

# Resistencia química del hormigón

XV.- Acción de una disolución saturada de yeso: influencia de la adición de escoria a un cemento portland de alta resistencia inicial. Evolución de las resistencias mecánicas a flexotracción y de los coeficientes de corrosión

JOSE LUIS SAGRERA-MORENO y DEMETRIO GASPAR-TEBAR - Drs. en Ciencias Químicas - IETCC

## RESUMEN

*En el presente trabajo, primero de otra nueva serie, se estudia la influencia que ejerce la adición de distintas cantidades de una escoria granulada molida a un cemento portland industrial de alta resistencia inicial (cemento 1 <> P-550-ARI) en su comportamiento químico-resistente frente a la acción de una disolución saturada de yeso, determinando la evolución de la resistencia química por el método de Koch-Steinegger, así como la de las resistencias mecánicas a flexotracción de probetas de mortero (1:3) de 1 × 1 × 6 cm, fabricadas con dicho cemento 1 y con las mezclas cemento 1/escoria = 85/15 - 65/35 - 40/60 y 30/70, en peso, sumergidas en agua potable filtrada unas series de 12 probetas y en una disolución saturada de yeso otras series análogas a las anteriores, durante 56-90-180 y 360 días, después de haberlas curado 24 horas en un recinto saturado de humedad a 20 ± 2°C y, a continuación, 21 días bajo agua potable filtrada. Se ha puesto de manifiesto la acción favorable que ejerce la adición de escoria [de un modo especial, de cantidades elevadas (> 60 %)] al cemento 1 estudiado.*

## SUMMARY

*In this work, the first of another new series, a study is made on the influence brought by adding different quantities of a groundgranulate slag to a high initial resistance industrial portland cement (cement 1 <> P-550-ARI) in its chemical-strength behaviour against the action of a gypsum saturated solution, determining the evolution of the chemical resistance using the Koch-Steinegger method, as well a tensile strengths of mortar test specimens (1:3) of 1 × 1 × 6 cm made with this cement 1 and with mixtures cement 1/slag = 85/15 - 65/35 - 40/60 and 30/70, in weight immersed in drinking water with some series of 12 test specimens filtered and other series that are analogue to the above, in a gypsum saturated solution, for 56-90-180 and 360 days, after curing them in a humidity saturated area at 20 ± 2°C, and later, 21 days under filtered drinking water. The favourable action exerted by adding slag has been evident, especially in high amounts (> 60 %) to cement 1 studied.*

## 1. INTRODUCCION

En otras publicaciones se estudió la influencia que ejerce la adición de escoria a un cemento portland industrial de alta resistencia inicial (cemento 1 <> P-550-ARI) cuando las probetas de mortero (1:3) fabricadas con dicho cemento 1 y con las mezclas cemento 1/escoria = 85/15, 65/35, 40/60 y 30/70, en peso, se someten a la acción del agua de mar artificial (ASTM D 1141-75), determinando:

- La evolución que experimenta la resistencia química por el método de Koch-Steinegger y las modificaciones de las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero (1:3) de 1 × 1 × 6 cm fabricadas con dicho cemento 1 y con las mezclas cemento 1/escoria reseñadas anteriormente, sumergidas en agua potable filtra-

- da (\*) unas series de 12 probetas, cada una, y en agua de mar artificial (\*\*), otras series análogas a las anteriores, durante 56 - 90 - 180 y 360 días, después de haberlas curado 24 horas en un recinto saturado de humedad a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  y hasta 22 días bajo agua potable filtrada (1).
- b) La variación de la concentración iónica de las disoluciones en donde han estado sumergidas las diversas series anteriores de probetas de mortero (agua potable filtrada y agua de mar artificial), de la que se dará cuenta en otra publicación.
  - c) Las características estructurales de las fases sólidas formadas en los medios de curado (agua potable filtrada) y de conservación (agua potable filtrada) (2) y de conservación-ataque (agua de mar artificial) (3).
  - d) 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/escoria-agua potable filtrada (2) y cemento 1/escoria-agua de mar artificial (3).

En el presente artículo, continuación de la serie iniciada en (1) y que se ampliará con otros, 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, objeto de las publicaciones (1) (2) (3), y con las mezclas de dicho cemento 1 con la escoria siderúrgica vítrea de (1) (2) (3) en las mismas proporciones (85/15 - 65/35 - 40/60 y 30/70, en peso), sumergidas en una disolución saturada de yeso (sistema: cemento 1/escoria-disolución saturada de yeso).

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

En este trabajo se estudia la influencia que ejerce la adición de distintas cantidades de una escoria granulada molida (1) (4) a un cemento portland industrial de fabricación española (P-550-ARI), designado como cemento 1 en las publicaciones (1) (2) (3) (4) (5), en su comportamiento químico-resistente frente a la acción de una disolución saturada de yeso 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 (6).

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 condiciones de (7). 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 saturada de yeso (sulfato de calcio dihidratado), unas series, y otras en agua potable filtrada (período de conservación) durante 56 - 90 - 180 y 360 días.

Este trabajo se complementará con otros, de los que se dará cuenta en publicaciones sucesivas.

### 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)

(\*) Sistema: cemento 1/escoria-agua potable filtrada.

(\*\*) Sistema: cemento 1/escoria-agua de mar artificial (ASTM).

(2) (3) (4) (5), que tiene la siguiente composición potencial calculada (Bogue):  $C_3S = 39,2 \%$ ,  $C_2S = 25,7 \%$ ,  $C_3A = 9,9 \%$  y  $C_4AF = 12,0 \%$ .

La escoria siderúrgica empleada, que procede de la industria española, se ha molido hasta conseguir una superficie específica (Blaine) de  $4.030 \text{ cm}^2/\text{g}$ ; tiene las características que se señalan en (1) (4).

#### b) *Arena empleada*

Para preparar las probetas de mortero se ha utilizado arena natural (Segovia), análoga a la empleada para preparar los morteros normalizados (RC-75), con un contenido de  $\text{SiO}_2$  superior a  $99 \%$ ; el tamaño de grano está comprendido entre 1 y 1,5 mm.

Las características fundamentales se recogen en (4).

#### c) *Disolución saturada de yeso, con una concentración de $\text{SO}_4$ (II) $\simeq 1,100 \text{ g/l}$*

La disolución saturada de yeso se ha preparado disolviendo yeso natural (con una riqueza de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  superior a  $98 \%$ , determinada por vía química y por DRX) en agua potable filtrada hasta saturación. Posteriormente, se ha determinado la concentración de ion sulfato (gravimétricamente, al estado de  $\text{BaSO}_4$ ); dicha concentración es  $1,099 \text{ g/l}$ .

#### 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 siguiente composición química (en g/l):

$\text{Ca (II)} = 0,005$ ;  $\text{Mg (II)} = 0,0016$ ;  $\text{SO}_4 \text{ (II)} = 0,003$ ;  $\text{Cl (I)} = 0,007$  y un  $\text{pH} = 7,4$ .

## 2.2. *Técnica operatoria*

#### a) *Preparación de las mezclas cemento 1/escoria*

Las mezclas cemento 1/escoria = 100/0 - 85/15 - 65/35 - 40/60 y 30/70, en peso, se han preparado como se señala en (1).

#### b) *Resistencia química. Método acelerado de Koch-Steinegger*

Se ha seguido la técnica de trabajo descrita en (6).

De las diversas series de probetas de mortero (1:3) de  $1 \times 1 \times 6 \text{ cm}$ , preparadas con  $a/c = 0,60$ , se han utilizado cinco series de 12 probetas cada una para el sistema cemento 1/escoria-agua potable filtrada y otras cinco para el sistema cemento 1/escoria-disolución saturada de yeso.

El volumen de agua potable filtrada en donde se han curado las probetas ha sido de  $500 \text{ ml/serie}$  y el correspondiente a los períodos de conservación y conservación-ataque, en donde han estado sumergidas cada una de las series durante 56 - 90 - 180 y 360 días en esta etapa, ha sido de  $800 \text{ ml/serie-edad}$ .

Los depósitos con el agua potable filtrada o con la disolución saturada de yeso y las series de probetas sumergidas hasta el momento de su rotura, así como los del agua potable filtrada 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 a flexotracción, que figuran en este trabajo, son la media de otros 12 valores concordantes correspondientes a las 12 probetas de cada serie.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSION

#### 3.1. Evolución de las resistencias mecánicas a flexotracción (\*)

En las figuras 1 a 4 se ha representado la evolución de las resistencias mecánicas, a flexotracción, para cada edad de curado (22 días) y de conservación o de conservación-ataque [56 - 90 - 180 y 360 días, por el momento (\*\*)] de las probetas de mortero en función de la mezcla cemento 1/escoria utilizada para fabricar dichas probetas.

En las figuras 5 y 6 se incluye la variación de las mencionadas resistencias a flexotracción de las probetas de mortero hechas con cada mezcla, en función del tiempo de curado (fijo) y de conservación o de conservación-ataque (variables), según el medio en donde han estado sumergidas hasta el momento de su rotura (agua potable filtrada o disolución saturada de yeso).

En las tablas 1 y 2 figuran los valores de las resistencias a flexotracción de las probetas de mortero de las distintas series sumergidas en agua potable filtrada y en la disolución saturada de yeso en la primera, y en la disolución saturada de yeso, en la segunda, referidos al valor índice (100,0 kp/cm<sup>2</sup>) asignado a la serie de probetas fabricadas con cemento 1 sin adición de escoria y sumergidas durante 56 días en agua potable filtrada (tabla 1) y en la disolución saturada de yeso (tabla 2).

TABLA 1

*Resistencias mecánicas a flexotracción. Valor índice = 100,0 kp/cm<sup>2</sup>, para t = 56 días; medio de conservación: agua potable filtrada y disolución saturada de yeso*

| Mezcla<br>cemento 1/escoria<br>(en peso) | Conservación          |       |       |       |                             |       |       |       |
|------------------------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-----------------------------|-------|-------|-------|
|                                          | Agua potable filtrada |       |       |       | Disolución saturada de yeso |       |       |       |
|                                          | Edad, días            |       |       |       | Edad, días                  |       |       |       |
|                                          | 56                    | 90    | 180   | 360   | 56                          | 90    | 180   | 360   |
| 100/0                                    | 100,0                 | 98,4  | 98,8  | 77,7  | 119,7                       | 110,0 | 124,4 | 118,3 |
| 85/15                                    | 113,2                 | 112,7 | 110,5 | 93,9  | 126,6                       | 120,3 | 128,4 | 113,3 |
| 65/35                                    | 127,7                 | 127,7 | 118,4 | 105,8 | 131,5                       | 140,0 | 137,0 | 139,1 |
| 40/60                                    | 126,0                 | 130,9 | 116,1 | 122,4 | 139,8                       | 138,7 | 139,4 | 148,9 |
| 30/70                                    | 111,2                 | 107,5 | 111,8 | 119,6 | 126,0                       | 126,7 | 136,2 | 138,2 |

TABLA 2

*Resistencias mecánicas a flexotracción. Valor índice = 100,0 kp/cm<sup>2</sup>, para t = 56 días; medio de conservación: disolución saturada de yeso*

| Mezcla<br>cemento 1/escoria<br>(en peso) | Edad, días |       |       |       |
|------------------------------------------|------------|-------|-------|-------|
|                                          | 56         | 90    | 180   | 360   |
| 100/0                                    | 100,0      | 91,9  | 103,9 | 98,9  |
| 85/15                                    | 105,8      | 100,5 | 107,3 | 94,7  |
| 65/35                                    | 108,9      | 116,1 | 114,5 | 116,2 |
| 40/60                                    | 116,9      | 115,9 | 116,5 | 124,3 |
| 30/70                                    | 105,3      | 105,8 | 113,8 | 115,5 |

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

(\*\*) A la vista de los resultados obtenidos se ha ampliado el estudio hasta 3 años, en una segunda etapa.

En la tabla 3 se encuentran los valores de las mencionadas resistencias referidos al valor índice (100,0 kp/cm<sup>2</sup>), asignado a cada una de las series de probetas hechas con la mezcla cemento 1/escoria = 100,0 sumergidas en agua potable filtrada o en la disolución saturada de yeso durante las cuatro edades estudiadas por el momento, 56 - 90 - 180 y 360 días.

TABLA 3

*Resistencias mecánicas a flexotracción. Valor índice = 100,0 kp/cm<sup>2</sup>, para t = 56, 90, 180 y 360 días; medio de conservación: agua potable filtrada y disolución saturada de yeso*

| Mezcla<br>cemento 1/escoria<br>(en peso) | Conservación          |       |       |       |                             |       |       |       |
|------------------------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-----------------------------|-------|-------|-------|
|                                          | Agua potable filtrada |       |       |       | Disolución saturada de yeso |       |       |       |
|                                          | 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                                    | 113,2                 | 114,6 | 111,8 | 120,8 | 105,8                       | 109,4 | 103,2 | 95,8  |
| 65/35                                    | 122,7                 | 129,9 | 119,8 | 136,2 | 109,9                       | 126,3 | 110,2 | 117,6 |
| 40/60                                    | 126,0                 | 133,1 | 117,6 | 157,5 | 116,8                       | 126,1 | 112,1 | 125,9 |
| 30/70                                    | 111,2                 | 109,3 | 113,2 | 153,8 | 105,3                       | 115,1 | 109,5 | 116,8 |

En la tabla 1 se aprecia que los valores de las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero elaboradas con las mezclas cemento 1/escoria = 85/15 (menos para la edad 22 + 360 días) - 65/35 - 40/60 y 30/70, conservadas en agua potable filtrada, son mayores, a todas las edades, que el valor índice (100,0 kp/cm<sup>2</sup>) y éste, a su vez, superior a los casos restantes. Los valores correspondientes a las diversas series de probetas de mortero sumergidas en la disolución saturada de yeso son mayores, en todos los casos, que el mencionado valor índice.

En la tabla 2 se observa que los valores de dichas resistencias, correspondiente a las probetas sumergidas en la disolución saturada de yeso, son mayores que el valor índice (100,0 kp/cm<sup>2</sup>, para t = 56 días), excepto para las series de probetas hechas con cemento 1/escoria 100/0, en peso, para las edades 22 + 90 y 22 + 360 días y 85/15 para 22 + 360 días, en peso.

Las resistencias de las diversas series de probetas de mortero, hechas con las mezclas cemento 1/escoria, a cada edad, son mayores que las de las series hechas con cemento 1 sin adición de escoria en todos los casos del sistema cemento 1/escoria-agua potable filtrada; así mismo, son mayores (excepto para la edad 22 + 360 días, las de la mezcla cemento 1/escoria = 85/15) en los diversos casos del sistema 1/escoria-disolución saturada de yeso.

Los valores máximos de dichas resistencias para cada edad, con relación a las de las probetas hechas con cemento 1 sin adición de escoria sumergidas en agua potable filtrada y en la disolución saturada de yeso (tablas 1 y 3), corresponden a las series de probetas de mortero fabricadas con cemento 1/escoria = 65/35 (para la edad 22 + 90 días) y 40/60 (para 22 + 56, 22 + 180 y 22 + 360 días).

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

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

ferentes mezclas cemento 1/escoria, sumergidas en agua potable filtrada  $R'$ , 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 en la mezcla utilizada (figuras 1 a 4, tablas 1 y 3) y del tiempo de conservación; sin embargo, las resistencias de las probetas elaboradas con una mezcla son del mismo orden o menores, conforme aumenta el tiempo de conservación, que las de las series análogas conservadas durante 56 días (figura 5 y tabla 1), 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 1)

Las resistencias a flexotracción de las probetas hechas con las mezclas cemento 1/escoria = 85/15 - 65/35 y 40/60, en peso, aumentan conforme lo hace el contenido de escoria, experimentando 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  $\text{kp/cm}^2$ , son 11,2 % superiores que estas últimas y ligeramente inferiores a las de la mezcla cemento 1/escoria = 85/15, en peso.

- Edad: 22 + 90 días (figura 2)

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  $\text{kp/cm}^2$ ) 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).

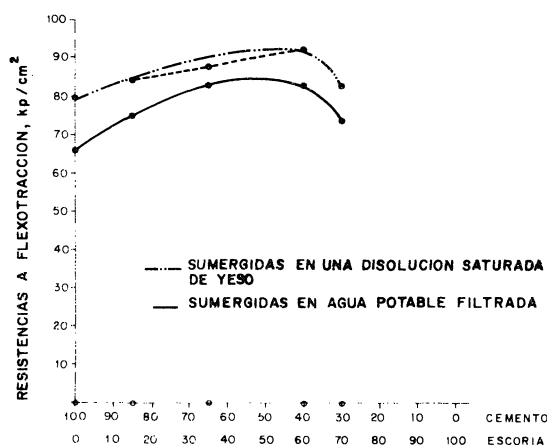


Fig. 1.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

Edad: (22 + 56 días).

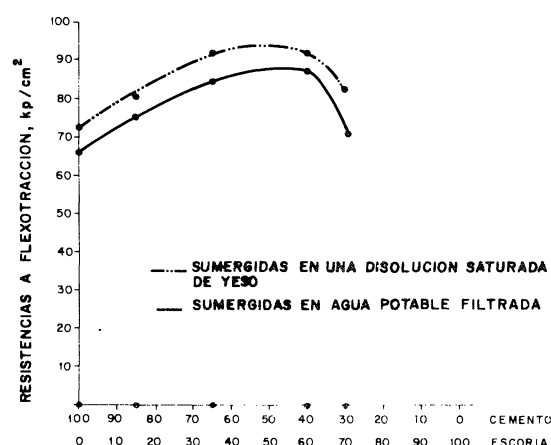


Fig. 2.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

Edad: (22 + 90 días).

- Edad: 22 + 180 días (figura 3)

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

- Edad: 22 + 360 días (figura 4)

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 adición de 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).

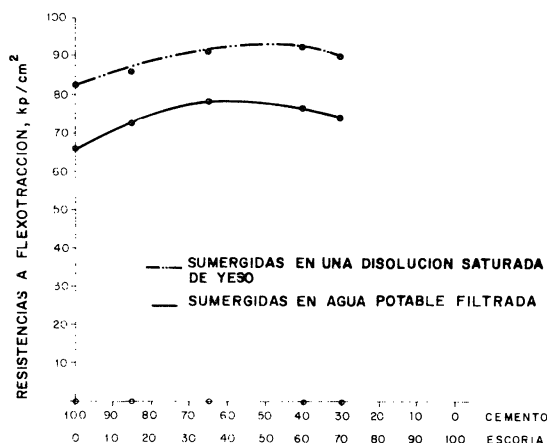


Fig. 3.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

Edad: (22 + 180 días).

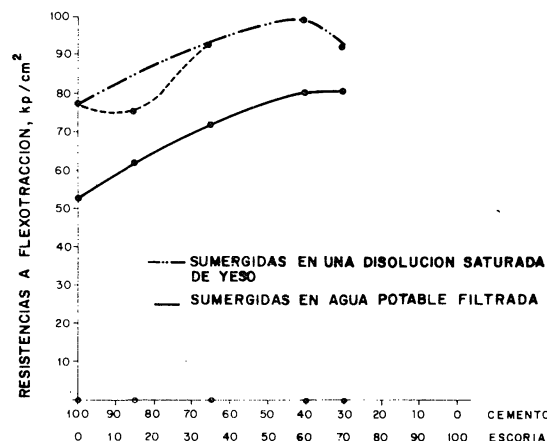


Fig. 4.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

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 100,0 kp/cm<sup>2</sup> (para 22 + 56 días), tabla 1.

Experimentan para cada mezcla, figura 5, 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/cm<sup>2</sup>) 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/cm<sup>2</sup>).

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

Los valores de estas series son superiores, para cada edad, a los de las series anteriores; 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 5); es decir, en las tres primeras edades los valores experimentan ligeras modificaciones (73,9 a 75,7 kp/cm<sup>2</sup>); por el contrario a 22 + 360 días se obtienen los valores menores (62,8 kp/cm<sup>2</sup>), 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 estas series de probetas aumentan hasta la edad de 22 + 90 días, pasando de 82,1 kp/cm<sup>2</sup> (a 22 + 56 días) a 85,4 kp/cm<sup>2</sup>; a continuación, disminuyen dando 79,2 kp/cm<sup>2</sup>, a 22 + 180 días, y 70,8 kp/cm<sup>2</sup>, a 22 + 360 días.

Los valores de cada edad son superiores a los correspondientes de las series anteriores (figura 5).

- 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/cm<sup>2</sup>, 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/cm<sup>2</sup>) experimentan un descenso del 7,8 %, así como a 22 + 360 días (81,9 kp/cm<sup>2</sup>) que es 2,9 %, con relación a los valores de la primera edad.

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

Las resistencias de las probetas hechas con esta mezcla presentan una evolución normal, incrementándose suavemente con el tiempo, excepto para 22 + 90 días en donde experimentan una ligera disminución de 3,4 % con relación a la primera edad, de tal modo que pasan de 74,4 kp/cm<sup>2</sup>, a 22 + 56 días, a 80,0 kp/cm<sup>2</sup> a 22 + 360 días.

#### b) Sistema: cemento 1/escoria-disolución saturada de yeso

Del mismo modo que en el sistema cemento 1/escoria-agua potable filtrada, las resistencias mecánicas a flexotracción de las diversas series de probetas de mortero, sumergidas en la disolución saturada de yeso ( $R_t$ ), experimentan un incremento para cada edad, con relación a las de las probetas hechas con cemento 1 sin adición de escoria, excepto para la mezcla cemento 1/escoria = 85/15 y para  $t = 22 + 360$  días, que es ligeramente inferior (tabla 3). Este incremento es función de la cantidad de escoria presente en la mezcla utilizada y del tiempo de conservación-ataque (figuras 1 a 4 y tablas 1 a 3). Las resistencias de las probetas fabricadas con una misma mezcla sufren variaciones de signo distinto, por regla general de pequeña magnitud, a lo largo del tiempo de conservación-ataque (figura 6).

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

- Edad: 22 + 56 días (figura 1)

Las resistencias mecánicas, a flexotracción, de las probetas de mortero hechas con las diversas mezclas cemento 1/escoria son mayores que las fabricadas con cemento 1, experimentando un incremento comprendido entre 5,3 %, para las probetas correspondientes a la mezcla 30/70, en peso, y 16,8 %, para las de la mezcla 40/60, en peso, (tabla 3).

A esta edad, las mencionadas resistencias siguen una evolución análoga a la de las probetas conservadas en agua potable filtrada.

- Edad: 22 + 90 días (figura 2)

Como en el caso anterior los valores de las resistencias de las probetas, sumergidas en la disolución saturada de yeso, siguen una evolución análoga a la de las probetas conservadas en agua potable filtrada. Las mencionadas resistencias de las diversas series de probetas de mortero hechas con las mezclas estudiadas de cemento 1 y escoria son mayores que las correspondientes a las probetas fabricadas con cemento 1 (tabla 3), experimentan-

do unos incrementos que se encuentran comprendidos entre 9,4 % para las probetas de la mezcla cemento 1/escoria = 85/15, en peso, y 26,3 % para las de la mezcla 65/35, en peso.

- Edad: 22 + 180 días (figura 3)

La evolución de las resistencias a flexotracción, a 22 + 180 días, de las series de probetas de mortero sumergidas en la disolución saturada de yeso es análoga, como en los casos anteriores, a la de las series sumergidas en agua potable filtrada. Dichas resistencias de las probetas hechas con las mezclas cemento 1 y escoria experimentan, con relación a las de las series de probetas hechas con cemento 1, un incremento comprendido entre 3,2 % (para la mezcla cemento 1/escoria = 85/15, en peso) y 12,1 % (para la mezcla 40/60, en peso).

- Edad: 22 + 360 días (figura 4)

A esta edad, las resistencias a flexotracción de las series de probetas hechas con la mezcla cemento 1/escoria = 85/15 experimentan un descenso del 4,2 %, con relación al valor correspondiente a las series fabricadas con cemento 1; sin embargo, las restantes series de probetas experimentan un incremento comprendido entre el 16,8 % para las probetas de la mezcla cemento 1/escoria = 30/70, en peso, y del 25,9 % para las de la mezcla 40/60, en peso (tabla 3).

— 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 diversas series de probetas de mortero, sumergidas en la disolución saturada de yeso, son superiores al valor índice (100,0 kp/cm<sup>2</sup>) asignado a las resistencias de las probetas hechas con cemento 1 sin adición de escoria, para  $t = 22 + 56$  días, excepto las de las probetas hechas sólo con dicho cemento 1, sumergidas durante 90 y 360 días, y con la mezcla cemento 1/escoria = 85/15 para la edad 22 + 360 días (tabla 2).

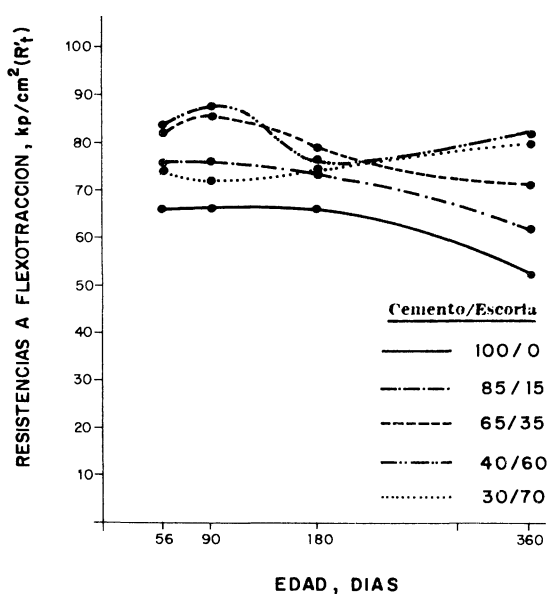


Fig. 5.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

Probetas sumergidas en agua potable filtrada.

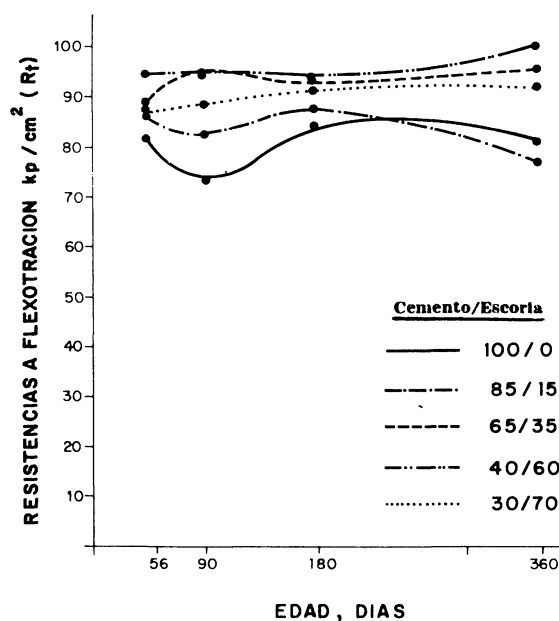


Fig. 6.—Evolución de las resistencias a flexotracción.

Probetas sumergidas en una disolución saturada de yeso.

En la figura 6 se puede apreciar la evolución de las resistencias mecánicas a flexotracción de las distintas series de probetas en función del tiempo (56 - 90 - 180 y 360 días, en que dichas series han estado sumergidas en la disolución saturada de yeso. Los valores máximos de dichas resistencias, a todas las edades, corresponden a las series hechas con la mezcla cemento 1/escoria = 40/60, en peso, seguida de las mezclas 65/35 y 30/70, en peso; los valores menores son los de las series de probetas de mortero fabricadas con cemento 1 sin adición de escoria para las tres primeras edades y para la cuarta (22 + 360 días) los correspondientes a las probetas elaboradas con el menor contenido de escoria (15 %). Dicha evolución es, para cada serie, la siguiente:

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

Las resistencias a flexotracción de las probetas de mortero correspondientes a la primera edad (22 + 56 días) y a las dos últimas (22 + 180 y 22 + 360 días) son del mismo orden; a 22 + 90 días experimentan un descenso que, con relación a las de 22 + 56 días, es del 8,1 %.

Los valores de las tres primeras edades de estas series son más bajos que los correspondientes a las restantes series de probetas hechas con las mezclas cemento 1/escoria; los de la cuarta edad, 22 + 360 días, son ligeramente superiores que los de las probetas de la mezcla que tiene el 15 % de escoria e inferiores a las restantes (figura 6 y tabla 2).

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

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero sumergidas en la disolución saturada de yeso durante 56 y 180 días son del mismo orden (84,7 y 85,9 kp/cm<sup>2</sup>) y superiores a las de las otras edades (80,5 kp/cm<sup>2</sup> para 90 días y 75,8 kp/cm<sup>2</sup> para 360 días), figura 6.

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

Las series de probetas sumergidas durante 90 y 360 días en la disolución saturada de yeso presentan resistencias a flexotracción (93 kp/cm<sup>2</sup> para ambas edades) mayores que las de las otras dos edades. El valor menor (88 kp/cm<sup>2</sup>) corresponde al menor período de tiempo (22 + 56 días).

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

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las series de probetas de mortero de esta mezcla sumergida durante 56 - 90 y 180 días, son del mismo orden (figura 6, tablas 1 y 2); las correspondientes a la cuarta edad experimentan un incremento del 6 %.

Los valores de las resistencias de estas series son superiores para 56 - 90 y 360 días, a los de las restantes series de probetas. Las resistencias a 180 días (92,8 kp/cm<sup>2</sup>) son del mismo orden que las de las probetas hechas con la mezcla que tiene 35 % de escoria (93,0 kp/cm<sup>2</sup>) y ambas superiores a las de las otras series.

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

Las resistencias mecánicas de las probetas correspondientes a las dos primeras edades son del mismo orden (84,3 y 84,7 kp/cm<sup>2</sup>); las de las dos últimas edades son superiores a las anteriores y, también, del mismo orden entre sí (91,1 y 92,4 kp/cm<sup>2</sup>).

#### c) *Estudio comparativo de ambos sistemas*

En las figuras 1 a 4 se ha representado la evolución de las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero de los sistemas cemento 1/escoria-agua potable fil-

trada y cemento 1/escoria-disolución saturada de yeso para cada una de las cuatro edades estudiadas hasta el momento.

Las resistencias de las distintas series de probetas de mortero hechas con cemento 1 y con las diversas mezclas cemento 1-escoria y para cada edad, sumergidas en la disolución saturada de yeso, son superiores a las de las series análogas conservadas en agua potable filtrada. La evolución de dichas resistencias a lo largo del tiempo es similar en ambos sistemas.

En dichas figuras se aprecia que, desde un punto de vista de las resistencias mecánicas a flexotracción, existe una mezcla óptima del sistema cemento 1/escoria-disolución saturada de yeso (cemento 1/escoria = 40/60, en peso) que proporciona las resistencias mayores de ambos sistemas a todas las edades (figs. 5 y 6); a 22 + 90 días los valores de las resistencias de las probetas de dicha mezcla (92,8 kp/cm<sup>2</sup>) son análogos a los correspondientes a la mezcla cemento 1/escoria = 65/35, en peso, a esta edad (93,0 kp/cm<sup>2</sup>).

En la tabla 1 donde se encuentran los valores de las resistencias de las distintas series de probetas, de ambos sistemas, referido al valor índice 100,0 kp/cm<sup>2</sup> (adjudicado a las probetas fabricadas con el cemento 1 sin escoria y sumergidas durante 56 días en agua potable filtrada después del período de curado) se confirma lo expuesto anteriormente y, además, que las resistencias a flexotracción de todas las series del sistema cemento 1/escoria-disolución saturada de yeso son superiores a dicho valor índice, así como las correspondientes a las probetas elaboradas con las mezclas cemento 1/escoria = 85/15 (para las tres primeras edades), 65/35, 40/60 y 30/70, en peso (para todas las edades) del sistema cemento 1/escoria-agua potable filtrada.

### 3.2. 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 7 y 8, y mayores que la unidad al ser las resistencias a flexotracción de las probetas sumergidas en la disolución saturada de yeso ( $R_t$ ) mayores que sus testigos, sumergidos en agua potable filtrada ( $R'_t$ ).

TABLA 4  
Coeficientes de corrosión Koch-Steinegger ( $R_t/R'_t$ ).  
Valor índice = 100,0 para  $t = 22 + 56$  días

| Mezcla<br>cemento 1/escoria<br>(en peso) | Edad, días |      |       |       |
|------------------------------------------|------------|------|-------|-------|
|                                          | 56         | 90   | 180   | 360   |
| 100/0                                    | 100,0      | 94,9 | 94,9  | 128,8 |
| 85/15                                    | 94,9       | 90,7 | 98,3  | 102,5 |
| 65/35                                    | 90,7       | 92,4 | 98,3  | 111,0 |
| 40/60                                    | 94,1       | 89,8 | 101,7 | 103,4 |
| 30/70                                    | 91,5       | 92,4 | 103,4 | 97,5  |

$R_t/R'_t$  (Koch-Steinegger) = 0,70 para  $t = 22 + 56$  días  $\langle \rangle$  59,3 referido a 1,18 (valor experimental para  $t = 22 + 56$  días).

En la tabla 4 se encuentran los valores de  $R_t/R'_t$ , para las distintas edades y las diferentes mezclas, referidos 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 100,0. En dicha tabla se puede apreciar que los valores del coeficiente de corrosión Koch-Steinegger son inferiores al mencionado valor 100,0 en los casos de las probetas hechas

con cemento 1/escoria = 100,0 para 22 + 90 y 22 + 180 días, 85/15 y 65/35 para las tres primeras edades, 40/60 y 30/70, en peso, para las dos primeras edades; en los casos restantes son superiores.

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

En la figura 7 puede apreciarse la influencia de la mezcla cemento 1/escoria utilizada en la fabricación de las probetas de mortero en el valor de los coeficientes de corrosión, para cada una de las edades estudiadas.

Los valores máximos de las distintas series de probetas corresponden a las edades 22 + 180 y 22 + 360 días, los cuales se encuentran comprendidos en el entorno 1,12-1,22 y 1,15-1,52 para dichas edades.

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

En la figura 8, en donde se ha representado la evolución de los coeficientes de corrosión de cada mezcla cemento 1/escoria con el tiempo (hasta 1 año), se aprecia que para la edad 22 + 90 días, con relación a la primera (22 + 56 días), aparece un mínimo en el caso de las probetas fabricadas con las mezclas cemento 1/escoria = 85/15 y 40/60, en peso, al que le corresponde los valores 1,07 y 1,06, respectivamente; así mismo, para la serie hecha con cemento 1 sin escoria el valor mínimo corresponde a las dos edades intermedias (22 + 90 y 22 + 180 días); 1,12 para ambas edades.

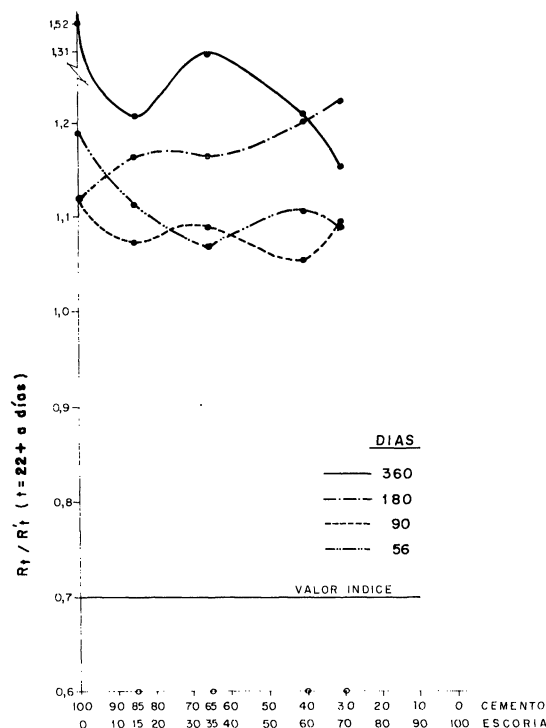


Fig. 7.—Evolución de los coeficientes de corrosión.

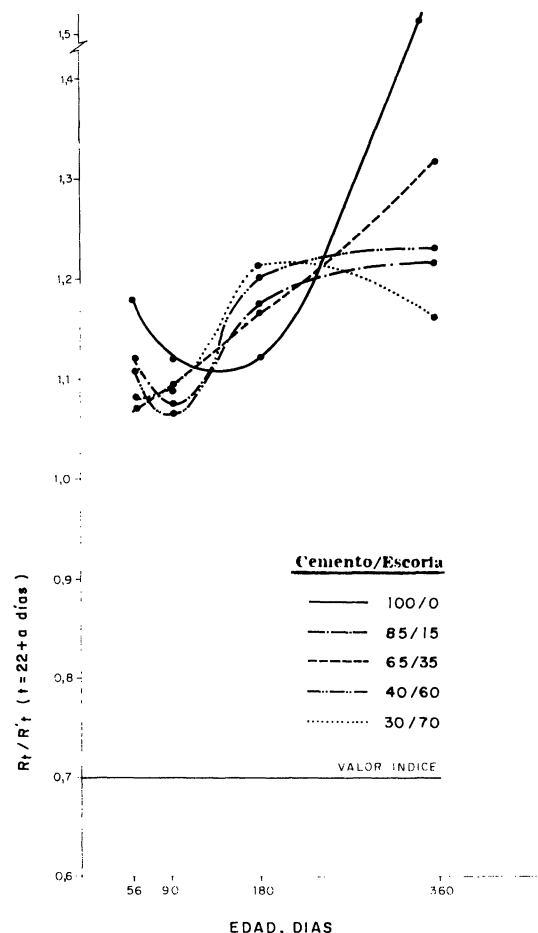


Fig. 8.—Evolución de los coeficientes de corrosión.

(a = 56 - 90 - 180 - 360 días).

## **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 = 85/15 - 65/35 - 40/60 y 30/70, en peso, sumergidas en agua potable filtrada durante el período de curado (21 días) y el de conservación (56 - 90 - 180 y 360 días) experimentan un incremento con relación a las de las probetas fabricadas con cemento 1, para cada edad, que depende del contenido de escoria de la mezcla utilizada y del tiempo de conservación.

#### **Segunda**

Los valores de las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero elaboradas con las mezclas cemento 1/escoria 85/15 (menos para  $t = 22 + 360$  días), 65/35, 40/60 y 30/70, en peso, son mayores, a todas las edades, que las de las probetas hechas con cemento 1 para  $t = 22 + 56$  días.

#### **Tercera**

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las diversas series de probetas fabricadas con cada una de las mezclas cemento 1/escoria estudiadas son del mismo orden o menores, conforme aumenta el tiempo de conservación, que las de las series análogas sumergidas durante 56 días en agua potable filtrada, para los casos de utilizar mezclas pobres en escoria y del mismo orden o mayores cuando se utilizan cantidades altas.

### **4.2. Sistema cemento 1/escoria-disolución saturada de yeso**

#### **Cuarta**

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las distintas series de probetas de mortero fabricadas con las mezclas cemento 1/escoria = 85/15, 65/35, 40/60 y 30/70, en peso, sumergidas en una disolución saturada de yeso durante 56 - 90 - 180 y 360 días experimentan, para cada una de las edades, un incremento con relación a las de las probetas hechas con cemento 1 sin adición de escoria (excepto para la serie correspondiente a la mezcla que tiene 15 % de escoria para  $t = 22 + 360$  días, el cual es ligeramente inferior), que 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 probetas de mortero fabricadas con una misma mezcla, a lo largo del tiempo de conservación-ataque, experimentan variaciones de signo distinto; estas resistencias son del mismo orden o menores para las mezclas pobres en escoria —o que no tienen— y del mismo orden o mayores para las mezclas ricas en escoria.

#### **Sexta**

En este trabajo se ha puesto de manifiesto que existe una mezcla óptima (cemento 1/escoria = 40/60, en peso), cuyas probetas sumergidas en la disolución saturada de yeso proporciona las resistencias mecánicas a flexotracción mayores, seguida de las correspondientes a las series de probetas fabricadas con las mezclas cemento 1/escoria = 65/35 y 30/70, en peso.

### **Séptima**

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las distintas series de probetas de mortero, fabricadas con cemento 1 y con las diversas mezclas cemento 1/escoria, y para cada edad, sumergidas en la disolución saturada de yeso son superiores a las de las series análogas conservadas en agua potable filtrada. La evolución de dichas resistencias, a lo largo del tiempo, es similar en ambos sistemas.

### **Octava**

Los coeficientes de corrosión Koch-Steinenger (resistencia química) son superiores al valor índice (0,70 para  $t = 22 + 56$  días) y mayores de la unidad, en todos los casos. Dichos coeficientes dependen de la mezcla cemento 1/escoria utilizada en la fabricación de las probetas de mortero y del tiempo de conservación.

En determinados casos y a edades superiores a  $t = 22 + 56$  días se obtienen valores menores que los correspondientes a dicha edad.

## **5. BIBLIOGRAFIA**

- (1) SAGRERA-MORENO, J. L. y GASPAR-TEBAR, D.: *Materiales de Construcción*, 178, 17-38, (1980).
- (2) GASPAR-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L.: *Materiales de Construcción*, 181, 33-44, (1981).
- (3) GASPAR-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L.: *Materiales de Construcción* (próxima aparición n.º 186).
- (4) GASPAR-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L.: *Materiales de Construcción*, 174, 43-70, (1979).
- (5) GASPAR-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L.: *Materiales de Construcción*, 176, 49-79, (1979).
- (6) GASPAR-TEBAR, D. y SAGRERA-MORENO, J. L.: *Materiales de Construcción*, 168, 33-60, (1977).
- (7) SAGRERA-MORENO, J. L. y GASPAR-TEBAR, D.: *Materiales de Construcción*, 169, 29-48, (1978).

## **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.