

Resistencia química del hormigón

IV . -Acción del agua de mar: influencia de la adición de escoria a un cemento portland de alta resistencia inicial.

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

JOSE LUIS SAGRERA-MORENO y DEMETRIO GASPAR-TEBAR

Drs. en Ciencias Químicas
IETcc

RESUMEN

En el presente trabajo (primero 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 modificaciones 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 de alta resistencia inicial (cemento 1 <> P-550-ARI) y con las mezclas cemento 1/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) y de las mezclas cemento (1 ó 2)/escoria = 70/30 y 30/70 (en peso) frente al agua de mar, dando cuenta de los resultados de la evolución obtenidos sobre las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero (1:3) de $1 \times 1 \times 6$ cm, cuando se sumergen durante 56 y 90 días en agua potable filtrada, unas series, y en agua de mar natural, otras series análogas, una vez curadas (1 día en cámara húmeda y 21 días bajo agua potable filtrada); sobre la resistencia química de los mencionados cementos y mezclas, por el método de Koch-Steinegger, frente a dicha agua de mar; sobre la variación de la concentración iónica de las disoluciones y sobre las características químicas y estructurales de las fases sólidas forma-

das en los medios de curado y de conservación y estructurales de la fracción enriquecida extraída de uno de los prismas de cada serie de probetas 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 [primero de un trabajo amplio en el que se estudia la acción del agua potable filtrada, del agua de mar natural y del agua saturada de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sobre los dos cementos portland mencionados, sobre otro tercer cemento portland de composición estructural distinta —con un contenido calculado (Bogue) de $\text{C}_3\text{A} = 9,7 \%$, de $\text{C}_4\text{AF} = 7,9 \%$, de $\text{C}_3\text{S} = 59,3 \%$ y $\text{C}_2\text{S} = 8,4 \%$ — y sobre diferentes mezclas de dichos cementos con diversas adiciones, naturales y artificiales, que será objeto de otras publicaciones] 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 1 (P-550-ARI), reseñado en (1) y (2), y con las mezclas de dicho cemento con la escoria siderúrgica vítrea de (1) y (2) en las siguientes proporciones: cemento 1/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 en agua de mar artificial, otras series, así como de la resistencia química de dicho cemento y de estas mezclas 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 molida (1) a uno de los dos cementos portland industriales de fabricación española (P-550-ARI), designado como cemento 1 en las publicaciones (1) y (2), en su comportamiento químico-resistente frente a la acción del agua de mar artificial determinando, en esta etapa, la evolución de las resistencias mecánicas a flexotracción de probetas de mortero (1:3) de $1 \times 1 \times 6$ cm y de la resistencia química por el método de Koch-Steinegger (3).

Las probetas de mortero se han preparado con el mencionado cemento 1, de alta resistencia inicial, y con las mezclas cemento 1/escoria = 85/15 - 65/35 - 40/60 y 30/70 (en peso), de acuerdo con las conclusiones de (4). Dichas probetas, una vez fabricadas, se han mantenido 24 horas en un recinto, a $20 \pm 2^\circ\text{C}$, saturado de humedad y hasta 22 días bajo agua potable filtrada (período de curado); a continuación, y hasta el momento de su rotura (período de conservación-ataque), se han sumergido en agua de mar artificial, unas series, y otras en agua potable filtrada durante 56 - 90 - 180 y 360 días.

Estos trabajos se complementarán con otros de los que se irá dando cuenta en sucesivas publicaciones.

2.1. Materiales utilizados y características

a) *Cemento y escoria*

Se ha utilizado el cemento portland industrial de alta resistencia inicial, cemento 1 de (1), que corresponde 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 (5), para 2θ comprendidos entre 30° y 35° , el primero, y 32° - 35° , el segundo. El equipo y las condiciones de trabajo son las señaladas en (1).

TABLA 1

Composición química del cemento 1 y de la escoria. Composición potencial calculada (Bogue) del cemento 1

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

Determinaciones	Cemento 1	Escoria
Pérdida por calcinación, P.F.	0,4	0,4
Residuo insoluble, R.I.	3,1	0,0
Dióxido de silicio, SiO ₂	19,3	35,2
Oxido de hierro (III), Fe ₂ O ₃	3,9	0,7
Oxido de aluminio, Al ₂ O ₃	6,2	17,0
Oxido de calcio, CaO	61,1	37,3
Oxido de magnesio, MgO	1,5	6,3
Trióxido de azufre, SO ₃	4,1	0,0
Manganeso (II), Mn (II)	n.d.	0,8
Suma	99,6	97,7
Oxido de calcio libre, CaO libre	1,0	n.d.
Composición potencial calculada (Bogue) del cemento		
Silicato tricálcico, C ₃ S	39,2	
Silicato bicálcico, C ₂ S	25,7	
Aluminato tricálcico, C ₃ A	9,9	
Ferrito aluminato tetracálcico, C ₄ AF	12,0	
Sulfato de calcio, CaSO ₄	6,9	

n.d. = no determinado.

TABLA 2

Características físicas y mecánicas del cemento 1

Determinaciones	Cemento 1
Superficie específica (Blaine), cm ² /g	5.313
Peso específico, g/cm ³	3,11
Expansión en autoclave, %	0,03
Resistencias mecánicas, kp/cm ²	
Flexotracción	
2 días	59
3 días	63
7 días	70
28 días	80
Compresión	
2 días	331
3 días	408
7 días	499
28 días	566

La escoria siderúrgica empleada procedente de la industria española, molida hasta conseguir una superficie específica (Blaine) de 4.030 cm²/g, tiene la composición química de la tabla 1. El DRX de la misma se encuentra en la figura 2.

b) *Arena utilizada para preparar las probetas*

Para preparar las probetas de mortero se ha utilizado 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 usado agua de mar artificial preparada según el punto 6 de la norma ASTM D 1141-75 (6), teniendo en cuenta que en el agua de mar sintética de Watford (7) existen únicamente los iones Cl (I), SO₄ (II), Ca (II), Mg (II) y Na (I).

— Preparación del agua de mar artificial

El agua de mar artificial se ha preparado disolviendo 245,34 g de cloruro de sodio y 40,94 gramos de sulfato de sodio anhidro en 8 a 9 litros de agua desionizada; a continuación se añaden lentamente y agitando enérgicamente 200 ml de la disolución 1 y 100 ml de la disolución 2, que se describen más adelante. Finalmente se diluye la disolución anterior con agua desionizada hasta completar un volumen de 10,0 litros.

Por último, se ajusta el pH a 8,2 utilizando, para ello, una disolución 0,1 N de hidróxido de sodio.

Disolución 1:

La disolución 1 se ha preparado disolviendo en un volumen apropiado de agua desionizada (menor de 7 litros) las cantidades de los productos siguientes:

MgCl ₂ .6H ₂ O	3.889,0 g
CaCl ₂ (anhidro)	405,6 g
SrCl ₂ .6H ₂ O	14,8 g

A continuación se diluye hasta un volumen total de 7,0 litros.

Disolución 2:

Para preparar la disolución 2 se han disuelto en un volumen de agua desionizada (menor de 7 litros) las cantidades de los productos que se indican a continuación:

KCl	486,2 g
NaHCO ₃	140,7 g
KBr	70,4 g
H ₃ BO ₃	19,0 g
NaF	2,1 g

por último, se diluye hasta 7,0 litros.

— Contenido experimental de Ca (II), Mg (II), SO₄ (II) y Cl (I) en el agua de mar artificial

Con objeto de conocer y comprobar la composición del agua de mar artificial se ha determinado experimentalmente el contenido de los iones reseñados, el cual figura en la tabla 3 en donde, además, se incluye el del agua de mar natural utilizada en (1) y (2).

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 filtrada

Como medio de curado y de conservación-testigo se ha empleado agua potable (canal de Isabel II-Madrid) una vez que ha pasado a través de un filtro cerámico. Tiene la composición que se indica en la tabla 3.

2.2. Técnica operatoria

a) Preparación de las mezclas cemento 1/escoria

La escoria granulada se ha molido hasta conseguir una superficie específica (Blaine) de 4.030 cm²/g; la superficie (Blaine) del cemento 1 es 5.313 cm²/g.

Con el cemento 1, lo mismo que con los cementos 2 y 3 que se reseñarán en otras publicaciones, y con la escoria granulada molida se han preparado las siguientes mezclas binarias, en peso, (e. p.):

Cemento: 100 - 85 - 65 - 40 - 30

Escoria: 0 - 15 - 35 - 60 - 70

b) Resistencia química. Método acelerado de Koch-Steinegger

Se ha seguido la técnica de trabajo descrita en (3). De las distintas series de probetas preparadas para cada mezcla, de acuerdo con el amplio programa que se ha señalado anteriormente, se han utilizado 5 series para cada uno de los dos sistemas (cemento 1/escoria-agua potable filtrada y cemento 1/escoria-agua de mar artificial) por edad, lo que hace un total de 20 series para cada sistema.

Las probetas de mortero, de $1 \times 1 \times 6$ cm, se han elaborado con las relaciones cemento/arena = 1/3 y agua/cemento = 0,60; en cada serie se han utilizado 12 probetas.

El volumen de agua potable filtrada en donde se han curado las probetas ha sido de 500 ml/serie y el correspondiente a los períodos de conservación-ataque, en donde se han sumergido cada una de las series durante 56 - 90 - 180 y 360 días, ha sido de 800 ml.

Las distintas series de probetas del sistema cemento 1/escoria-agua potable filtrada se han utilizado como testigos para los restantes trabajos en donde se estudia la influencia de otras adiciones a este cemento.

Los depósitos con el agua potable filtrada o con el agua de mar y las series de probetas sumergidas hasta el momento de su rotura, así como los del agua potable en donde se han curado, se han mantenido cerrados herméticamente en un laboratorio a $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Los valores de las resistencias mecánicas son la media de otros 12 valores concordantes, correspondientes a las 12 probetas de cada serie.

c) *Determinación de las características del cemento y de la escoria*

Las características del cemento y de la escoria se han determinado de acuerdo con las técnicas de trabajo descritas en el Pliego RC-75 (8).

d) *Determinación del contenido de iones en los medios de curado y de conservación-ataque*

El contenido de los iones Ca (II), Mg (II), SO_4 (II) y Cl (I) en el agua potable filtrada y en el agua de mar artificial se ha determinado complexométricamente con EDTA, los dos primeros, gravimétricamente, el tercero, y volumétricamente por el método de Mohr, el cuarto.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Características del cemento 1 y de la escoria

a) *Características del cemento 1*

El cemento 1 tiene un contenido calculado (Bogue) de $\text{C}_3\text{A} = 9,9 \%$, de $\text{C}_4\text{AF} = 12,0 \%$, siendo la suma de ambos $21,9 \%$, y el de C_3S ($39,2 \%$) más C_2S ($25,7 \%$) es $64,9 \%$; este cemento por los valores de sus características químicas y de las resistencias mecánicas se puede calificar, de acuerdo con el Pliego RC-75, como P-550-ARI.

En los DRX de la figura 1, y de un modo especial en el difractograma correspondiente al residuo del cemento atacado con ácido salicílico-metanol, se puede apreciar que el pico del C_3A , a $2\theta = 33,15^\circ$, presenta una intensidad relativa menor que la del pico del C_4AF , a $2\theta = 33,80^\circ$ (34° teóricos); además, existe un pico a $2\theta = 33,5^\circ$ y posiblemente otro a $2\theta = 32,40^\circ$.

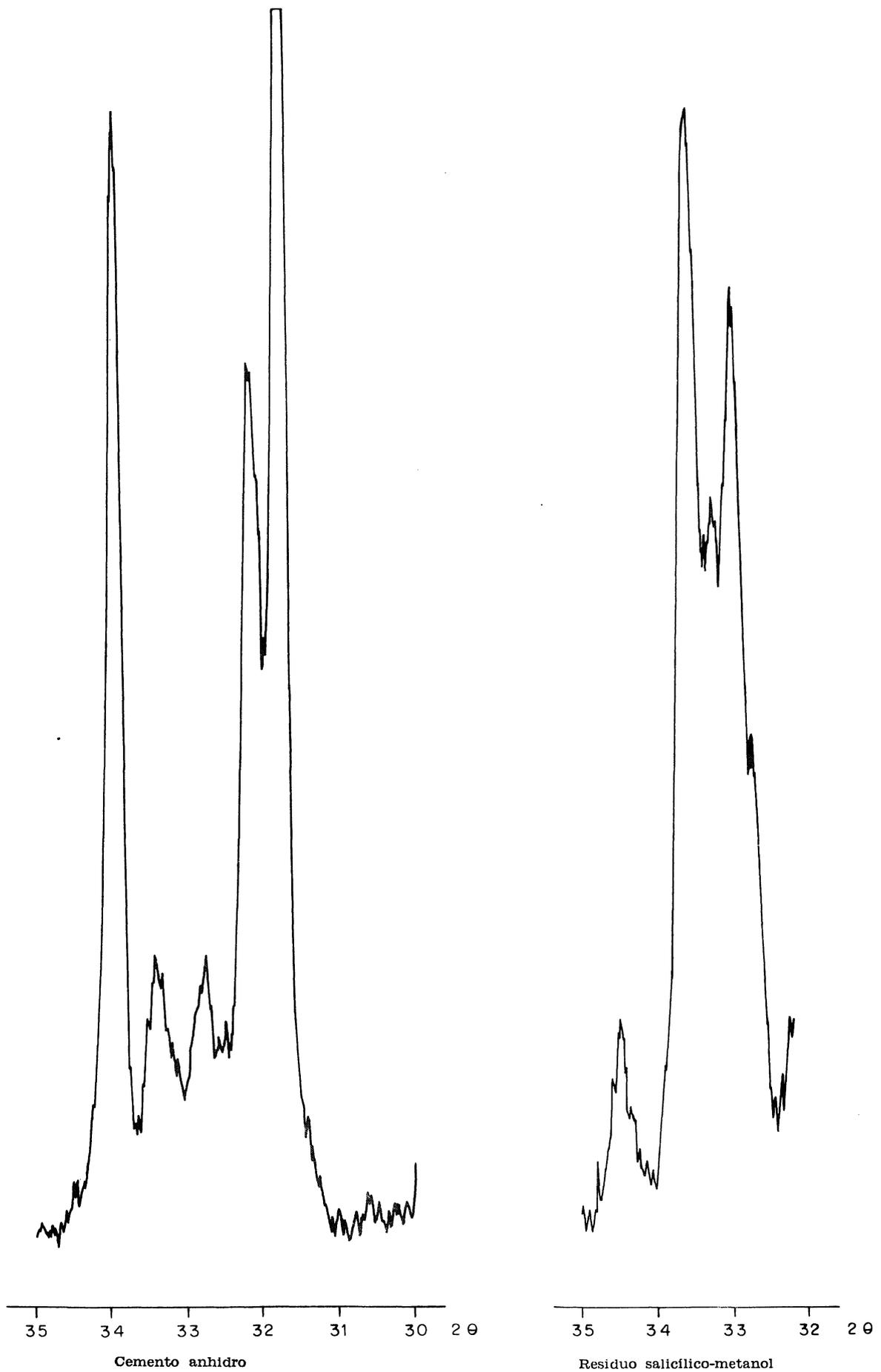


Fig. 1.—DRX del cemento 1 anhidro y del residuo de dicho cemento anhidro atacado con ácido salicilico-metanol.

b) Características de la escoria

La escoria siderúrgica vítrea (DRX de la figura 2) cumple la condición especificada en el Pliego RC-75 para poder utilizarla en la fabricación de cementos siderúrgicos.

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

La superficie específica (Blaine) de la escoria molida utilizada en la elaboración de las mezclas cemento/escoria es 4.030 cm²/g.

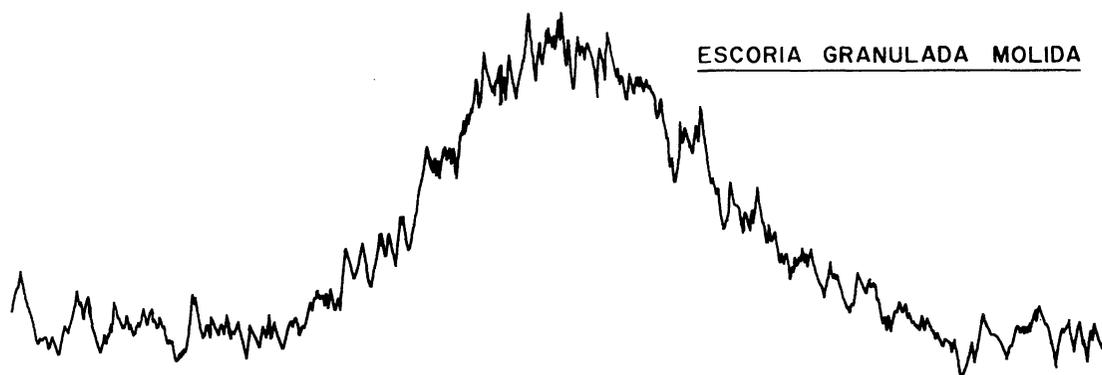


Fig. 2.—DRX de la escoria granulada.

3.2. Evolución de las resistencias mecánicas, a flexotracción (*)

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 360 días) de las probetas de mortero en función de la mezcla cemento 1/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).

En las tablas 4 y 6 figuran los valores de las resistencias 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 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 mencionados valores referidos al valor índice (100 kp/cm²), asignado a cada una de las series de probetas hechas con cemento 1/escoria = 100/0 sumergidas en agua potable filtrada o en agua de mar artificial durante las cuatro edades estudiadas: 56 - 90 - 180 y 360 días. En esta tabla se aprecia que los valores de las resistencias, para cada edad, de las diversas series de probetas hechas con las mezclas cemento 1/escoria son superiores a los de las fabricadas con cemento 1 sin adición de escoria.

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

En la tabla 4 se observa que los valores de las resistencias de las probetas elaboradas con las mezclas cemento 1/escoria = 85/15 (menos para 22 + 360 días) - 65/35 - 40/60 y 30/70, conservadas en agua potable filtrada, son mayores que el mencionado valor índice (100 kp/cm²) y éste, a su vez, superior a los restantes. Sin embargo, en las probetas sumergidas en agua de mar artificial son mayores los valores de las series hechas con las mezclas cemento 1/escoria = 65/35 (para 22 + 360 días) - 40/60 y 30/70; los restantes son menores.

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 1/ /Escoria	Conservación							
	Agua potable filtrada				Agua de mar artificial			
	Edad, días				Edad, días			
	56	90	180	360	56	90	180	360
100/0	100	98,4	98,8	77,7	80,0	78,0	86,7	80,3
85/15	113,2	112,7	110,5	93,9	93,4	84,5	96,0	88,5
65/35	122,7	127,7	118,4	105,8	98,7	98,8	99,3	110,5
40/60	126,0	130,9	116,1	122,4	132,3	113,3	100,0	124,0
30/70	111,2	107,5	111,8	119,6	129,4	117,2	130,5	141,0

Los valores de las resistencias, referidos a los de las probetas hechas con cemento 1 sin adición de escoria (tabla 6, valor índice = 100 kp/cm² para 56 días), son mayores en todos los casos, excepto para la serie de probetas hechas con dicha mezcla, a la edad de 22 + 90 días.

a) *Sistema: cemento 1/escoria - agua potable filtrada*

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero hechas con las diferentes mezclas cemento 1/escoria, sumergidas en agua potable filtrada (R'_t) y para cada una de las edades estudiadas, experimentan un incremento, con relación a las de las probetas fabricadas con cemento sin adición de escoria, que depende de la cantidad de escoria de la mezcla utilizada (figuras 3 a 6, tablas 4 y 5) y del tiempo de conservación; sin embargo, las resistencias de las probetas elaboradas con una misma mezcla son del mismo orden o menores, conforme aumenta el tiempo de conservación, que las de las series análogas conservadas durante 56 días (figura 7 y tabla 4), en el caso de utilizar mezclas ricas en cemento, y del mismo orden o mayores cuando se utilizan cantidades altas de escoria, sobre todo para la edad de 22 + 360 días.

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

- Edad: 22 + 56 días (figura 3)

Las resistencias a flexotracción de las probetas hechas con las mezclas cemento 1/escoria = 85/15 - 65/35 y 40/60 aumentan conforme lo hace el contenido de escoria, experi-

mentando unos incrementos que van del 13,2 % al 26,0 %, con relación a las de las probetas fabricadas con cemento 1 sin adición de escoria; sin embargo, las resistencias de las probetas correspondientes a la mezcla con mayor cantidad de escoria (70 %), 74,4 kp/cm², son 11,2 % superiores que estas últimas (66,9 kp/cm²) y ligeramente inferiores a las de la mezcla cemento 1/escoria = 85/15 (75,7 kp/cm²).

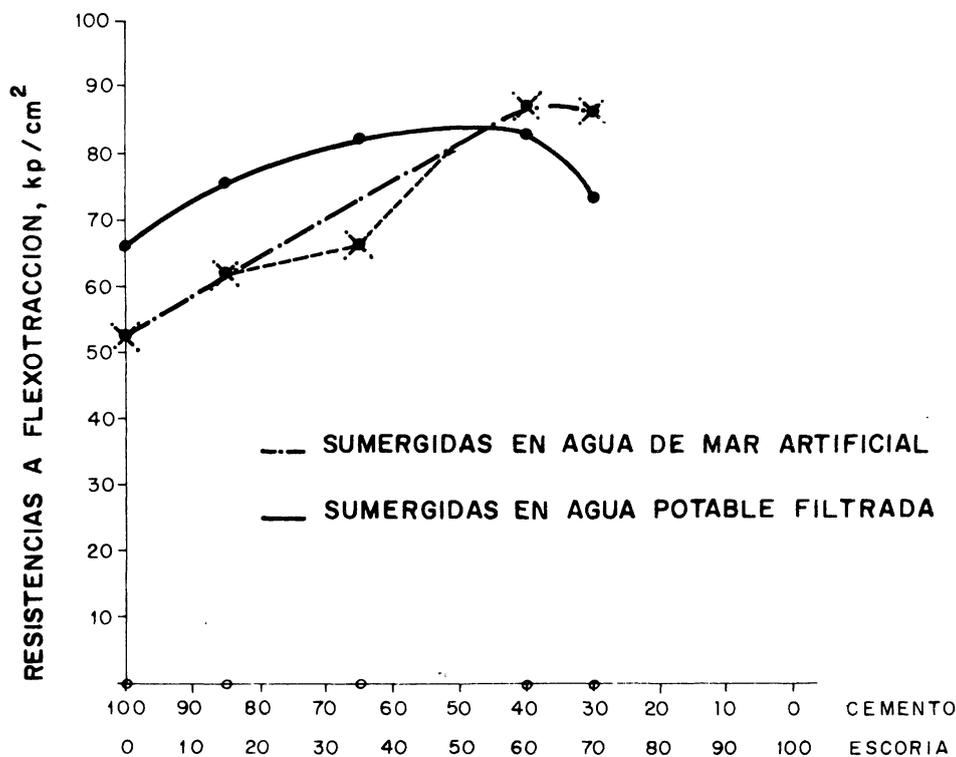


Fig. 3.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

Edad: (22 + 56 días)

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 1/ /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	113,2	114,6	111,8	120,8	116,8	108,2	110,7	110,2
65/35	122,7	129,9	119,8	136,2	123,4	126,6	114,5	137,6
40/60	126,0	133,1	117,6	157,5	165,4	145,2	115,3	154,7
30/70	111,2	109,3	113,2	153,8	161,9	150,2	150,5	175,6

- Edad: 22 + 90 días (figura 4)

La evolución de las resistencias de las probetas, a esta edad, presenta un hábito análogo al caso anterior (22 + 56 días).

Los valores mayores (87,6 kp/cm²) corresponden, también, a las probetas hechas con la mezcla cemento 1/escoria = 40/60; el incremento experimentado, con relación a la serie de la mezcla cemento 1/escoria = 100/0 (90 días), es 33,1 % (tabla 5).

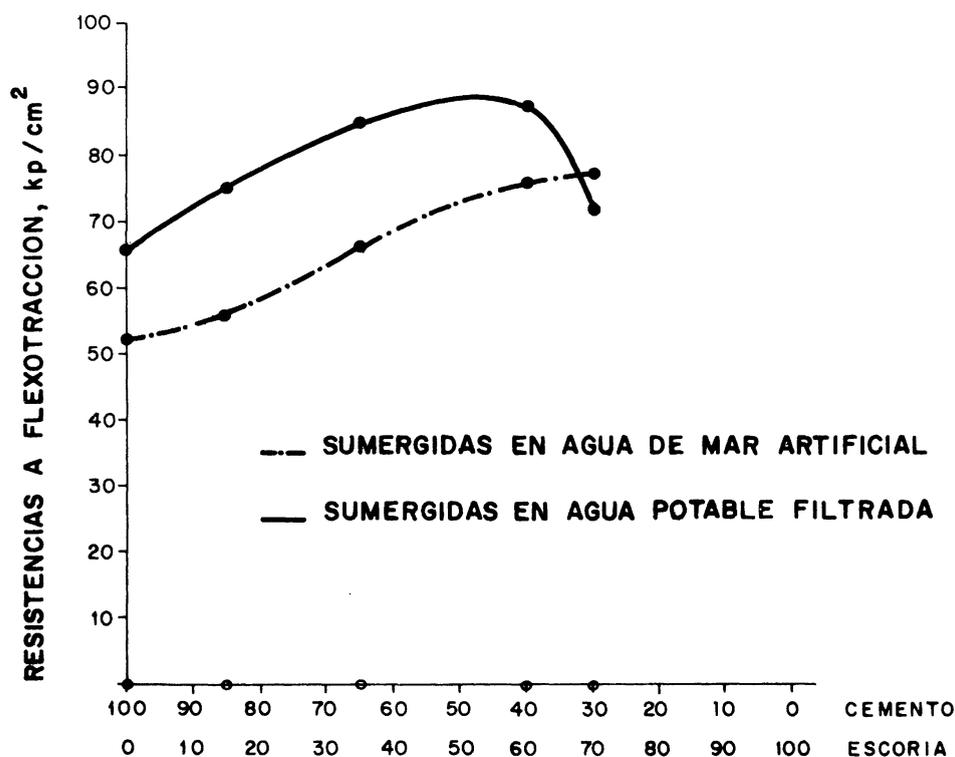


Fig. 4.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

Edad: (22 + 90 días)

- Edad: 22 + 180 días (figura 5)

En este caso se pueden hacer consideraciones similares a las dos anteriores; las mayores resistencias (79,2 kp/cm², supone un incremento del 19,8 %) corresponden a las probetas confeccionadas con la mezcla cemento 1/escoria = 65/35.

- Edad: 22 + 360 días (figura 6)

Las resistencias de las distintas series de probetas, elaboradas con las mezclas cemento 1/escoria = 85/15 - 65/35 y 40/60, aumentan conforme lo hace la cantidad de escoria, llegando a ser, las de la última mezcla, 57,5 % mayores que las de la serie hecha con cemento 1 sin escoria; los valores de las probetas de la mezcla que tiene mayor contenido de escoria, junto con la del 60 %, son las que experimentan los mayores incrementos (53,8 y 57,5 %, respectivamente).

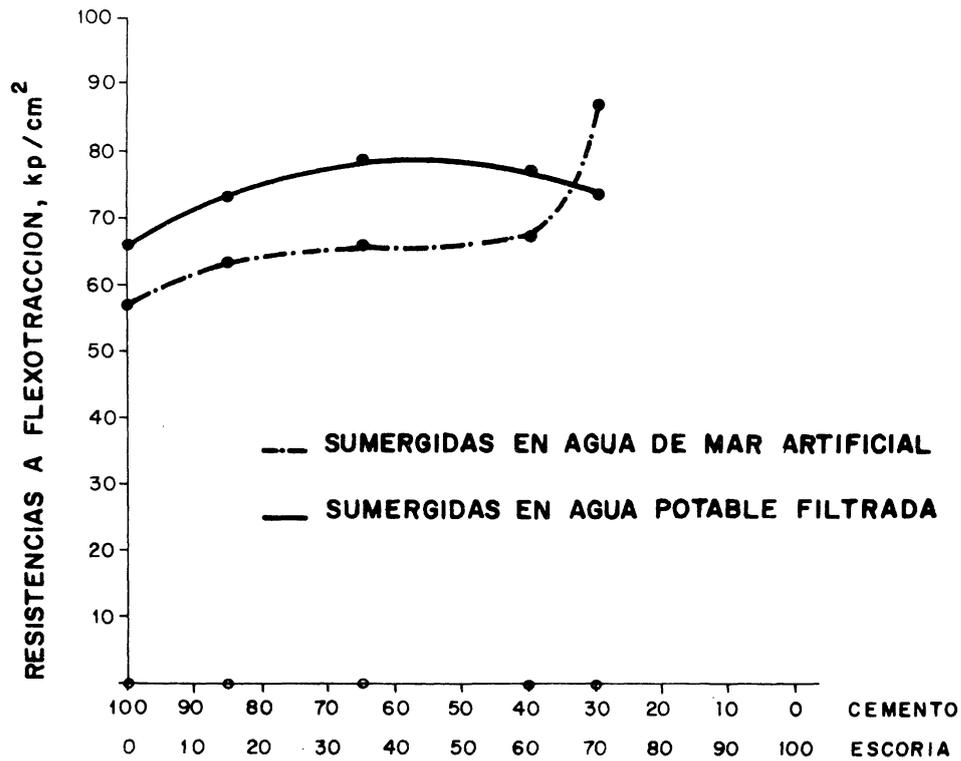


Fig. 5.—Evolución de las resistencias a flexotracción.
Edad: (22 + 180 días)

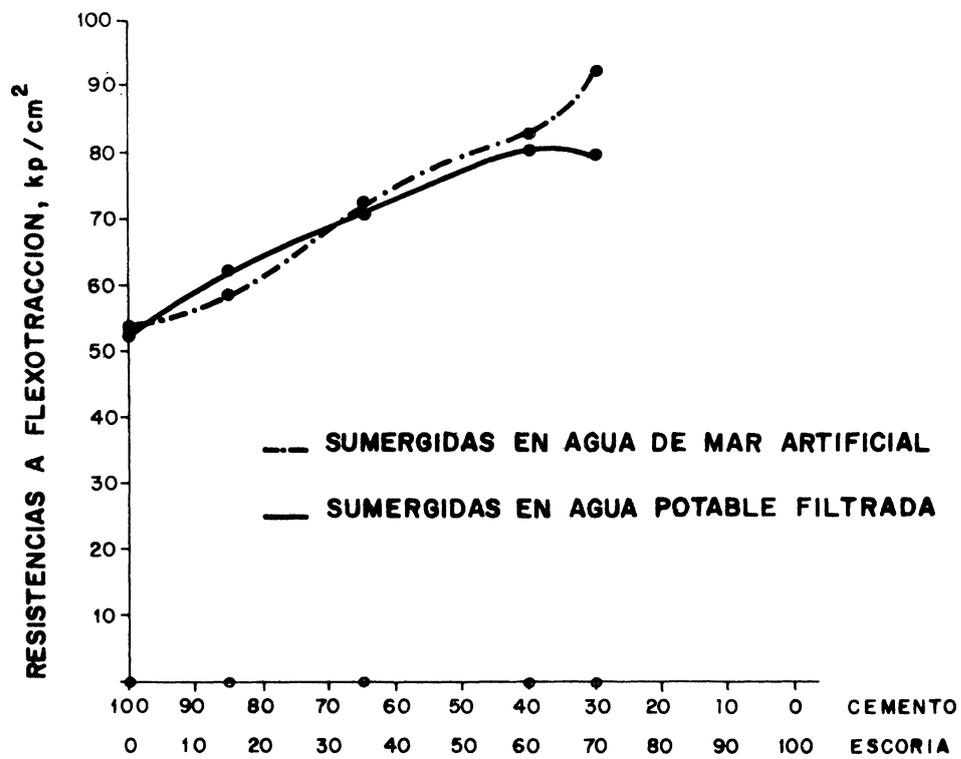


Fig. 6.—Evolución de las resistencias a flexotracción.
Edad: (22 + 360 días)

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

Las resistencias a flexotracción de las probetas de mortero de las distintas series, hechas con las mezclas cemento 1/escoria = 85/15 (menos a 22 + 360 días) - 65/35 - 40/60 y 30/70, a lo largo del tiempo, son superiores al valor índice 100 kp/cm² (para 22 + 56 días), tabla 4. Experimentan, para cada mezcla, figura 7, las siguientes modificaciones:

- Mezcla: cemento 1/escoria = 100/0 (en peso)

Las resistencias permanecen prácticamente constantes hasta 22 + 180 días, experimentando un ligero descenso (1,6 %) a la edad de 22 + 90 días. Los valores menores (52,0 kp/cm²) corresponden a la edad mayor (22 + 360 días), lo que supone un descenso de 22,3 % con relación al valor correspondiente a 22 + 56 días (66,9 kp/cm²).

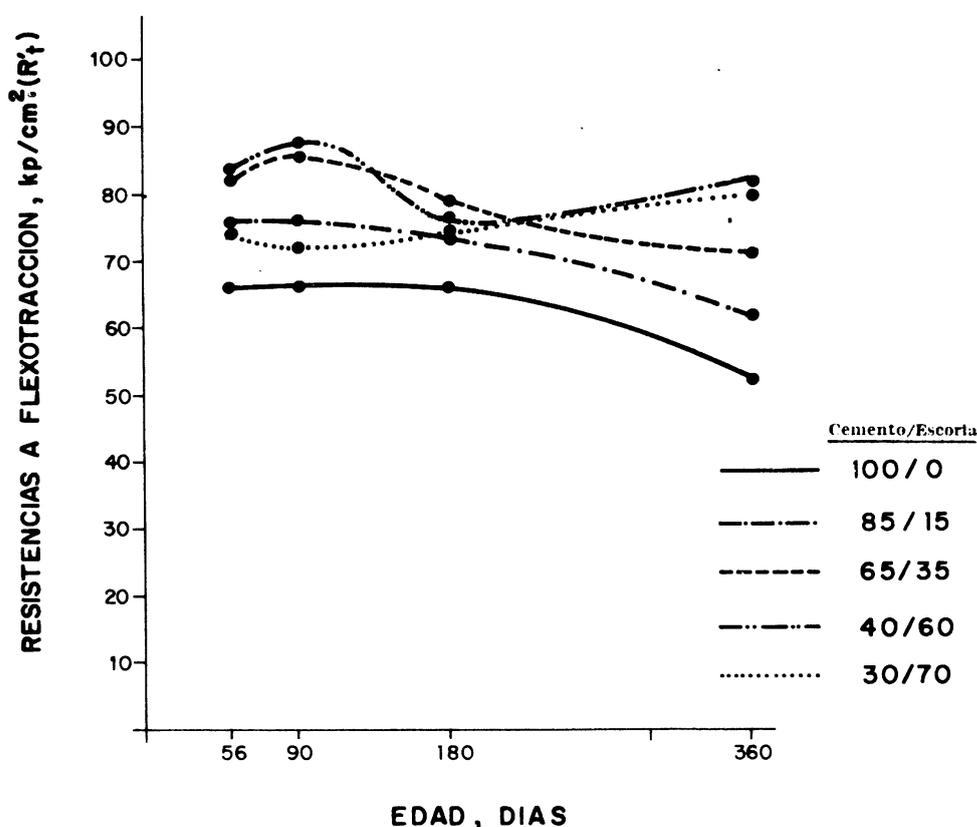


Fig. 7.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

Probetas sumergidas en agua potable filtrada

- Mezcla: cemento 1/escoria = 85/15 (en peso)

Los valores de esta serie son superiores, para cada edad, que los de la serie anterior; los incrementos experimentados para las tres primeras edades están comprendidos entre 11,8 y 14,6 % mientras que para la cuarta es 20,8 %.

La evolución de las resistencias, a lo largo del tiempo, tiene un hábito análogo al de las probetas hechas con la mezcla cemento 1/escoria = 100/0 (figura 7); es decir, en las tres

primeras edades los valores experimentan ligeras modificaciones (73,9 a 75,7 kp/cm²); por el contrario a 22 + 360 días se obtienen los valores menores (62,8 kp/cm²), con un descenso del 17 %, con relación a los valores de la primera edad.

- Mezcla: cemento 1/escoria = 65/35 (en peso)

Las resistencias de esta serie de probetas aumentan hasta la edad de 22 + 90 días, pasando de 82,1 kp/cm² (a 22 + 56 días) a 85,4 kp/cm²; a continuación disminuyen dando 79,2 kp/cm², a 22 + 180 días, y 70,8 kp/cm², a 22 + 360 días.

Los valores de cada edad son superiores a los correspondientes de las series anteriores (figura 7).

- Mezcla: cemento 1/escoria = 40/60 (en peso)

Las resistencias a flexotracción de las probetas de mortero de las dos primeras edades (84,3 y 87,6 kp/cm², respectivamente) son ligeramente mayores que las correspondientes a las probetas hechas con la mezcla cemento 1/escoria = 65/35 y superiores a las de las restantes series, a las mismas edades. A 22 + 180 días, las resistencias (77,7 kp/cm²) experimentan un descenso del 7,8 % —así como a 22 + 360 días (81,9 kp/cm²), que es 2,9 %— con relación a los valores de la primera edad.

- Mezcla: cemento 1/escoria = 330/70 (en peso)

Las probetas hechas con esta mezcla presentan una evolución normal, incrementándose suavemente con el tiempo, excepto para 22 + 90 días en donde experimentan una disminución de 3,4 % con relación a la primera edad, de tal modo que pasan de 74,4 kp/cm², a 22 + 56 días, a 80,0 kp/cm², a 22 + 360 días.

b) Sistema: cemento 1/escoria-agua de mar artificial

Del mismo modo que en el sistema cemento 1/escoria-agua potable filtrada las resistencias mecánicas a flexotracción de las diferentes series de probetas, sumergidas en agua de mar artificial (R_f), experimentan un incremento para cada edad con relación a las de las probetas hechas con cemento 1 sin adición de escoria, que es función de la cantidad presente en la mezcla utilizada y del tiempo de conservación-ataque (figuras 3 a 6 y tablas 4 a 6). Por el contrario, las resistencias de las probetas fabricadas con una misma mezcla experimentan variaciones de signo distinto, a lo largo del tiempo de conservación-ataque, con relación a las de las series análogas sumergidas durante 56 días (figura 8, tablas 4 y 6).

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

- Edad: 22 + 56 días (figura 3)

Las resistencias a flexotracción se incrementan conforme lo hace la cantidad de escoria en la mezcla utilizada para confeccionar las probetas. Los valores de las series hechas con las mezclas que tienen las mayores cantidades de escoria (60 y 70 %) son del mismo orden (88,5 y 86,6 kp/cm², respectivamente); los incrementos experimentados, con relación al valor a 56 días, son 65,4 % y 61,9 % (tabla 5).

T A B L A 6

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

Mezcla: Cemento 1/Escoria	Edad, días			
	56	90	180	360
100/0	100	97,6	108,4	100,4
85/15	116,8	105,6	120,0	110,6
65/35	123,4	123,6	124,1	138,1
40/60	165,4	141,7	125,0	155,3
30/70	161,9	146,5	163,2	176,3

- Edad: 22 + 90 días (figura 4)

La evolución de las resistencias, en esta edad, presenta un hábito parecido al caso anterior; no obstante, los incrementos experimentados son inferiores, excepto el de las probetas elaboradas con la mezcla cemento 1/escoria = 65/35. Los valores mayores corresponden a las series de probetas hechas, también, con las mayores cantidades de escoria (60 y 70 %), que son 45,2 % y 50,2 % superiores que las de las probetas fabricadas sólo con cemento 1.

- Edad: 22 + 180 días (figura 5)

Los valores de las resistencias correspondientes a las series hechas con las mezclas cemento 1/escoria = 100/0 - 85/15 - 65/25 y 40/60 experimentan ligeras modificaciones, pasan de 58,0 kp/cm² a 66,9 kp/cm², alcanzando el valor mayor (87,3 kp/cm²) para las de la mezcla cemento 1/escoria = 30/70, con un incremento del 50,5 % con relación al valor índice (tabla 5).

- Edad: 22 + 360 días (figura 6)

En este caso los valores de las resistencias presentan un aumento lineal según la cantidad de escoria de la mezcla utilizada, estando directamente ligado a dicho contenido. Así, este incremento es, con relación a las resistencias de las probetas hechas con cemento 1 sin adición de escoria, 10,2 % - 37,6 % - 54,7 % y 75,6 %, según que las cantidades de escoria sean 15 % - 35 % - 60 % y 70 %, 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, sumergidas en agua de mar artificial, son superiores al valor índice (100 kp/cm²) asignado a las resistencias de las probetas fabricadas con cemento 1 sin adición de escoria, sumergidas en dicha agua de mar 56 días, excepto las de las probetas hechas con la misma mezcla y sumergidas 90 días, las cuales son 2,4 % inferiores (tabla 6).

La evolución de las resistencias de las diferentes series de probetas confeccionadas con las distintas mezclas cemento 1/escoria (figura 8) es la siguiente:

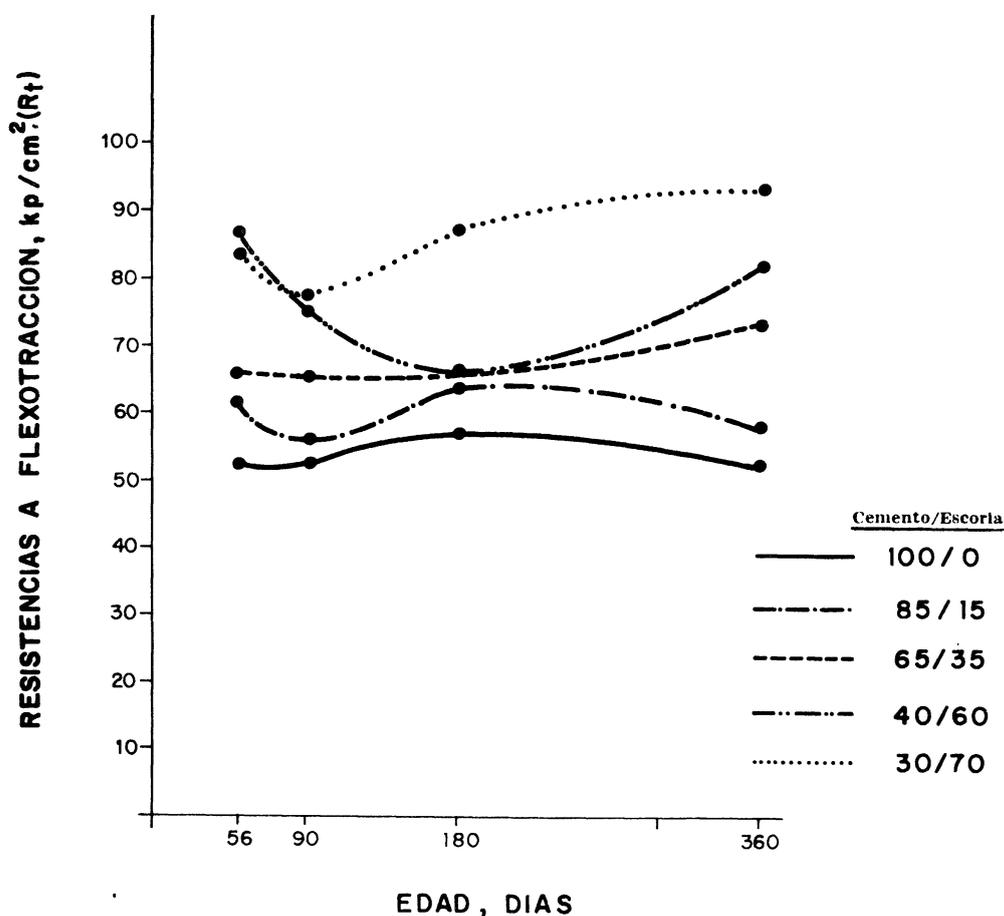


Fig. 8.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

Probetas sumergidas en agua de mar artificial

- Mezcla: cemento 1/escoria = 100/0 (en peso)

Las resistencias permanecen prácticamente constantes en las cuatro edades estudiadas, experimentando un ligero descenso (2,4 %) a 22 + 90 días. Los valores de esta serie son más bajos que los correspondientes a las restantes series de probetas hechas con las mezclas cemento 1/escoria (figura 8 y tabla 6).

- Mezcla: cemento 1/escoria = 85/15 (en peso)

Las resistencias de esta serie, superiores a las del caso anterior, siguen el hábito de la figura 8, presentando un valor mínimo (56,5 kp/cm²) a la edad de 22 + 90 días.

- Mezcla: cemento 1/escoria = 65/35 (en peso)

Las resistencias de las series de probetas correspondientes a las tres primeras edades son del mismo orden (se encuentran comprendidas entre 66,0 y 66,4 kp/cm²).

Los valores más altos (73,9 kp/cm²) son los de la edad 22 + 360 días, habiendo experimentado un incremento del 12,0 %.

Todos los valores de las resistencias de estas series son superiores, a todas las edades, a los de las series de probetas hechas con las mezclas anteriores.

- Mezcla: cemento 1/escoria = 40/60 (en peso)

Las resistencias de las series de las tres primeras edades experimentan una disminución (14,4 %, para 22 + 90 días, y 24,4 % para 22 + 180 días), recuperándose (83,1 kp/cm²) para la edad 22 + 360 días, pero sin llegar a alcanzar el valor de la primera edad (88,5 kp/cm² para 22 + 56 días).

- Mezcla: cemento 1/escoria = 30/70 (en peso)

Las probetas de las series correspondientes a las tres últimas edades han proporcionado las mayores resistencias, para cada edad, de las distintas series estudiadas; únicamente las de la primera edad son ligeramente inferiores a las de las probetas hechas con la mezcla cemento 1/escoria = 40/60.

Los incrementos experimentados con relación a los valores de las series hechas con cemento 1 sin adición de escoria, para cada edad, han sido: 61,9 % (33,1 kp/cm²), 50,2 % (26,2 kp/cm²), 50,5 % (29,3 kp/cm²) y 75,6 % (40,6 kp/cm²), respectivamente (tabla 5).

c) *Estudio comparativo de ambos sistemas*

En las figuras 3 a 6 se ha representado la evolución de las resistencias mecánicas a flexotracción de los sistemas cemento 1/escoria-agua potable filtrada y cemento 1/escoria-agua de mar artificial a cada una de las cuatro edades estudiadas.

Las resistencias de las distintas series de probetas de mortero fabricadas con las mezclas cemento 1/escoria = 100/0 - 85/15 y 65/35, sumergidas durante 56 - 90 y 180 días en agua de mar artificial, son inferiores a las de las series similares sumergidas en agua potable filtrada (figuras 3, 4, 5, y tabla 4); asimismo son menores las de la mezcla 40/60, excepto para la primera edad. Por el contrario, las resistencias de las series de probetas elaboradas con la mezcla que tiene la mayor cantidad de escoria (70 %) son superiores en todos los casos (figuras 3 a 6, tabla 4).

Para la edad 22 + 360 días (fig. 6) las resistencias, en ambos sistemas, son del mismo orden o ligeramente diferentes para todas las mezclas cemento 1/escoria estudiadas. Como en los casos anteriores los valores de las probetas hechas con cemento 1/escoria = 30/70 son más altos (17,9 %).

En la tabla 4 (en donde se encuentran los valores de las resistencias de las distintas series de probetas de ambos sistemas referidos al valor índice 100 kp/cm², adjudicado a las probetas confeccionadas con el cemento 1 sin escoria y sumergidas 56 días en agua potable filtrada) se confirma lo expuesto anteriormente y, además, que las resistencias de las series correspondientes a las mezclas cemento 1/escoria = 40/60 y 30/70, sumergidas en los dos medios, son superiores al valor índice.

3.3. Resistencia química. Método acelerado de Koch-Steinegger

Los coeficientes de corrosión (R_t/R'_t) son, en todos los casos, superiores al valor índice de Koch-Steinegger (0,70 para $t = 22 + 56$ días), figuras 9 y 10, y mayores que la unidad para las probetas de las mezclas de cemento 1/escoria = 30/70, a todas las edades (figura 10), y para todas las mezclas a la edad de $22 + 360$ días (figura 9), excepto para la de cemento 1/escoria = 85/15, ya que los valores de las resistencias a flexotracción de las probetas sumergidas en agua de mar artificial (R_t) son más altos que los de las probetas sumergidas en agua potable filtrada (R'_t).

TABLA 7

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

Mezcla: Cemento 1/Escoria	Edad, días			
	56	90	180	360
100/0	100	101,3	112,8	132,0
85/15	105,2	96,2	111,5	120,5
65/35	102,6	98,7	107,7	133,3
40/60	134,6	110,3	110,3	129,5
30/70	142,3	129,5	150,0	151,3

R_t/R'_t , Koch-Steinegger = 0,70 para $t = 22 + 56$ días < > 90 referido a 0,78 (valor experimental para $t = 22 + 56$ días).

En la tabla 7 se encuentran los valores de R_t/R'_t para las distintas edades y las diferentes mezclas referidas al valor correspondiente a las probetas de mortero hechas con cemento 1 sin adición de escoria para $t = 22 + 56$ días, al que se le ha asignado el valor 100. En dicha tabla se puede apreciar que los valores del coeficiente de corrosión Koch-Steinegger son superiores al mencionado valor 100 en todos los casos, excepto en dos que corresponden a las mezclas cemento 1/escoria = 85/15 y 65/35 para $t = 22 + 90$ días; estos valores llegan a ser hasta 51,3 % mayores en el caso de las probetas fabricadas con la mayor cantidad de escoria (70 %).

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

En la figura 9, en donde se ha representado la evolución de los coeficientes de corrosión a las distintas edades estudiadas en función de la mezcla utilizada, se puede apreciar que es posible distinguir dos zonas principales:

La primera, que comprende los coeficientes de corrosión de las mezclas cemento 1/escoria = 100/0 - 85/15 y 65/35 para $t = 22 + 56$ días y $22 + 90$ días y 100/0 - 85/15 - 65/35 y 40/60 para $t = 22 + 180$ días y $22 + 360$ días, presenta los siguientes valores medios: 0,80 - 0,77 - 0,86 y 1,01, respectivamente, con unos entornos comprendidos entre 0,78 - 0,82 el primero, 0,75 - 0,79 el segundo, 0,84 - 0,88 el tercero, y 0,94 - 1,04 el cuarto. No obstante, a cada edad, se ha puesto de manifiesto la existencia de un mínimo que depende de la mezcla cemento 1/escoria utilizada, como se ha probado en (4) (9).

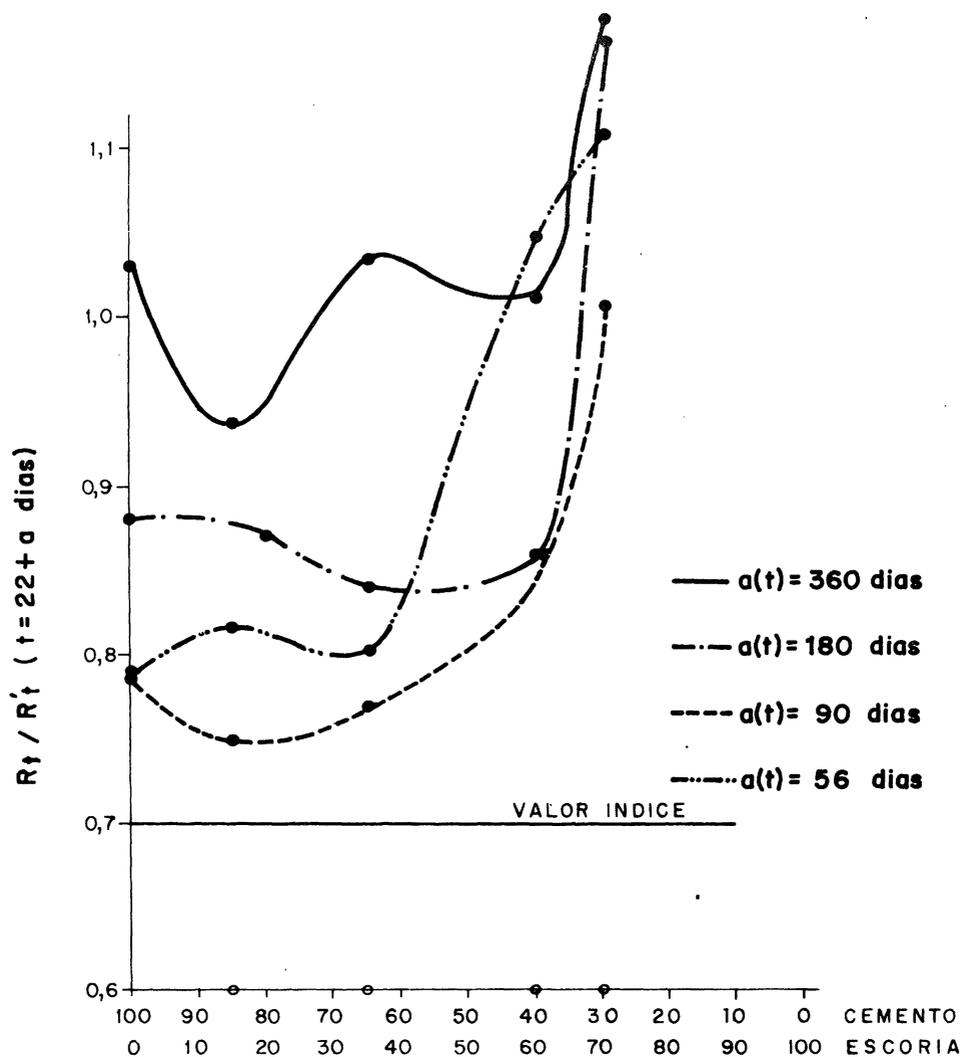


Fig. 9.—Evolución de los coeficientes de corrosión.

La segunda, que corresponde a la mezcla cemento 1/escoria = 30/70 para todas las edades en donde dicho coeficiente de corrosión está comprendido entre 1,01 y 1,18 y, además, 40/60 para $t = 22 + 56$ días y $22 + 90$ días, en cuyos casos los coeficientes medios y entornos son 1,08 (1,05 - 1,11) y 0,94 (0,86 - 1,01) respectivamente. Con la primera mezcla (30/70) se obtienen, para cada edad, los valores mayores.

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 con el tiempo (hasta 1 año), experimentando las siguientes modificaciones:

- Mezcla: cemento 1/escoria = 100/0 (en peso)

Los coeficientes de corrosión aumentan con el tiempo, pasando de 0,78 (22 + 56 días) a 1,03 (22 + 360 días), habiendo experimentado un incremento del 32 %.

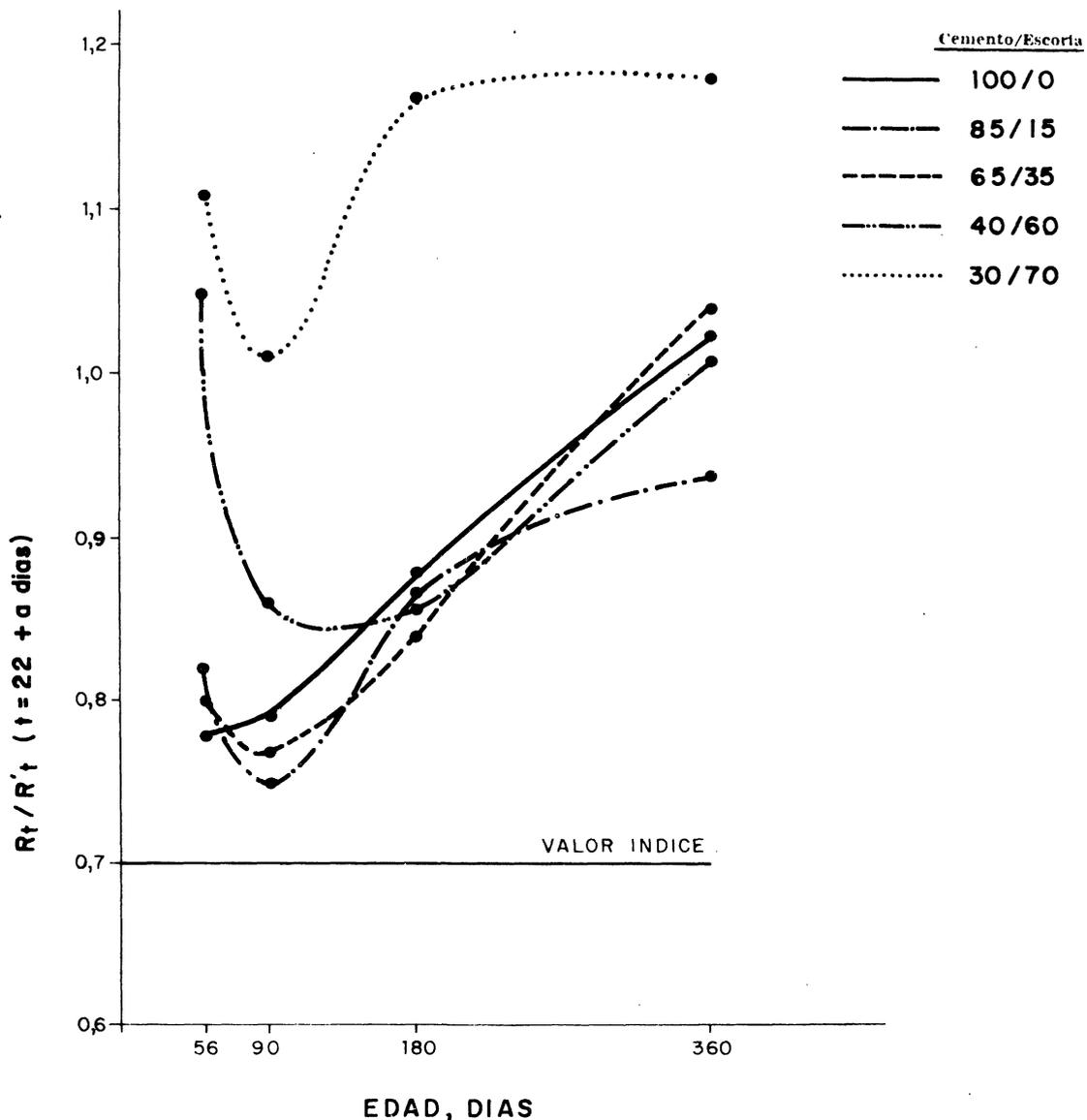


Fig. 10.—Evolución de los coeficientes de corrosión.

(a = 56 - 90 - 180 - 360 días)

- Mezcla: cemento 1/escoria = 85/15 (en peso)

En este caso, también, aumentan los coeficientes de corrosión con el tiempo, excepto para 22 + 90 días en donde se tiene el valor mínimo (0,75) de la serie y del conjunto (figura 10, tabla 7); dichos coeficientes pasan de 0,82 (22 + 56 días) a 0,94 (22 + 360 días).

- Mezcla: cemento 1/escoria = 65/35 (en peso)

Los coeficientes de corrosión pasan, como en la mezcla anterior, por un mínimo (0,77) a la misma edad, aumentando en las restantes; de 0,80 para 22 + 56 días llegan a ser 1,04 para 22 + 360 días.

- Mezcla: cemento 1/escoria = 40/60 (en peso)

Los coeficientes R_t/R'_t disminuyen a las edades 22 + 90 días (0,86) y 22 + 180 días (0,86),

siendo 1,05 para 22 + 56 días y 1,01 para 22 + 360 días.

- Mezcla: cemento 1/escoria = 30/70 (en peso)

En esta mezcla el coeficiente de corrosión a 22 + 56 días (1,11) disminuye a 22 + 90 días (1,01), incrementándose, a continuación, para las edades 22 + 180 días (1,17) y 22 + 360 días (1,18).

4. CONCLUSIONES

4.1. Sistema cemento 1/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 1/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, experimentan un incremento con relación a las de las probetas fabricadas sólo con dicho cemento 1, para cada edad, que depende del contenido de escoria de la mezcla utilizada y del tiempo de conservación.

Segunda

Los menores incrementos de las mencionadas resistencias mecánicas, para las primeras edades, corresponden a las probetas elaboradas con las mezclas ricas en escoria (70 %) y los mayores, para cada edad (excepto para 22 + 180 días), a las probetas hechas con la mezcla cemento 1/escoria = 40/60.

Tercera

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las diversas series de probetas fabricadas con una mezcla cemento 1/escoria son del mismo orden o menores, conforme aumenta el tiempo de conservación, que las de las series análogas conservadas durante 56 días, para los casos de utilizar mezclas pobres en escoria y del mismo orden o mayores cuando se utilizan cantidades altas, sobre todo para la edad de 22 + 360 días.

4.2. Sistema cemento 1/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 probetas hechas sólo con cemento 1; este incremento es función de la cantidad de escoria presente en la mezcla utilizada y del tiempo de conservación-ataque.

Quinta

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las distintas series de probetas fabricadas con una misma mezcla experimentan variaciones de signo contrario, a lo largo del tiempo de conservación-ataque, con relación a las de las series análogas sumergidas en agua de mar artificial durante 56 días.

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 %, de un modo especial 70 %, en peso).

Sexta

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las series de probetas hechas con cemento 1 y con las mezclas que tienen cantidades de escoria iguales o inferiores del 35 % sumergidas en agua de mar artificial son, por regla general, menores que las de las series análogas conservadas en agua potable filtrada; así mismo, son inferiores las correspondientes a las probetas elaboradas con la mezcla cemento 1/escoria = 40/60, excepto para 22 + 56 días y 22 + 360 días.

Por el contrario, las resistencias a flexotracción de las series de probetas confeccionadas con la mezcla que tiene la mayor cantidad de escoria (70 %) son, en todos los casos, 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 probetas fabricadas con la mezcla cemento 1/escoria = 30/70, a todas las edades.

Octava

El valor del coeficiente de corrosión (R_t/R'_t) de las distintas series de probetas, hechas con las mezclas cemento 1 y escoria, alcanza un valor mínimo a la edad de 22 + 90 días.

Los valores mayores de dicho coeficiente corresponden, para cada edad, a las probetas elaboradas con la mezcla que tiene la mayor cantidad de escoria (70 %) y, para todas las mezclas, excepto para el caso cemento 1/escoria = 40/60, a la edad de 22 + 360 días.

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) GASPARE-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L.: *Materiales de Construcción*, 168, 40-41, (1977).
- (4) SAGRERA-MORENO, J. L. y GASPARE-TEBAR, D.: *Materiales de Construcción*, 169, 29-48, (1978).
- (5) TAKASHIMA, S. and AMANO, F.: *Rev. of the Fourteenth Gen. Meet.*; Tokyo, may 1960, págs. 19-22.
- (6) ASTM D 1141-75: *Standard Specification for Substitute Ocean Water*; 1978 Annual Book of ASTM Standards; Part 31, págs. 909-911.
- (7) LEA, F. M.: *Research Paper N.º 30*, Build. Res. Station. London, 1960, pág. 5.
- (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.