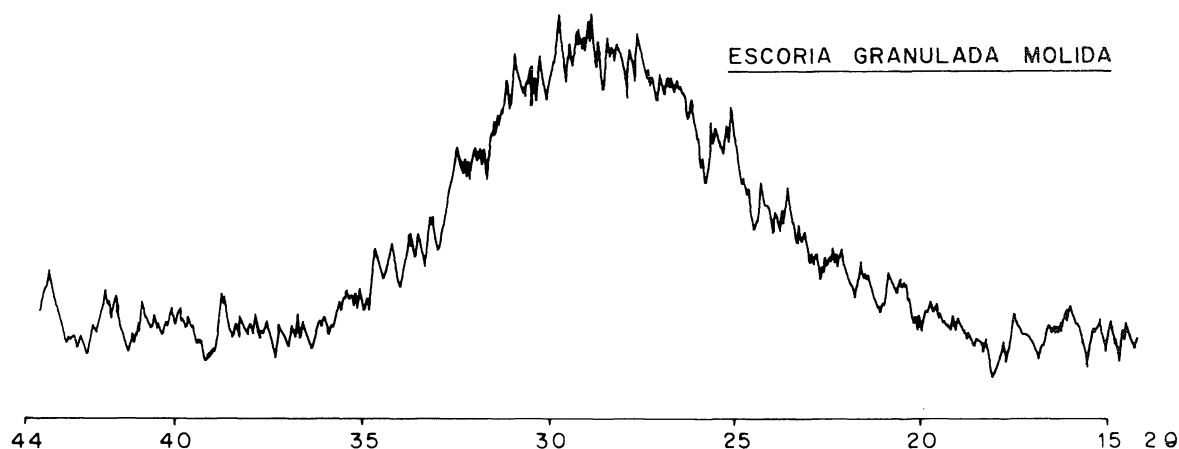


Fig. 2.—DRX de la escoria granulada.

2.1. Materiales utilizados y características

a) *Cemento y escoria*

Se ha utilizado el cemento portland industrial resistente al yeso, de fabricación española, designado como cemento 2 en (1), que responde a la composición química y potencial calculada (Bogue) de la tabla 1, así como a las características físicas y mecánicas de la tabla 2.

En la figura 1 se encuentran los DRX del cemento anhidro y del residuo procedente del ataque de dicho cemento con ácido salicílico-metanol (6), para 2θ comprendidos entre 30 y 35°, el primero, y 32 - 35°, el segundo.

La composición química de la escoria siderúrgica utilizada, procedente de la industria española, una vez molida hasta conseguir una superficie específica (Blaine) de 4.030 cm²/g, se encuentra en la tabla 1 y el DRX correspondiente, para $2\theta = 15$ a 44°, en la figura 2.

El equipo empleado y las condiciones de trabajo para realizar los DRX son los reseñados en (1).

b) *Arena utilizada para preparar las probetas de mortero de 1 × 1 × 6 cm*

Se ha utilizado, como se señaló en (3), la arena natural (Segovia) análoga a la empleada para la fabricación de los morteros normalizados (RC-75), con un contenido de SiO₂ superior a 99 %. El tamaño de grano está comprendido entre 1 y 1,5 mm.

En el DRX de dicha arena, figura 3 de (1), se han identificado los picos de α -SiO₂.

c) *Agua de mar artificial*

Se ha empleado agua de mar artificial preparada según el punto 6 de la norma ASTM D 1141-75 (7) que se recoge en (3).

El contenido de los iones Ca(II), Mg (II), SO₄ (II) y Cl (I), así como el valor del pH de dicha agua de mar artificial y del agua de mar natural, utilizada en los trabajos (1) y (2), es el que figura en la tabla 3.

TABLA 3

Contenido de Ca (II), Mg (II), SO₄ (II) y Cl (I), en g/l, y pH del agua de mar y del agua potable

Determinaciones	Agua de mar		Agua potable
	Natural	Artificial	
Ca (II)	0,482	0,521	0,005
Mg (II)	1,402	1,347	0,0016
SO ₄ (II)	2,880	2,928	0,003
Cl (I)	20,840	19,585	0,007
pH	7,7	6,5	7,4

d) *Agua potable*

Como medio de curado y de conservación se ha usado el agua potable reseñada en (1) (2) y (3) (Canal de Isabel II-Madrid), una vez que ha pasado a través de un filtro cerámico. El contenido de los iones determinados experimentalmente y el pH son los que figuran en la tabla 3.

2.2. Técnica operatoria

Las técnicas de trabajo seguidas para:

- a) Preparar las 20 mezclas cemento 2/escoria para cada uno de los dos sistemas y las probetas de mortero de 1 × 1 × 6 cm,
- b) Determinar las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero, sumergidas en agua potable filtrada y en agua de mar artificial, así como la resistencia química frente al agua de mar artificial por el método de Koch-Steinegger,
- c) Determinar las características de los materiales utilizados y el contenido de los iones Ca (II), Mg (II), SO₄ (II) y Cl (I) en los medios de curado y conservación ataque, son las que se describen en (3) (4).

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Características del cemento 2 y de la escoria

a) *Características del cemento 2*

El cemento 2, objeto del presente artículo, tiene un contenido calculado (Bogue) de C₃A = 0 % y de C₄AF = 10,8 %; el valor correspondiente a la suma C₃S (75,6 %) y C₂S (6,1 %) es 81,7 %. Las fases cristalinas correspondientes a los aluminatos del cemento anhidro y del residuo del ataque del cemento anhidro con ácido salicílico-metanol se pueden apreciar en los DRX de la figura 1, en los que se ha detectado un pico del C₃A a 2θ =

= 33,15° y otro del C₄AF a 2θ = 33,8° (34° teóricos); además se ha puesto de manifiesto la existencia de otro pico a 2θ = 32,9° perfectamente diferenciado en el DRX del residuo del cemento tratado con ácido salicílico-metanol.

Este cemento 2, por sus características químicas y mecánicas, se puede clasificar de acuerdo con el Pliego RC-75 como P-450-Y.

b) Características de la escoria

La escoria siderúrgica utilizada, molida hasta conseguir una superficie específica (Blaine) de 4.030 cm²/g, es vítrea (DRX de la figura 2) y cumple la condición

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} > 1 \text{ (en este caso es 1,7)}$$

especificada en el Pliego RC-75 para poder utilizarla en la fabricación de cemento siderúrgico (8).

3.2. Evolución de las resistencias mecánicas a flexotracción (*) de las probetas de mortero de 1 × 1 × 6 cm

En las figuras 3 a 6 se ha representado la evolución de las resistencias mecánicas, a flexotracción, para cada edad de curado (1 día en atmósfera saturada de humedad y 21 días bajo agua potable filtrada) y de conservación-ataque (56-90-180 y 360 días bajo agua potable filtrada o bajo agua de mar artificial) de las probetas de mortero de 1 × 1 × 6 cm en función de la mezcla cemento 2/escoria utilizada para la fabricación de dichas probetas.

En las figuras 7 y 8 se incluye la variación de dichas resistencias mecánicas de las probetas de mortero, fabricadas con cada mezcla, en función del tiempo de curado (fijo) y de conservación-ataque (variable), según el medio en donde han estado sumergidas las probetas (agua potable filtrada o agua de mar artificial).

En las tablas 4 y 6 se encuentran los valores de las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero de las distintas series sumergidas en agua potable filtrada y en agua de mar artificial, en la primera, referidos al valor de la serie de probetas fabricadas con cemento 2, sin adición de escoria y sumergidas durante 22 + 56 días en agua potable filtrada, al que se le ha asignado el valor 100 kp/cm², que se ha tomado como índice (tabla 4) y en agua de mar artificial durante la misma edad (22 + 56 días), al que también se le ha adjudicado el valor índice 100 kp/cm² (tabla 6).

En la tabla 5 se encuentran los valores de las mencionadas resistencias referidos al valor índice (100 kp/cm²), asignado a cada una de las series de probetas confeccionadas con cemento 2 sin adición de escoria, sumergidas en agua potable filtrada o en agua de mar artificial durante 56-90-180 ó 360 días.

a) Sistema: cemento 2/escoria-agua potable filtrada

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero hechas con las dis-

(*) Dadas las dimensiones de las probetas no se han determinado las resistencias mecánicas a compresión.

TABLA 4

Resistencias mecánicas a flexotracción. Valor índice = 100 kp/cm², para t = 56 días; medio de conservación: agua potable filtrada y agua de mar artificial

Mezcla: Cemento 2/ /Escoria	Conservación							
	Agua potable filtrada				Agua de mar artificial			
	Edad, días				Edad, días			
	56	90	180	360	56	90	180	360
100/0	100,0	98,7	106,4	89,9	87,8	83,1	94,4	87,0
85/15	112,2	110,3	114,5	108,7	102,4	94,2	98,4	98,7
65/35	135,9	130,6	127,5	109,7	103,5	109,5	101,6	96,1
40/60	127,7	124,0	123,2	117,9	119,5	91,8	102,4	113,8
30/70	118,4	121,6	110,8	121,3	126,6	123,8	117,6	126,9

TABLA 5

Resistencias mecánicas a flexotracción. Valor índice = 100 kp/cm², para t = 56-90-180 y 360 días; medio de conservación: agua potable filtrada y agua de mar artificial

Mezcla: Cemento 2/ /Escoria	Conservación							
	Agua potable filtrada				Agua de mar artificial			
	Edad, días				Edad, días			
	56	90	180	360	56	90	180	360
100/0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
85/15	112,2	111,7	107,6	121,0	116,7	113,4	104,3	113,5
65/35	135,9	132,3	119,8	122,0	118,0	131,8	107,7	110,6
40/60	127,7	125,6	115,7	131,2	136,1	110,5	108,5	130,9
30/70	118,4	123,2	104,1	134,9	144,2	149,0	124,6	145,9

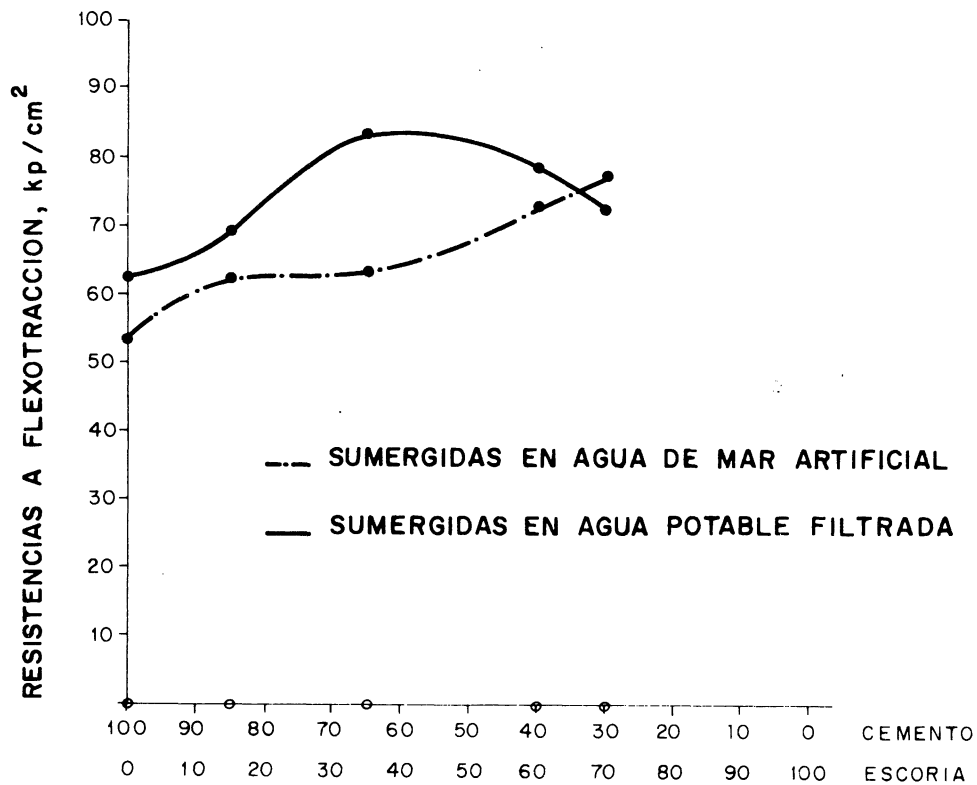


Fig. 3.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

Edad: (22 + 56 días)

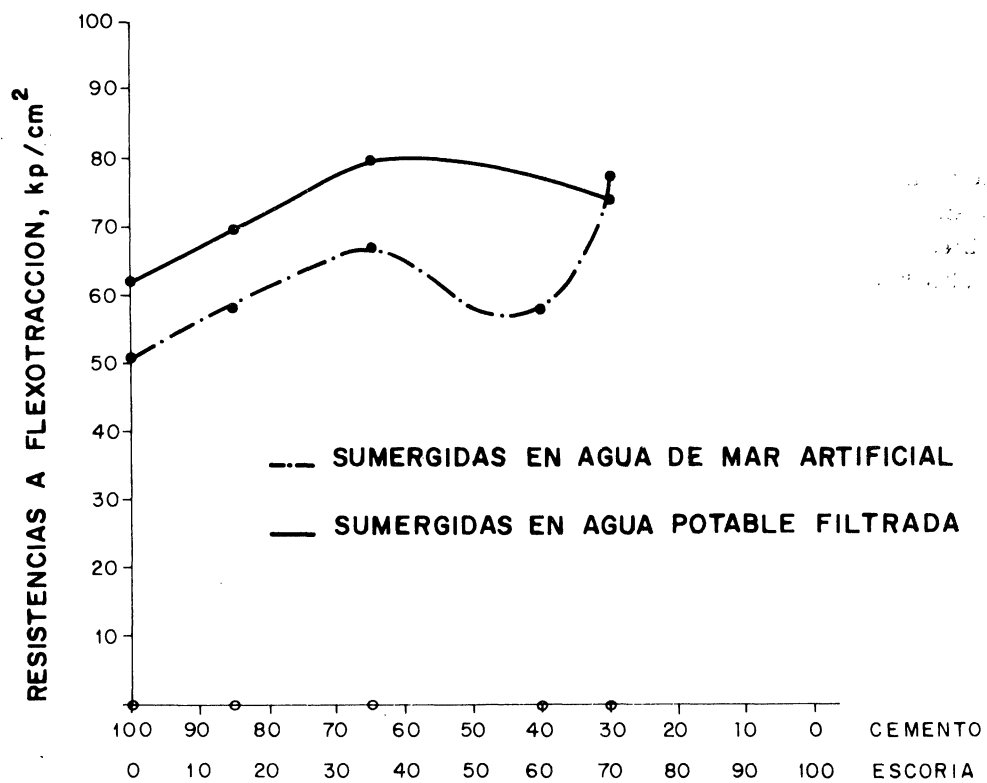


Fig. 4.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

Edad: (22 + 90 días)

tintas mezclas cemento 2/escoria, sumergidas en agua potable filtrada (R'_t) y para cada una de las diferentes edades estudiadas, son mayores que las correspondientes a las probetas fabricadas con cemento 2 sin adición de escoria (figuras 3 a 6, tabla 5).

Los incrementos experimentados dependen de la cantidad de escoria en la mezcla utilizada y del tiempo de conservación.

Las resistencias de las probetas elaboradas con una misma mezcla experimentan, a lo largo del tiempo, ligeras variaciones que dependen de la mezcla utilizada (figura 7 y tabla 4). Así, son del mismo orden o menores para las distintas series que corresponden a las mezclas que tienen contenidos de escoria iguales o inferiores al 60 %; en estos casos las resistencias a 22 + 360 días son más bajas que las de la primera edad (22 + 56 días); sin embargo, para las series fabricadas con la mezcla cemento 2/escoria = 30/70 son del mismo orden o superiores, excepto para 22 + 180 días, que los de 22 + 56 días.

Los valores mayores de las resistencias a flexotracción, en este sistema, corresponden, para las tres primeras edades, a las series hechas con la mezcla que tiene 35 % de escoria y para la cuarta edad a la serie de la mezcla cemento 2/escoria = 30/70.

— Influencia de la mezcla utilizada en la fabricación de las probetas de mortero.

- Edad: 22 + 56 días (figura 3)

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las diversas series de probetas, con relación al valor de las probetas hechas solo con cemento 2, experimentan un incremento con la adición de escoria, alcanzando el valor máximo (84,4 kp/cm², lo que supone un incremento del 35,9 %) la serie de probetas confeccionadas con la mezcla cemento 2/escoria = 65/35.

- Edad: 22 + 90 días (figura 4)

Del mismo modo que en el caso anterior, las resistencias de las distintas series experimentan, con relación a las de las probetas elaboradas con cemento 2 sin adición de escoria, un aumento que depende de la cantidad de escoria. La serie de probetas fabricada con la mezcla cemento 2/escoria = 65/35 también alcanza el valor máximo (81,1 kp/cm², con un incremento de 32,3 %).

- Edad: 22 + 180 días (figura 5)

En este caso, como en los dos anteriores, se pueden hacer consideraciones análogas; las mayores resistencias también corresponden a la mezcla cemento 2/escoria = 65/35 (79,2 kp/cm², con un incremento de 19,8 %, tabla 5).

- Edad: 22 + 360 días (figura 6)

A esta edad, las resistencias de las series de probetas elaboradas con las mezclas cemento 2/escoria = 100/0 - 85/15 - 65/35 y 40/60 son menores que las correspondientes a las mismas mezclas de las restantes edades (tabla 4).

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las distintas series de probetas aumentan conforme lo hace la cantidad de escoria de la mezcla utilizada, llegando a ser las de la serie fabricada con la mezcla cemento 2/escoria = 30/70 (75,3 kp/cm²) 34,9 % superiores que las de las probetas hechas con cemento 2 sin adición de escoria (tabla 5).

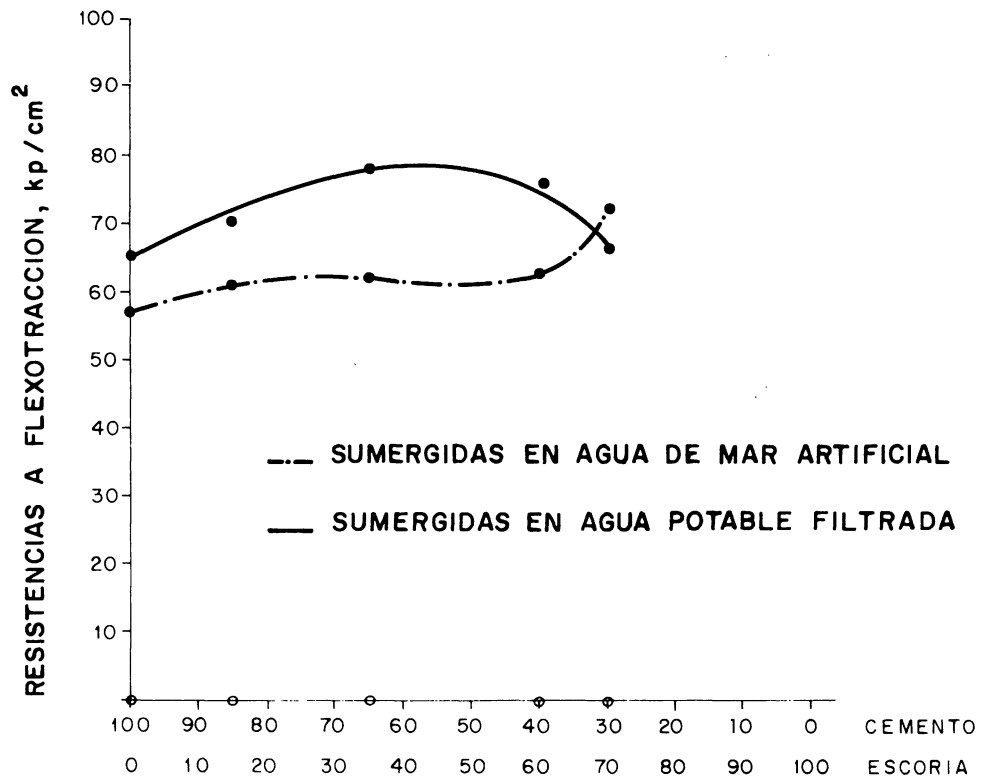


Fig. 5.—Evolución de las resistencias a flexotracción.
Edad: (22 + 180 días)

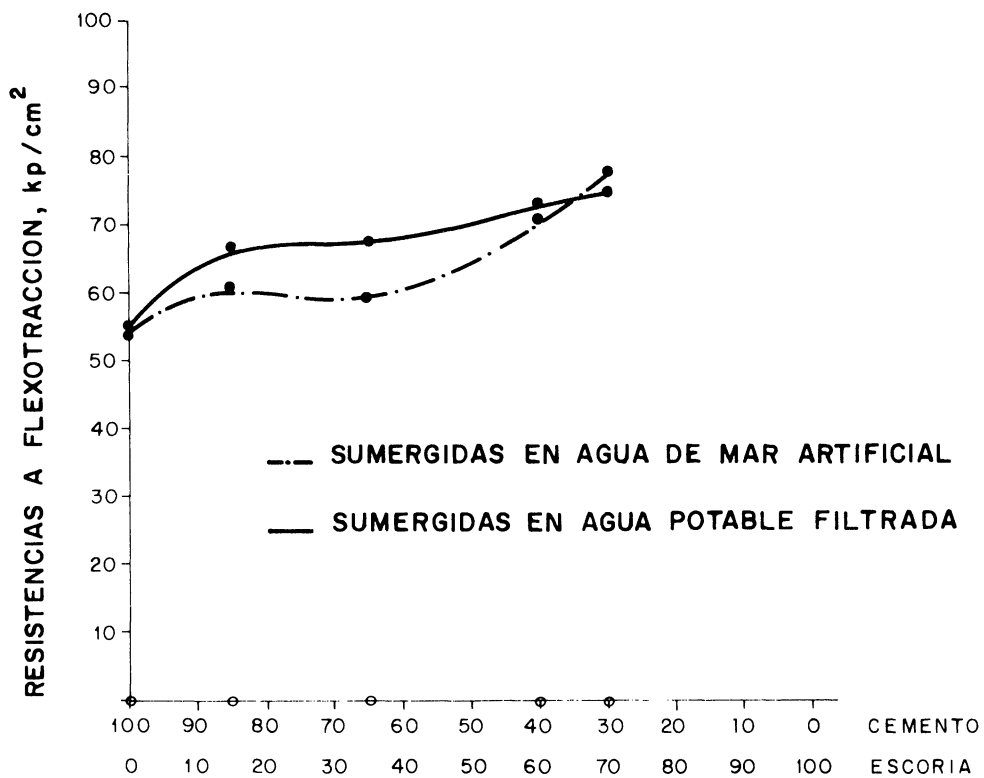


Fig. 6.—Evolución de las resistencias a flexotracción.
Edad: (22 + 360 días)

— Influencia del tiempo de curado-conservación para las probetas de mortero hechas con una misma mezcla.

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero de las distintas series, a lo largo del tiempo, son superiores al valor índice, 100 kp/cm² para 22 + 56 días, excepto para las hechas con cemento 2/escoria = 100/0 a 22 + 90 días y 22 + 360 días (tabla 4). La evolución de las resistencias de las diversas series de probetas para cada mezcla, a lo largo del tiempo, figura 7, experimenta las siguientes modificaciones:

- Mezcla: cemento 2/escoria = 100/0 (en peso)

Las resistencias mecánicas a flexotracción, en las cuatro edades estudiadas, que son más bajas que las de las distintas series de probetas elaboradas con las diversas mezclas cemento 2/escoria, se encuentran comprendidas entre 55,8 kp/cm² (a 22 + 360 días) y 66,1 kp/cm² (a 22 + 90 días).

- Mezcla: cemento 2/escoria = 85/15 (en peso)

La evolución de las resistencias de esta serie es muy parecida a la de la mezcla anterior; los valores se encuentran comprendidos entre 67,5 kp/cm² (a la edad de 22 + 360 días) y 71,1 kp/cm² (a la edad de 22 + 180 días). El valor para 22 + 56 días es 69,7 kp/cm².

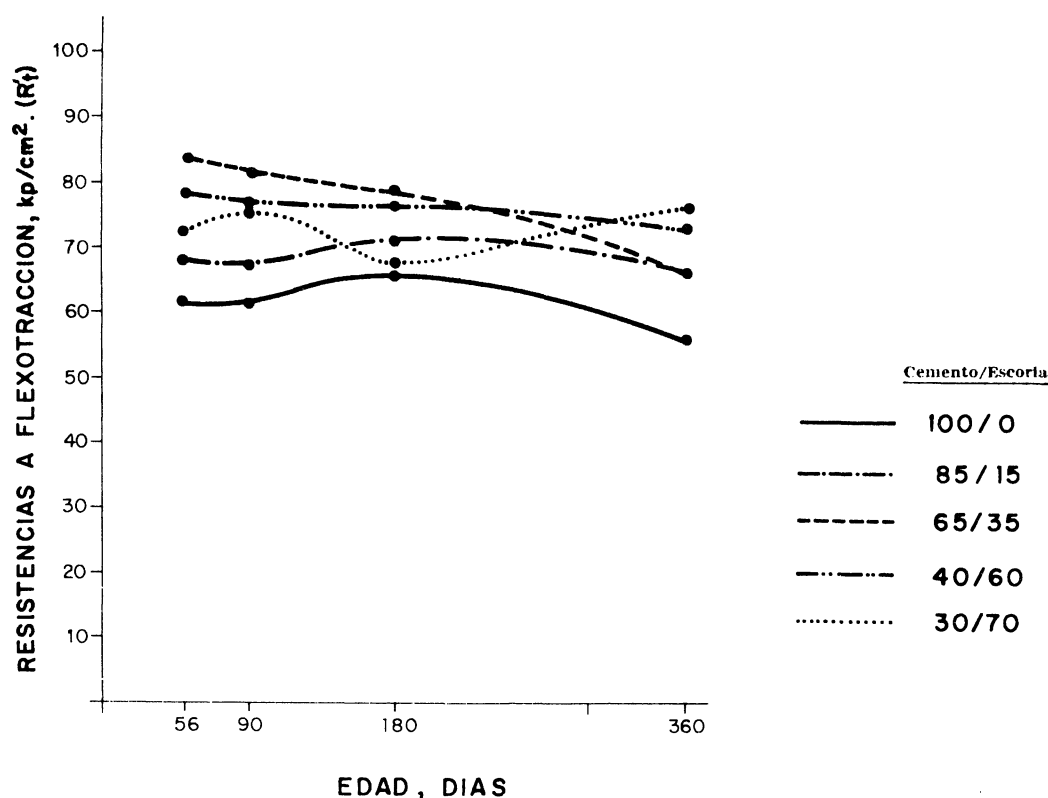


Fig. 7.—Evolución de las resistencias a flexotracción.
Probetas sumergidas en agua potable filtrada.

- Mezcla: cemento 2/escoria = 65/35 (en peso)

En esta serie las resistencias disminuyen con el tiempo, pasando de 84,4 kp/cm² (a la edad de 22 + 56 días) a 68,1 kp/cm² (a la edad de 22 + 360 días). Los incrementos de las resis-

tencias, para una misma edad, referidos a los valores de las probetas hechas con cemento 2 sin adición de escoria oscilan entre 35,9 % y 19,8 % para las edades 22 + 56 días y 22 + 180 días, respectivamente (tabla 5).

Las resistencias a todas las edades son superiores a las de las series fabricadas con la mezcla cemento 2/escoria = 85/15, excepto para 22 + 360 días que son del mismo orden (tabla 4 y figura 7).

- Mezcla: cemento 2/escoria = 40/60 (en peso)

Del mismo modo que en el caso anterior, las resistencias de las series de probetas hechas con esta mezcla disminuyen conforme aumenta el tiempo de conservación, pasando de 79,3 kp/cm² (22 + 56 días) a 73,2 kp/cm² (22 + 360 días). Los incrementos experimentados, con relación a los valores de las probetas elaboradas con cemento 2 sin adición de escoria y para cada edad (tabla 5), están comprendidos en el entorno 15,7 % (22 + 180 días) y 31,2 % (22 + 360 días).

- Mezcla: cemento 2/escoria = 30/70 (en peso)

Las resistencias correspondientes a las edades 22 + 56 días, 22 + 90 días y 22 + 360 días presentan valores muy parecidos, se encuentran comprendidos entre 73,5 kp/cm² y 75,5 kp/cm², experimentando un descenso (68,8 kp/cm²) a 22 + 180 días.

Este último valor es superior a los de todas las edades de la serie de probetas fabricadas con cemento 2 sin adición de escoria.

b) Sistema: cemento 2/escoria-agua de mar artificial

En el sistema presente las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero, sumergidas en agua de mar artificial (R_t), experimentan un incremento para cada edad, con relación a las de las hechas con cemento 2 sin adición de escoria, que depende de la cantidad de escoria de la mezcla utilizada (figuras 3 a 6, tablas 4 a 6).

El valor de las resistencias correspondiente a las series de probetas confeccionadas con una misma mezcla experimenta variaciones de signo distinto, a lo largo del tiempo de conservación-ataque, con relación al de las series análogas sumergidas durante 56 días en agua de mar artificial que, así mismo, es función de la mezcla utilizada (figura 8 y tabla 6).

Todos los valores de las mencionadas resistencias, excepto el de las probetas fabricadas con la mezcla cemento 2/escoria = 100/0, a 22 + 90 días y a 22 + 360 días, son superiores al valor índice (100 kp/cm²), asignado a las resistencias de la serie de probetas análogas a la anterior sumergidas durante 56 días en la mencionada agua de mar artificial (tabla 6).

— Influencia de la mezcla utilizada en la fabricación de las probetas de mortero.

- Edad: 22 + 56 días (figura 3)

Las resistencias mecánicas a flexotracción aumentan conforme lo hace la cantidad de escoria en la mezcla empleada para fabricar las probetas; en efecto, pasan de 54,5 kp/cm², para la mezcla cemento 2/escoria = 100/0, a 78,6 kp/cm², para la mezcla 30/70, produciéndose un incremento de 44,2 % (tabla 5).

- Edad: 22 + 90 días (figura 4)

Las resistencias de las series de probetas hechas con las diversas mezclas cemento 2/escoria son mayores que las confeccionadas con dicho cemento 2 sin adición de escoria, pasando de 51,6 kp/cm² para las últimas, (mezcla cemento 2/escoria = 100/0), a 76,9 kp/cm² para las probetas de la mezcla que tiene el mayor contenido de escoria (70 %), habiendo experimentado un incremento del 49 % (tabla 5). El valor de dichas resistencias de la serie de probetas elaborada con la mezcla cemento 2/escoria = 40/60 (57,0 kp/cm²) es el menor de los correspondientes a las restantes series, fabricadas con las mezclas cemento 2/escoria = 85/15, 65/35 y 30/70.

- Edad: 22 + 180 días (figura 5)

En este caso, las resistencias de las diversas series de probetas aumentan conforme lo hace el contenido de escoria de la mezcla utilizada en su fabricación, permaneciendo prácticamente estabilizada en la zona correspondiente a las probetas en las que se han empleado mezclas con 15, 35 y 60 % de escoria. Los incrementos experimentados por las resistencias de las distintas series, con relación a las resistencias de las probetas hechas con cemento 2 sin escoria, son los menores del conjunto de las diversas edades (tabla 5).

- Edad: 22 + 360 días (figura 6)

A esta edad, las resistencias de las diversas series de probetas hechas con las mezclas cemento 2/escoria son mayores que las correspondientes a las fabricadas con cemento 2 sin adición de escoria. Los incrementos experimentados en las series hechas con las mezclas que tienen las mayores cantidades de escoria (60 y 70 %), con relación a las elaboradas con cemento 2, son 24,6 y 45,9 %, respectivamente (tabla 5).

— Influencia del tiempo de curado y conservación-ataque para las probetas de mortero hechas con una misma mezcla.

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las distintas series de probetas de mortero hechas con una misma mezcla (conservadas, después del período de curado, en agua de mar artificial) son superiores al valor índice (100 kp/cm²), asignado a las probetas fabricadas con cemento 2 sin adición de escoria y sumergidas durante 56 días en dicha agua de mar, excepto para las probetas de la misma serie conservadas 22 + 90 días y 22 + 360 días, las cuales son 5,3 y 0,9 % inferiores, respectivamente (tabla 6).

La evolución que experimentan las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas elaboradas con las distintas mezclas cemento 2/escoria (figura 8) es la siguiente:

- Mezcla: cemento 2/escoria = 100/0 (en peso)

Las resistencias mecánicas, a flexotracción, permanecen prácticamente estabilizadas en las cuatro edades estudiadas; están comprendidas entre 51,6 kp/cm² (22 + 90 días) y 58,6 kp/cm² (22 + 180 días). Los valores de las resistencias de esta serie son más bajos que los correspondientes a las restantes series de probetas hechas con las mezclas cemento 2/escoria (figura 8 y tabla 6).

- Mezcla: cemento 2/escoria = 85/15 (en peso)

Las resistencias mecánicas de esta serie, superiores a cada edad a las del caso anterior, presenta un hábito parecido a las de dicho caso (figura 8). Dichas resistencias pasan de

63,6 kp/cm² (22 + 56 días) a 61,3 kp/cm² (22 + 360 días), valor análogo al de 22 + 180 días (61,1 kp/cm²). A 22 + 90 días se tiene el valor mínimo (58,5 kp/cm²), habiendo experimentado un descenso del 8 % con relación a las resistencias a 22 + 56 días.

TABLA 6

Resistencias mecánicas a flexotracción. Valor índice = 100 kp/cm², para t = 56 días; medio de conservación: agua de mar artificial

Mezcla: Cemento 2/Escoria	Edad, días			
	56	90	180	360
100/0	100,0	94,7	107,5	99,1
85/15	116,7	107,3	112,1	112,5
65/35	118,0	124,8	115,8	109,5
40/60	136,1	104,6	116,7	129,7
30/70	144,2	141,1	133,9	144,5

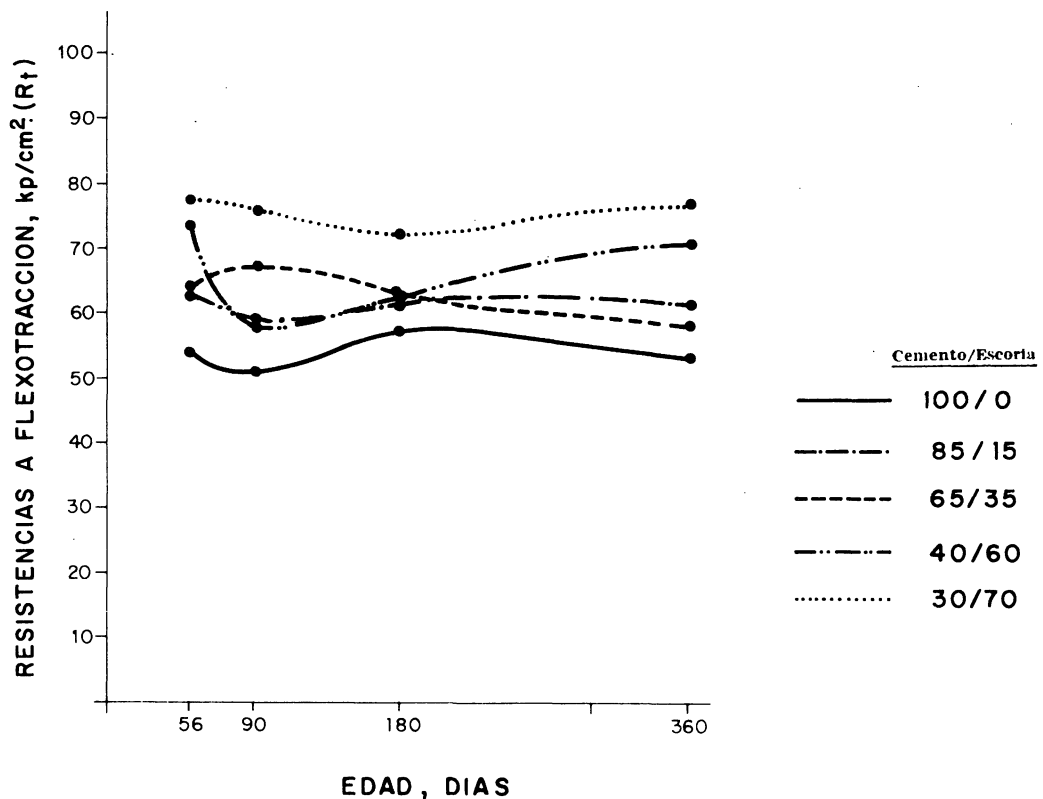


Fig. 8.—Evolución de las resistencias a flexotracción. Probetas sumergidas en agua de mar artificial.

- Mezcla: cemento 2/escoria = 65/35 (en peso)

Las resistencias mecánicas de las probetas hechas con esta mezcla pasan de 64,3 kp/cm² (22 + 56 días) a 68,0 kp/cm² (22 + 90 días), disminuyendo en las dos últimas edades, 61,1 y 59,7 kp/cm² (figura 8).

- Mezcla: cemento 2/escoria = 40/60 (en peso)

Las resistencias a flexotracción de las probetas fabricadas con la mezcla cemento 2/escoria = 40/60 alcanzan los valores mínimos a 22 + 90 días (57,0 kp/cm²) y a 22 + 180 días (63,6 kp/cm²). Los valores de dichas resistencias a 22 + 56 días y 22 + 360 días son 74,2 kp/cm² y 70,7 kp/cm², respectivamente.

A la edad de 22 + 90 días se obtienen los valores mínimos de las distintas series de probetas hechas con cemento 2 y con escoria.

- Mezcla: cemento 2/escoria = 30/70 (en peso)

Las resistencias de las probetas hechas con la mezcla que tiene el mayor contenido de escoria (70 %) es la que, para cada edad, proporciona los valores más altos de las mencionadas resistencias del sistema cemento 2/escoria-agua de mar artificial; se encuentran comprendidas entre 73,0 kp/cm² (22 + 180 días) y 78,8 kp/cm² (22 + 360 días). Los incrementos experimentados con relación a los valores índices (100 kp/cm²), asignados para cada edad a las probetas fabricadas con cemento 2, son 24,6 % para el valor mínimo de la serie (22 + 180 días) y 44, 49 y 45,9 % para las restantes edades.

c) Estudio comparativo de ambos sistemas

Las resistencias de las distintas series de probetas de mortero fabricadas con las mezclas cemento 2/escoria = 100/0 - 85/15 - 65/35 y 40/60, sumergidas en agua de mar artificial durante 56-90-180 y 360 días, son inferiores a las de las series similares conservadas durante el mismo tiempo en agua potable filtrada (figuras 3, 4, 5 y 6).

Por el contrario las de las series de probetas elaboradas con la mezcla que tiene el mayor contenido de escoria (70 %), sumergidas en dicha agua de mar artificial, son superiores en todos los casos que las correspondientes a las series análogas sumergidas en agua potable filtrada.

En la tabla 4 (en donde se encuentran los valores de las resistencias a flexotracción de las diversas series de probetas de ambos sistemas referidos al valor índice, 100 kp/cm², adjudicado a las probetas fabricadas con cemento 2 sin adición de escoria sumergidas en agua potable filtrada durante 56 días) se confirma lo expuesto anteriormente y, además, se observa que los valores de dichas resistencias de las probetas del sistema cemento 2/escoria-agua potable filtrada son mayores que el valor índice, excepto para las probetas hechas sólo con cemento 2 a 22 + 90 días y 22 + 360 días, y que en las series de probetas del sistema cemento 2/escoria-agua de mar artificial, dicho valor índice es mayor que el de las probetas elaboradas con las mezclas cemento 2/escoria = 100/0 (para todas las edades), 85/15 (para las tres últimas edades), 65/35 (para 22 + 360 días) y 40/60 (para 22 + 90 días).

3.3. Resistencia química. Método acelerado de Koch-Steinegger

En las figuras 9 y 10 se ha representado la evolución de los coeficientes de corrosión Koch-Steinegger (R_t/R'_t) en función de la mezcla cemento 2/escoria utilizada para fabricar las probetas y del tiempo de conservación-ataque respectivamente. Dichos coeficientes son en todos los casos superiores al valor índice Koch-Steinegger (0,70 para $t = 22 + 56$ días) y mayores de la unidad para las series de probetas hechas con la mezcla cemento 2/escoria = 30/70, a todas las edades (figura 10), ya que los valores de las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero sumergidas en agua de mar artificial (R_t) son más altos que los de las probetas análogas sumergidas en agua potable filtrada (R'_t).

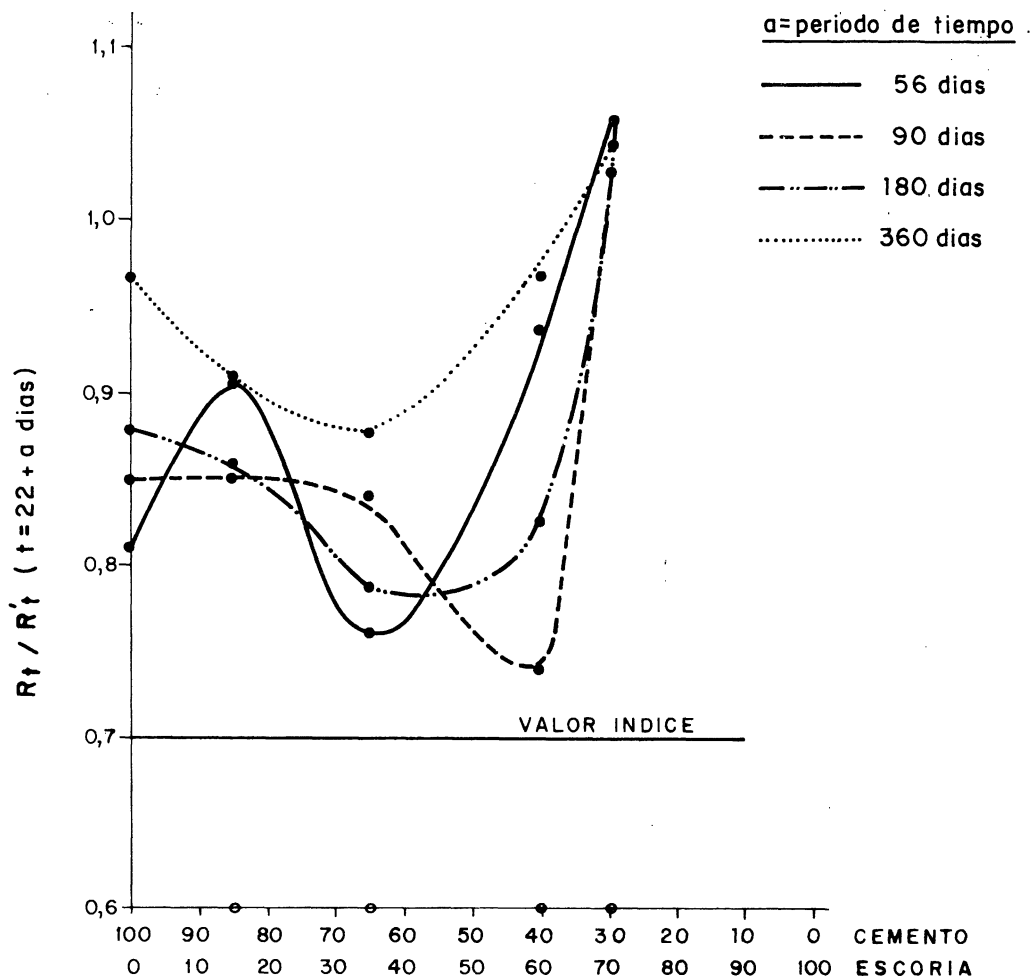


Fig. 9.—Evolución de los coeficientes de corrosión.

TABLA 7

Coefficiente de corrosión Koch-Steinegger (R_t/R'_t). Valor índice = 100 para $t = 22 + 56$ días

Mezcla: Cemento 2/Escoria	Edad, días			
	56	90	180	360
100/0	100	105	109	120
85/15	112	105	106	112
65/35	94	104	98	109
40/60	116	91	102	120
30/70	131	127	131	130

R_t/R'_t (Koch-Steinegger) = 0,70 para $t = 22 + 56$ días <> 86 referido al valor índice para $t = 22 + 56$ días.

En la tabla 7 se encuentran los valores de R_t/R'_t , para las diferentes mezclas y las distintas edades estudiadas, referidas al valor correspondiente a la serie de probetas de mortero fabricadas con cemento 2 sin adición de escoria para $t = 22 + 56$ días, al que se le ha asignado el valor 100. En la mencionada tabla se puede apreciar que los valores del coeficiente de corrosión Koch-Steinegger son superiores a dicho valor 100 en todos los casos, excepto en tres que corresponden a las mezclas cemento 2/escoria = 65/35, para $t = 22 + 56$ días y $22 + 180$ días, y 40/60 para $t = 22 + 90$ días.

a) *Influencia de la mezcla utilizada en la fabricación de las probetas de mortero*

La evolución de los coeficientes de corrosión Koch-Steinegger depende, para cada una de las cuatro edades consideradas, de la cantidad de escoria de la mezcla utilizada en la fabricación de las probetas de mortero, pasando por un mínimo como se ha puesto de manifiesto en (9) (5) (3), figura 9, que corresponde a las mezclas cemento 2/escoria = 65/35 y 40/60, para $t = 22 + 56$ días, $22 + 180$ días y $22 + 360$ días la primera, y para $t = 22 + 90$ días y $22 + 180$ días la segunda. Los coeficientes R_t/R'_t son: 0,76-0,79-0,88-0,74 y 0,83, respectivamente.

Los coeficientes de corrosión de la mezcla cemento 2/escoria = 30/70, superiores a la unidad, se encuentran en un entorno comprendido entre 1,03 y 1,06.

b) *Influencia del tiempo de curado-conservación y ataque para las probetas de mortero hechas con una misma mezcla*

En la figura 10 se puede apreciar la variación de los coeficientes de corrosión de cada mezcla a lo largo del tiempo (hasta 1 año), experimentando las siguientes modificaciones:

- Mezcla: cemento 2/escoria = 100/0 (en peso)

Los coeficientes de corrosión aumentan con el tiempo pasando de 0,81 ($22 + 56$ días) a 0,97 ($22 + 360$ días), habiendo experimentado un incremento del 19,8 %.

- Mezcla: cemento 2/escoria = 85/15 (en peso)

En esta mezcla, los coeficientes de corrosión pasan por un mínimo que corresponde a $22 + 90$ días y $22 + 180$ días. Dichos coeficientes van de 0,91 ($22 + 56$ días) a 0,85-0,86, para las dos edades anteriores, y a 0,91 para $22 + 360$ días.

- Mezcla: cemento 2/escoria = 65/35 (en peso)

Los coeficientes de corrosión, en este caso, también aumentan con relación al de $22 + 56$ días; el incremento menor corresponde a $22 + 180$ días que, a su vez, coincide con el mínimo de esta mezcla. Los mencionados coeficientes pasan de 0,76 ($22 + 56$ días) a 0,88 ($22 + 360$ días).

- Mezcla: cemento 2/escoria = 40/60 (en peso)

Los coeficientes R_t/R'_t alcanzan los valores mínimos de la serie a $22 + 90$ días (0,74) y $22 + 180$ días (0,83); el primero, que corresponde al mínimo de esta serie, es además el valor menor del conjunto. Los coeficientes de corrosión para $22 + 56$ días y $22 + 360$ días son 0,94 y 0,97, respectivamente.

- Mezcla: cemento 2/escoria = 30/70 (en peso)

En esta mezcla los coeficientes de corrosión, que pasan por un mínimo a 22 + 90 días, permanecen dentro de un entorno estrecho cuyos límites mínimo y máximo son 1,03 y 1,06.

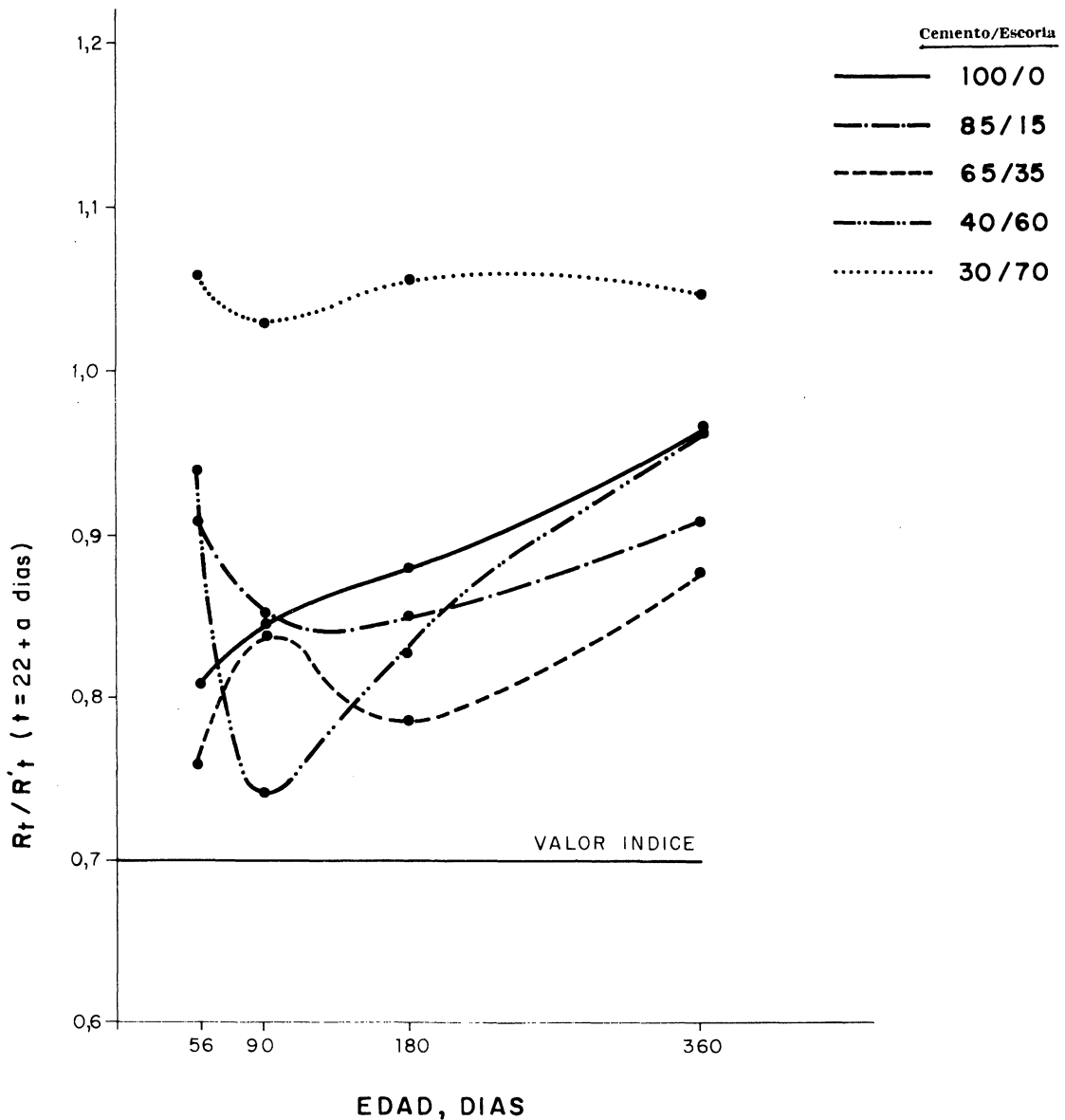


Fig. 10.—Evolución de los coeficientes de corrosión.
(a = 56 - 90 - 180 - 360 días).

4. CONCLUSIONES

4.1. Sistema: cemento 2/escoria-agua potable filtrada

Primera

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero (1:3) de 1 × 1 × 6 cm hechas con las mezclas de cemento 2/escoria (en peso) = 85/15-65/35-40/60 y 30/70,

sumergidas en agua potable filtrada durante 22 + 56 días - 22 + 90 días - 22 + 180 días y 22 + 360 días, son mayores que las correspondientes a las probetas fabricadas con dicho cemento 2 sin adición de escoria. Los incrementos experimentados dependen de la cantidad de escoria en la mezcla utilizada y del tiempo de conservación.

Segunda

Los valores mayores de las resistencias a flexotracción, para las tres primeras edades, corresponden a las series de probetas hechas con la mezcla que tiene 35 % de escoria y para la cuarta edad (22 + 360 días) para la serie de la mezcla que tiene el mayor contenido de escoria (70 %).

Tercera

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las diversas series de probetas fabricadas con las mezclas que tienen cantidades de escoria iguales o inferiores al 60 % son del mismo orden o ligeramente menores, conforme aumenta el tiempo de conservación, que las de las series análogas conservadas durante 56 días y del mismo orden o ligeramente superiores que las correspondientes a las series hechas con cemento 2/escoria = 30/70.

4.2. Sistema: cemento 2/escoria-agua de mar artificial

Cuarta

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las distintas series de probetas de mortero, análogas a las anteriores, sumergidas en agua de mar artificial, experimentan un incremento para cada edad, con relación a las de las series hechas sólo con cemento 2, que depende de la cantidad de escoria de la mezcla utilizada y del tiempo de conservación-ataque.

Quinta

Las resistencias mecánicas a flexotracción correspondientes a las series de probetas fabricadas con una misma mezcla experimentan variaciones a lo largo del tiempo de conservación-ataque, con relación al de las series análogas sumergidas 56 días; estas variaciones son función de la mezcla utilizada.

Sexta

Las resistencias de las distintas series de probetas de mortero hechas con cemento 2 sólo, o con mezclas cemento 2/escoria con cantidades iguales o menores del 60 %, sumergidas en agua de mar artificial, son inferiores que las de las series análogas conservadas durante el mismo período de tiempo en agua potable filtrada. Por el contrario, las de las series de probetas elaboradas con la mezcla que tiene el mayor contenido de escoria (70 %) son superiores.

Séptima

Los coeficientes de corrosión Koch-Steinenger (resistencia química) son, en todos los casos, superiores al valor índice (0,70 para $t = 22 + 56$ días) y mayores de la unidad para las series de probetas de mortero hechas con la mezcla cemento 2/escoria = 30/70, a todas las edades.

Octava

El valor del coeficiente de corrosión (R_t/R'_t), para cada edad, es función de la mezcla utilizada para fabricar las probetas de mortero; dicho valor presenta un mínimo a cada edad, que en este caso corresponde a las mezclas cemento 2/escoria = 65/35 (para $t = 22 + 56$ días, $22 + 180$ días y $22 + 360$ días) y 40/60 (para $t = 22 + 90$ días).

Asimismo, dicho valor del coeficiente de corrosión, a lo largo del tiempo, de las distintas series de probetas hechas con las mezclas cemento 2 escoria alcanza un valor mínimo a las edades $22 + 90$ días (mezclas cemento 2/escoria = 85/15-40/60 y 30/70) y $22 + 180$ días (mezclas cemento 2/escoria = 85/15 y 65/35).

5. BIBLIOGRAFIA

- (1) GASPARE-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L.: *Materiales de Construcción*, 174, 43-70, (1979).
- (2) GASPARE-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L.: *Materiales de Construcción*, 176, 49-77, (1979).
- (3) SAGRERA-MORENO, J. L. y GASPARE-TEBAR, D.: *Materiales de Construcción*, 178, 17-38, (1980).
- (4) GASPARE-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L.: *Materiales de Construcción*, 168, 33-60, (1977).
- (5) SAGRERA-MORENO, J. L. y GASPARE-TEBAR, D.: *Materiales de Construcción*, 169, 29-48, (1978).
- (6) TAKASHIMA, S. and AMANO, F.: *Rev. of the fourteenth. Gen. Meet.*; Tokyo, may 1960, págs. 19-22.
- (7) ASTM D 1141-75: *Standard Specification for Substitute Ocean Water*; 1978 Annual Book of ASTM Standards Part 31, págs. 909-911.
- (8) *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la Recepción de Cementos, 1975 (RC-75)*; MOP, Servicio de Publicaciones; Madrid, 1975.
- (9) JASPERS, M. J.: *Rev. des Mat. de Const.*, 704, 51-58, (1977).

RECONOCIMIENTO

Nuestro más sincero agradecimiento a las personas del Equipo de Durabilidad del IETcc: Amalia Rodríguez Pereira, Lucila López Solana, Felipe Cantero Palacios y Manuel Cantero Palacios por su valiosa colaboración en la realización de este trabajo.