

Resistencia química del hormigón

VIII.- Acción 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

JOSE LUIS SAGRERA-MORENO y DEMETRIO GASPÁR-TEBAR
Drs. en Ciencias Químicas
IETec

RESUMEN

En el presente trabajo, tercero 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 (cemento 3 <> P-450) y con las mezclas cemento 3/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 durante 21 días bajo agua potable filtrada.

1. INTRODUCCION

En otras publicaciones (1) (2) (3) (4) 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 cemento (1 ó 2)/escoria = 70/30 y 30/70 (en peso) frente al agua de mar natural, en las dos primeras, y de las mezclas 85/15 - 65/35 - 40/60 y 30/70 (en peso) frente al agua de mar artificial, en las dos últimas.

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 3 <> P-450 y con las mezclas de dicho cemento 3 con la escoria siderúrgica vítrea de (1) (2) (3) (4) en las proporciones 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 las variaciones de la resistencia química del cemento 3 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 3 < > P-450 de fabricación española 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 3 y con cuatro mezclas cemento 3/escoria, sumergidas en agua potable filtrada, unas series, y en agua de mar artificial, otras series análogas, durante 56-90-180 y 360 días (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 mezclas cemento 3/escoria (en peso) utilizadas para fabricar las probetas de mortero han sido las siguientes:

Cemento 3: 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 3 y de las cuatro mezclas cemento 3/escoria anteriores frente al agua de mar artificial, por el método de Koch-Steinegger (6).

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

2.1. Materiales utilizados y características

- a) Cemento y escoria

Se ha utilizado un cemento portland industrial de fabricación española, designado como cemento 3, 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 salicílico-metanol (7) para 2θ comprendidos entre 30 y 35° , el primero, y $32-35^\circ$, 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 $4.030 \text{ cm}^2/\text{g}$, 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 $1 \times 1 \times 6$ 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 SiO_2 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 $\alpha\text{-SiO}_2$.

TABLA 1

Composición química del cemento 3 y de la escoria. Composición potencial calculada (Bogue) del cemento 3.

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

Determinaciones	Cemento 3	Escoria
Pérdida por calcinación, P.F.	2,7	0,4
Residuo insoluble, R.I.	0,1	0,0
Dióxido de silicio, SiO ₂	18,5	35,2
Oxido de hierro (III), Fe ₂ O ₃	2,6	0,7
Oxido de aluminio, Al ₂ O ₃	5,3	17,0
Oxido de calcio, CaO	62,0	37,3
Oxido de magnesio, MgO	3,1	6,3
Trióxido de azufre, SO ₃	4,6	0,0
Manganeso (II); Mn (II)	n.d.	0,8
Suma	98,9	97,7
Composición potencial calculada (Bogue) del cemento		
Silicato tricálcico, C ₃ S	56,4	
Silicato bicálcico, C ₂ S	10,5	
Aluminato tricálcico, C ₃ A	9,7	
Ferrito aluminato tetracálcico, C ₄ AF	7,9	
Sulfato de calcio, CaSO ₄	7,8	

n.d. = no determinado.

TABLA 2

Características físicas y mecánicas del cemento 3

Determinaciones	Cemento 3
Superficie específica (Blaine), cm ² /g	3.748
Peso específico, g/cm ³	3,18
Expansión en autoclave, %	0,04
Resistencias mecánicas, kp/cm²	
Flexotracción	
1 día	23
3 días	34
7 días	49
28 días	83
Compresión	
1 día	95
3 días	185
7 días	333
28 días	530

c) Agua de mar artificial

Se ha empleado agua de mar artificial preparada según el punto 6 de la norma ASTM D 1141-75 (8) 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) (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	0,001 ₆
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) (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 es el que figura en la tabla 3.

2.2. Técnica operatoria

Las técnicas de trabajo seguidas para:

- Preparar 20 mezclas cemento 3/escoria para cada uno de los dos sistemas y las probetas de mortero de 1 × 1 × 6 cm.
- Determinar la evolución de 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 por el método de Koch-Steinegger.
- 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) (6).

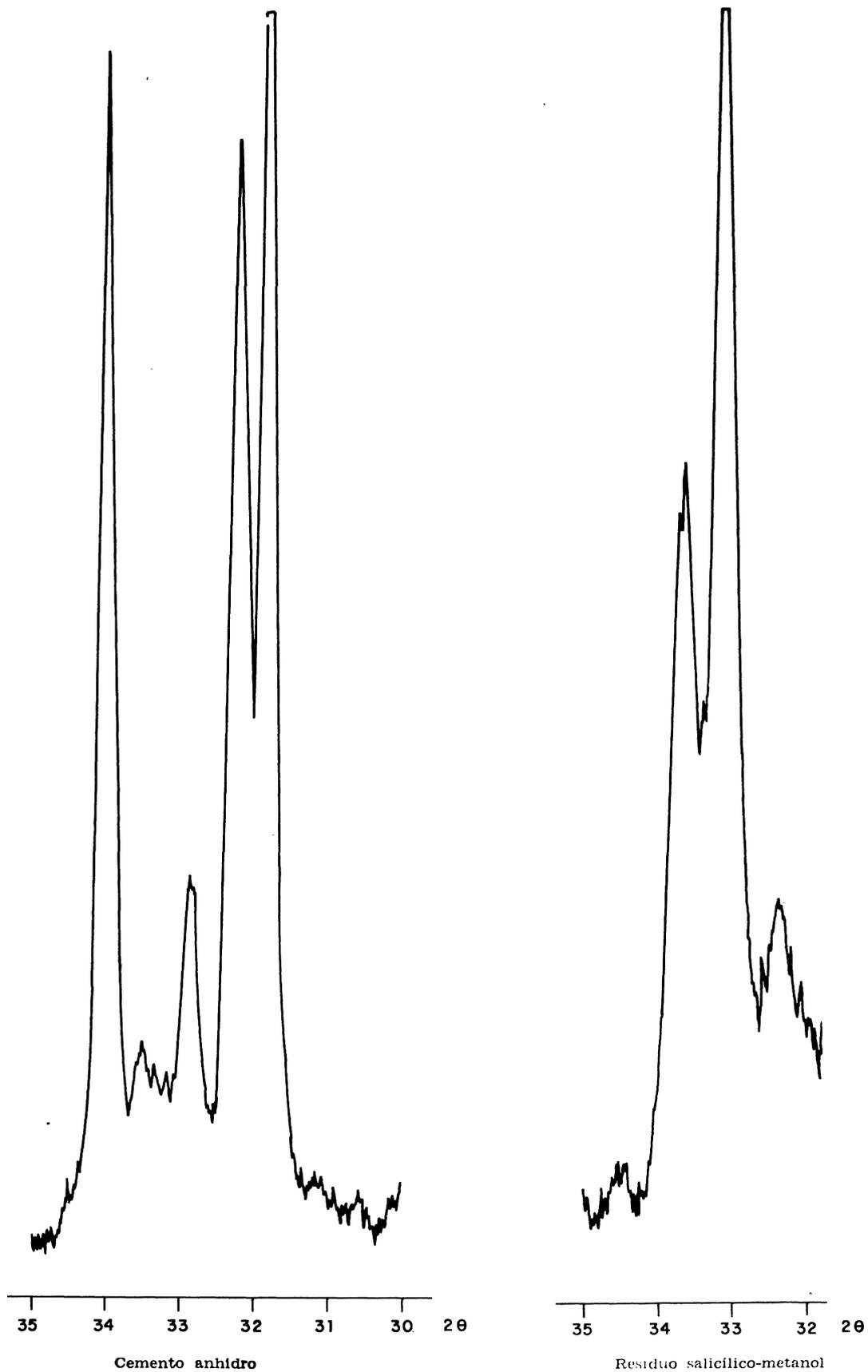


Fig. 1.—DRX del cemento 3 anhidro y del residuo de dicho cemento anhidro atacado con ácido salicilico-metanol.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Características del cemento 3 y de la escoria

a) Características del cemento 3

El cemento 3, objeto del presente artículo, tiene un contenido calculado (Bogue) de $C_3A = 9,7\%$ y de $C_4AF = 7,9\%$, lo que hace un total de $17,6\%$ de $C_3A + C_4AF$; el valor correspondiente a la suma de C_3S ($56,4\%$) y de C_2S ($10,5\%$) es $66,9\%$. 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 C_3A a $2\theta = 33,15^\circ$ y otro del C_4AF a $2\theta = 33,8^\circ$ (34° teóricos); la intensidad del primero es mayor que la del segundo en este DRX y también en los DRX de los cementos 1 y 2 (3) (4).

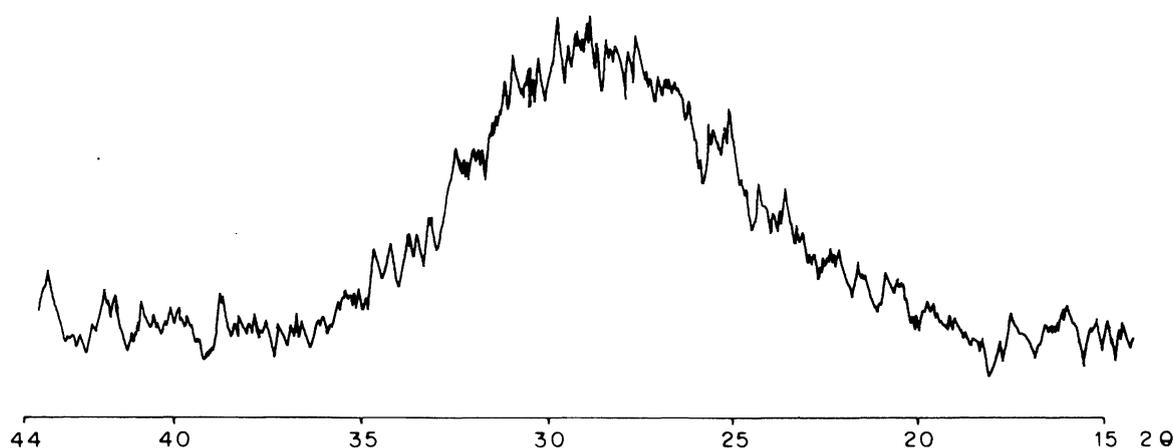


Fig. 2.—DRX de la escoria granulada.

Este cemento 3, por sus características químicas y mecánicas, se puede clasificar de acuerdo con el Pliego RC-75 (9), como P-450.

b) Característica de la escoria

La escoria siderúrgica utilizada, molida hasta conseguir una superficie específica (Blaine) de $4.030\text{ cm}^2/\text{g}$, 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 cementos siderúrgicos (9).

3.2. Evolución de las resistencias mecánicas a flexotracción (*) de las probetas de mortero de $1 \times 1 \times 6\text{ cm}$

En las figuras 3 a 6 se ha representado la evolución de las resistencias mecánicas, a flexotracción, para cada edad de curado (22 días) y de conservación-ataque (56 - 90 - 180 y

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

360 días) de las probetas de mortero en función de la mezcla cemento 3/escoria utilizada para fabricar dichas probetas.

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

T A B L A 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 3/ /Escoria	Conservación							
	Agua potable filtrada				Agua de mar artificial			
	Edad, días				Edad, días			
	56	90	180	360	56	90	180	360
100/0	100	92,1	86,0	74,5	58,2	51,4	27,2	14,2
85/15	105,2	103,7	98,9	98,9	85,5	75,2	54,3	45,6
65/35	115,5	115,0	112,3	94,3	82,1	80,7	83,7	94,7
40/60	116,5	118,2	108,7	107,9	114,9	110,6	87,5	98,1
30/70	109,0	116,9	101,6	114,8	114,6	116,3	111,9	116,2

En las tablas 4 y 6 figuran 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, y en agua de mar artificial, en la segunda, referidos al valor índice de las series hechas con cemento sin adición de escoria, sumergidas durante 56 días en agua potable filtrada (tabla 4) y en agua de mar artificial (tabla 6), al que se le ha asignado el valor 100 kp/cm².

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 fabricadas con cemento 3/escoria = 100/0 sumergidas en agua potable filtrada o en agua de mar artificial durante 56 - 90 - 180 y 360 días.

a) *Sistema: cemento 3/escoria - agua potable filtrada*

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero hechas con las distintas mezclas cemento 3/escoria, sumergidas en agua potable filtrada (R'_1) y para cada una de las diferentes edades estudiadas, son mayores que las correspondientes a las probetas fabricadas con cemento 3 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.

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 3/ /Escoria	Conservación							
	Agua potable filtrada				Agua de mar artificial			
	Edad, días				Edad, días			
	56	90	180	360	56	90	180	360
100/0	100	100	100	100	100	100	100	100
85/15	105,2	112,6	115,0	132,7	141,9	146,2	199,5	321,2
65/35	115,5	124,9	130,7	126,5	141,1	156,8	307,4	667,7
40/60	116,5	128,3	126,5	144,8	197,5	215,0	321,6	691,9
30/70	109,0	126,9	118,2	154,0	197,0	226,2	411,0	819,2

Las resistencias de las probetas elaboradas con una misma mezcla son, a lo largo del tiempo, del mismo orden hasta una edad y menores para las restantes que las de las series análogas conservadas durante 56 días (figura 7 y tabla 4); sin embargo, las resistencias de la serie hecha con la mayor cantidad de escoria (70 %) son superiores, excepto las correspondientes a las probetas conservadas durante 180 días.

— Influencia de la mezcla utilizada en la fabricación de las probetas de mortero para cada edad

• Edad: 22 + 56 días (figura 3)

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas hechas con las mezclas cemento 3/escoria = 85/15 - 65/35 y 40/60 aumentan conforme lo hace la cantidad de escoria, experimentando unos incrementos, con relación a las de las probetas hechas con cemento 3 sin adición de escoria, que van de 5,2 % a 16,5 %; sin embargo, las resistencias de las series de probetas fabricadas con la mayor cantidad de escoria (70 %), 76,1 kp/cm², son 9 % superiores que las de referencia e inferiores que las de las mezclas cemento 3/escoria = 65/35 y 40/60.

• Edad: 22 + 90 días (figura 4)

Del mismo modo que en el caso anterior las resistencias mecánicas de las distintas series experimentan un incremento, con relación a las de las probetas elaboradas con cemento 3 sin adición de escoria. Los valores mayores corresponden a las series de probetas fabricadas con las tres mezclas que tienen las mayores cantidades de escoria (35 - 60 y 70 %); estos valores se encuentran comprendidos entre 80,3 y 82,5 kp/cm², lo que representa unos incrementos del 24,9 % al 28,3 % (tabla 5) con relación a los de la serie mencionada.

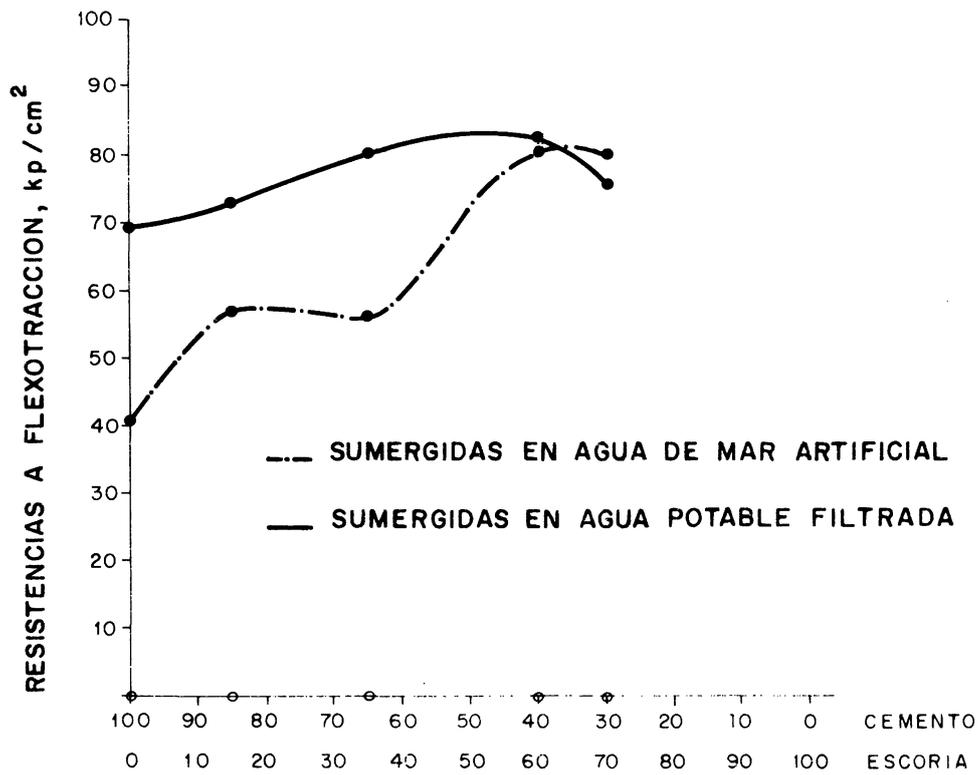


Fig. 3.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

Edad: (22 + 56 días)

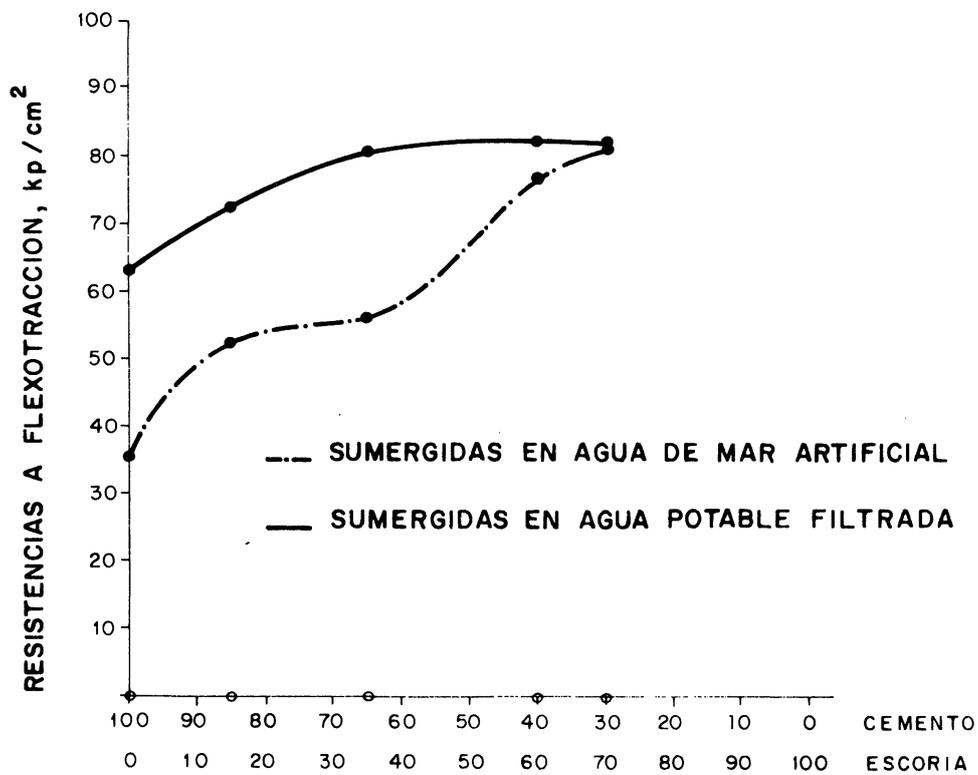


Fig. 4.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

Edad: (22 + 90 días)

- Edad: 22 + 180 días (figura 5)

En este caso se pueden hacer consideraciones análogas a las de los dos casos anteriores; las mayores resistencias (78,4 kp/cm², supone un incremento del 30,7 %) corresponden a las probetas hechas con la mezcla cemento 3/escoria = 65/35.

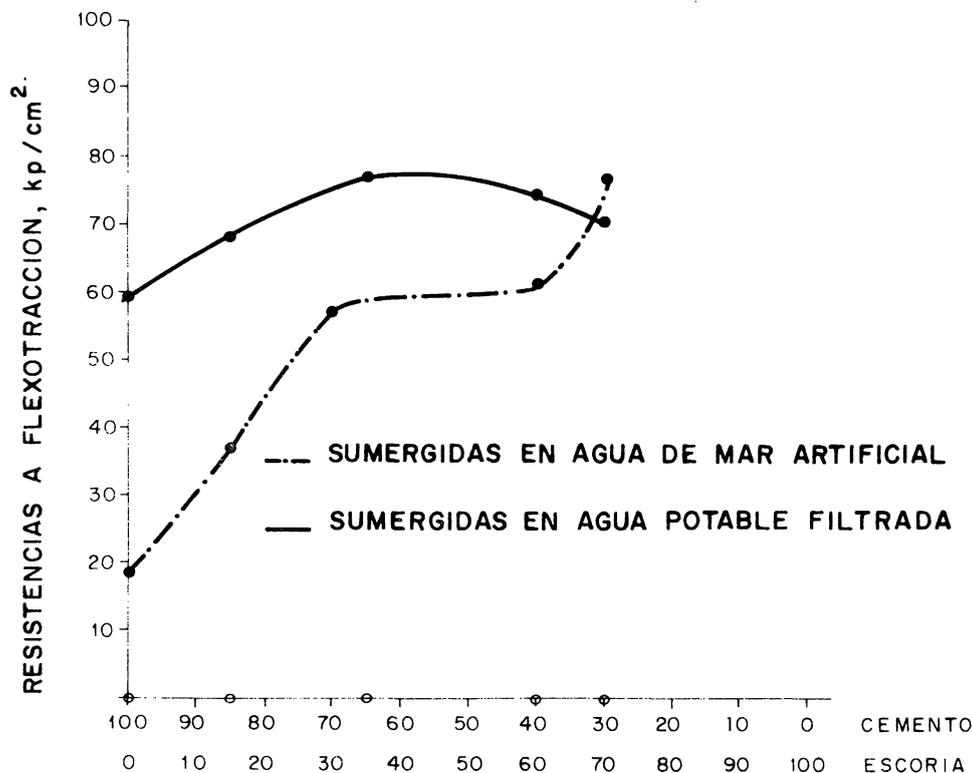


Fig. 5.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

Edad: (22 + 180 días)

- Edad: 22 + 360 días (figura 6)

A esta edad, las resistencias mecánicas de las series de probetas elaboradas con las mezclas cemento 3/escoria = 100/0 y 65/35 son menores que las correspondientes a las restantes edades de las mismas mezclas (tabla 4); mientras que las de las mezclas 85/15 y 40/60 son del mismo orden que las de la edad 22 + 180 días e inferiores que las de las restantes edades; por el contrario, las de la mezcla 30/70 son las mayores de esta edad (80,1 kp/cm², con un incremento del 54 % —tabla 5— con relación a las de la serie hecha con cemento 3 solo, 52 kp/cm²).

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

Las resistencias de las series de probetas fabricadas con las mezclas cemento 3/escoria = 85/15 (para las edades 22 + 56 días y 22 + 90 días), 65/35 (para las tres primeras edades), 40/60 y 30/70 (ambas, para todas las edades) son superiores al valor índice (100 kp/cm²), asignado a la serie de probetas confeccionadas con cemento 3 sin adición de escoria, a la edad de 22 + 56 días, (tabla 4).

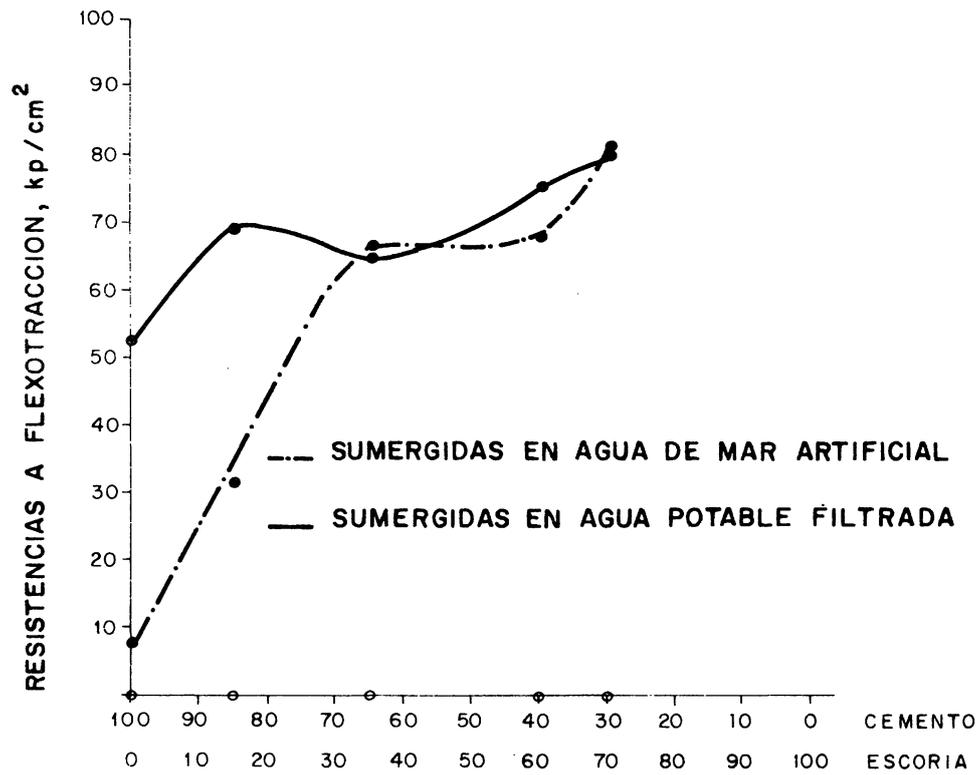


Fig. 6.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

Edad: (22 + 360 días)

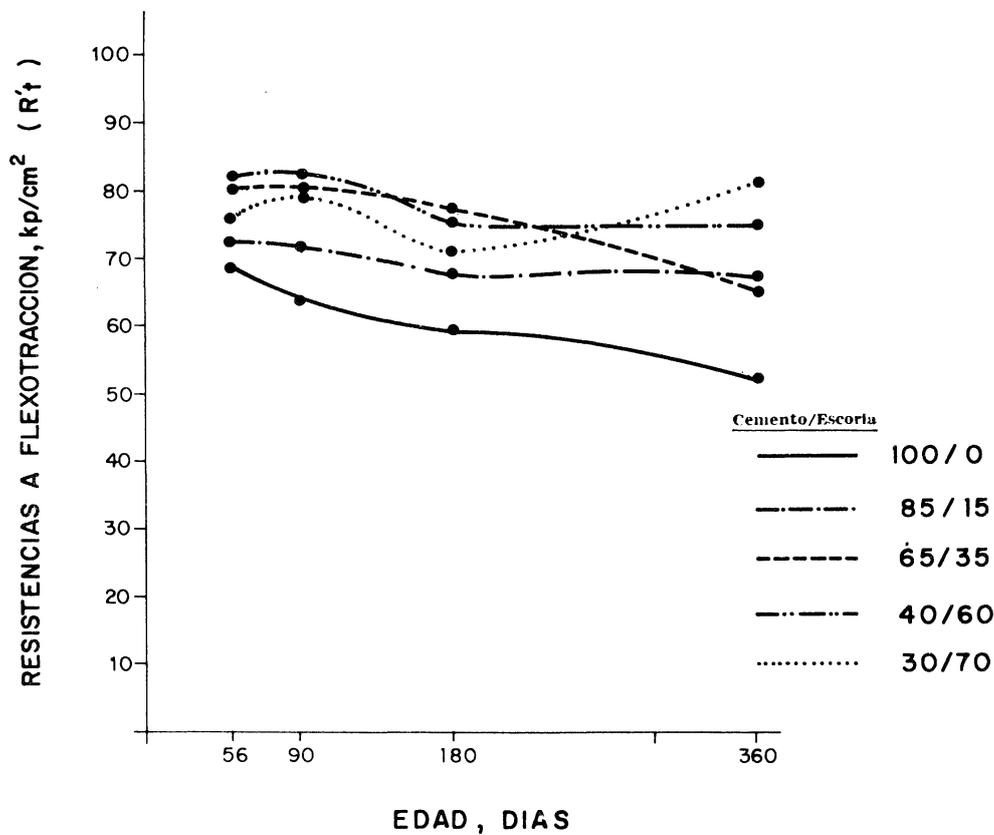


Fig. 7.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

Probetas sumergidas en agua potable filtrada.

La evolución de las resistencias mecánicas de las diversas series de probetas, para cada mezcla, a lo largo del tiempo (figura 7) experimenta las siguientes modificaciones:

- Mezcla: cemento 3/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 3/escoria, disminuyen conforme aumenta el tiempo de conservación (tabla 4); en efecto, pasan de 69,8 kp/cm² (22 + 56 días) a 52,0 kp/cm² (22 + 360 días), habiendo experimentado una disminución del 25,5 %.

- Mezcla: cemento 3/escoria = 85/15 (en peso)

La evolución de las resistencias mecánicas de esta serie es parecida a la de la mezcla anterior; disminuyen desde la edad 22 + 56 días (73,4 kp/cm²) hasta 22 + 180 días (69,0 kp/cm²). A 22 + 360 días presentan el mismo valor que para la edad anterior.

- Mezcla: cemento 3/escoria = 65/35 (en peso)

Las resistencias mecánicas, en esta serie, disminuyen con el tiempo pasando de 80,6 kp/cm² para la edad de 22 + 56 días a 65,8 kp/cm² a 22 + 360 días. Los incrementos experimentados por dichas resistencias para cada edad, con relación a los valores de las probetas hechas con cemento 3 sin adición de escoria, oscilan desde 15,5 % para 22 + 56 días a 30,7 % para 22 + 180 días (tabla 5).

- Mezcla: cemento 3/escoria = 40/60 (en peso)

En esta serie, las resistencias mecánicas de las dos primeras edades son del mismo orden (81,3 kp/cm² y 82,5 kp/cm²), así como las de las dos últimas edades (75,9 kp/cm² y 75,3 kp/cm²). Los valores de dichas resistencias son más altos, excepto para 22 + 180 días, que los de las mezclas anteriores.

- Mezcla: cemento 3/escoria = 30/70 (en peso)

Los valores de las resistencias correspondientes a las edades 22 + 90 días y 22 + 360 días, superiores a las de las otras dos edades, son del mismo orden (81,6 kp/cm² y 80,1 kp/cm² respectivamente). El incremento experimentado por la serie de probetas a 22 + 360 días, con relación al valor de las probetas hechas con cemento 3 sin adición de escoria y a la misma edad, es el mayor de todo el conjunto (54 %), como puede apreciarse en la tabla 5.

b) Sistema: cemento 3/escoria-agua de mar artificial

En el sistema presente las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero hechas con mezclas cemento 3/escoria, sumergidas en dicha agua de mar artificial (R_f) experimentan un incremento, con relación a las de las probetas hechas con cemento 3 solo, que es función directa de la cantidad de escoria presente en la mezcla utilizada para cada edad (figuras 3 a 6 y 8, tablas 4 a 6).

El valor de las resistencias de las series hechas con cemento 3 (100 %), con las mezclas cemento 3/escoria = 85/15 y 40/60 (hasta la edad 22 + 180 días) disminuye conforme au-

mente el tiempo de conservación-ataque, mientras que en los casos de las restantes series de probetas hechas con las mezclas cemento 3/escoria = 65/35 (excepto para 22 + 360 días) y 30/70 experimentan una ligera variación o permanecen prácticamente constantes (tabla 6 y figura 8).

TABLA 6

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

Mezcla: Cemento 3/Escoria	Edad, días			
	56	90	180	360
100/0	100	88,4	46,8	24,4
85/15	141,9	129,3	93,3	78,3
65/35	141,1	138,7	143,8	162,8
40/60	197,5	190,1	150,5	168,8
30/70	197,0	200,0	197,4	199,8

— 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 de mortero; en efecto, pasan de 40,6 kp/cm², para la mezcla cemento 3/escoria = 100/0 a 80,0 kp/cm² para la mezcla 30/70, produciéndose un incremento del 97 % (tabla 5).

- Edad: 22 + 90 días (figura 4)

La evolución de las resistencias a esta edad presenta un hábito parecido al caso anterior; no obstante, los incrementos experimentados, con relación a los valores de la serie de probetas de mortero hechas con cemento 3 sin escoria (35,9 kp/cm²), son superiores (tabla 5). Estos incrementos llegan a ser 115 % y 126,2 % para las series de probetas fabricadas con las mezclas que tienen las mayores cantidades de escoria (60 y 70 %, respectivamente); los valores de las resistencias de estas series son 77,2 y 81,2 kp/cm².

- Edad: 22 + 180 días (figura 5)

A esta edad, las resistencias mecánicas a flexotracción de las diversas series de probetas de mortero aumentan conforme lo hace la cantidad de escoria en las mezclas utilizadas en su fabricación; dichas resistencias pasan de 19 kp/cm² (probetas hechas con cemento 3 sin adición de escoria) a 78,1 kp/cm² (probetas elaboradas con la mezcla que tiene la mayor cantidad de escoria, 70 %), habiendo experimentado un incremento del 311 % (tabla 5).

- Edad: 22 + 360 días (figura 6)

Las resistencias a flexotracción en este caso, también aumentan conforme lo hace la cantidad de escoria. Los incrementos experimentados, con relación a las resistencias de las probetas confeccionadas con cemento 3 sin escoria, son los mayores de todas las series (tabla 5); dichas resistencias pasan de 9,9 kp/cm² a 31,8 kp/cm² - 66,1 kp/cm² - 68,5 kp/cm² y 81,1 kp/cm² para las series de probetas elaboradas con las mezclas cemento 3/escoria = 85/15 - 65/35 - 40/60 y 30/70, respectivamente, habiendo experimentado los siguientes incrementos: 121,2 % - 567,7 % - 591,9 % y 719,2 %.

— 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 las mezclas cemento 3/escoria = 85/15 (para 22 + 56 días y 22 + 90 días), 65/35, 40/60 y 30/70 (a todas las edades, para estas tres últimas mezclas) sumergidas después del período de curado en agua de mar artificial, son superiores al valor índice (100 kp/cm²), asignado a la serie de probetas fabricadas con cemento 3 sin adición de escoria y conservadas bajo agua de mar artificial durante 56 días, e inferiores en los restantes casos (tabla 6).

La evolución que experimentan las resistencias mecánicas a flexotracción de las diferentes series de probetas confeccionadas con las distintas mezclas cemento 3/escoria (figura 8) es la siguiente:

- Mezcla: cemento 3/escoria = 100/0 (en peso)

Las resistencias mecánicas a flexotracción experimentan una disminución brusca conforme aumenta el tiempo de curado-ataque, pasando de 40,6 kp/cm² (56 días) a 9,9 kp/cm² (360 días); la disminución experimentada es del 75,6 %. Los valores de dichas resistencias son menores que los de las distintas series de probetas de mortero hechas con las diversas mezclas cemento 3/escoria (figura 8 y tabla 5).

- Mezcla: cemento 3/escoria = 85/15 (en peso)

La evolución de las resistencias mecánicas presenta un hábito parecido al caso anterior (figura 1), teniendo con dicho caso un desfase de 17 kp/cm² y 21,9 kp/cm² para las edades extremas. Los valores de dichas resistencias también disminuyen con el tiempo de curado - ataque; pasan de 57,6 kp/cm² (56 días) a 31,8 kp/cm² (360 días), habiendo experimentado un descenso del 44,8 %.

- Mezcla: cemento 3/escoria = 65/35 (en peso)

Las resistencias mecánicas de las probetas hechas con esta mezcla experimentan un aumento conforme se incrementa el tiempo de conservación - ataque, excepto para la edad de 22 + 90 días (56,3 kp/cm²) que son ligeramente inferiores a las de 22 + 56 días (57,3 kp/cm²). Los valores de dichas resistencias se encuentran comprendidos entre 56,3 kp/cm² (22 + 90 días) y 66,1 kp/cm² (22 + 360 días).

- Mezcla: cemento 3/escoria = 40/60 (en peso)

Las resistencias mecánicas (flexotracción) de las probetas de mortero experimentan una

disminución conforme aumenta el tiempo de curado - ataque, pasando de 80,2 kp/cm², para la edad 22 + 56 días, a 61,1 kp/cm², para 22 + 180 días, y a 68,5 kp/cm² para 22 + 360 días; no obstante, los valores de dichas resistencias son, a todas las edades, superiores a los de las probetas confeccionadas con las mezclas anteriores (figura 8).

- Mezcla: cemento 3/escoria = 30/70 (en peso)

Las resistencias de las probetas de mortero hechas con la mezcla que tiene el mayor contenido de escoria (70 %) es la que para cada edad, excepto para 22 + 56 días (80,0 kp/cm²), proporciona los valores mayores de las distintas series estudiadas del sistema cemento 3/escoria-agua de mar artificial; dichos valores se encuentran comprendidos entre 78,1 kp/cm², para la edad de 22 + 180 días, y 81,2 kp/cm², para 22 + 90 días, (figura 8).

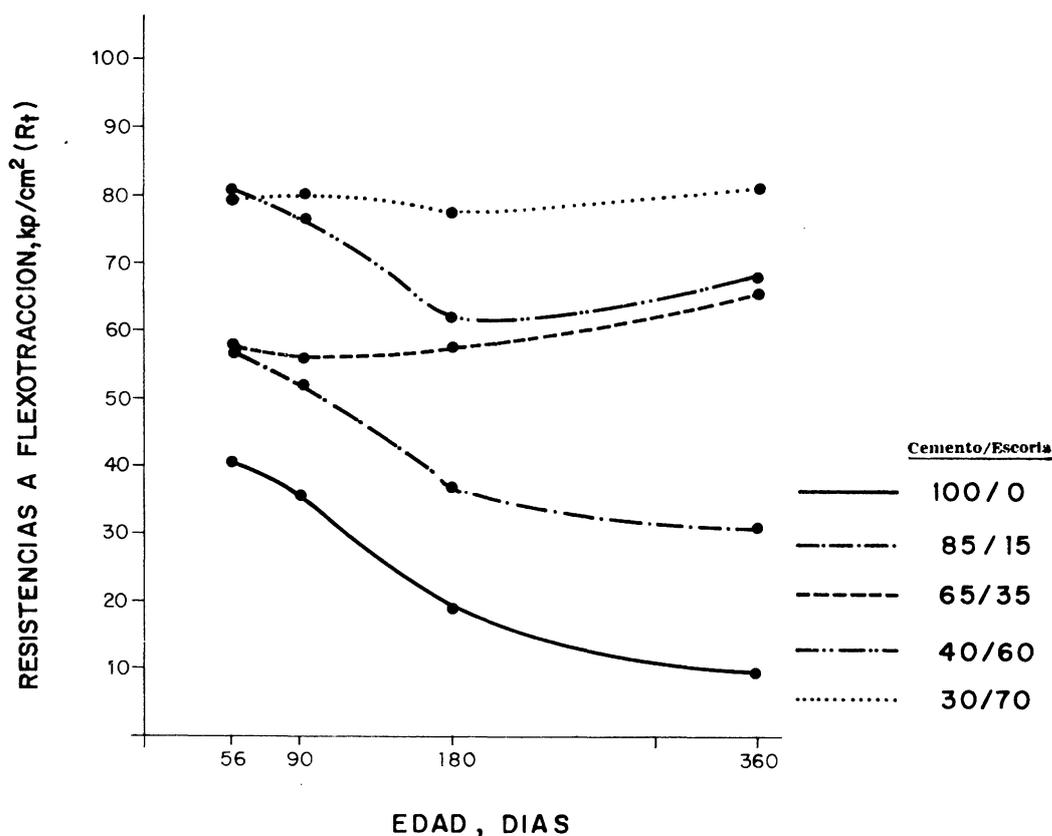


Fig. 8.—Evolución de las resistencias a flexotracción.
Probetas sumergidas en agua de mar artificial.

Los incrementos experimentados con relación a los valores índices (100 kp/cm²), asignados para cada edad a las probetas de mortero fabricadas con cemento 3 sin adición de escoria, son 97 % - 126,2 % - 311 % y 719,2 %, respectivamente, (tabla 5).

c) Estudio comparativo de ambos sistemas

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las diversas series de probetas de mortero fabricadas con las mezclas cemento 3/escoria = 100/0 (a todas las edades), 85/15 (a todas las edades), 65/35 (a 22 + 56 días, 22 + 90 días y 22 + 180 días), 40/60 (a todas las edades) y 30/70 (a 22 + 90 días) sumergidas en agua de mar artificial son inferiores a las de las series análogas conservadas durante los períodos de tiempo señalados en agua potable filtrada, (figuras 3 a 6) y superiores en los casos restantes.

Los incrementos experimentados por dichas resistencias, con relación a los valores índices asignados a las series de probetas para cada edad fabricadas con cemento 3 sin escoria, son mucho mayores en el caso del sistema cemento 3/escoria-agua de mar artificial que en el del sistema cemento 3/escoria-agua potable filtrada (tabla 5); dichos incrementos llegan a ser hasta 22 veces mayores.

Las resistencias a flexotracción de las series de probetas de mortero hechas con la mezcla que tiene el mayor contenido de escoria (70 %), sumergidas en agua de mar artificial, son del mismo orden o ligeramente superiores que las conservadas en agua potable filtrada.

3.3. Resistencia química. Método acelerado de Koch-Steinegger

Los coeficientes de corrosión (R_t/R'_t) de las series de probetas de mortero hechas con el cemento 3 sin adición de escoria, así como con la mezcla cemento 3/escoria = 85/15, para $t = 22 + 180$ días y $22 + 360$ días, del sistema cemento 3/escoria-agua de mar artificial son inferiores al valor índice del Koch-Steinegger (0,70 para $t = 22 + 56$ días) y superiores o del mismo orden en los demás casos, (figuras 9 y 10; tabla 7). Dichos coeficientes de corrosión son, a su vez, iguales o mayores de la unidad para las series de probetas fabricadas con la mezcla cemento 3/escoria = 30/70 para las edades $t = 22 + 56$ días, $22 + 180$ días y $22 + 360$ días y 65/35 para $t = 22 + 360$ días, ya que los valores de las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas sumergidas en agua de mar artificial (R_t) son superiores que las correspondientes a las probetas similares conservadas bajo agua potable filtrada (R'_t), figuras 3 a 6.

En la tabla 7 se encuentran los valores R_t/R'_t para las distintas edades y las diferentes mezclas, referidos al valor correspondiente a las probetas de mortero hechas con cemento 3 sin adición de escoria, para $t = 22 + 56$ días, al que se le ha asignado el valor 100. En dicha tabla se puede apreciar lo señalado anteriormente y que dichos coeficientes de corrosión llegan a ser 70,7 - 89,7 % mayores en el caso de las diferentes series de probetas fabricadas con la mezcla que tiene el mayor contenido de escoria (70 %).

TABLA 7

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

Mezcla: Cemento 3/Escoria	Edad, días			
	56	90	180	360
100/0	100	96,6	55,2	32,8
85/15	134,5	124,1	94,8	79,3
65/35	122,4	120,7	127,6	172,4
40/60	169,0	160,3	137,9	156,9
30/70	181,0	170,7	189,7	174,1

R_t/R'_t (Koch-Steinegger) = 0,70 para $t = 22 + 56$ días $\langle \rangle$ 120,7 referido a 0,58 (valor experimental para $t = 22 + 56$ días).

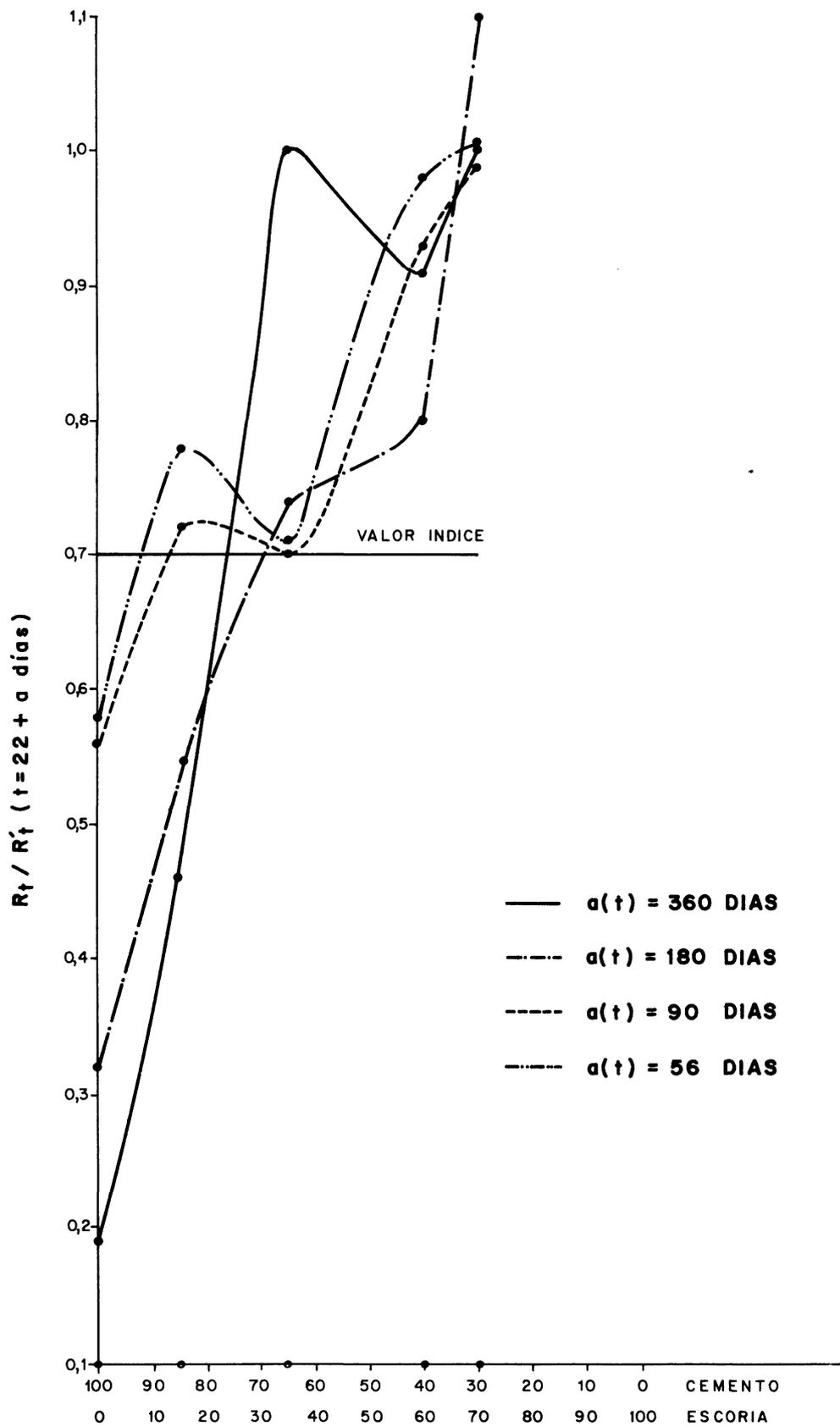


Fig. 9.—Evolución de los coeficientes de corrosión.

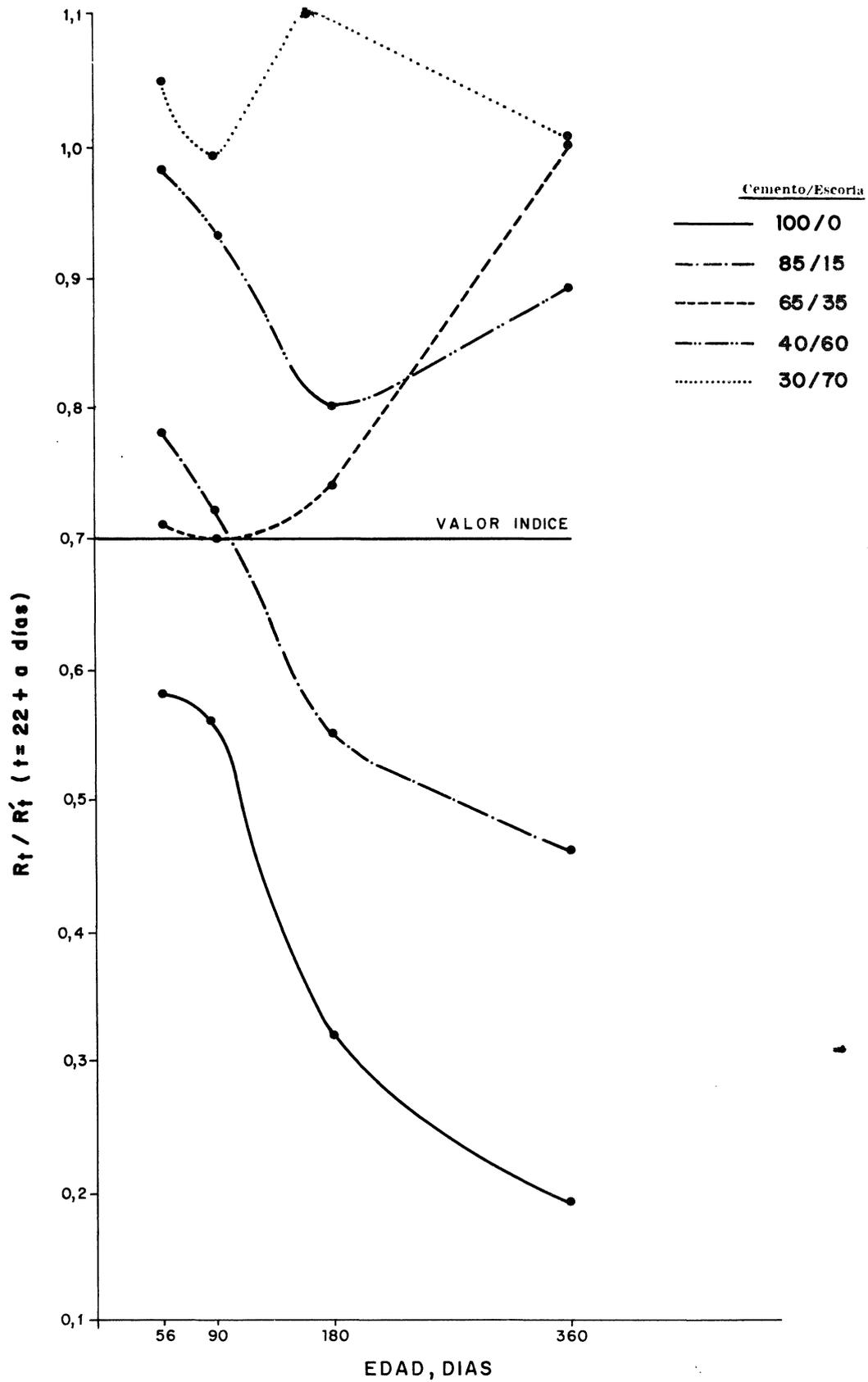


Fig. 10.—Evolución de los coeficientes de corrosión.
(a = 56 - 90 - 180 - 360 días).

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 estudiadas, de la cantidad de escoria de la mezcla utilizada en la fabricación de las probetas de mortero, pasando por un mínimo, figura 9, como se ha puesto de manifiesto en (3) (5) (10), que corresponde a las mezclas cemento 3/escoria = 65/35 (para $t = 22 + 56$ días y $22 + 90$ días), y 40/60 (para $t = 22 + 360$ días); el valor del mencionado mínimo es, en todos los casos, superior al valor índice (0,70 para $t = 22 + 56$ días) y al de las series hechas con cemento 3 sin adición de escoria a la edad de $t = 22 + 56$ días.

Los coeficientes de corrosión mayores corresponden, para todas las edades, a la mezcla cemento 3/escoria = 30/70 (en peso); dichos coeficientes se encuentran comprendidos en el entorno 0,99 ($t = 22 + 90$ días) y 1,10 ($t = 22 + 180$ días).

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 observar la variación de los coeficientes de corrosión de cada mezcla a lo largo del tiempo de conservación-ataque (hasta 1 año), experimentando las siguientes variaciones:

- Mezcla: cemento 3/escoria = 100/0 (en peso)

Los coeficientes de corrosión, menores de 0,70, disminuyen con el tiempo de conservación-ataque; pasando de 0,58 ($t = 22 + 56$ días) a 0,19 ($t = 22 + 360$ días), habiendo experimentado una disminución del 67,2 %.

- Mezcla: cemento 3/escoria = 85/15 (en peso)

En este caso, los coeficientes de corrosión también disminuyen con el tiempo de conservación - ataque pasando de 0,78 ($t = 22 + 56$ días) a 0,46 ($t = 22 + 360$ días); la disminución experimentada es del 41 %. Dichos coeficientes son mayores de 0,70 en las dos primeras edades (0,78 y 0,72) y menores en las dos últimas (0,55 y 0,46).

- Mezcla: cemento 3/escoria = 65/35 (en peso)

Los coeficientes R_t/R'_t , iguales o mayores que 0,70, son del mismo orden en las dos primeras edades (0,71 y 0,70), experimentando un aumento en las otras dos edades (0,74 <> <> 4 % y 1,00 <> 40 %) con relación al valor correspondiente a $t = 22 + 56$ días.

- Mezcla: cemento 3/escoria = 40/60 (en peso)

En esta mezcla los coeficientes de corrosión, que también son mayores de 0,70, se encuentran comprendidos entre 0,80 (valor mínimo) para $t = 22 + 180$ días y 0,98 (valor máximo) para $t = 22 + 56$ días, pasando por un mínimo para la edad $t = 22 + 180$ días.

- Mezcla: cemento 3/escoria = 30/70 (en peso)

Los coeficientes R_t/R'_t , en este caso, que pasan por un mínimo a $22 + 90$ días, se encuentran comprendidos entre 0,99 (valor mínimo) para $t = 22 + 90$ días y 1,10 (valor máximo)

para $t = 22 + 180$ días. Para las otras dos edades son 1,05 para $t = 22 + 56$ días y 1,01 para $t = 22 + 360$ días.

4. CONCLUSIONES

4.1. Sistema: cemento 3/escoria-agua potable filtrada

Primera

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero (1:3) de $1 \times 1 \times 6$ cm hechas con las mezclas cemento 3/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 el mencionado cemento 3 sin adición de escoria. Los incrementos experimentados dependen, para cada edad, del contenido de escoria en la mezcla utilizada.

Segunda

Los valores mayores de las resistencias a flexotracción, para las dos primeras edades, corresponden a las series de probetas hechas con la mezcla que tiene 60 % de escoria, para la tercera edad a la serie de la mezcla con 35 % de escoria y para la cuarta edad a la serie de la mezcla que tiene el mayor de escoria (70 %).

Tercera

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las distintas series de probetas fabricadas con las mezclas que tienen cantidades de escoria iguales o inferiores al 60 % son del mismo orden en las primeras edades y menores en las últimas edades que las de las series análogas conservadas durante 56 días. Sin embargo, las de las series hechas con las mezclas que tienen el mayor contenido de escoria (70 %) son superiores para las edades 22 + 90 y 22 + 360 días e inferiores para 22 + 180 días.

4.2. Sistema: cemento 3/escoria-agua de mar artificial

Cuarta

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero hechas con cemento 3 sin adición de escoria y con la mezcla cemento 3/escoria = 85/15, sumergidas en agua de mar artificial después del período de curado (22 días), experimentan un descenso brusco (sobre todo las primeras) conforme aumenta el tiempo de conservación-ataque.

Quinta

Las resistencias a flexotracción de las probetas de mortero fabricado con la mezcla cemento 3/escoria = 65/35 y 30/70 son, para las cuatro edades, del mismo orden o ligeramente superiores (para $t = 22 + 360$ días, en el primer caso).

Sexta

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las distintas series de probetas de mortero sumergidas en agua de mar artificial experimentan un incremento, para cada edad, con

relación a las de las probetas hechas con cemento 3 sin adición de escoria; este incremento depende de la cantidad de escoria presente en la mezcla utilizada y del tiempo de conservación - ataque. Los mayores incrementos de dichas resistencias corresponden a las series de probetas fabricadas con las mezclas que tienen las mayores cantidades de escoria (60 y 70 %).

Séptima

Las resistencias mecánicas (flexotracción) de las distintas series de probetas de mortero confeccionadas con las mezclas cemento 3/escoria = 100/0 - 85/15 - 65/35 (menos para $t = 22 + 360$ días) y 40/60, sumergidas en agua de mar artificial, son menores a todas las edades que las de las series análogas sumergidas 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 iguales o superiores.

Octava

Los coeficientes de corrosión Koch-Steinenger (resistencia química) son, para las series de probetas correspondientes a las mezclas cemento 3/escoria = 100/0 y 85/15 (para $t = 22 + 180$ días y $22 + 360$ días), inferiores al valor índice (0,70 para $t = 22 + 56$ días) y superiores en los demás casos.

Los valores mayores de dicho coeficiente corresponden, para cada edad, a las probetas hechas con la mezcla que tiene el mayor contenido de escoria (70 %); dichos valores son mayores que la unidad, excepto para $t = 22 + 90$ días (0,99).

Novena

La evolución de los coeficientes de corrosión (R_t/R'_t), a lo largo del tiempo, depende de la cantidad de escoria de la mezcla utilizada en la fabricación de las probetas de mortero; pasan por un mínimo en determinados casos.

Los coeficientes de corrosión de las mezclas cemento 3/escoria = 100/0 y 85/15 experimentan, a lo largo del tiempo, una disminución considerable, que llega a ser del 67,2 % y 41 %, respectivamente, al pasar de $t = 22 + 56$ días a $t = 22 + 360$ días.

5. BIBLIOGRAFIA

- (1) GASPAR-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L.: *Materiales de Construcción*, 174, 43-70, (1979).
- (2) GASPAR-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L.: *Materiales de Construcción*, 176, 49-77, (1979).
- (3) SAGRERA-MORENO, J. L. y GASPAR-TEBAR, D.: *Materiales de Construcción*, 178, 17-38, (1980).
- (4) GASPAR-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L.: *Materiales de Construcción*, 179, 59-79, (1980).
- (5) SAGRERA-MORENO, J. L. y GASPAR-TEBAR, D.: *Materiales de Construcción*, 169, 29-48, (1978).
- (6) GASPAR-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L.: *Materiales de Construcción*, 168, 33-60, (1977).
- (7) TAKASHIMA, S. and AMANO, F.: *Rev. of the fourteenth Gen. Meet.*: Tokyo, may 1960, págs. 19-22.

- (8) ASTM D 1141-75: Standard Specification for Substitute Ocean Water; 1978 Standards; Part 31, páginas 909-911.
- (9) Pliego de Prescripciones Técnicas para la Recepción de Cementos, 1975 (RC-75): MOP, Servicio de Publicaciones. Madrid, 1975.
- (10) 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.

**SE VENDE:
4 CAMIONES
DE MOVIMIENTO**

**de tierras de 40 T
marca FAUN tipo K 40.4
año de construcción 1978
horas de servicio: 4.500
precio unitario: DM 149.500 neto
en Berlín Oeste**

**Dieter Hafemeister
Erdbau GmbH & Co.
Tel. 030/3312021
Telex 1 81525**
