

Resistencia química del hormigón

III.-Acción del agua de mar. Influencia de la adición de escoria al cemento portland (1.ª parte)

DEMETRIO GASPAR-TEBAR y JOSE LUIS SAGRERA-MORENO
IETec

1. INTRODUCCION

En publicaciones anteriores (1) (2) se dio cuenta de los trabajos efectuados para estudiar el comportamiento de dos cementos portland industriales, en la primera, y la influencia que ejerce la adición de diversas cantidades de una escoria vítrea a un cemento portland ambos de fabricación española, en la segunda, cuando los morteros (1:3) fabricados con dichos cementos o con las mezclas cemento/escoria se someten a la acción del agua de mar, determinando la evolución de las resistencias mecánicas a flexotracción, la variación de los coeficientes de corrosión (Koch-Steinegger), la modificación de la concentración iónica de los medios en donde han estado sumergidas las probetas, así como la composición estructural de la fase sólida formada y de la fracción enriquecida del conglomerante hidratado.

Con el fin de contribuir al conocimiento de la resistencia química de los cementos siderúrgicos frente al agua de mar se estudia en este trabajo, que se ampliará con otros, la influencia de la adición de una escoria vítrea (30 y 70 %, en peso) a dos cementos portland españoles, P-550-ARI y P-450-Y, de características distintas, determinando las variables que se citan en el apartado siguiente.

2. PARTE EXPERIMENTAL

En el presente trabajo se estudia la influencia que ejerce la adición de una escoria granulada molida a dos cementos portland industriales, de fabricación española, en el comportamiento químico-resistente frente a la acción del agua de mar (*). Para ello, se ha determinado:

- a) La evolución de las resistencias mecánicas, a flexotracción, de probetas de mortero 1:3 (1 × 1 × 6 cm) fabricadas con ambos cementos y con las mezclas cemento/escoria = 70/30 y 30/70 (en peso), sumergidas en agua potable filtrada hasta 22 días (período de curado) y, a continuación, en agua de mar, unas series de probetas, y en agua potable filtrada, otras series, durante 56 y 90 días (período de conservación).

(*) Tomada en el Mediterráneo, zona sureste

- b) La resistencia química por el método de Koch-Steinegger (3).
- c) La variación de la concentración iónica en el agua potable filtrada y en el agua de mar en donde han estado sumergidas las probetas de mortero.
- d) La composición estructural de las fases sólidas formadas en los medios de curado y de conservación, así como de la fracción enriquecida (pasta del cemento hidratado) de las probetas de mortero.

Las probetas de mortero se han fabricado con dos cementos portland comerciales de distintas características (P-550-ARI y P-450-Y) y con las mezclas cemento/escoria granulada molida 70/30 y 30/70 (en peso), de acuerdo con las conclusiones obtenidas en (2).

2.1. Materiales utilizados y características

a) *Cementos y escoria*

Los materiales utilizados han sido dos cementos portland, que se han designado cemento 1 y cemento 2, y una escoria siderúrgica vítrea, procedentes de la industria española que responden a las características, determinadas de acuerdo con las técnicas de trabajo descritas en el Pliego RC-75 (4), que se incluyen en las tablas 1 y 2.

Los valores correspondientes a la composición química, en % en peso, referidos a la muestra seca a 105-110°C, se han expresado como óxidos, excepto la pérdida por calcinación, el contenido de Mn (II) y el residuo insoluble en ácido clorhídrico.

En la figura 1 se encuentran los DRX de ambos cementos y en la figura 2 los de los residuos procedentes del ataque de los cementos con ácido salicílico-metanol (5) (6).

b) *Agua de mar*

Como medio potencialmente agresivo se ha utilizado agua del mar Mediterráneo, tomada en la zona sureste de nuestro litoral. Los contenidos de Ca (II), Mg (II), SO₄ (II) y Cl (I) son 482, 1.402, 2.808 y 20.840 mg/l, respectivamente; el valor del pH es 7,7.

c) *Agua potable*

Como medio de curado y de conservación-testigo se ha empleado agua potable (canal de Isabel II) una vez que ha pasado a través de un filtro cerámico. Tiene 5 mg/l de Ca (II), 1,6 mg/l de Mg (II), 3 mg/l de SO₄ (II) y 7 mg/l de Cl (I); el valor del pH es 7,4.

2.2. Técnica operatoria

a) *Preparación de las mezclas cemento/escoria*

La escoria granulada se ha molido hasta conseguir una superficie específica (Blaine) de 4.030 cm²/g; las superficies correspondientes a los cementos 1 y 2 son 5.313 y 3.553 cm²/g, respectivamente.

TABLA 1

Composición química de los cementos y de la escoria

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

Determinaciones	Cemento		Escoria
	1	2	
Pérdida por calcinación, P.F.	0,4	1,1	0,4
Residuo insoluble, R.I.	3,1	0,2	0,0
Dióxido de silicio, SiO ₂	19,3	22,0	35,2
Oxido de hierro (III), Fe ₂ O ₃	3,9	4,1	0,7
Oxido de aluminio, Al ₂ O ₃	6,2	1,8	17,0
Oxido de calcio, CaO	61,1	67,9	37,3
Oxido de magnesio, MgO	1,5	0,5	6,3
Trióxido de azufre, SO ₃	4,1	2,3	0,0
Manganeso (II), Mn (II)	n. d.	n. d.	0,8
Suma	99,6	99,9	97,7
Oxido de calcio libre, CaO libre	1,0	1,8	n. d.
COMPOSICION POTENCIAL CALCULADA (BOGUE)			
Compuestos	Cemento		
	1	2	
Silicato tricálcico, C ₃ S	39,2	75,6	
Silicato bicálcico, C ₂ S	25,7	6,1	
Aluminato tricálcico, C ₃ A	9,9	0,0	
Ferrito aluminato tetracálcico, C ₄ AF	12,0	10,8	
Sulfato de calcio, CaSO ₄	6,9	3,9	

n. d. = no determinado.

TABLA 2

Características físicas y mecánicas

Determinaciones	Cemento 1	Cemento 2
Superficie específica (Blaine), cm ² /g	5.313	3 553
Peso específico, g/cm ³	3,11	3,12
Expansión en autoclave, %	0,03	0,02
Resistencias mecánicas, kp/cm ²		
Flexotracción:		
2 días	59	36
3 días	63	52
7 días	70	73
28 días	80	83
Compresión:		
2 días	331	203
3 días	408	285
7 días	499	473
28 días	566	542

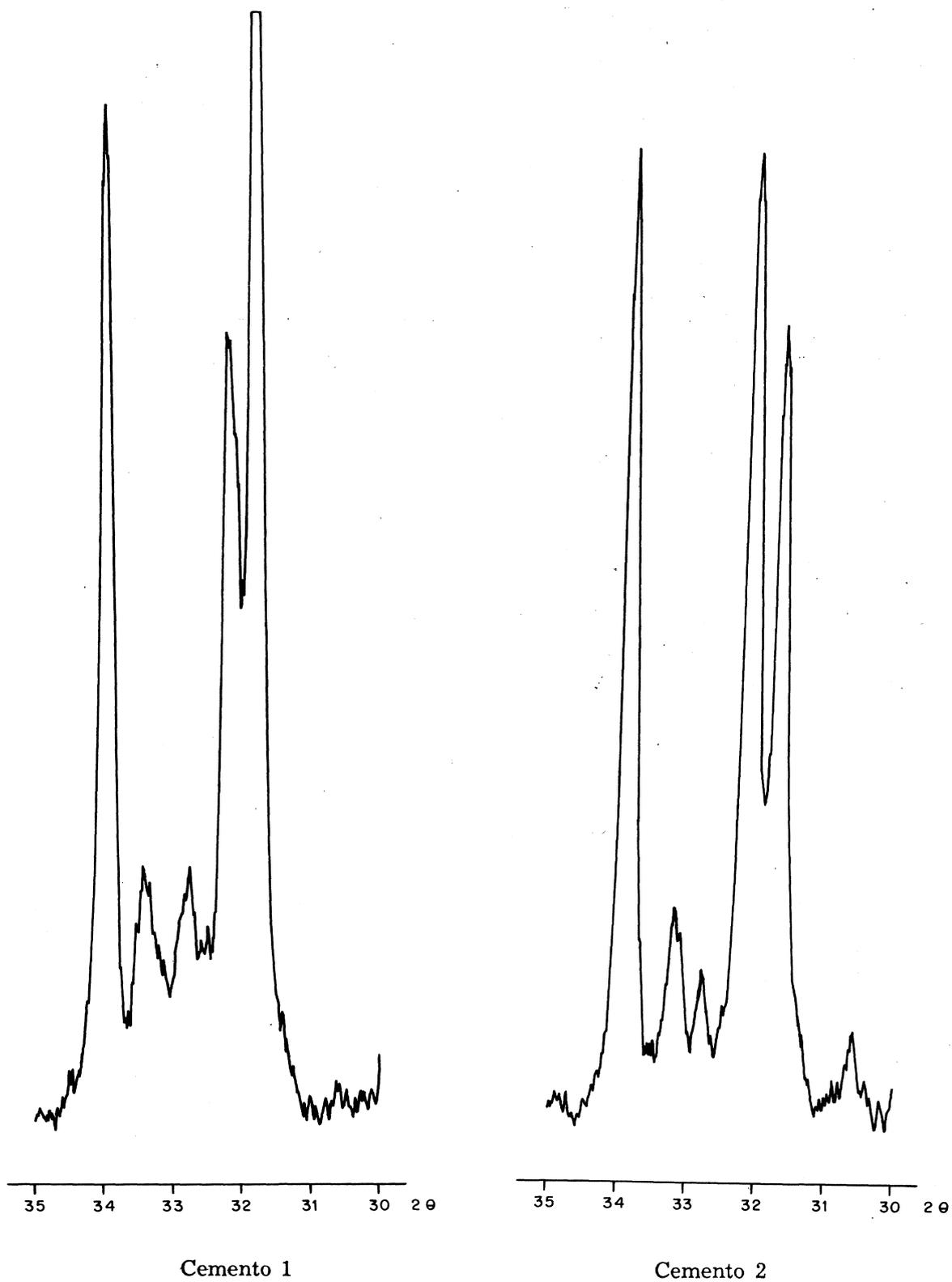


Fig. 1.—DRX de los cementos anhidros.

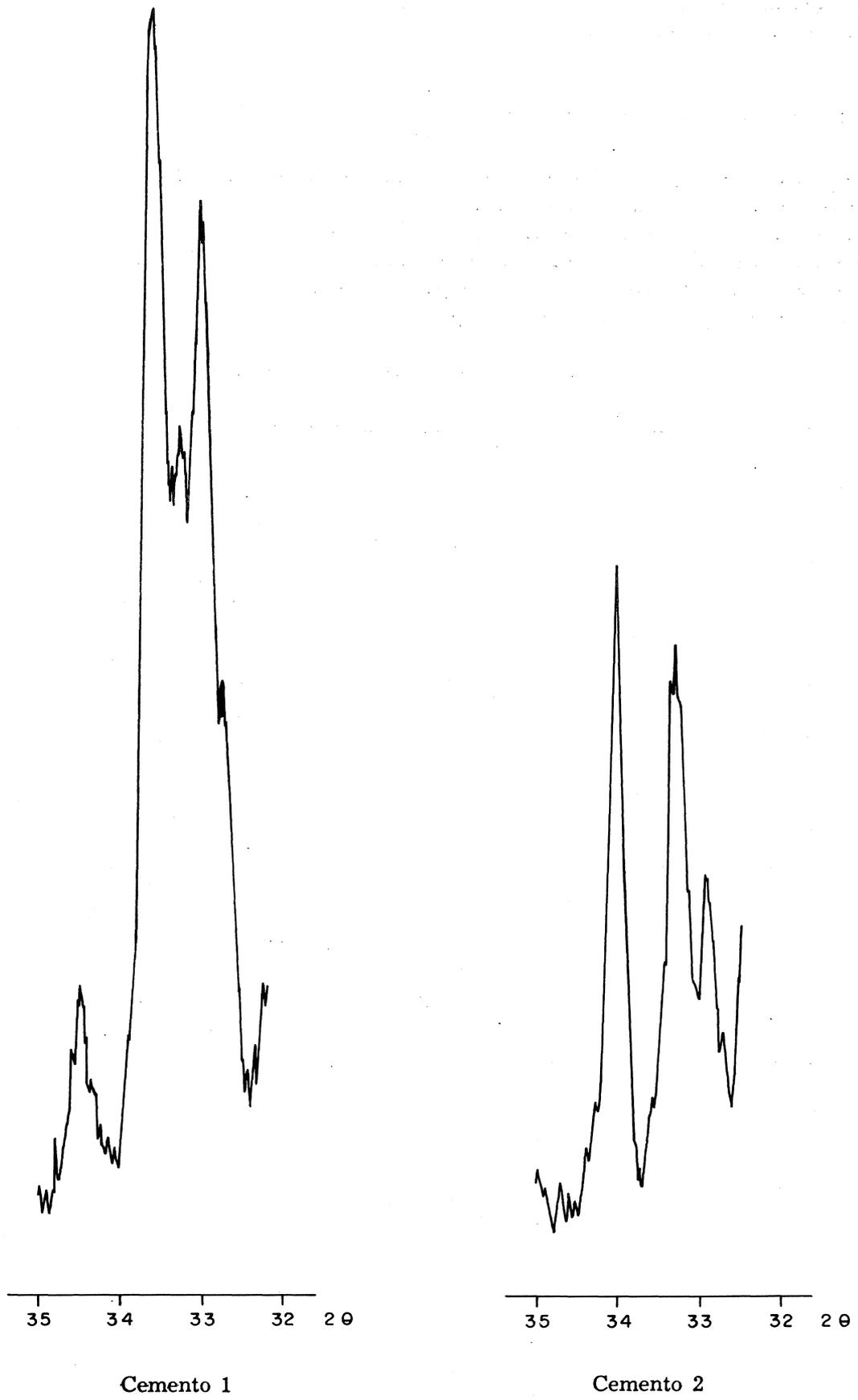


Fig. 2.—DRX del residuo de los cementos anhidros atacados con ácido salicílico-metanol.

Con cada uno de los cementos y con la escoria granulada molida se han preparado las siguientes mezclas binarias, en peso (e.p.), cemento escoria = 100/0, 70/30 y 30/70.

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

Se ha seguido la técnica de trabajo descrita en (3). Se han preparado cuatro series de probetas de mortero, por cemento y mezcla, de $1 \times 6 \times 6$ cm con relaciones cemento/arena = 1/3 y $a/c = 0,60$. 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 y el correspondiente al del agua potable filtrada y al del agua de mar, en donde se han sumergido las probetas de las distintas series, ha sido de 800 ml.

Los depósitos con el agua de mar o el agua potable filtrada y las series de probetas sumergidas hasta el momento de su rotura, 56 y 90 días, así como los del agua potable filtrada en donde se han curado las mencionadas probetas hasta 22 días, se han mantenido cerrados herméticamente en un laboratorio, a $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

c) *Determinación de las características de los cementos y de la escoria*

Las características químicas y fisicomecánicas de los cementos y de la escoria se han determinado de acuerdo con las técnicas de trabajo descritas en el Pliego RC-75 (4).

La composición estructural de la escoria, de los cementos anhidros y de los compuestos hidratados de las diversas mezclas cemento/escoria estudiadas se ha efectuado por DRX, según se indica en el apartado e) de este punto 2.2.

d) *Determinación del contenido de iones en los medios de curado y de conservación, en las fases sólidas y en las fracciones enriquecidas*

El contenido de los iones Ca (II), Mg (II), SO_4 (II) y Cl (I) en los medios de curado y de conservación de las distintas series de probetas, agua potable filtrada y agua de mar, se ha realizado complexométricamente con EDTA, los dos primeros, gravimétricamente, el tercero y volumétricamente por el método de Mohr, el cuarto. En las fases sólidas y en las fracciones enriquecidas se ha determinado, por técnicas análogas, una vez puestas en disolución por ataque con HCl, diluido.

e) *Estudio por difracción de rayos X*

El estudio de los cementos anhidros, de la fracción enriquecida correspondiente a los morteros de las probetas sumergidas en agua potable filtrada y en agua de mar (pasta de cemento hidratado) y de las fases sólidas formadas se ha hecho por difracción de rayos X, utilizando un equipo Philips PW-1010, con una unidad de registro PW-1540, trabajando en las siguientes condiciones:

Anodo de cobre a 50 kV; mA = 20; filtro de níquel; velocidad de registro = $2^\circ/\text{min}$; velocidad de la carta = 40; desmultiplicador = 8; constante de tiempo = 2; multiplicador = 1; discriminación: canal = 12 V, amplitud = 18 V, atenuación = 4; detector proporcional a 1.480 V.

Preparación de la fase sólida

La fase sólida formada en los medios en donde han estado sumergidas las probetas durante el tiempo correspondiente al período de curado, 21 días, y al de conservación, 56 y 90 días, se ha separado por filtración, se ha secado con una corriente de nitrógeno y se ha pesado. A continuación se han determinado por difracción de rayos X los compuestos cristalinos que existen.

Esta fase sólida se encuentra impurificada por pequeñas fracciones desprendidas de las probetas de mortero.

Preparación de la fracción enriquecida

De uno de los prismas de mortero de las distintas series fabricadas con cada una de las mezclas señaladas en el apartado a) de este punto 2.2., sumergidas durante 56 y 90 días en agua potable filtrada y en agua de mar, se ha separado, una vez desecado a la temperatura ambiente en un recinto aislado de la atmósfera, por disgregación mecánica y con ayuda de un tamiz de 4.900 mallas/cm² (88 μ de distancia entre hilos) la casi totalidad de la fracción correspondiente a la arena. El residuo, fracción enriquecida, está formado por la pasta de cemento hidratado, en gran parte, y por una pequeña cantidad de arena.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Características de los cementos estudiados

La composición química y potencial calculada (Bogue) de los dos cementos, así como las características físicas y mecánicas se encuentran en las tablas 1 y 2.

Los diagramas de difracción de rayos X de dichos cementos y de los residuos de los mismos, una vez tratados con ácido salicílico-metanol, se incluyen en las figuras 1 y 2.

El cemento 1, de altas resistencias iniciales, tiene un contenido calculado (Bogue) de $C_3A = 9,9\%$ y de $C_4AF = 12,0\%$, mientras que el de C_3A del cemento 2 es nulo y el de C_4AF 10,8 %. Los valores correspondientes de $C_3S + C_2S$ son 64,9 %, cemento 1, y 81,7 %, cemento 2.

Las fases cristalinas correspondientes a los aluminatos de ambos cementos son diferentes como puede apreciarse en los DRX de los cementos anhidros, figura 1, y en los de los residuos del ataque de los mencionados cementos con ácido salicílico-metanol, figura 2.

La intensidad del pico del C_3A , a $2\theta = 33,15^\circ$, del DRX del cemento 1, con relación a la del mismo pico del cemento 2, es mucho mayor; del mismo modo la intensidad del pico del C_4AF que aparece a $2\theta = 33,8^\circ$ (34° teóricos) es superior en el DRX del cemento 1. En el DRX del cemento 2 (figura 2) aparece claramente diferenciado un pico a $2\theta = 32,9^\circ$, hecho que no sucede en el DRX del cemento 1 y, en éste, otro a $2\theta = 33,5^\circ$ que no se ha puesto de manifiesto en el DRX del cemento 2.

Dadas las características químicas y estructurales de los cementos estudiados, el cemento 2 limita la formación de ettringita (DRX a 56 y 90 días, figuras 12 y 13), libera más portlandita y presenta menores resistencias mecánicas, sobre todo a las primeras edades.

Ambos cementos, de acuerdo con el Pliego RC-75, se pueden clasificar como P-550-ARI, el primero, y como P-450-Y, el segundo.

3.2. Características de la escoria granulada

La composición química de la escoria granulada y el diagrama de difracción de rayos X se encuentran en la tabla 1 y en la figura 3. La superficie específica (Blaine) de la escoria molida es 4.030 cm²/g. Se trata de una escoria siderúrgica vítrea que cumple la condición

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} > 1$$

(su valor es 1,7) especificada en el Pliego RC-75 para poder utilizarla en la fabricación de cementos siderúrgicos.

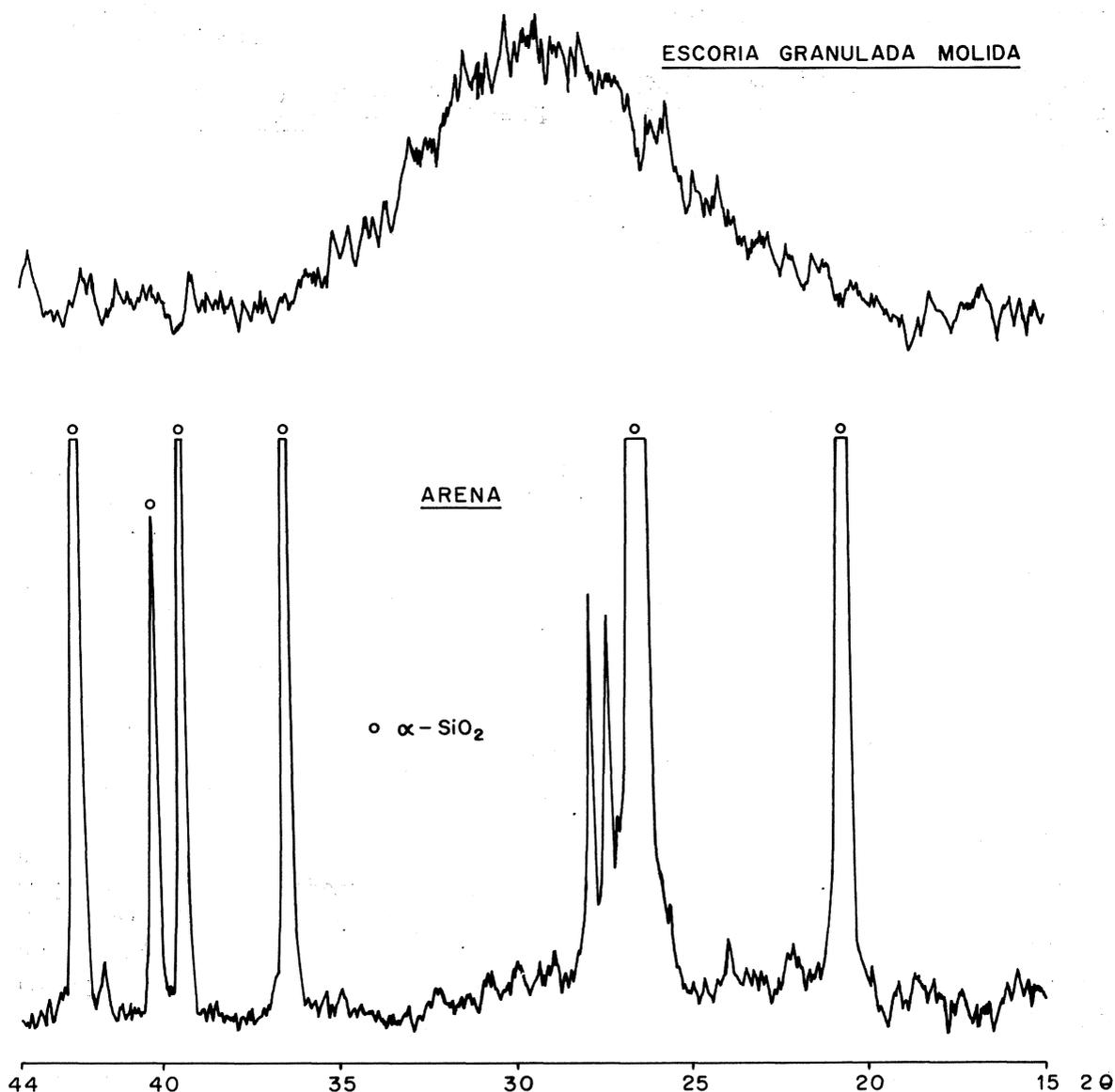


Fig. 3.—DRX de la escoria granulada y de la arena.

3.3. Arena utilizada para la preparación de los morteros

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.

El diagrama de difracción de rayos X se encuentra en la figura 3; los picos identificados corresponden a α-SiO₂.

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

En las tablas 3 y 4 se incluyen los valores de las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero correspondientes a las distintas series, medias de 12 valores concordantes, conservadas durante 24 ± 1 horas en un depósito a 20 ± 2°C, con una humedad relativa superior a 95 %, y hasta 22 días bajo agua potable filtrada. A continuación una serie de cada mezcla se ha sumergido en agua potable filtrada y otra serie en agua de mar durante 56 días; la misma operación se ha efectuado con otras series para la edad de 90 días.

En la tabla 3 se encuentran los valores de los sistemas cemento 1/escoria-agua potable filtrada y cemento 1/escoria-agua de mar y en la tabla 4 los de los sistemas cemento 2/escoria-agua potable filtrada y cemento 2/escoria-agua de mar.

TABLA 3

Sistemas: cemento 1/escoria-agua potable filtrada y cemento 1/escoria-agua de mar
Resistencias mecánicas a flexotracción (kp/cm²) y coeficiente de corrosión (R_t/R'_t)

Cemento/escoria	Agua potable, R' _t		Agua de mar, R _t		R _t /R' _t	
	56 días	90 días	56 días	90 días	56 días	90 días
100/0	66,9	65,8	54,1	50,2	0,81	0,76
70/30	77,4	75,2	63,1	60,4	0,81	0,80
30/70	74,4	71,9	83,9	78,5	1,13	1,09

TABLA 4

Sistemas: cemento 2/escoria-agua potable filtrada y cemento 2/escoria-agua de mar
Resistencias mecánicas a flexotracción (kp/cm²) y coeficiente de corrosión (R_t/R'_t)

Cemento/escoria	Agua potable, R' _t		Agua de mar, R _t		R _t /R' _t	
	56 días	90 días	56 días	90 días	56 días	90 días
100/0	62,1	60,8	51,1	48,2	0,82	0,79
70/30	71,0	74,1	63,0	63,6	0,88	0,86
30/70	73,5	75,5	75,2	68,5	1,02	0,91

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

Sistemas: cemento/escoria-agua potable filtrada

Los sistemas relacionados con el cemento 1 proporcionan, de acuerdo con su composición, resistencias mecánicas a flexotracción mayores, a la edad de 56 días, que las del cemento 2; del mismo modo, las resistencias de las probetas fabricadas con las mezclas cemento 1/escoria = 100/0 y 70/30, a la edad de 90 días, son más altas que las de las probetas hechas con las mismas mezclas del cemento 2. Por el contrario, los valores de las resistencias de las probetas elaboradas con las mezclas cemento/escoria = 30/70, con la menor cantidad de la fracción clínker, son análogos para ambos cementos a la edad de 56 días y mayores las del cemento, 2 a 90 días, que los del cemento 1. Las resistencias a flexotracción del sistema cemento 1/escoria-agua potable filtrada son mayores en las probetas hechas con las mezclas cemento/escoria, 70/30 y 30/70 (15,7 % y 11,2 %, a 56 días; 14,3 % y 9,3 %, a 90 días) que las hechas con cemento sin adición de escoria, así como las del sistema cemento 2/escoria-agua potable filtrada, experimentando, en este caso, un incremento de 14,3 % y 18,4 %, a 56 días, y de 21,9 % y 24,2 %, a 90 días. Por el contrario, en el primer sistema, las resistencias a flexotracción experimentan una ligera disminución al pasar de 56 a 90 días y en el segundo sistema únicamente en las probetas hechas con cemento sin adición de escoria.

La adición de la escoria a los dos cementos considerados en este trabajo, ejerce una influencia favorable en las dos edades estudiadas, proporcionando resistencias mecánicas a flexotracción mayores que las de las probetas confeccionadas con dichos cementos sin adición de escoria.

Sistemas: cemento/escoria-agua de mar

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de los sistemas cemento/escoria-agua de mar aumentan conforme lo hace la cantidad de escoria en la mezcla. Los valores superiores corresponden a las probetas fabricadas con las mezclas cemento/escoria = 30/70, experimentando un incremento, con relación a las resistencias de las probetas hechas con cemento solo, de 55,1 % (56 días) y 56,4 % (90 días) para el primer sistema y de 47,2 % (56 días) y 42,1 % (90 días) para el sistema cemento 2/escoria-agua de mar.

Las probetas de mortero fabricadas con las mezclas cemento/escoria = 100/0 y 70/30, sumergidas en agua de mar, presentan resistencias mecánicas a flexotracción menores que las probetas sumergidas en agua potable filtrada. La disminución de dichas resistencias para las probetas de ambas mezclas, con relación a las de las probetas sumergidas en agua potable filtrada, es 18,1 y 18,5 %, a 56 días, 23,7 y 19,7 %, a 90 días, para el sistema cemento 1/escoria-agua de mar, 17,7 y 11,3 %, a 56 días y a 90 días 20,7 y 17,2 %, para el sistema del cemento 2. Por el contrario, las resistencias de las probetas hechas con la mezcla cemento/escoria = 30/70 del cemento 1 experimentan un incremento del 12,8 % (56 días) y 9,2 % (90 días), del 2,3 % las del cemento 2, a 56 días, y una disminución del 9,3 % a 90 días.

En los fenómenos reseñados influye, además de la calidad y cantidad de escoria, las características de la fracción clínker de cada cemento.

3.5. 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 $t = 56$ días) y mayores de la unidad para las probetas de las mezclas cemento/escoria = 30/70 para $t = 56$ días, ya que los valores de R_t = resistencia de las probetas sumergidas en agua de mar son más altos que los de las probetas sumer-

gidas en agua potable filtrada (R'_t), como se ha puesto de manifiesto en (7); hecho que también sucede para las probetas hechas con la misma mezcla, utilizando el cemento 1, para $t = 90$ días (tablas 3 y 4).

3.6. Estudio de los sistemas: cemento/escoria-agua potable filtrada

a) Sistemas: cemento/escoria-agua potable filtrada (curado)

Variación de la concentración iónica

En la tabla 5 se incluyen los valores correspondientes al contenido de Ca (II) y de SO_4 (II) en el agua potable filtrada en donde se han curado las probetas durante 21 días, así como el valor del pH y la cantidad de fase sólida formada (calcita), impurificada, en grado distinto, por pequeñas fracciones desprendidas de las probetas de mortero.

TABLA 5

Sistemas: cemento/escoria-agua potable filtrada (curado)

Concentración iónica, pH y fase sólida

Determinaciones	Cemento 1			Cemento 2		
	100/0	70/30	30/70	100/0	70/30	30/70
Ca (II), g/l	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,002
moles/l	$0,5 \times 10^{-4}$	$0,5 \times 10^{-4}$	$0,5 \times 10^{-4}$	$0,8 \times 10^{-4}$	$0,8 \times 10^{-4}$	$0,5 \times 10^{-4}$
g/500 ml	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$
moles/500 ml (\approx)	3×10^{-5}	3×10^{-5}	3×10^{-5}	4×10^{-5}	4×10^{-5}	3×10^{-5}
SO_4 (II)	n. d.					
pH	11,1	11,5	9,7	9,7	9,5	9,5
Fase sólida, g	0,417	0,641	0,291	0,708	0,354	0,105
Ca (II), g	0,167	0,257	0,117	0,284	0,142	0,042
moles	$0,42 \times 10^{-2}$	$0,64 \times 10^{-2}$	$0,29 \times 10^{-2}$	$0,71 \times 10^{-2}$	$0,35 \times 10^{-2}$	$0,11 \times 10^{-2}$

n. d. = no detectado.

El contenido de Ca (II) en el agua potable filtrada es: $1,25 \times 10^{-4}$ moles/litro y $6,3 \times 10^{-5}$ moles en 500 ml.

La cantidad de Ca (II) presente en la disolución (500 ml) está comprendida entre 3×10^{-5} y 4×10^{-5} moles (la del agua potable filtrada es 6×10^{-5} moles) y en la fase sólida, obtenida por cálculo y comprobado experimentalmente, oscila entre $0,29 \times 10^{-2}$ y $0,64 \times 10^{-2}$ moles, en el sistema del cemento 1, y entre $0,11 \times 10^{-2}$ y $0,71 \times 10^{-2}$ moles en el del cemento 2; como puede apreciarse, tabla 5, el Ca (II) se encuentra prácticamente en la fase sólida. La menor cantidad de Ca (II) corresponde al medio, en donde han estado sumergidas las probetas hechas con la mezcla cemento/escoria = 30/70.

El valor del pH de los medios en donde se han curado las probetas hechas con las mezclas cemento/escoria = 100/0 y 70/30 del primer sistema (11,1 y 11,5) es superior al del segundo sistema (9,7 y 9,5); sin embargo, el correspondiente al medio de curado de las probetas hechas con la menor cantidad de cemento (cemento/escoria = 30/70) es del mismo orden (9,7 y 9,5).

Estudio de la fase sólida formada

En las figuras 4 y 5 se han representado los diagramas de difracción de rayos X de la fase sólida formada en el agua potable filtrada en donde han estado sumergidas las pro-

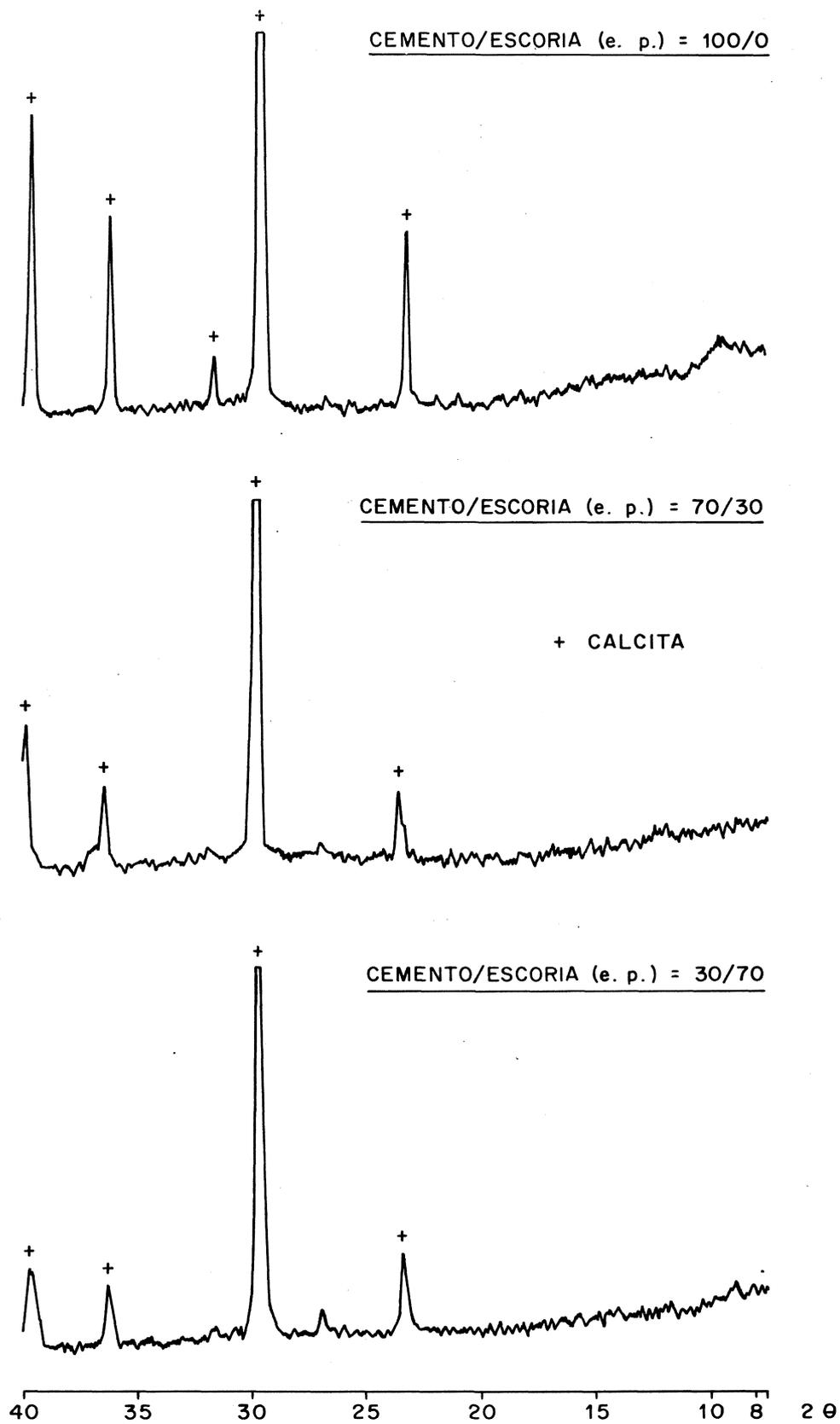


Fig. 4.—Sistema: cemento 1/escoria-agua potable filtrada (curado).

DRX de la fase sólida.

e. p. = en peso.

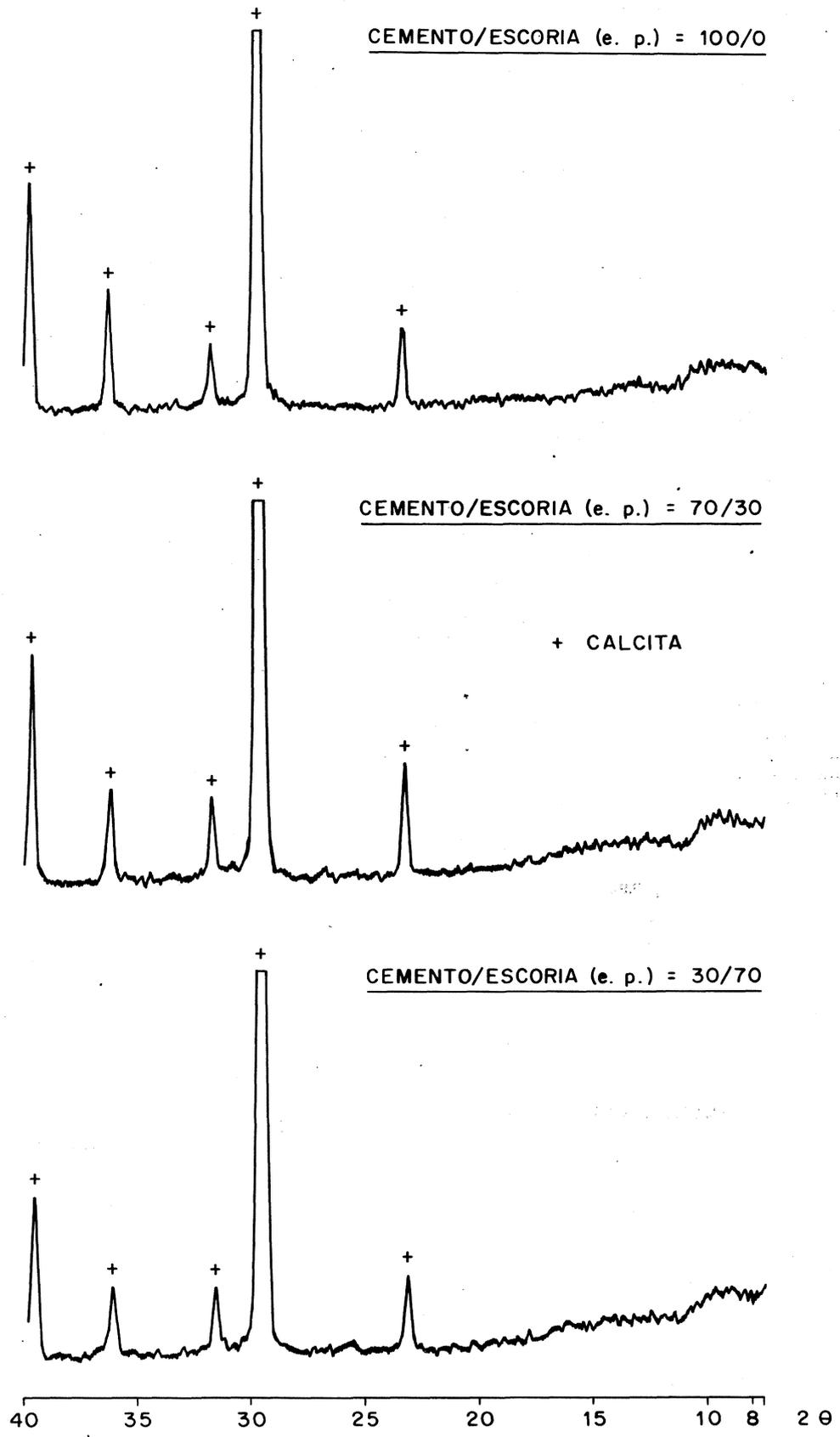


Fig. 5.—Sistema: cemento 2/escoria-agua potable filtrada (curado).
DRX de la fase sólida.
e. p. = en peso.

betas de mortero de las distintas series, habiéndose identificado los picos correspondientes al compuesto cristalino calcita. En ciertos casos se ha determinado su riqueza (mayor del 95 %) por análisis químico.

b) *Sistema: cemento 1/escoria-agua potable filtrada (conservación)*

Variación de la concentración iónica

En la tabla 6 figura el contenido de Ca (II) y de SO₄ (II), el valor del pH y la cantidad de fase sólida formada en el agua potable filtrada en donde se han sumergido las probetas de mortero durante 56 y 90 días, después del período de curado (1 + 21 días).

TABLA 6

Sistema: cemento 1/escoria-agua potable filtrada

Concentración iónica, pH y fase sólida

Determinaciones	Edad: 56 días			Edad: 90 días		
	100/0	70/30	30/70	100/0	70/30	30/70
Ca (II), g/l	0,037	0,007	0,019	0,017	0,003	0,010
moles/l	$9,2 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$4,7 \times 10^{-4}$	$4,2 \times 10^{-4}$	$0,7 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-4}$
moles/800 ml	$7,4 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^{-4}$	$3,4 \times 10^{-4}$	$0,6 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$
SO ₄ (II), g/l	0	0	0,020	0	0,010	0,035
moles/l	0	0	$2,1 \times 10^{-4}$	0	$1,0 \times 10^{-4}$	$3,6 \times 10^{-4}$
moles/800 ml	0	0	$1,7 \times 10^{-4}$	0	$0,8 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-4}$
pH	12,0	9,2	8,4	12,1	10,2	7,6
Fase sólida, g	0,924	0,486	0,111	0,760	0,595	0,139
Ca (II), g	0,370	0,195	0,044	0,304	0,238	0,056
moles	$0,92 \times 10^{-2}$	$0,49 \times 10^{-2}$	$0,11 \times 10^{-2}$	$0,76 \times 10^{-2}$	$0,59 \times 10^{-2}$	$0,14 \times 10^{-2}$

El contenido de Ca (II) en 800 ml de agua potable filtrada es $1,0 \times 10^{-4}$ moles.

En los diferentes casos estudiados para cada mezcla y para ambas edades, 56 y 90 días, aparece una fase sólida y Ca (II) en la disolución; el ion SO₄ (II) se ha detectado en el medio en donde se han conservado las probetas de mortero hechas con la mezcla cemento/escoria = 30/70, a 56 y 90 días, y 70/30, a 90 días.

La cantidad de Ca (II) en la disolución (800 ml) se encuentra comprendida entre $0,6 \times 10^{-4}$ y $7,4 \times 10^{-4}$ moles (la del agua potable filtrada es $1,0 \times 10^{-4}$ moles), a 56 y 90 días, mientras que en la fase sólida (calcita), obtenida por cálculo y comprobada experimentalmente, oscila entre $0,11 \times 10^{-2}$ y $0,92 \times 10^{-2}$ moles, también a 56 y 90 días. La mayor cantidad de Ca (II) se encuentra, en todos los casos, en la fase sólida; ésta corresponde al precipitado formado en el medio en donde han estado sumergidas las probetas fabricadas con cemento sin adición de escoria y la menor a la nueva fase sólida del medio en donde se han conservado las probetas hechas con la mezcla cemento/escoria = 30/70.

La cantidad total de Ca (II) liberado durante estos períodos de tiempo, 56 y 90 días, Ca (II) presente en la disolución y en la fase sólida formada, es inferior a la correspondiente al tiempo de curado (21 días) para el caso de las probetas hechas con las mezclas 70/30 y 30/70 y del mismo orden o con ligeras diferencias en ambas edades (56 y 90 días) para las distintas series de cada mezcla (tabla 8); dicha cantidad depende de la relación cemento/escoria utilizada en la fabricación de las probetas de mortero.

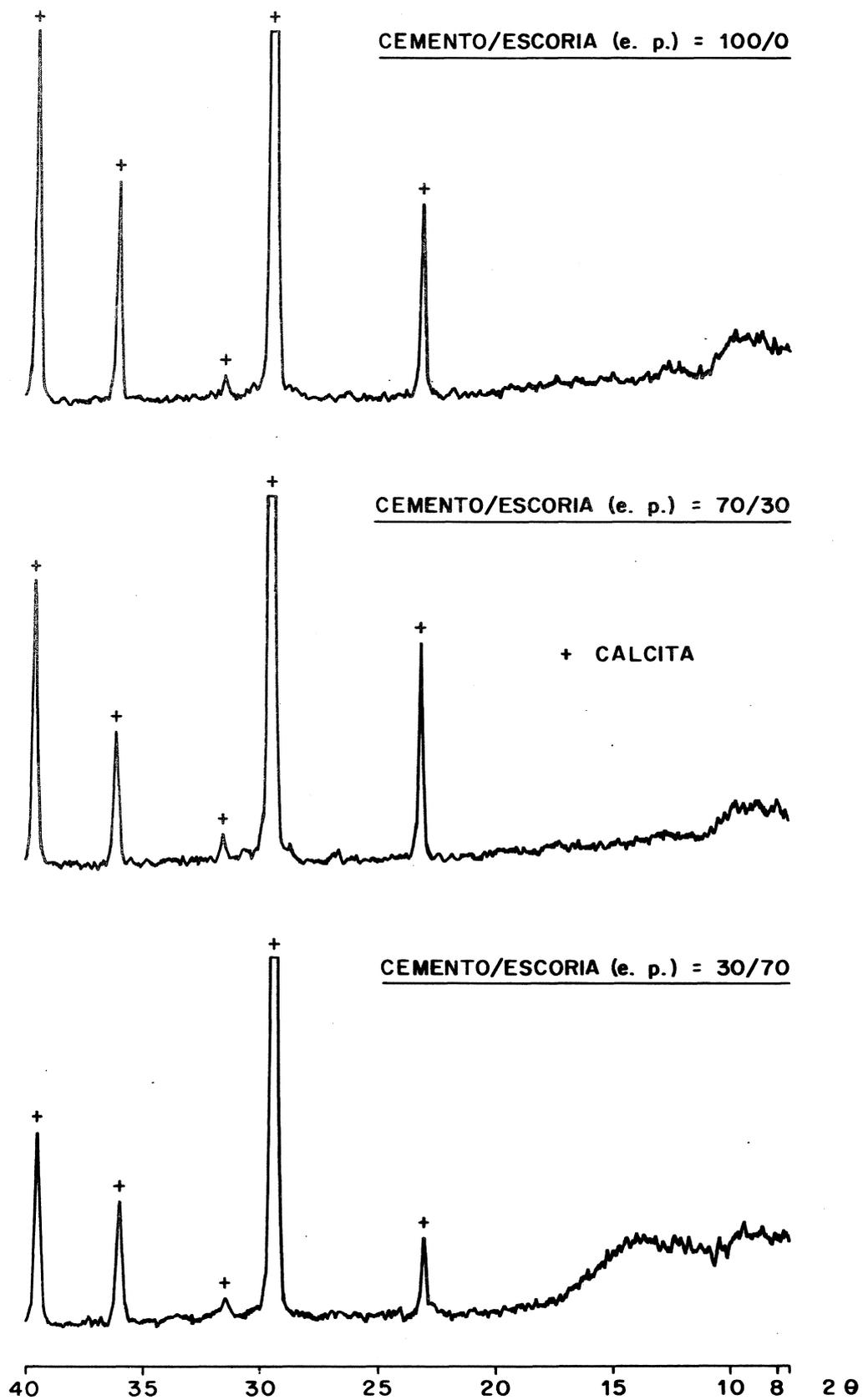


Fig. 6.—Sistema: cemento 1/escoria-agua potable filtrada (56 días).

DRX de la fase sólida.

e. p. = en peso.

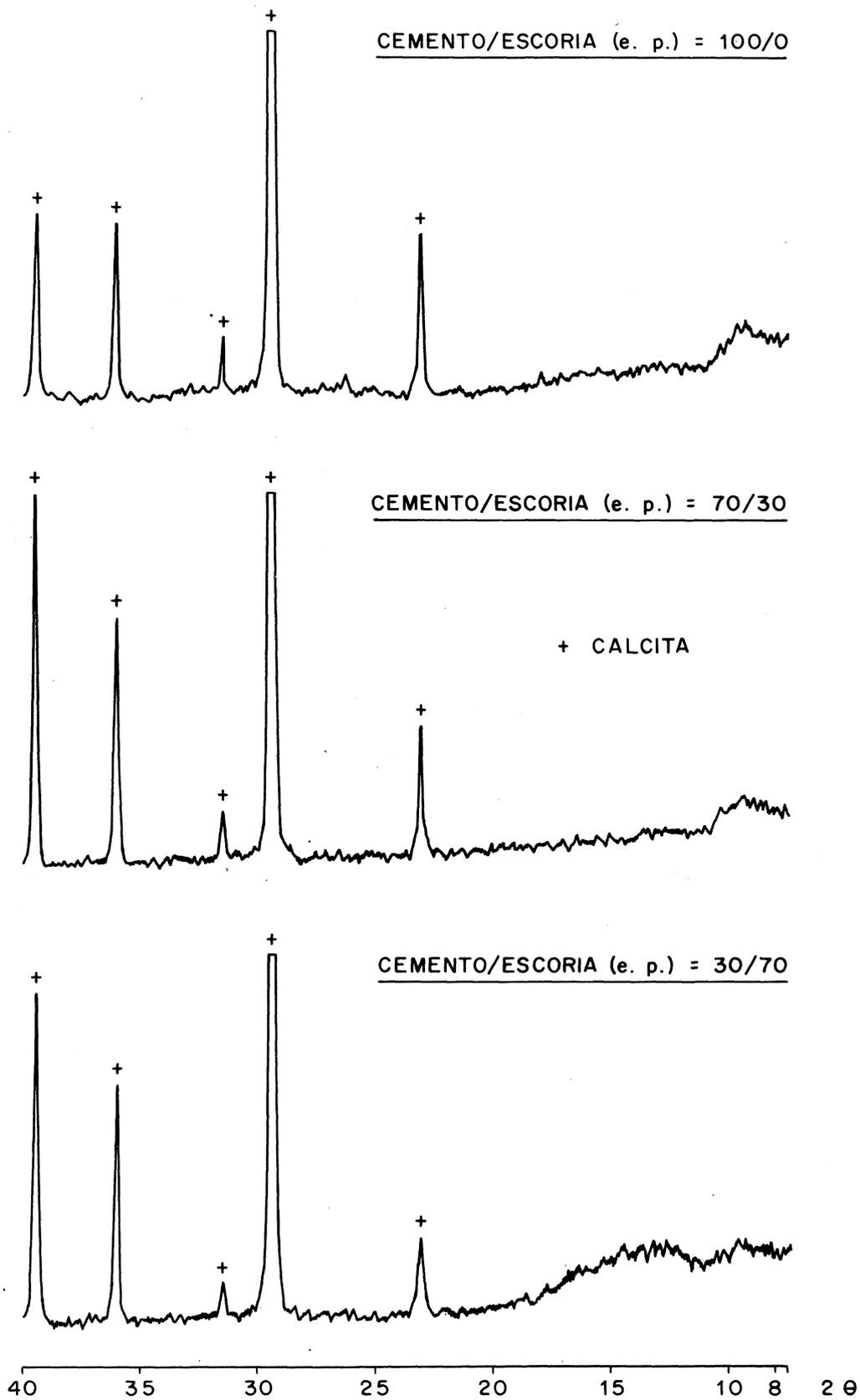


Fig. 7.—Sistema: cemento 1/escoria-agua potable filtrada (90 días).

DRX de la fase sólida.

e. p. = en peso.

El valor del pH del medio disminuye en aquellas disoluciones en donde han estado sumergidas las probetas hechas con las mezclas cemento/escoria = 70/30 y 30/70, siendo función de la cantidad de la fracción clínker. Dicho valor ha pasado de un pH fuertemente básico (12,0 y 12,1) a un pH básico (8,4 y 7,6), a la vez que la fase sólida va de 0,924-0,760 g, $0,92 \times 10^{-2}$ - $0,76 \times 10^{-2}$ moles de Ca (II), a 0,111-0,139 g, $0,11 \times 10^{-2}$ - $0,14 \times 10^{-2}$ moles de Ca (II), según se trate de las disoluciones en donde se han conservado las probetas de mortero fabricadas con cemento o con la mezcla cemento/escoria = 30/70.

Estudio de la fase sólida formada

La nueva fase sólida, que se encuentra impurificada por pequeñas fracciones desprendidas de las probetas de mortero, se ha estudiado por difracción de rayos X en todos los casos y por análisis químico.

Los diagramas de difracción de rayos X de la fase sólida formada en el agua potable filtrada en donde han estado sumergidas las probetas de mortero de las diversas series estudiadas, durante 56 y 90 días, se encuentran en las figuras 6 y 7. En todos los casos se han identificado, únicamente, los picos del compuesto cristalino calcita.

Estudio de la fracción enriquecida

En los diagramas de difracción de rayos X (figuras 8 y 9) de la fracción enriquecida (cemento hidratado) correspondiente a las series de probetas de mortero hechas con las tres mezclas cemento 1/escoria, sumergidas en agua potable filtrada, una vez curadas (22 días), durante 56 y 90 días, se han identificado los picos de los siguientes compuestos cristalinos: ettringita, portlandita, yeso y calcita, además de α -SiO₂ que procede de la arena utilizada en la fabricación de las probetas.

La intensidad de los picos que aparecen en los DRX de la fracción enriquecida de la probeta representativa de las distintas mezclas, excepto la de la calcita, es tanto menor cuanto mayor es la cantidad de la fracción escoria, o menor la del clínker, de la mezcla. La máxima intensidad corresponde a la fracción enriquecida de la probeta hecha con cemento sin adición de escoria.

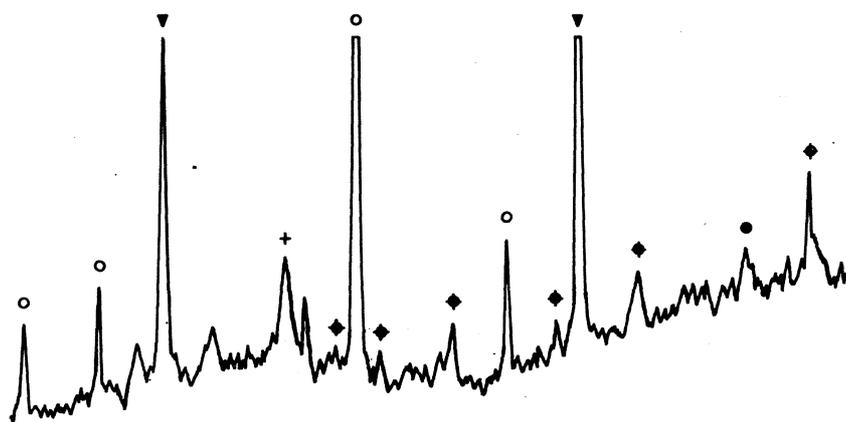
c) Sistema: cemento 2/escoria-agua potable filtrada

Variación de la concentración iónica

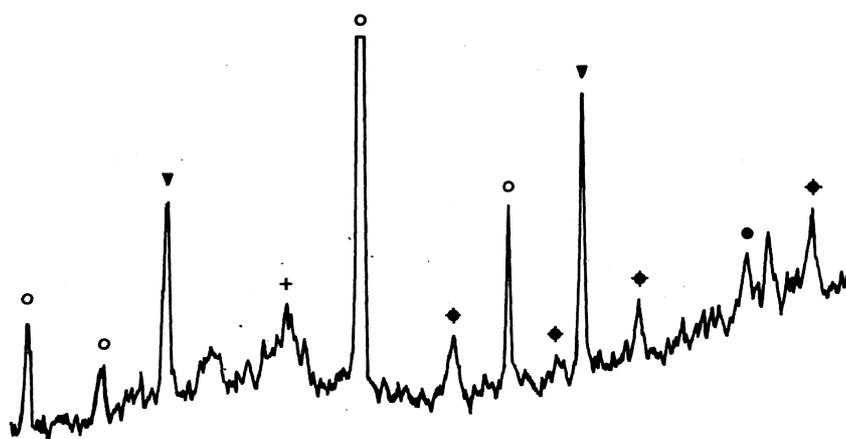
El contenido de Ca (II) y de SO₄ (II) del agua potable filtrada en donde han estado sumergidas las probetas de mortero durante 56 y 90 días, así como el valor del pH y la cantidad de fase sólida formada se encuentran en la tabla 7.

En este sistema aparecen los iones Ca (II) y SO₄ (II), así como la nueva fase sólida en los seis casos estudiados. La cantidad de Ca (II) total liberado, Ca (II) presente en la disolución y en la fase sólida, en los medios de conservación correspondientes a cada serie de probetas es mayor que en el sistema cemento 1/escoria-agua potable filtrada (tabla 8) así como a la correspondiente al tiempo de curado (21 días); por otra parte, el Ca (II) liberado en el período mayor de tiempo (90 días) es ligeramente superior al de 56 días.

CEMENTO/ESCORIA (e. p.) = 100/0



CEMENTO/ESCORIA (e. p.) = 70/30



CEMENTO/ESCORIA (e. p.) = 30/70

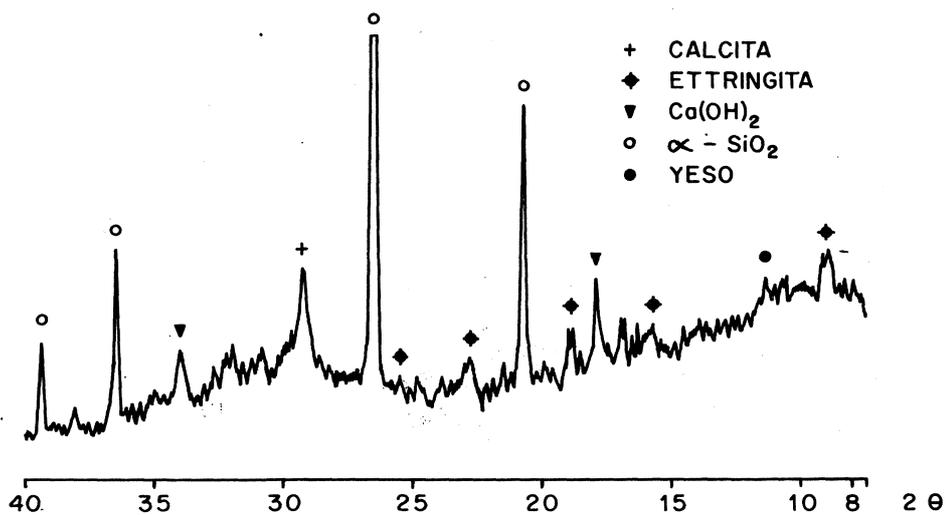
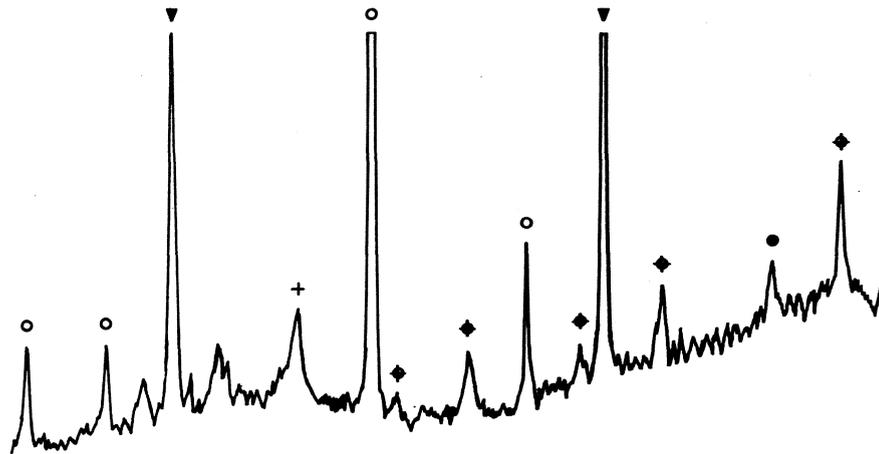


Fig. 8.—Sistema: cemento 1/escoria-agua potable filtrada (56 días).

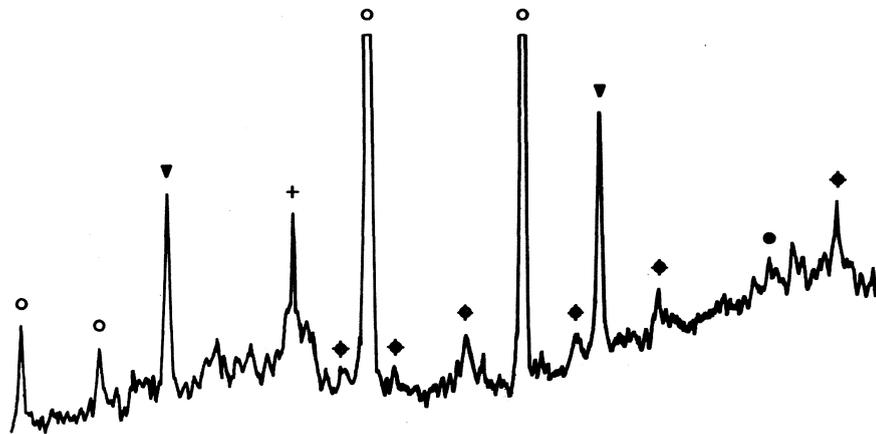
DRX de la fracción enriquecida.

e. p. = en peso.

CEMENTO/ESCORIA (e. p.) = 100/0



CEMENTO/ESCORIA (e. p.) = 70/30



CEMENTO/ESCORIA (e. p.) = 30/70

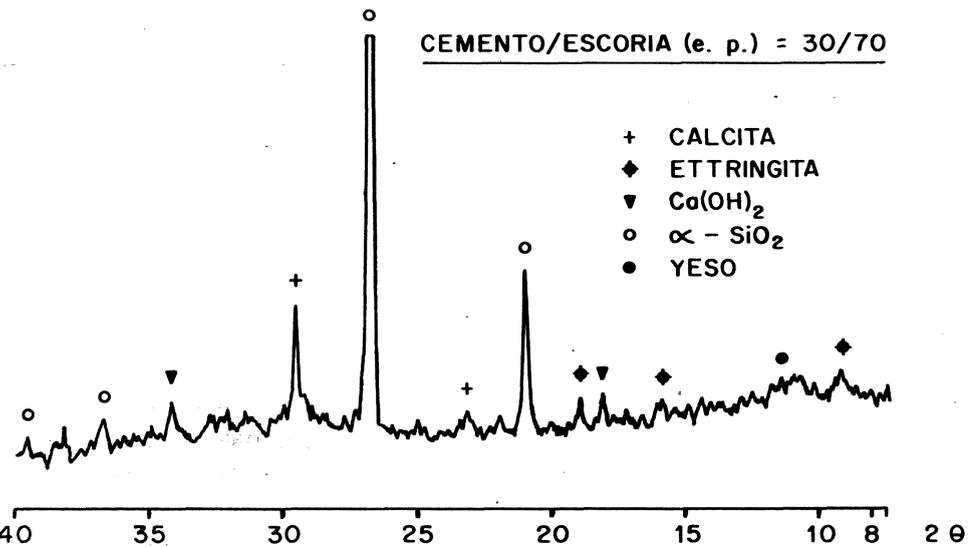


Fig. 9.—Sistema: cemento 1/escoria-agua potable filtrada (90 días).

DRX de la fracción enriquecida.

e. p. = en peso.

La cantidad de Ca (II) que existe en el medio (800 ml) en donde se han conservado las probetas hechas con cemento sin adición de escoria, a 56 y 90 días, es aproximadamente $0,5 \times 10^{-2}$ moles, mientras que en la disolución en donde han estado sumergidas las probetas hechas con cemento/escoria igual a 70/30 y 30/70 está comprendida entre $1,0 \times 10^{-4}$ y $4,2 \times 10^{-4}$ moles (en el agua potable filtrada hay $1,0 \times 10^{-4}$ moles). En la fase sólida, el contenido de Ca (II), obtenido por cálculo y comprobado experimentalmente, oscila entre $0,31 \times 10^{-2}$ y $1,53 \times 10^{-2}$ moles.

T A B L A 7

Sistema: cemento 2/escoria-agua potable filtrada

Concentración iónica, pH y fase sólida

Determinaciones	Edad: 56 días			Edad: 90 días		
	100/0	70/30	30/70	100/0	70/30	30/70
Ca (II), g/l	0,227	0,006	0,019	0,260	0,005	0,021
moles/l	$56,6 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$4,7 \times 10^{-4}$	$64,9 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$5,2 \times 10^{-4}$
moles/800 ml	$0,45 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^{-4}$	$0,52 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$4,2 \times 10^{-4}$
SO ₄ (II), g/l	0,017	0,008	0,016	0,015	0,006	0,032
moles/l	$1,8 \times 10^{-4}$	$0,8 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-4}$	$0,6 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^{-4}$
moles/800 ml	$1,4 \times 10^{-4}$	$0,6 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$0,5 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-4}$
pH	12,6	10,5	9,1	12,8	10,5	8,5
Fase sólida, g	1,370	1,070	0,313	1,533	1,143	0,441
Ca (II), g	0,549	0,429	0,125	0,614	0,458	0,177
moles	$1,37 \times 10^{-2}$	$1,07 \times 10^{-2}$	$0,31 \times 10^{-2}$	$1,53 \times 10^{-2}$	$1,14 \times 10^{-2}$	$0,44 \times 10^{-2}$

El contenido de Ca (II) en 800 ml de agua potable filtrada es $1,0 \times 10^{-4}$ moles.

La cantidad de fase sólida formada en dichos medios disminuye conforme en las series de probetas de mortero sumergidas aumenta la cantidad de escoria utilizada en su fabricación, así como el valor del pH, que han pasado de 1,370-1,533 g [$1,36 \times 10^{-2}$ - $1,53 \times 10^{-2}$ moles de Ca (II)], a 0,313-0,441 g [$0,31 \times 10^{-2}$ - $0,44 \times 10^{-2}$ moles de Ca (II)], y de 12,6-12,8 a 9,1-8,5, a 56 y 90 días, respectivamente.

Estudio de la fase sólida formada

La fase sólida formada, impurificada por pequeñas fracciones desprendidas de las probetas de mortero, se ha estudiado por DRX y por análisis químico.

En las figuras 10 y 11 se han representado los diagramas de difracción de rayos X de la fase sólida formada en el medio en donde han estado sumergidas las probetas de mortero durante 56 y 90 días. En dichos DRX se han identificado los picos de los compuestos cristalinos calcita, en todos los casos, y aragonito, en menor cantidad, únicamente en la fase sólida formada en el agua potable filtrada en donde se han sumergido (56 y 90 días) las probetas de mortero hechas con cemento sin adición de escoria.

La intensidad de los picos del aragonito en el diagrama de la figura 10 (56 días) es mayor que en el de la figura 11 (90 días).

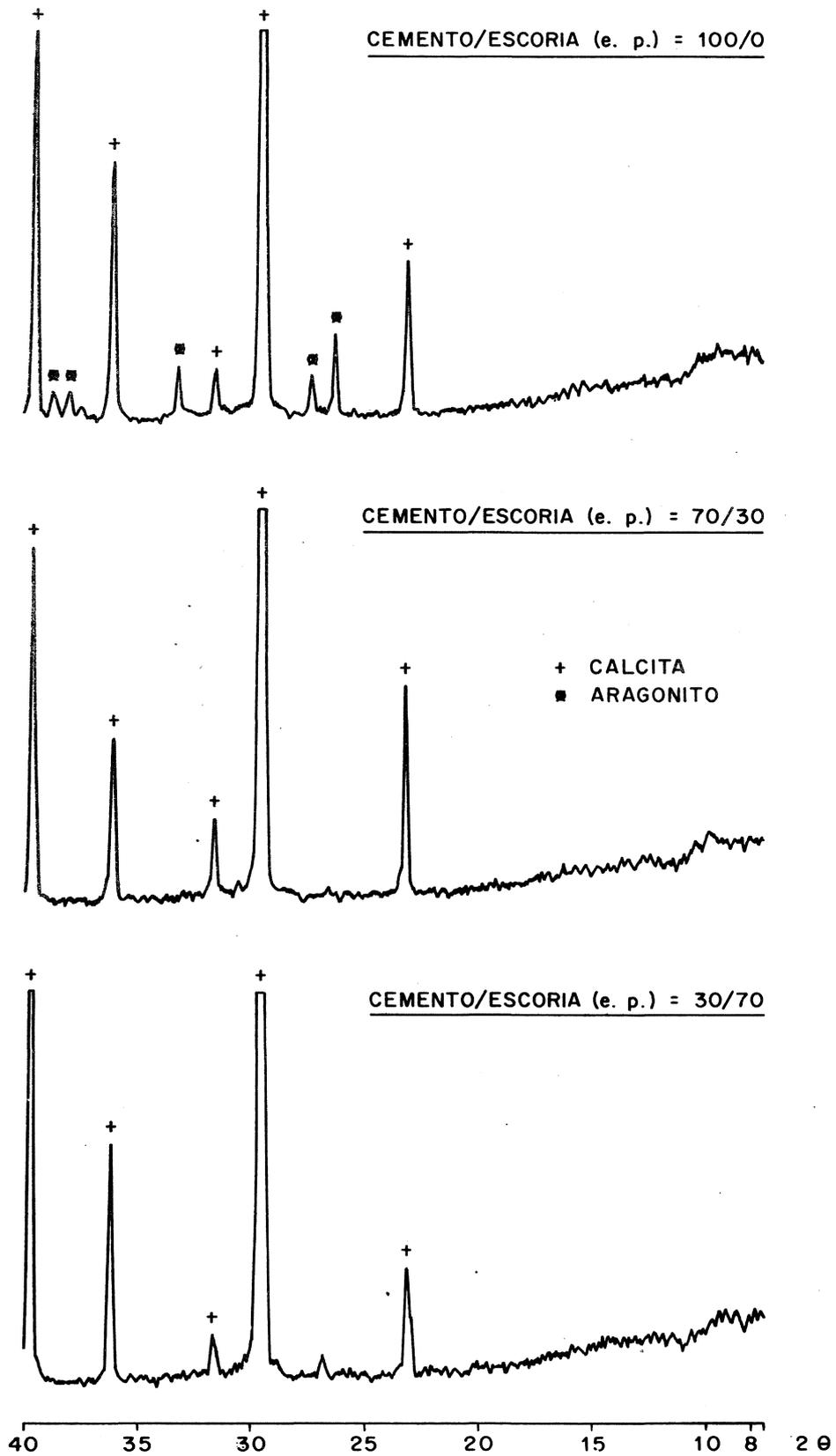


Fig. 10.—Sistema: cemento 2/escoria-agua potable filtrada (56 días).

DRX de la fase sólida.

e. p. = en peso.

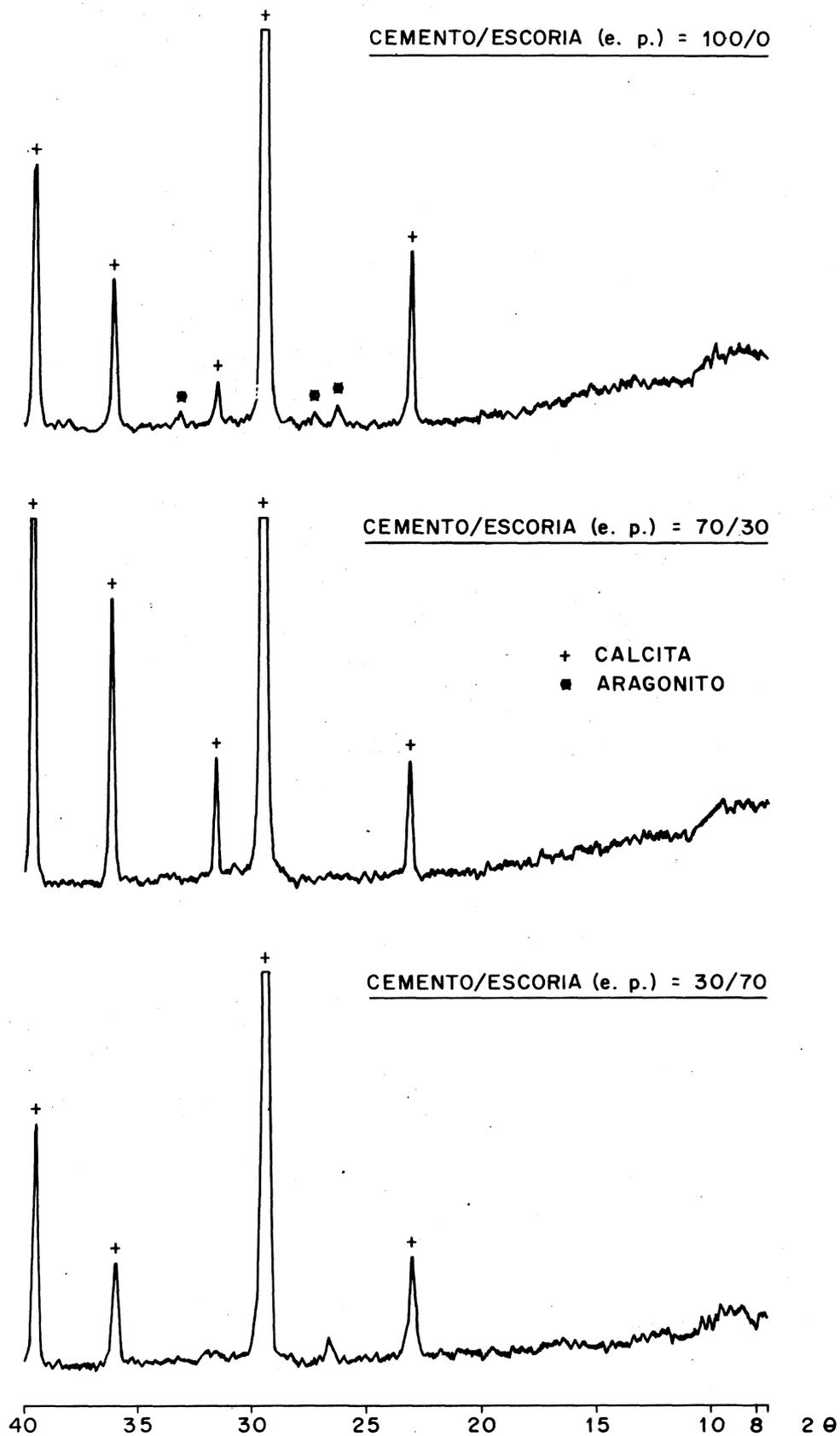


Fig. 11.—Sistema: cemento 2/escoria-agua potable filtrada (90 días).
 DRX de la fase sólida.
 e. p. = en peso.

Estudio de la fracción enriquecida

En los diagramas de difracción de rayos X (figuras 12 y 13), que corresponden a la fracción enriquecida extraída de una de las probetas de mortero de las distintas series hechas con las mezclas cemento/escoria reseñadas, sumergidas en agua potable filtrada durante 21 días y, posteriormente, durante 56 ó 90 días en agua potable filtrada, se han identificado los picos de los siguientes compuestos cristalinos:

- Portlandita, calcita y cuarzo en todos los diagramas.
- Ettringita en todos los diagramas, excepto en el correspondiente a la fracción de la probeta hecha con la mezcla cemento/escoria = 30/70, a 56 días, en el cual no se ha detectado.
- Yeso en los diagramas de la fracción extraída de la probeta de las series hechas con las mezclas cemento/escoria = 70/30 (56 días, figura 12) y 30/70 (90 días, figura 13).

La intensidad de los picos de los diagramas de difracción de rayos X de las fracciones enriquecidas es función del contenido de la fracción clínker y escoria de la mezcla con que se fabricaron las probetas de mortero; la de los picos de la portlandita y ettringita disminuye conforme lo hace la cantidad de clínker o aumenta la de escoria.

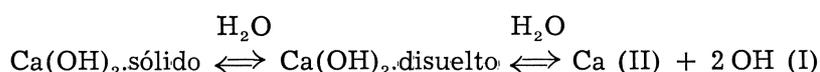
La intensidad de los picos de la ettringita y del yeso de este sistema es menor que la de los DRX del sistema cemento 1/escoria-agua potable filtrada.

d) Interpretación de resultados

El Ca (II) que aparece en el medio (agua potable filtrada) en donde han estado sumergidas las probetas de mortero, bien durante el período de curado (21 días) o el de conservación (56 ó 90 días), procede fundamentalmente del Ca(OH)_2 , como se señaló en (1), formado durante las reacciones de hidratación del C_3S y del C_2S de la fracción clínker de los cementos que producen tobermorita, como fase final, y portlandita, la cual se puede formar, también, a partir del CaO libre.

Los silicatos de calcio hidratados son poco solubles en agua, 50 mg/l como CaO (8) (9) $\langle \rangle$ $\langle \rangle$ 66 mg/l como Ca(OH)_2 . Asimismo, la ettringita se disuelve ligeramente con separación de gel de alúmina, sulfato de calcio dihidratado e hidróxido de calcio (10) (11); las concentraciones finales, según Taylor (10), son 35 mg/l de CaO, 215 mg/l de Al_2O_3 y 43 mg/l de SO_3 y, según Lea y Desch (11), 215 mg/l de CaSO_4 , 43 mg/l de CaO y 35 mg/l de Al_2O_3 , a 25°C. Para Bogue (12) la ettringita es extraordinariamente insoluble (0,001 g de SO_3 por 100 ml de agua saturada de cal).

La solubilidad de la portlandita ($\text{pk} = 5,3$) en agua es, a 20°C, 1.230 mg/l según Biczok (13) ó 1,23 g/l como CaO $\langle \rangle$ 1.625 mg/l como Ca(OH)_2 según Duriez y Arrambadi (14); las reacciones que tienen lugar son las siguientes:



produciendo un incremento de la basicidad del medio y, por consiguiente, del valor del pH.

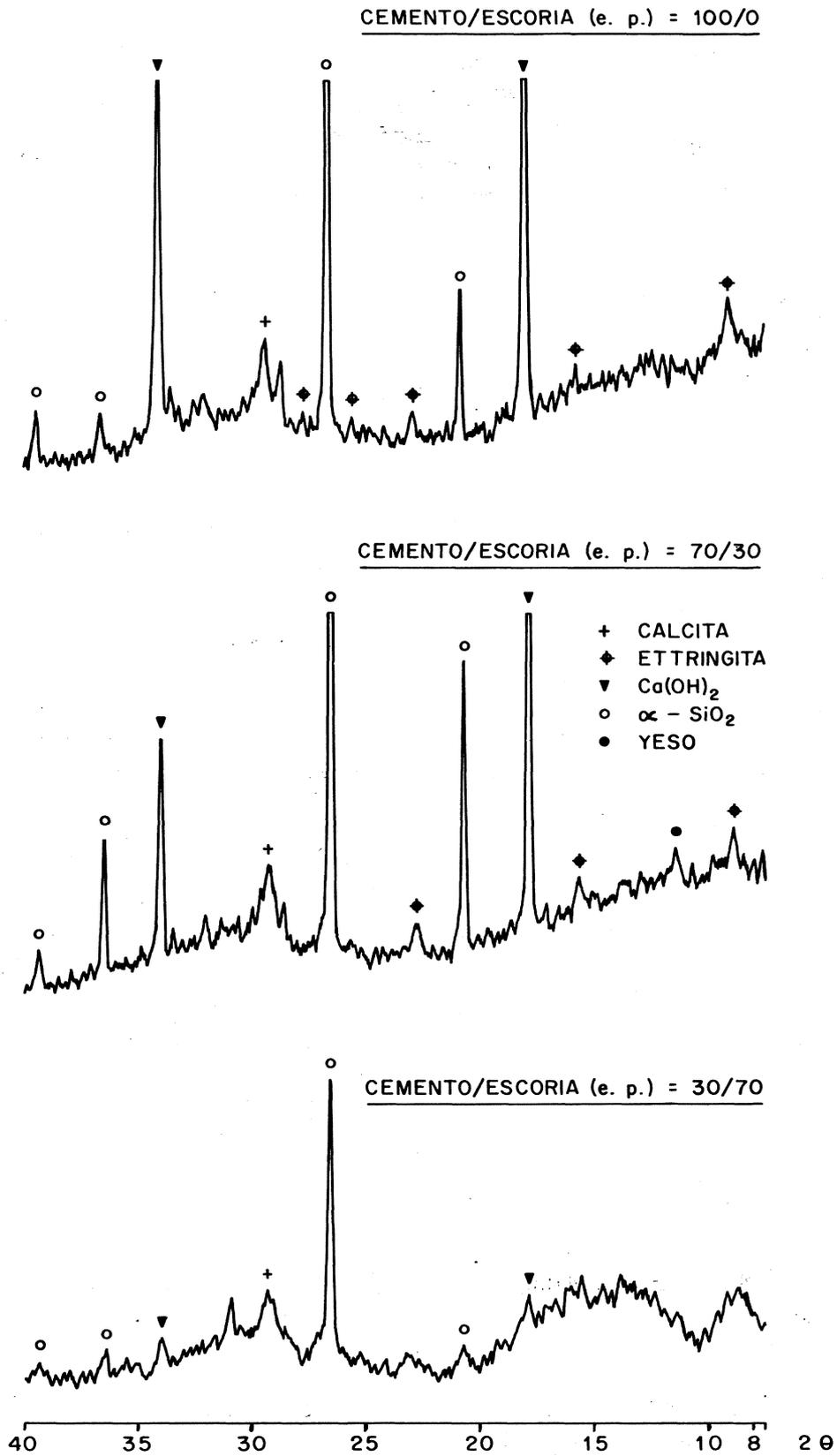


Fig. 12.—Sistema: cemento 2/escoria-agua potable filtrada (56 días).

DRX de la fracción enriquecida.

e. p. = en peso.

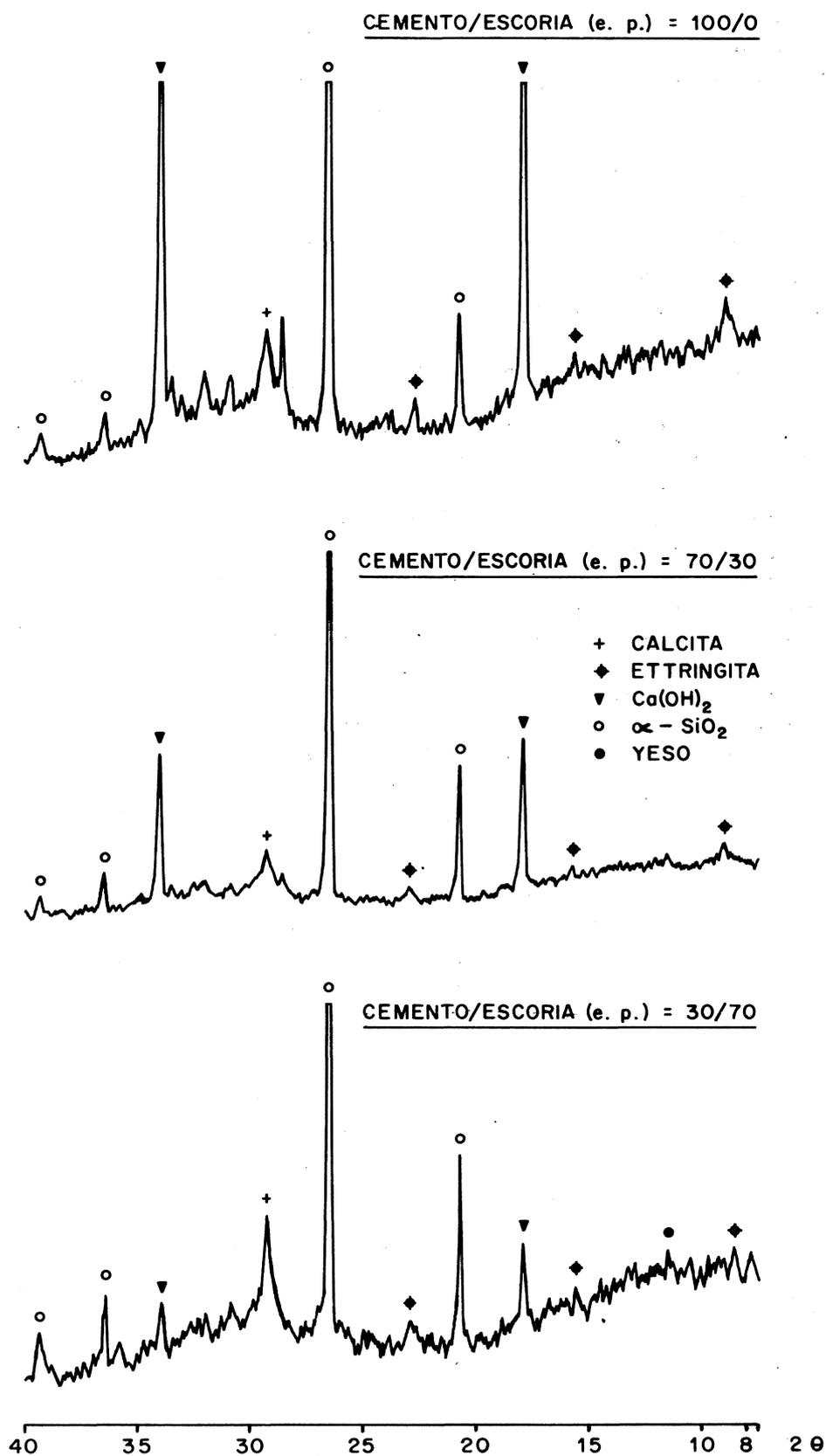


Fig. 13.—Sistema: cemento 2/escoria-agua potable filtrada (90 días).

DRX de la fracción enriquecida

e. p. = en peso.

La solubilidad del Ca(OH)_2 , electrólito débil, se incrementa por la presencia de otros iones no comunes procedentes de electrólitos fuertes (efecto salino); si, por el contrario, dichos iones son comunes (efecto del ion común) la solubilidad del electrólito débil disminuye. Así, la presencia de hidróxidos alcalinos reduce considerablemente la solubilidad de la portlandita (15) (16).

La disolución progresiva del Ca(OH)_2 favorece la reacción de hidratación del clínker liberando más portlandita que pasa, en parte, al medio en forma iónica, a la vez que los silicatos correspondientes se degradan. Cuando hay escoria en la mezcla el hidróxido de calcio naciente es fijado parcialmente por ella, formando compuestos cálcicos; en este caso el valor del pH del medio es menor, tanto más bajo cuanto más cantidad de Ca(OH)_2 haya fijado la escoria y, por consiguiente, menor cantidad quede libre, hecho que normalmente está de acuerdo con la cantidad de escoria presente en la mezcla.

Si la acción del agua potable filtrada continúa, al renovarse constantemente o a intervalos dados, sigue la disolución (extracción) del Ca(OH)_2 , formándose compuestos —en la fase sólida— cada vez más pobres en Ca (II), de tal modo que éstos se pueden destruir quedando, como fase final, las sustancias estables, óxidos de aluminio (III) y de hierro (III) muy hidratados y ácido silícico (17) (18) (19). Las pérdidas de masa experimentadas por los compuestos hidratados del cemento son considerables; en otros trabajos, de los que daremos cuenta en próximas publicaciones, se ha puesto de manifiesto que el contenido de cemento experimenta una disminución del 60 % y el de Ca (II) del 65 al 70 %.

Tanto el yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($\text{pk} = 4,6$), como la anhidrita, CaSO_4 ($\text{pk} = 5,9$), son poco solubles en agua; 2,41 g/l, a 0°C, y 2,22 g/l, a 100°C, el primero, y 2,09 g/l, a 0°C, y 1,619 g/l, a 100°C, el segundo (20). Como se ha señalado anteriormente, en la solubilidad de estos compuestos (electrólitos débiles) influye la presencia de otros iones en la disolución (21).

El CO_2 disuelto en el agua es capaz de reaccionar, medio básico, con el Ca (II) que se encuentra en la disolución procedente del Ca(OH)_2 , como se ha mencionado, según:



dando lugar a la formación de CaCO_3 sólido, siempre que se alcance el valor de su $\text{pk} = 8,3$, y a la neutralización de los iones OH (I), por lo que se produce un descenso del contenido de Ca (II) en la disolución y del valor del pH. Al disminuir la concentración de Ca (II) y de OH (I) del medio se facilita la solubilidad del Ca(OH)_2 y los fenómenos reseñados que lleva consigo.

La nueva fase sólida formada en los sistemas cemento/escoria-agua filtrada potable está compuesta por CaCO_3 cristalizado como calcita en todos los casos y por aragonito, además, en pequeña cantidad en los sistemas correspondientes a las probetas de mortero hechas con cemento 2 sin adición de escoria.

Lach y Sauman (22) han probado que en la carbonatación del hormigón celular, por reacción del CO_2 presente en la atmósfera con los productos resultantes del cemento hidratado, se forma CaCO_3 ; habiendo estudiado las modificaciones que tienen lugar en este compuesto (calcita, aragonito y vaterita). Señalan que las pequeñas cantidades de aragonito que se producen se transforman en calcita por ser metaestable y que la formación de este compuesto es muy rara.

En la tabla 8 puede apreciarse que la cantidad de Ca (II) presente en el agua potable filtrada en donde han estado sumergidas las probetas de mortero durante el período de curado (21 días) es del mismo orden para los sistemas cemento 1 y cemento 2/escoria-agua

potable filtrada (menor de $0,5 \times 10^{-4}$ moles), mientras que la correspondiente a la fase sólida (calcita) es \geq de $0,29 \times 10^{-2}$ moles para el sistema del cemento 1 y de $0,11 \times 10^{-2}$ moles para el del cemento 2. Así mismo, los contenidos de Ca (II) en el medio en donde han estado sumergidas las probetas de mortero, a continuación del período de curado (21 días), durante 56 y 90 días es menor de 8×10^{-4} moles para el sistema cemento 1/escoria-agua potable filtrada y para el sistema cemento 2/escoria-agua potable filtrada (probetas hechas con las mezclas cemento/escoria = 70/30 y 30/70) menor de $4,5 \times 10^{-4}$ moles y de $0,6 \times 10^{-2}$ moles para el medio en donde han estado sumergidas las probetas hechas con el mencionado cemento 2 sin adición de escoria; por el contrario el Ca (II) de la fase sólida está comprendido para ambos sistemas, entre $0,11 \times 10^{-2}$ y $1,53 \times 10^{-2}$ moles.

TABLA 8

Sistemas: cemento/escoria-agua potable filtrada

Ca (II) en la disolución y en la fase sólida, en moles

Edad días	Cemento/escoria	Cemento 1			Cemento 2		
		Disolución, experimental	Fase sólida, calculada	Suma	Disolución, experimental	Fase sólida, calculada	Suma
21	100/0	$0,3 \times 10^{-4}$	$0,42 \times 10^{-2}$	$0,42 \times 10^{-2}$	$0,4 \times 10^{-4}$	$0,71 \times 10^{-2}$	$0,71 \times 10^{-2}$
	70/30	$0,3 \times 10^{-4}$	$0,64 \times 10^{-2}$	$0,64 \times 10^{-2}$	$0,4 \times 10^{-4}$	$0,35 \times 10^{-2}$	$0,35 \times 10^{-2}$
	30/70	$0,3 \times 10^{-4}$	$0,29 \times 10^{-2}$	$0,29 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-4}$	$0,11 \times 10^{-2}$	$0,11 \times 10^{-2}$
56	100/0	$7,4 \times 10^{-4}$	$0,92 \times 10^{-2}$	$0,99 \times 10^{-2}$	$0,45 \times 10^{-2}$	$1,37 \times 10^{-2}$	$1,82 \times 10^{-2}$
	70/30	$1,4 \times 10^{-4}$	$0,49 \times 10^{-2}$	$0,50 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-4}$	$1,07 \times 10^{-2}$	$1,08 \times 10^{-2}$
	30/70	$3,8 \times 10^{-4}$	$0,11 \times 10^{-2}$	$0,15 \times 10^{-2}$	$3,8 \times 10^{-4}$	$0,31 \times 10^{-2}$	$0,35 \times 10^{-2}$
90	100/0	$3,4 \times 10^{-4}$	$0,76 \times 10^{-2}$	$0,79 \times 10^{-2}$	$0,52 \times 10^{-2}$	$1,53 \times 10^{-2}$	$2,05 \times 10^{-2}$
	70/30	$0,6 \times 10^{-4}$	$0,59 \times 10^{-2}$	$0,60 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-2}$	$1,15 \times 10^{-2}$
	30/70	$2,0 \times 10^{-4}$	$0,14 \times 10^{-2}$	$0,16 \times 10^{-2}$	$4,2 \times 10^{-4}$	$0,44 \times 10^{-2}$	$0,48 \times 10^{-2}$

Los hechos reseñados ponen de manifiesto que el Ca (II) extraído del cemento hidratado se encuentra, prácticamente, en la fase sólida siendo las cantidades de dicho Ca (II) muy parecidas para los otros dos períodos de tiempo de conservación, 56 y 90 días, en cada serie de un mismo sistema.

Así mismo, la cantidad total de Ca (II) extraído (moles), presente en la disolución y en la fase sólida, de cada serie de probetas sumergidas en agua potable filtrada y para cada cemento es del mismo orden (tabla 9) tanto para el período de tiempo 21 días (curado) y 56 días (conservación), como para 21 días (curado) y 90 días (conservación). Las probetas de mortero hechas con el cemento 2, sin adición de escoria, son las que liberan mayor cantidad total de Ca (II) mientras que la de las probetas hechas con las mezclas cemento 2/escoria = 70/30 y 30/70 de ambos períodos de tiempo son análogas a la de las mismas series del sistema del cemento 1; estos fenómenos están de acuerdo con las características de la fracción clínker (alto contenido de C_3S y bajo de C_2S y de C_3A) que, a pesar de liberar mayor cantidad de $Ca(OH)_2$, es fijado en mayor cuantía por la fracción de escoria añadida.

Las resistencias mecánicas a flexotracción de las probetas de mortero hechas con cemento sin adición de escoria, sumergidas en agua potable filtrada, pasan del valor 100 kp/cm^2 , que se ha tomado como índice, a $115-114$ y a $110-109 \text{ kp/cm}^2$, a 56 y 90 días, para las probetas hechas con las mezclas cemento/escoria = 70/30 y 30/70, respectivamente, del sis-

T A B L A 9

Sistemas: cemento/escoria-agua potable filtrada.

Ca (II) liberado, en moles, en los períodos de tiempo

21 días (curado) + 56 días (conservación) y 21 días (curado) + 90 días (conservación)

Cemento	Cemento/es- coria	Edad, días				
		21	56	90	21 + 56	21 + 90
1	100/0	$0,42 \times 10^{-2}$	$0,99 \times 10^{-2}$	$0,79 \times 10^{-2}$	$1,41 \times 10^{-2}$	$1,21 \times 10^{-2}$
	70/30	$0,64 \times 10^{-2}$	$0,50 \times 10^{-2}$	$0,60 \times 10^{-2}$	$1,14 \times 10^{-2}$	$1,24 \times 10^{-2}$
	30/70	$0,29 \times 10^{-2}$	$0,15 \times 10^{-2}$	$0,16 \times 10^{-2}$	$0,44 \times 10^{-2}$	$0,45 \times 10^{-2}$
2	100/0	$0,71 \times 10^{-2}$	$1,82 \times 10^{-2}$	$2,05 \times 10^{-2}$	$2,53 \times 10^{-2}$	$2,76 \times 10^{-2}$
	70/30	$0,35 \times 10^{-2}$	$1,08 \times 10^{-2}$	$1,15 \times 10^{-2}$	$1,43 \times 10^{-2}$	$1,50 \times 10^{-2}$
	30/70	$0,11 \times 10^{-2}$	$0,35 \times 10^{-2}$	$0,48 \times 10^{-2}$	$0,46 \times 10^{-2}$	$0,59 \times 10^{-2}$

tema cemento 1/escoria-agua potable filtrada, y a 115-121 y 119-125 kp/cm², a 56 y 90 días, para las probetas análogas del sistema cemento 2/escoria-agua potable filtrada; en ambos casos, la adición de escoria ejerce una influencia favorable como consecuencia de las reacciones que se han producido, dando lugar a la formación de nuevos compuestos y a la disminución, total o parcial, de otros, como ha sucedido con las especies cristalinas que se encuentran en el cemento hidratado (p.e. disminución de portlandita y ettringita, aparición de yeso en ciertos casos, aumento de calcita, etc.), según las características del clinker.

(continuará)