

Contribución al análisis y estudio de las posibilidades de variación de la cantidad de yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, como agresivo, del método acelerado de ensayo ASTM C 452. Parte I A

RAFAEL TALERO MORALES, Dr. en Química Industrial
IETcc/CSIC
Serrano Galvache, s/n, 28033 MADRID/España

Fecha de recepción: 3-XI-87

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, que se publicará en 4 partes, fue realizado como consecuencia de las discusiones y controversias surgidas, en su día, sobre el método acelerado de ensayo ASTM C 452-68 y particularmente sobre su contenido de SO_3 del 7,0 %.

Para intentar esclarecerlas, en lo posible, se ensayaron —según dicha técnica experimental— dos cementos portland P-1 (14,11 % C_3A) y P-31 (7,62 % C_3A) y un cemento puzolánico PUZ-8, todos ellos industriales, empleando cantidades de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) como agresivo, de tal manera que la mezcla-conglomerante correspondiente tuviera un contenido de SO_3 del 5,0 %, 7,0 %, 10,0 % y 14,0 %, respectivamente.

Los parámetros determinados en las probetas correspondientes en esta parte I A fueron el ΔL (%) y el $[\Delta L$ (%)]/g. cemento. En la misma se da cuenta principalmente de los resultados experimentales obtenidos y de su discusión correspondiente en su caso. Como consecuencia surge el concepto de GRADO DE RESPUESTA de un determinado parámetro sobre el grado de coincidencia entre los valores del mismo a las edades fundamentales del ensayo de 14 y/o 28 días, y la de 730 días o fin del ensayo.

SUMMARY

This research work, which will include four publications, was done as a result of the discussions, doubts and controversies which were originated some time ago about the ASTM C 452 method and specially on its 7.0 % SO_3 content.

To clarify this two portland cements P-1 (14.11 % C_3A) and P-31 (7.62 % C_3), all it industriels, were tested and a pozzolanic cement PUZ-8, by the ASTM C 452-68 method, but using gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, with aggressive contents of 5.0 %, 7.0 %, 10.0 %, 12.0 % and 14.0 % SO_3 , respectively.

The determined parameters in the correspondent specimens, in this part IA, were ΔL (%) and $[\Delta L$ (%)]/g. cement].

This first part IA contains the experimental results obtained mainly and the corresponding discussion. As result of this the concept ANSWER of the determined parameter is proposed.

I. INTRODUCCION

Como es sabido el método acelerado de ensayo o método de ensayo simplemente, ASTM C 452, es aplicable "únicamente a cementos portland", según figura expresamente en la INTRODUCCION del mismo. (No obstante, se aconseja ver detenidamente más adelante el punto 3.º de la presente introducción por la íntima relación y repercusión que tiene dicha aplicabilidad citada tan expresa y concreta).

El procedimiento del método acelerado de ensayo en cuestión se basa en la determi-

nación de la expansión de probetas de mortero 1 : 2,75, selenitoso, hechas con una mezcla del cemento portland a ensayar y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) —llamada comúnmente "mezcla-conglomerante selenitoso", o simplemente "mezcla-conglomerante"—, en tales proporciones que la mezcla-conglomerante selenitosa citada posea un contenido de SO_3 (*) (trióxido de azufre) del 7,0 %, en peso.

(*) Se refiere y referirá a lo largo de este trabajo: partes IA y IB y del que le sigue, partes IIA y IIB, a la cantidad equivalente de yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, pero expresada como SO_3 .

Del mismo modo también es de todos conocido que el método acelerado de ensayo en cuestión es uno de los más empleados, a nivel internacional, para la calificación del grado de resistencia de los cementos portland ante el ataque de los iones sulfato.

No obstante y pese a lo cual, e igual que los demás, dicho método de ensayo no ha dejado de ser debatido y discutido con amplitud por todos aquellos interesados en esta temática. Y como prueba de ello se expone aquí, entre otros muchos, algunos de los puntos más debatidos hoy día sobre el mismo:

1.º En cuanto a su grado de eficacia y realismo tecnológico, por estequiometría, al poder disponer tan sólo de un 7,0 % de SO_3^* , en su mortero selenitoso correspondiente, aquellos cementos portland que posean un contenido de C_3A superior al 7,87 % deberían continuar teniendo C_3A sobrante sin haber podido pasar a ettringita en sus probetas respectivas. Ello viene a estar de acuerdo implícitamente con las siguientes consideraciones:

- el estudio estequiométrico realizado por Calleja en su trabajo titulado "Puntos de vista sobre el contenido de yeso de los cementos portland" (1), y
- similar estudio derivado del anterior a propósito del método de ensayo ASTM C 452, realizado esta vez por P. García de Paredes en su trabajo titulado "Inalterabilidad de los conglomerantes frente al ataque de los sulfatos. Comparación de métodos para apreciarla" (2).

Por lo tanto, en tal caso y ante tal situación, las probetas de los mismos, a partir de una determinada edad, quizás podrían muy bien tener retracción en lugar de expansión, que es de lo que se trata, dado que, y como es sabido en tales situaciones, la ettringita inicialmente formada tendería quizás a pasar a fase Afm o monosulfoaluminato de calcio hidratado $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$, de menor volumen molecular que la ettringita ($319,10 \text{ cm}^3/\text{mol}$ contra $715,09 \text{ cm}^3/\text{mol}$, respectivamente).

Por otra parte este punto puede continuar siendo debatido en amplitud y profundidad, pues existen puntos de vista adicionales que se derivan igualmente de tal hecho estequiométrico como pueden ser, entre otros, la discusión sobre el mecanismo de formación de la ettringita sobre: si el de

* Por razones no explicadas, por los autores, sobre el método de ensayo en cuestión.

through-solution, si el topoquímico con o sin disolución previa, si el de las presiones osmóticas o cualquier otro de los existentes (5).

2.º La primera parte de la discusión anterior da pie a poder pensar con fundamento —según el sector profesional que se considere— en la necesidad de una mayor disponibilidad de yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, como agresivo en la mezcla-conglomerante cemento a ensayar más yeso, al objeto de que en el peor de los casos el cemento portland así ensayado, o de elevado contenido de C_3A —normalmente alrededor del 15 % en tal contenido (valor máximo esté especificado expresamente por la norma ASTM C 150-81 (3) y que en la actualidad se encuentra en vigor)—, el mismo posea la cantidad suficiente de yeso (por estequiometría 13,32 % de SO_3) e incluso sobre algo, con objeto de que todo el C_3A pase íntegramente a ettringita y origine con ellos el total de expansión (ΔL %) posible, en cada caso, en las probetas correspondientes y no sólo "una parte" del mismo.

Lógicamente se debe reconocer que, por la razón expuesta al principio de este punto, éste es uno de los más discutidos debido a los deseos e intereses de los diferentes sectores profesionales implicados, los cuales se encuentran aquí contrapuestos.

3.º En cuanto a las limitaciones de aplicabilidad del método de ensayo en cuestión, las cuales ya fueron denunciadas en 1967 por Pablo García de Paredes (11) (2), así como también, y más recientemente (1980), por el autor del presente artículo (4). Tales limitaciones vienen implícita y explícitamente indicadas en el artículo y en la introducción, respectivamente, del método de ensayo en cuestión, y en particular en esta última, cuando dice: "Este método es aplicable únicamente a cementos portland ..." (4).

No obstante, recientemente, merced a los trabajos de Tesis Doctoral de R. Talero Morales (5), se ha demostrado la posibilidad real de empleo de la técnica experimental del método de ensayo en cuestión ASTM C 452 para averiguar:

- el grado de resistencia al ataque de los iones sulfato de los cementos de mezcla, constituidos únicamente por cemento portland (clínker portland en su caso) y puzolana (1) hasta un 40 % del total de la masa de aquéllos (con su "óptimo de SO_3 " como "regulador de fraguado"), só-

lo que la especificación propuesta por dicho autor a la luz de tales trabajos ha resultado ser, de momento, algo diferente que para los portland [Véase la MEMORIA de la Tesis Doctoral citada (5). Este objetivo fue anunciado en su momento en un artículo realizado por este mismo autor (4)], y/o

- el “carácter” o “intencionalidad de comportamiento” de una puzolana dada y de él:
 - poder deducir su UTILIDAD MAS ADECUADA PARA UN FIN DETERMINADO*, así como también,
 - poder determinar la DOSIFICACION MAS ADECUADA de la(s) misma(s) —junto con la de SO_3 (u “óptimo de SO_3 ”) y clínker portland (o cemento portland en su caso) que la(s) acompañe en cada cemento de mezcla— para conseguirlo.

De todo lo cual se deduce el inusitado interés que al método de ensayo ASTM C 452 puede llegar a despertar, gracias a tales trabajos, entre los fabricantes y usuarios de cementos, máxime si la mayor parte de los que actualmente se consumen en la realidad son de mezcla.

- 4.º Referente a sus especificaciones puramente físicas y debido al valor de la expansión porcentual máxima permisible de las probetas correspondientes a la edad de 14 días de las mismas (ΔL_{14d} %), para poder calificar a un cemento portland como de “elevada resistencia al ataque de los iones sulfato”, que era del 0,045 % (9), ha pasado a ser en la actualidad del 0,040 % (7).

Por otra parte, y como se ha podido demostrar (5) (8), la especificación primera del 0,045 % ha discrepado en cuanto a su diagnóstico, calificativo del correspondiente derivado del análisis químico o mejor composición potencial, mediante los cálculos de Bogue, del cemento portland ensayado. De tal manera que se han producido y se pueden llegar a producir algunos casos (quizás poco numerosos, pero posibles) en los que mientras el método acelerado de ensayos ASTM C 452-85 y la norma ASTM C 150-84, Tabla 2A**, han calificado al cemento portland ensayado como de “elevada resistencia al ataque de los

* Resistencias mecánicas elevadas a edades iniciales o resistencia química y, más concretamente, a aguas y/o terrenos selenitosos, etc.

** Expansión por ataque de iones sulfato del cemento portland ensayado.

iones sulfato”; no así la Tabla 1 de la misma norma*, puesto que:

- el contenido de C_3A superaba ligeramente el valor tope máximo permisible del 5 % especificado, para tal tipo de cementos portland (7), entre otros,
- el contenido de $C_4AF + 2 C_3A$ superaba el valor tope máximo permisible del 20 % (especificado anteriormente entre otros) para tal tipo de cemento portland (9) y que, actualmente, ha pasado a ser del 25 % (7),
- o bien tales superaciones anteriores se verifican a un tiempo, o viceversa.

Del mismo modo, y por idéntica razón, puede llegar a ocurrir con la especificación segunda o vigente del 0,040 %.

Tales modificaciones citadas, tanto la concerniente a la especificación puramente física, como las correspondientes de tipo químico, surgieron en su día a conveniencia de unas discusiones razonadas, mantenidas por el sector productivo español de cementos (HISPACEMENT), en el Comité C-1 sobre Cementos de la ASTM, con la colaboración expresa prestada por este Instituto a través del autor de este trabajo mediante un INFORME (8) emitido por él mismo, fruto, entre otros, de sus trabajos de Tesis Doctoral, en la cual se hace hincapié sobre la conveniencia o necesidad de primar el ensayo de tipo físico, o ASTM C 452-85, o expansión por ataque de iones de sulfato sobre el puramente químico y su derivado correspondiente o composición potencial del cemento portland ensayado —fundamentalmente en el caso de que las limitaciones químicas se superen ligeramente y, de un modo especial, el contenido de C_3A —, para la calificación de tal tipo de cementos; ante la falta de exactitud de los ensayos, puramente químicos, así como de los cálculos de Bogue correspondientes, y la mayor desconexión de los mismos con el comportamiento en obra del cemento analizado, aquel ensayo —el de expansión por los iones sulfato— lógicamente siempre se deberá de encontrar algo más próximo a la realidad que el puramente químico.

Para mayor abundamiento, dicha idea fundamentada y mantenida por el autor se ve más avalada ante la invalidez total y manifiesta de los citados cálculos de Bogue

* Composición potencial del cemento portland anterior o mejores contenidos porcentuales de C_3A y/o C_4AF .

para poder calificar a los cementos de mezcla existentes en el mercado —sustitutivos en igualdad de condiciones de los portland— como de elevada, moderada o escasa, respectivamente, resistencia al ataque de los iones sulfato. De aquí la necesidad urgente de un método acelerado de ensayo para dicho fin, el cual ha quedado plenamente satisfecho mediante las aplicaciones surgidas al amparo de los trabajos de Tesis Doctoral del autor (5).

Asimismo, y por su posible conexión con este punto de discusión y algún(os) otro(s) —en especial los dos primeros de los expuestos con anterioridad—, el autor del presente artículo publicó un trabajo (12) en el que pudo demostrar que un contenido de SO_3 del 10,0 %, aproximadamente, la mezcla-conglomerante cemento portland (un P y un PY), a ensayar, más yeso, acortaba en algunos días la edad de diagnóstico; o lo que es lo mismo, que a igualdad de edad del ensayo el valor medio del incremento de longitud (ΔL %) de las probetas correspondientes a ambos cementos ensayados era algo superior con el 10,0 % de SO_3 que con el 7,0 %, como prescribe expresamente la norma en cuestión.

Así se podría continuar con algunos otros puntos de discusión sobre el método de ensayo ASTM C 452 que, pese a su posible gran interés, se encuentran más o menos alejados del tema que nos ocupa, como pueden ser entre otros:

- a) La calidad, tipología y granulometría de la arena silícica empleada (6).
- b) El grado de influencia del tiempo de fraguado y la velocidad de endurecimiento del mortero selenitoso con las dificultades de desmoldeado de las probetas correspondientes.
- c) La relación que puede existir entre las discrepancias de calificación, antes denunciadas, con el punto de discusión 4.º y la finura de molido del(los) cemento(s) portland ensayado(s).
- d) La propia cinética de formación de los sulfoaluminatos de calcio hidratados expansivos, pues mientras que unos autores preconizan que la formación de ettringita es la prioritaria en todos los casos para pasar con posterioridad a Fase Afm, en ausencia de C_3A , otros preconizan lo contrario, es decir, que en todos los casos primeramente se forma Fase Afm y ésta, con mayor cantidad de $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, pasaría seguidamente a ettringita,

Algunos de estos puntos se tratarán, oportunamente, en próximas publicaciones, bien en ésta u otras revistas nacionales y extranjeras del sector.

5.º En cuanto al agua de amasado necesaria para confeccionar el mortero selenitoso correspondiente es sabido que:

- antes de 1975 se medía en por ciento, de forma que el mortero fluya entre 100 % y 115 %, tal y como se determina en la Sec. 9 del método ANSI ASTM C 109-77 (método de la “mesa de sacudidas”), y
- después de 1975 quedó fijada:
 - en 194 ml para todos los cementos portland sin aireantes, y
 - en 184 ml para todos los cementos portland con aireantes.

Pues bien, por medio de los trabajos de la Tesis Doctoral del autor se ha demostrado que esta última agua de amasado, o relación agua/cemento de 0,485 es causa de que a igual edad durante el ensayo se haya originado un mayor número de casos en los que las probetas del cemento ensayado originan un menor ΔL (%) que las homónimas correspondientes amasadas mediante el método de la “mesa de sacudidas”. Por ello no ha de extrañar que este punto sea también uno de los más discutidos de todos, dado que los deseos e intereses de los diferentes sectores profesionales implicados se encuentran también en este punto contrapuestos.

6.º En lo referente a la edad de diagnóstico del ensayo, y su especificación correspondiente, hay que considerar:

- que en un principio y hasta el año 1969 fue la informal del 0,059 %, expansión máxima permisible (valor medio) de las probetas correspondientes a la edad de 28 días de las mismas, la cual se realizó en base a la propuesta implícita de I. Biczok (10) obtenida a su vez del Bull. ASTM n.º 212 (18),
- que a continuación, y a partir de 1970, pasó a ser del 0,045 % a la edad de 14 días, y
- que, finalmente, a partir de 1985 pasó a ser del 0,040 % a la edad también de 14 días existiendo no obstante, pese a su resolución actual en favor de esta última, la controversia científico-tecnológica sobre el grado de adecuación de la misma y su especificación correspondiente entre los distintos sectores profe-

sionales implicados, al igual que ocurriré en los puntos de discusión 2.º y 5.º

II. OBJETIVOS

Por todo lo cual, y en especial los puntos de discusión 1.º y 2.º, se ha realizado este trabajo a título de prueba exploratoria, al objeto de tratar de conocer con alguna aproximación:

1.º Qué valores de $\bar{\Delta}L$ % se obtendrán y qué grado de sensibilidad se alcanzará con el método de ensayo en cuestión, al disminuir hasta el 5,0 %, y aumentando al 10,0 %, 12,0 % y 14,0 %, respectivamente, el contenido del 7,0 % de SO_3 , especificado expresamente por la norma en cuestión.

2.º Con cuál de los porcentajes de SO_3 anteriores mostrarán los cementos, así ensayados, el máximo valor del parámetro,

ABSOLUTO: Incremento Porcentual de Longitud, ΔL (%), y

RELATIVO: Incremento Porcentual de Longitud por gramo de cemento ensayado

$$\left[\frac{\bar{\Delta}L (\%)}{\text{g. cemento } X} \right],$$

respectivamente.

3.º Con cuál de los porcentajes de SO_3 anteriores mostrarán los cementos así ensayados el máximo valor del parámetro Velocidad de Crecimiento Longitudinal de sus probetas $V_{cl} = [(\bar{\Delta}L \%) / \text{día}]$, el cual puede ser sinónimo en gran medida, y según las condiciones del medio, de cantidad potencial de ettringita formada a cada edad del ensayo y, comparativamente, de su velocidad de Formación o simplemente Velocidad de Reacción Expansiva.

(El presente objetivo se verá en la parte II* de este trabajo y que se publicará en un próximo número de esta revista).

III. PARTE EXPERIMENTAL

En esta fase se emplearon dos cementos portland denominándoles P-1 y P-31 y un cemento puzolánico que, a su vez, se le denominó como PUZ-8, y cuyos resultados del análisis químico respectivo (15) figuran en la Tabla 1. Como agresivo se empleó piedra natural de yeso, de un elevado grado de riqueza, cuyos resultados del análisis correspondiente figuran en la Tabla 1.

* A y B.

TABLA 1

Determinaciones químicas (%)	Cementos			Yeso
	P-1 (15)	P-31 (15)	PUZ-8 (*) (17)	CaSO ₄ · 2 H ₂ O (16)
P.F.	1,60	3,45	2,70	ver H ₂ O (40°C - 217°C)
R.I.	0,70	0,86	1,46	0,75
SiO ₂	19,18	18,13	24,58	0,26
Al ₂ O ₃	6,44	5,30	8,21	0,04
Fe ₂ O ₃	1,75	3,80	5,49	
CaO	63,94	61,68	46,08	32,54
MgO	1,48	1,82	3,70	0,36
Na ₂ O	0,90	0,76	0,39	0,02
K ₂ O	0,52	0,31	0,90	0,01
SO ₃	3,50	3,86	3,51	45,87
Total	100,01	99,97	100,02	99,98
H ₂ O (105°C)	0,24	0,33	1,05	20,13 (40°C - 217°C)
CaO libre	1,90	0,63	0,38	
COMPOSICION POTENCIAL (%)				
C ₃ S	51,05	58,70	-	CaSO ₄ · 2H ₂ O - 95,58
C ₂ S	16,48	7,70	-	CaSO ₄ · ½ H ₂ O y/o
C ₃ A	14,11	7,62	-	CaSO ₄ 2,47
C ₄ AF	5,33	11,56	-	CaCO ₃ 0,75
				MgCO ₃ 0,81
				H ₂ O a 40°C 0,41

(*) PUZ-8: Cemento Puzolánico constituido únicamente por portland y puzolana, según los datos aportados al respecto por el fabricante.

Cada cemento citado se ensayó conforme indica expresamente la técnica operatoria descrita en la norma ASTM C 452-68 (13). No obstante en este trabajo se emplearían, por las razones aducidas anteriormente, los porcentajes de SO_3 del 5,0 %; 7,0 %; 10,0 %; 12,0 % y 14,0 % (y 21,0 % en Parte II*) respectivamente, en las fórmulas que especifica expresamente la norma ASTM C 452-68 para dosificar la mezcla-conglomerante cemento a ensayar, más yeso, el lugar del 7,0 % fue ocupado independientemente por cada una de las cantidades de SO_3 previstas con anterioridad.

Por lo cual en la parte I*, del presente trabajo, únicamente van a figurar los valores correspondientes a los contenidos de SO_3 de las mezclas conglomerantes selenitosas con el 5,0 %; 7,0 %; 10,0 %; 12,0 % y 14,0 % de SO_3 , dejando para la parte II* los correspondientes a las del 21,0 % de SO_3 deducido de esta parte I.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS. DISCUSION E INTERPRETACION DE LOS MISMOS

Los resultados experimentales obtenidos se encuentran en las Figs. 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Los coeficientes de desviación respectivos han oscilado entre el 0,92 % y el 12,39 %.

DISCUSION

(A) Parámetro: $\bar{\Delta}L$ (%).

1.º A igualdad de cemento ensayado:

1. Caso del cemento portland P-1 (Fig. 1):

1.ª La evolución de los valores del parámetro $\bar{\Delta}L$ de sus probetas, a lo largo de todo el ensayo, ha sido la de aumentar progresivamente excepto en el caso del contenido de SO_3 del 5,0 % en su mezcla-conglomerante cemento P-1 + yeso, cuyas probetas han mostrado generalmente de principio a fin del ensayo marcada estabilidad de volumen; no obstante, en el resto de los casos diferentes al 5,0 % de SO_3 tal aumento ha sido: superior para el caso del 7,0 % de SO_3 sobre el resto, 10,0 % 12,0 % y 14,0 % de SO_3 , respectivamente, durante las edades del ensayo a 7, 14, 21 y 28 días, e inferior desde la edad de 60 días en adelante, hasta el punto de que las probetas

correspondientes a estos últimos porcentajes de SO_3 citados, o sea, 10,0 %; 12,0 % y 14,0 % de SO_3 , respectivamente, acabaron autodestruyéndose, por ataque selenitoso, a la edad común del ensayo (120 días), mientras que las del 7,0 % de SO_3 permanecieron íntegras y con la marcada estabilidad de volumen alcanzada tras su expansión previa durante los primeros 60 días de edad de las mismas hasta la actualidad, al igual que las del 5,0 % de SO_3 , sólo que lógicamente con un mayor crecimiento que las de este último contenido.

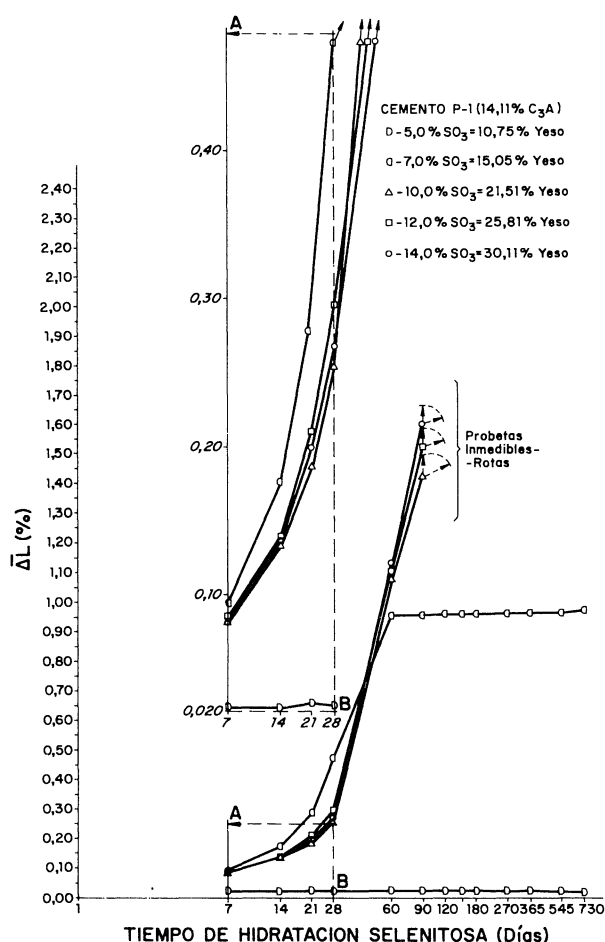


Fig. 1

2.ª Las clasificaciones que se obtienen a igual edad durante el ensayo de las distintas mezclas-conglomerantes selenitosas del cemento portland P-1, en función del valor del $\bar{\Delta}L$ de sus probetas respectivas —de menor a mayor valor, por este orden—, han sido las siguientes (Tabla 2):

* A y B.

TABLA 2

Edad (días)	Parámetro	Clasificación de las mezclas-conglomerantes selenitosas cemento portland, P-1 + yeso con 5,0 %, 7,0 %, 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de SO ₃ , en función de los valores de $\bar{\Delta}L$ % de sus probetas respectivas:
7	$\bar{\Delta}L_{xd} < (\%) <$	5,0% < 10,0% = 14,0% < 12,0% < 7,0%
⋮		⋮ ⋮ ⋮ ⋮ ⋮
60		5,0% < 7,0% < 14,0% < 12,0% < 10,0%
90		5,0% < 7,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0%
⋮		⋮ ⋮ ⋮ ⋮ ⋮
730		5,0% < 7,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0%
Contenido SO ₃ (%) mezcla-conglomerante cemento P-1 + yeso		5,0% < 7,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0%

Como se puede observar, tan sólo las clasificaciones correspondientes a las edades del ensayo comprendidas entre la de 90 y 730 días, son totalmente coincidentes con la que se obtiene ordenando, sin más, tales contenidos de SO₃ de menor a mayor valor, por este orden.

3.^a El valor de la relación agua/(cemento P-1 + yeso) o a/c, en cada caso, ha sido la siguiente (Tabla 3):

2. Caso del cemento portland P-31 (Fig. 2)

1.^a En este punto se puede decir otro tanto que en el caso del cemento portland P-1, discusión (A) 1.º 1.1.^a, con las siguientes diferencias:

a) Los valores del $\bar{\Delta}L$ de las probetas con el 7,0 % de SO₃ en su mezcla-conglomerante cemento P-31 + yeso, tan sólo son superiores sobre los del resto de las

TABLA 3

	Contenido de SO ₃ (%) de la mezcla-conglomerante cemento portland P-1 + yeso:				
	5,0%	7,0%	10,0%	12,0%	14,0%
Relación a/c	0,528	0,510	0,528	0,536	0,528

probetas de los demás contenidos de SO_3 , hasta la edad inicial de 21 días del ensayo, pues a partir de la edad de 28 días inclusive, solamente superan a los del 5,0 % y 10,0 % de SO_3 (igualan a los del 14,0 % de SO_3 , y no superan a los del 12,0 % de SO_3) para, a partir de dicha edad de 28 días hasta finalizar el ensayo, continuar superando tan sólo a los del 5,0 % de SO_3 y no, por el contrario, a los del resto de las mezclas-conglomerantes selenitosas ensayadas 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de SO_3 , al igual que ocurriere con el cemento portland P-1, a partir de la edad de 90 días en adelante.

b) La edad de autodestrucción selenitosa de las probetas con 10,0 %; 12,0 % y 14,0 % de SO_3 en su mezcla-conglomerante cemento P-31 más yeso, respectivamente, ha sido en este otro caso la de 270 días.

2.^a Las clasificaciones que se obtienen a igual edad durante el ensayo de las distintas mezclas conglomerantes selenitosas del cemento portland P-31, en función del valor

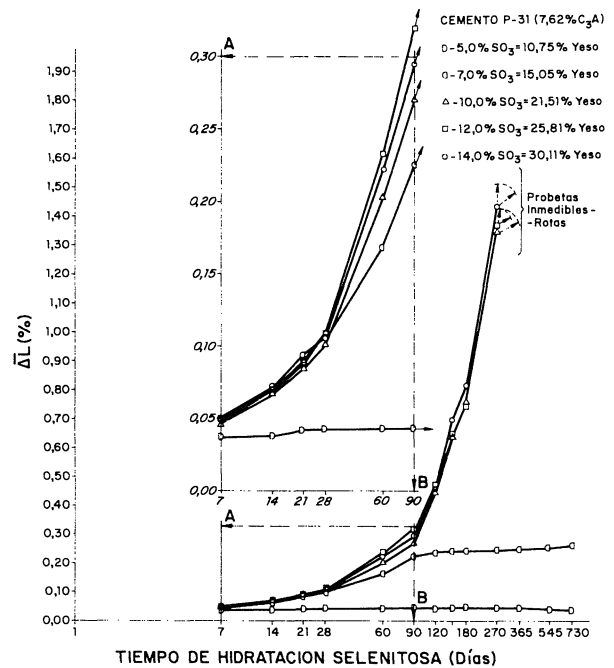


Fig. 2

del $\bar{\Delta L}$ de sus probetas respectivas —de menor a mayor valor, por este orden—, han sido las siguientes (Tabla 4):

TABLA 4

Edad (días)	Parámetro	Clasificación de las mezclas-conglomerantes selenitosas cemento portland, P-31 + yeso con 5,0 %, 7,0 %, 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de SO_3 , en función de los valores de $\bar{\Delta L}$ % de sus probetas respectivas:
7	$< \bar{\Delta L}_{xd} <$ (%)	5,0% < 10,0% < 14,0% < 12,0% < 7,0%
⋮		⋮
28		5,0% < 10,0% < 7,0% = 14,0% < 12,0%
60		5,0% < 7,0% < 10,0% < 14,0% < 12,0%
⋮		⋮
150		5,0% < 7,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0%
180		5,0% < 7,0% < 12,0% < 10,0% < 14,0%
270		5,0% < 7,0% < 10,0% < 14,0% < 12,0%
⋮		⋮
730		5,0% < 7,0% < 10,0% 12,0% y 14,0%, inclasificables entre si
Contenido de SO_3 (%) mezcla-conglomerante cemento P-31 + yeso		5,0% < 7,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0%

A continuación hay que remitirse a todo lo expuesto en la Discusión (A). 1.º1.2.ª anterior, sólo que en este caso partiendo de la edad de 150 días, hasta la de 730 días o fin del ensayo.

3.ª El valor de la relación agua/cemento P-31 + yeso o a/c, en cada caso, ha sido la siguiente (Tabla 5):

3. Caso del cemento puzolánico PUZ-8 (Fig. 3)

1.ª La evolución de los valores de este parámetro ΔL de sus probetas, a lo largo de todo el ensayo, ha sido la de aumentar progresivamente hasta hacerse constante, tanto más pronto cuanto menor ha sido el contenido de SO_3 de su mezcla-conglomerante

TABLA 5

	Contenido de SO_3 (%) de la mezcla-conglomerante cemento portland P-31 + yeso:				
	5,0%	7,0%	10,0%	12,0%	14,0%
Relación a/c	0,518	0,520	0,526	0,528	0,530

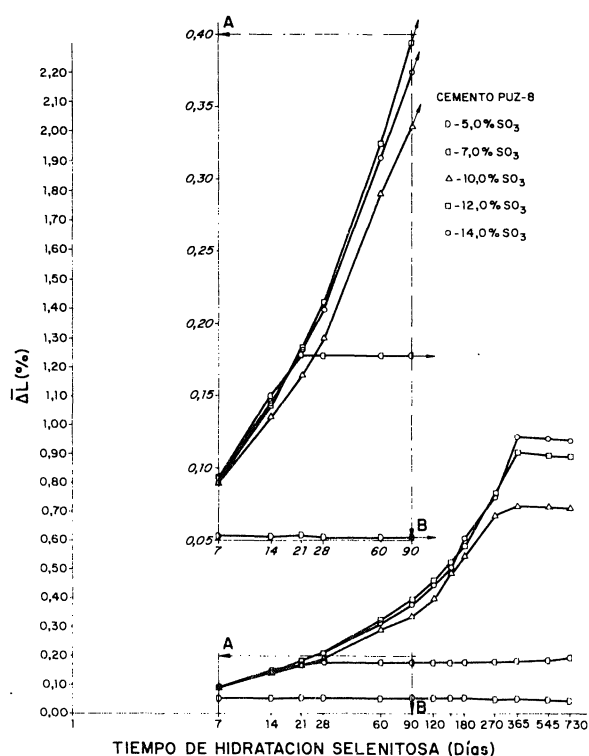


Fig. 3

rante selenitosa y viceversa, de tal modo que:

- las del 5,0 % de SO_3 nacieron y permanecieron prácticamente constantes de principio a fin del ensayo (es decir, mostraron una marcada estabilidad de volumen),
- las del 7,0 % de SO_3 alcanzaron la constancia de valores citados prácticamente a la edad de 28 días, y
- las del 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de SO_3 alcanzaron la constancia de valores citados a la edad común de 365 días.

Habiendo demostrado todas ellas una ligerísima retracción a las edades finales del ensayo, excepto la del 7,0 % de SO_3 que manifestó una ligerísima expansión.

2.ª Las clasificaciones que se obtienen a igual edad durante el ensayo de las distintas mezclas-conglomerantes selenitosas del cemento puzolánico PUZ-8, en función del valor del ΔL de sus probetas respectivas —de menor a mayor valor, por este orden—, han sido las siguientes (Tabla 6):

TABLA 6

Edad (días)	Parámetro	Clasificación de las mezclas-conglomerantes-selenitosas cemento puzolánico PUZ-8 + yeso con 5,0 %, 7,0 %, 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de SO ₃ , en función de los valores de ΔL % de sus probetas respectivas:
7	$\bar{\Delta L}_{xd} <$ (%)	5,0% < 10,0% < 14,0% < 7,0% = 12,0%
14		5,0% < 10,0% < 14,0% < 12,0% < 7,0%
21		5,0% < 7,0% < 10,0% < 14,0% < 12,0%
28		5,0% < 7,0% < 10,0% < 14,0% < 12,0%
⋮		⋮ ⋮ ⋮ alternancias diversas
⋮		⋮ ⋮ ⋮ entre el 12,0% y 14,0%
⋮		⋮ ⋮ ⋮
365 a 730		5,0% < 7,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0%
Contenido de SO ₃ (%) mezcla-conglomerante cemento PUZ-8 + yeso		5,0% < 7,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0%

A continuación remitirse a todo lo dicho en la discusión (A) 1.º 1.1.ª y 1.º 2.2.ª anteriores, sólo que en este caso partiendo de la edad de 365 días, hasta la de 730 días o fin del ensayo.

3.ª El valor de la relación agua/cemento PUZ-8 + yeso o a/c, en cada caso, ha sido la siguiente (Tabla 7):

2.º A igual contenido de SO₃ (%) de la mezcla-conglomerante selenitosa cemento "X" + yeso:

1.ª A igual edad, durante el ensayo, la clasificación que se obtendría de los cementos así ensayados y comparados, en función del valor del parámetro ΔL de sus probetas respectivas —de menor a mayor va-

TABLA 7

	Contenido de SO ₃ (%) de la mezcla-conglomerante cemento puzolánico PUZ-8 + yeso				
	5,0%	7,0%	10,0%	12,0%	14,0%
Relación a/c	0,544	0,540	0,542	0,538	0,534

lor por este orden—, ha sido la siguiente (Tabla 8):

sólo que las edades de creación y/o mantenimiento de iguales clasificaciones obtenidas,

TABLA 8

Edad (días)	Parámetro	Clasificación de los cementos ensayados a igual contenido de SO ₃ (%) de su mezcla-conglomerante selenitosa y edad del ensayo igual, en función del valor del parámetro:					
		a) $\bar{\Delta}L$ % de sus probetas respectivas, de menor a mayor valor					
		5,0%	7,0%	10,0%	12,0%	14,0%	
7	$\bar{\Delta}L$ (%)				P-31 < P-1 < PUZ-8		
14							
21			P-31 < PUZ-8 < P-1				
28							
60					P-31 < PUZ-8 < P-1		
90							
120			P-1 < P-31 < PUZ-8				
150							
180							
270							
365				PUZ-8 < P-31 < P-1			
545							
730							
			b) $[\bar{\Delta}L$ %/g. cemento] de sus probetas respectivas, de menor a mayor valor				
7		$[\bar{\Delta}L$ (%)/g. cemento]				P-31 < P-1 < PUZ-8	
14							
21			P-31 < PUZ-8 < P-1				
28							
60					P-31 < PUZ-8 < P-1		
90							
120			P-1 < P-31 < PUZ-8				
150							
180							
270							
365				PUZ-8 < P-31 < P-1			
545							
730							

En definitiva, cuanto menor ha sido el contenido de SO₃ de la mezcla-conglomerante selenitosa —caso del 5,0 %—, el cemento cuyas probetas han mostrado mayor estabilidad de volumen ha sido paradójicamente el P-1, seguido del P-31 y del PUZ-8; ocurre todo lo contrario entre las probetas con el 7,0 %, 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de SO₃ en su mezcla-conglomerante selenitosa, es decir, las de menores valores de $\bar{\Delta}L$ se manifestaron a partir de la edad de 90 días en el caso del 7,0 % de SO₃, y de 150 días, en el caso del 10,0 %, 12,0 % y del 14,0 % de SO₃ en adelante; hasta finalizar el ensayo han sido las del cemento PUZ-8 precedidas de las del P-31 y éstas de las del P-1.

Respecto a igual estudio comparativo, realizado mediante el parámetro relativo ($\bar{\Delta}L$ /g. cemento), se puede decir que ocurre otro tanto,

no han resultado ser totalmente coincidentes con las correspondientes al parámetro absoluto $\bar{\Delta}L$, citadas anteriormente.

(B) Parámetro: $\bar{\Delta}L$ %/g. cemento (*)
(Figs. 4, 5 y 6)

(*) Antes de entrar a discutir los valores de este parámetro derivado ($\bar{\Delta}L$ %/g. cemento) se hace constar que el comparable debería ser para el caso de los portland, éste otro parámetro también derivado ($\bar{\Delta}L$ %/g. clínker), al no poder suponer que todo el contenido de SO₃ de aquél se encuentra en forma de yeso CaSO₄.2 H₂O, como regulador de fraguado, con lo cual el error que se cometería en tal caso sería un hecho. Por ello se ha preferido admitir este otro error al dividir por el total de gramos de cemento empleado, pues el mismo no afecta prácticamente para nada el objetivo propuesto y facilita el poderlo alcanzar igualmente en el caso del cemento puzolánico PUZ-8.

1.º A igualdad de cemento ensayado:

En este caso no interesa llevar a cabo la discusión de la evolución de los valores de este parámetro en el transcurso del ensayo de un cemento dado, pues todos ellos tienen una evolución bastante semejante a la de los absolutos ΔL % (compruébase si se considera necesario).

Por el contrario sí resulta de interés la

comparación individualizada de los valores para un sólo cemento y a igual edad durante el ensayo del mismo. Así se tiene que, según ello, las clasificaciones que se obtienen a igual edad durante el ensayo de las distintas mezclas-conglomerantes selenitosas del cemento P-1, P-31 y PUZ-8, en función del valor de este parámetro de sus probetas correspondientes —de menor a mayor valor, por este orden—, han sido las reflejadas en la tabla 9.

TABLA 9

Edad (días)	Parámetro	Clasificación de las mezclas-conglomerantes selenitosas cemento P-1 ó P-31 ó PUZ-8 + yeso, con 5,0 %, 7,0, 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de SO ₃ , en función de los valores del parámetro expuesto:									
		CEMENTO P-1									
7	$\left[\frac{\Delta L (\%)}{\text{g. cemento}} \right] \times 10^{-4}$	5,0%	<	10,0%	<	7,0%	<	12,0%	<	14,0%	
⋮		⋮		⋮		⋮		⋮		⋮	
21		5,0%	<	10,0%	<	12,0%	<	14,0%	<	7,0%	
⋮		⋮		⋮		⋮		⋮		⋮	
60		5,0%	<	7,0%	<	10,0%	<	12,0%	<	14,0%	
730		5,0%	<	7,0%		(*)		(*)		(*)	
			CEMENTO P-31								
7			5,0%	<	10,0%	<	7,0%	<	12,0%	<	14,0%
14			5,0%	<	7,0%	<	10,0%	<	12,0%	<	14,0%
21			5,0%	<	10,0%	<	7,0%	<	12,0%	<	14,0%
28			5,0%	<	7,0%	<	10,0%	<	12,0%	<	14,0%
⋮			⋮		⋮		⋮		⋮		⋮
90			5,0%	<	7,0%	<	10,0%	<	14,0%	<	12,0%
120			5,0%	<	7,0%	<	10,0%	<	12,0%	<	14,0%
⋮			⋮		⋮		⋮		⋮		⋮
545			5,0%	<	7,0%	<	21,0%		(*)		(*)
730		5,0%	<	7,0%		(*)		(*)		(*)	
		CEMENTO PUZ-8									
7		5,0%	<	7,0%	<	10,0%	<	12,0%	<	14,0%	
⋮		⋮		⋮		⋮		⋮		⋮	
730		5,0%	<	7,0%	<	10,0%	<	12,0%	<	14,0%	
Contenido de SO ₃ (%) mezcla-conglomerante cemento + yeso		5,0%	<	7,0%	<	10,0%	<	12,0%	<	14,0%	
(*) Probetas Rotas: Imposible la realización de su estudio comparativo											

Como se puede comprobar existen mayoría de casos coincidentes con esta última clasificación, que no coincidentes con la misma, lo cual nos conduce a poder pensar, con fundamento, en la necesidad de continuar investigando la influencia que puede ejercer sobre los valores de dicho parámetro derivado (ΔL %/g. cemento) la presencia de una mayor cantidad de yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, como agresivo; por ejemplo el 21,0 % para el caso de los cementos de mezcla constituidos únicamente por portland y puzolana(s) naturales y/o artificiales, por ser de los que más se están empleando en la actualidad.

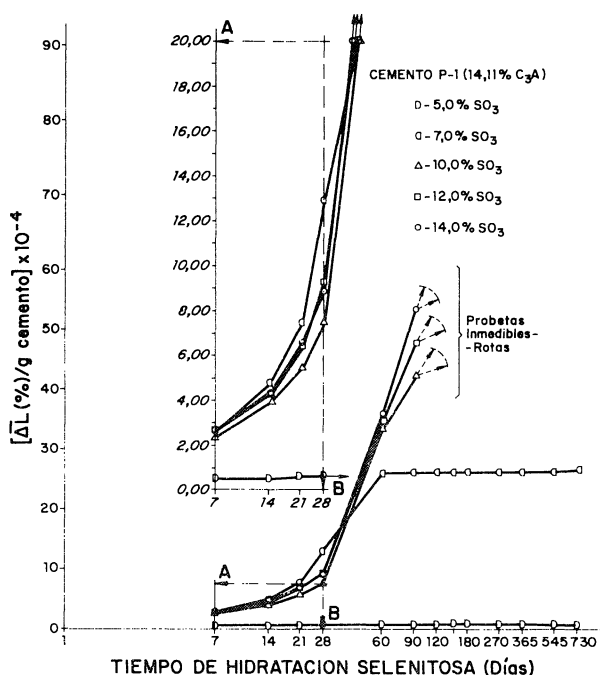


Fig. 4

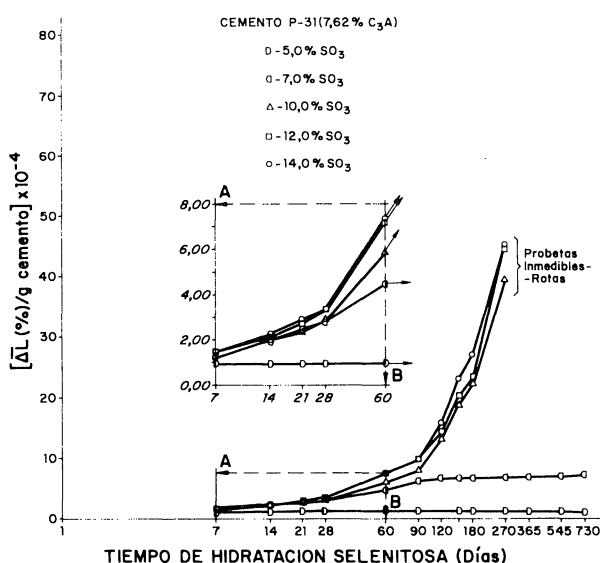


Fig. 5

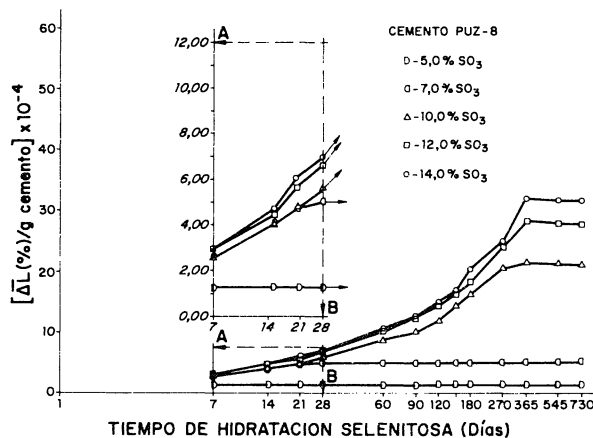


Fig. 6

2.º A igual contenido de SO_3 de la mezcla conglomerante cemento "X" + yeso y, a igual edad del ensayo, se cumple íntegramente todo lo dicho para el caso del parámetro ΔL (%) en la discusión (A).2.º

(C) Comparación del GRADO DE RESPUESTA de cada parámetro determinado:

Se entiende por GRADO DE RESPUESTA de un parámetro el grado de coincidencia con la realidad (18) de la calificación dada, mediante el mismo, al cemento ensayado; siendo deseable que para obtener tal calificación, el parámetro en cuestión muestre el máximo valor posible, en cada caso, a las edades fundamentales del ensayo de 14 y/o 28 días. Dicho valor máximo deberá corresponder a la mezcla-conglomerante selenitosa de contenido de SO_3 más adecuado, según los resultados experimentales aquí obtenidos y al sector industrial implicado en esta temática; que se consideren, y deberá coincidir, al menos, en calificación con la correspondiente derivada del valor de dicho parámetro a la edad de 730 días, proporcionado por él mismo o con el de alguno(s) de los contenidos de SO_3 mayores que él; y cuanto mayor, mejor todavía.

De las tres edades expuestas, las dos primeras se ha debido a su marcado interés tecnológico, dada su posible trascendencia para la creación y puesta a punto de ensayos acelerados adecuados al caso, mientras que la última dado su interés ha sido, para tratar de comparar el grado de repetibilidad de respuesta de todas o sólo de alguna(s) de las dos anteriores.

Pues bien, según ello, mientras que el parámetro ΔL % se ve favorecido mayormente a edades iniciales y en desigual medida por los contenidos de SO_3 del 7,0 %; el 12,0 %, en el caso de los dos cementos que han mostrado

TABLA 10

Edad (días)	Contenido de SO ₃ de las mezclas-conglomerantes selenitosas que proporcionan el valor máximo de $\bar{\Delta}L$ e ($\bar{\Delta}L/g.$ cemento) a las edades de 7, 14, 28 y 730 días de las probetas de 1" × 1" × 11 1/4" de los cemento P-1, P-31 y PUZ-8.					
	$\bar{\Delta}L$ %			$\bar{\Delta}L$ %/g. cemento		
	P-1	P-31	PUZ-8	P-1	P-31	PUZ-8
7	7,0%	7,0%	12,0%	14,0%	14,0%	14,0%
14	7,0%	7,0%	7,0%	14,0%	14,0%	14,0%
28	7,0%	12,0%	12,0%	7,0%	14,0%	14,0%
730	14,0%	12,0%	14,0%	14,0%	14,0%	14,0%

mejor y distinto comportamiento (con calificativo de no elevado) ante el ataque de los iones sulfato, como han sido el P-31 y PUZ-8, de peor a mejor en dicho orden, principalmente por el contenido de SO₃ del 7,0 % en el caso del cemento P-1 (que ha sido el que peor comportamiento ha mostrado de los tres en-

sayados y comparados en este trabajo); el parámetro $\bar{\Delta}L$ (%)/g. cemento se ve favorecido por el contrario, mayormente en casi todos los casos por el contenido de SO₃ del 14,0 % [véase lo expuesto, a propósito de este parámetro, a continuación del punto 2.º de la interpretación de este trabajo (19)].

VI. BIBLIOGRAFIA

- (1) J. CALLEJA: "Puntos de vista sobre el contenido de yeso de los cementos portland. Mat. de Const. n.º 120, pp. 41-56, oct.-nov.-dic. 1965, I.E.T.c.c. Madrid.
- (2) P. GARCIA DE PAREDES Y GAIBROIS: "Inalterabilidad de los conglomerantes frente al ataque de los sulfatos. Comparación de métodos para apreciarla". Cuaderno de Investigación n.º 12, del I.E.T.c.c., Dic. 1967.
- (3) ASTM C 150-81: Standard Specification for Portland Cement; ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. Part 13. Cement. Lyme Gypsum, 1982.
- (4) R. TALERO: "Método de ensayo patrón para medir la expansión potencial de morteros de cemento portland, expuestos a la acción de los sulfatos". Mat. de Const. n.º 177, enero-feb.-marzo, 1980, I.E.T.c.c. Madrid.
- (5) R. TALERO: "Contribución al estudio analítico y físico-químico del sistema: Cementos puzolánicos-yeso-agua". Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1986.
- (6) ASTM C 778-80 a: Standard Specification for Standard Sand, ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Section 4, Construction, Volume 04.01, Cement Lyme, Gypsum, 1983.
- (7) ASTM C 150-85: Id., Section 4, Construction, Volume 04.01, Cement Lyme Gypsum, 1985.
- (8) R. TALERO: Informe emitido para seis HISPACEMENT S.A. en la persona de D. Juan Puig, sobre "Las especificaciones que los cementos portland de alta resistencia a los iones sulfato deben cumplir".
- (9) ASTM C 150-84: Id., Section 4, Construction, Volume 04.01, Cement Lyme, Gypsum, 1984.
- (10) I. BICZOK: Corrosión y Protección del Hormigón. Ed. URMO, C/ Espartero n.º 10, Bilbao, España.
- (11) W. LERCH, F. A. HVEEM, W. S. WEAVER, D. G. MILLER, E. J. WECHTER Y E. G. SWENSON: "A Performace Test for he Potential Sulfate Resistance of Portland Cement". ASTM Bull. n.º 212, Feb. 1956.
- (12) R. TALERO: "Durabilidad de los conglomerantes hidráulicos frente a los sulfatos. Introducción al estudio de una posible modificación del método ASTM C 452-68". ION, Vol. XXXIV, n.º 394, pp. 343-350.

- (13) ASTM C 452-68: Standard Test Method for Potential Expansi3n de Portland Cement. ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Part 7 Cement, Lyme, Gypsum, 1968.
- (14) ASTM C 230: Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Part 13, Cement, Lyme Gypsum, 1981.
- (15) RC-75: Pliego de Condiciones para la Recepci3n de Cementos, B.O.E. n.º 206, 28-8-75.
- (16) ASTM C 471: Methods for Chemical Analysis of Gypsum and Products. ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Part 13, Cement, Lyme Gypsum, 1981.
- (17) ASTM C 595-83: Standard Specification for Blended Hydraulic Cements ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Section 4, Construction, Volume 04.01, Cement; Lyme, Gypsum 1985.
- (18) Bull. ASTM n.º 212, Feb. 1986.
- (19) R. TALERO: Parte IB de este trabajo, a publicar pr3ximamente en esta misma revista.

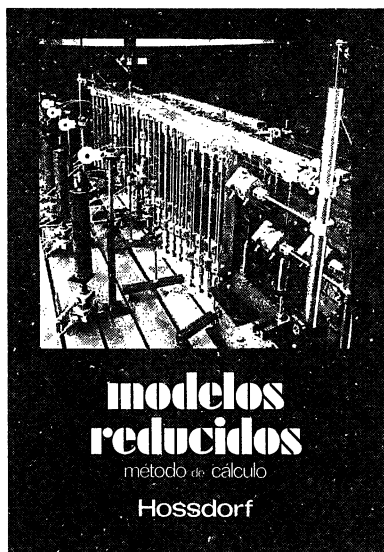
(Continuar3))

RECONOCIMIENTO:

Deseo agradecer a los componentes del E. I. Durabilidad, D. Felipe Cantero Palacios y D. Manuel Cantero Palacios, la colaboraci3n prestada en la realizaci3n de este trabajo. Asimismo a Dña. M.ª Isabel Jim3nez Garc3a y a Dña. Raquel Canellada Llavona el mecanografiado de la misma y a D. Juan Jos3 L3pez del Amor y D. Jos3 D3az Salado las fotograf3as realizadas.

* * *

publicaciones del i.e.t.c.c.



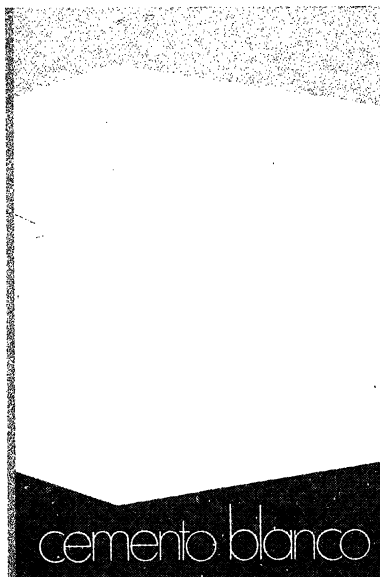
Modelos reducidos. Método de cálculo

H. Hossdorf, Ingeniero Civil

La t3cnica de los ensayos en modelos reducidos de estructuras sufre hoy d3a una decisiva metamorfosis. Hasta hace poco era un medio m3s bien de artesan3a, que no siempre era tomado en serio por los acad3micos teorizantes para comprender el comportamiento resistente de las estructuras complejas y al que se acudi3 las m3s de las veces, como a un 3ltimo remedio debido a sus indiscutibles insuficiencias. Sin embargo, en poco tiempo y gracias a su conexi3n con los ordenadores digitales, se ha transformado en un instrumento cient3ficamente valioso, que no puede quedar a un lado en la pr3ctica diaria del Ingeniero Projectista.

Un volumen encuadernado en cart3n3 plastificado con lomo de tela, de 17 x 24 cm, compuesto de 250 p3ginas, 158 figuras y fotograf3as.

Precios: 1.800 ptas.; \$ USA 26.00.



Cemento blanco

Juli3n Rezola
Ingeniero Qu3mico Dipl. I. Q. S.

Sabido es que existe una extensa y documentada bibliograf3a sobre el cemento gris; en cambio, no puede decirse lo mismo acerca del cemento portland blanco, ya que los escritos existentes se refieren tan s3lo a algunas peculiaridades que le distinguen de aqu3l.

El autor nos ofrece sus profundos conocimientos y su larga experiencia tanto en laboratorio como en fabricaci3n.

La parte descriptiva del libro se complementa con gr3ficos, diagramas y fotograf3as de gran utilidad, destinados a conseguir la aplicaci3n apropiada de este aglomerante.

Un volumen encuadernado en cart3n3 p3licado, de 17,4 x 24,3 cm, compuesto de 395 p3ginas, numerosas figuras, tablas y abacos.

Precios: España, 1.700 ptas.; extranjero, \$ 24.00.



La presa bóveda de Susqueda

A. Rebollo,
Dr. Ingeniero de Caminos

El esfuerzo del constructor de presas se sitúa, por su pretensi3n de perennidad, a contracorriente de las tendencias de la civilizaci3n actual, caracterizada por lo fungible. Pueden evocarse las 10.000 grandes presas en funcionamiento o en construcci3n que est3n envejeciendo y reclaman los cuidados gerontol3gicos para mantener y perfeccionar su servicio y garantizar su inalienable pretensi3n de perennidad. En la medida en que todas nuevas obras, grandes o pequeñas, son portadoras de riesgos ecol3gicos y, a veces, catastr3ficos, que aumentan con el envejecimiento, la gerontolog3a de las presas es todo un empleo. La acci3n adelantada de Arturo Rebollo en este terreno marca un camino a seguir para todos los que aman su propia obra con la devoci3n paternal que 3l ha puesto en Susqueda.

Un volumen encuadernado en cart3n3 plastificado con lomo de tela, de 18 x 24,5 cm, compuesto de 408 p3ginas, 330 figuras y fotograf3as y 39 tablas.

Precios: 1.700 ptas.; extranjero, \$ USA 24.00.