

## 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 (1) (2) y (3) Parte IIB

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

Fecha de recepción: 31-X-1988

### RESUMEN

*En primer lugar el lector debe remitirse a los resúmenes de las partes IA, IB y IIA de este trabajo (publicadas en los N.ºs 209, 211 y 212, respectivamente, de Materiales de Construcción) con objeto de que pueda tener una idea más clara del tema que se desarrolla.*

*El empleo de mayores cantidades de yeso, como agresivo, que el 15,05 % ( $\approx 7,0$  % de  $\text{SO}_3$ ) especificado por el método ASTM C 452, ha demostrado un interés cierto por parte de los usuarios de cemento y de aquellos que hayan de juzgar y/o aconsejar y/o decidir el empleo, o no, de un determinado cemento en base a su dictamen.*

*En general, el grado de respuesta del parámetro empleado en el caso del 21,0 % de  $\text{SO}_3$  y edad de las probetas de 14 días, seguido del 12,0 % de  $\text{SO}_3$  y edad de 28 días, parecen ser los más apropiados para obtener una calificación más precisa de los cementos portland y puzolánico ensayados. Por otra parte, mediante el contenido de  $\text{SO}_3$  del 21,0 %, se ha logrado demostrar definitivamente que no todos los cementos puzolánicos son de elevada o moderada resistencia al ataque de aguas selenitosas.*

*Se recomienda llevar a cabo una investigación apropiada, racional y representativa de TODOS los cementos puzolánicos para confirmar si esta última conclusión es extensible, o no, a todos ellos.*

### SUMMARY

*The reader should first refer to the summary of the IA(1), IB(2) and IIA(3) parts of this work (published in Materiales de Construcción nos. 209, 211 and 212, respectively) in order to have a clearer idea of the subject being dealt with herein.*

*The use of the larger quantities of gypsum as aggressive agent than the 15,05 % ( $\approx 7.0$  %  $\text{SO}_3$ ) specified by the ASTM C 452 method has shown its possible interest to users of cement and those who have to judge and/or recommend, or otherwise, its employment.*

*In general the DEGREE OF RESPONSE of the parameter  $\Delta L$  (%) in the case of the 21,0 %  $\text{SO}_3$  and 14 days age test, continued by the 12,0 % and 28 days age test, appear to be more appropriated to evaluate more precisely the portland and pozzolanic cements which are tested thus.*

*The 21,0 %  $\text{SO}_3$  content test has shown that not ALL THE POZZOLANIC CEMENTS have high or moderate sulphate resistance against seleniteuse water attack in contrast to the resposse shown by the rest of the cements with smaller  $\text{SO}_3$  contents tested.*

*It is recommended to carry out a appropriate, rational and representative investigation of pozzolanic cements to confirm, or otherwise, these last conclusion on those cements.*

### I. INTRODUCCION

En la parte IIA (1) del presente trabajo se da cuenta, fundamentalmente, de la Discusión de los resultados experimentales obtenidos en el mismo, y en la presente IIB se da cuenta de la INTERPRETACION, CONCLUSIONES Y DE-DUCCIONES obtenidos de los mismos. Para ello, y adicionalmente, en esta parte IIB del presente trabajo se encuentran además el resto de los resultados experimentales obtenidos, los cuales figuran en las fotografías de la 1 a la 17 inclusive.

### II. INTERPRETACION CORRESPONDIENTE A LA DISCUSION DE LA PARTE IIA (1).

(A) Parámetro:  $\Delta L$  (%)

En gran medida es válido todo lo dicho referente a este parámetro  $\Delta L$  (%) en la parte IB de este trabajo (2), pudiéndose añadir únicamente a la misma que los resultados experimentales obtenidos en esta segunda parte vienen a confirmar la posibilidad de empleo del contenido de  $\text{SO}_3$  del 21,0 % para diferen-

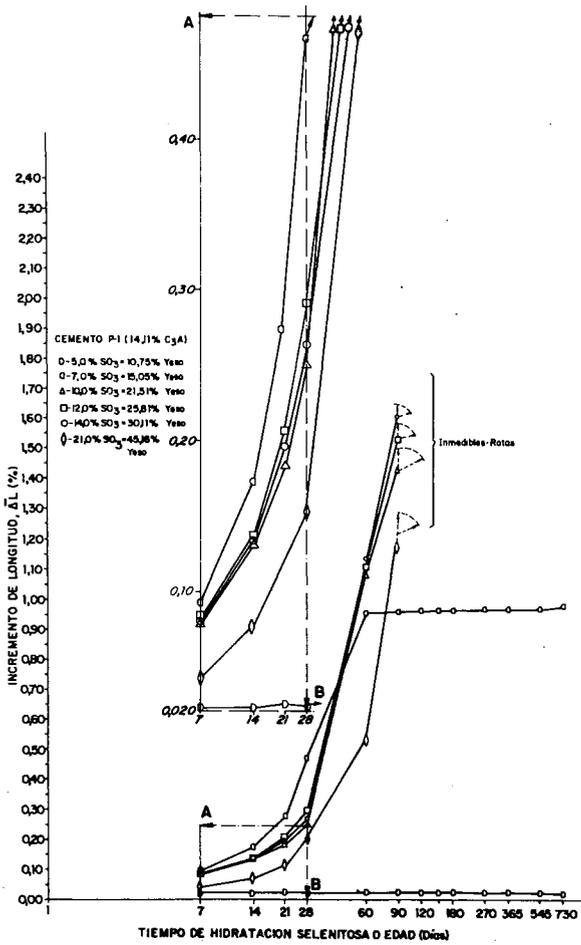


Fig. 1

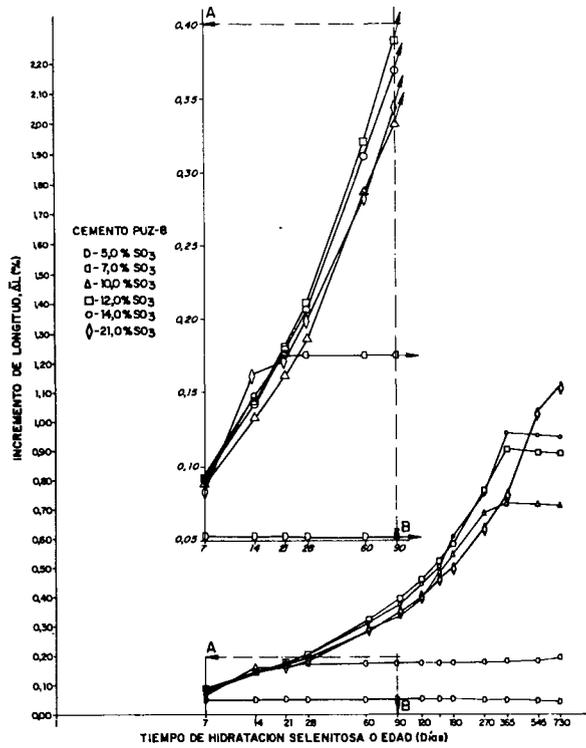


Fig. 3

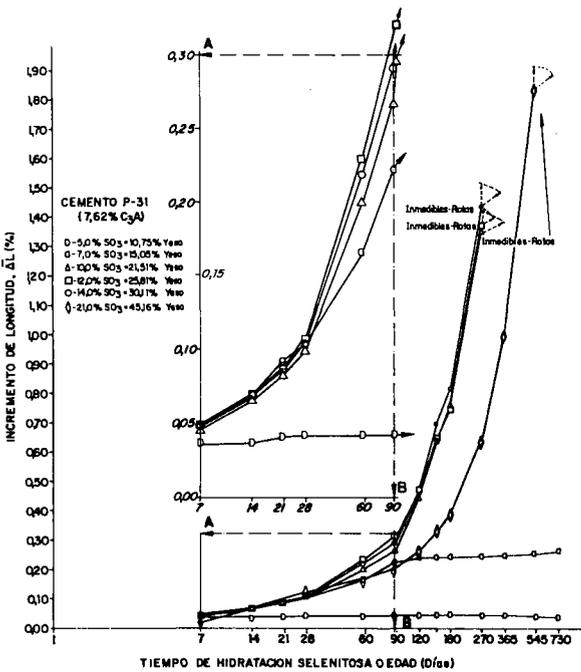


Fig. 2

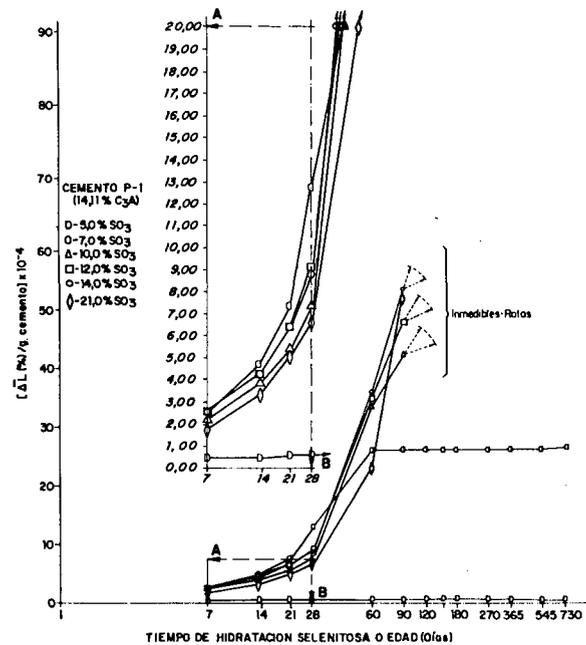


Fig. 4

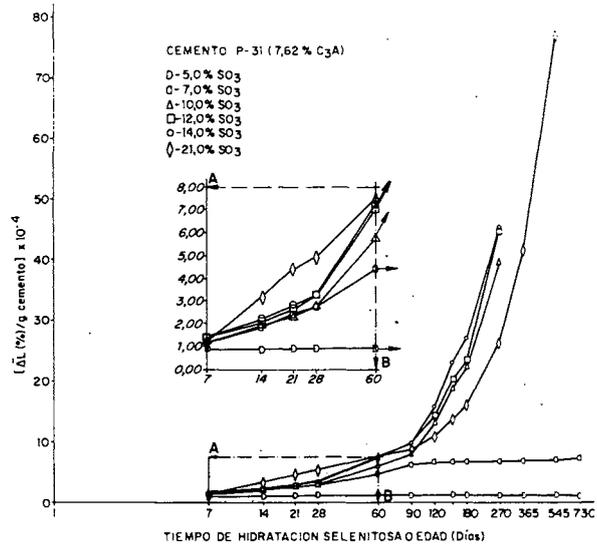


Fig. 5

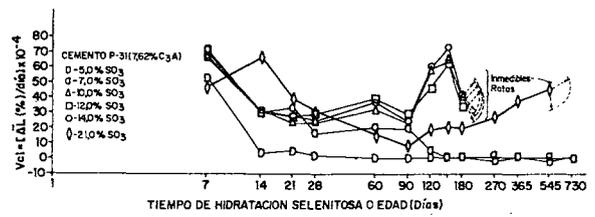


Fig. 8

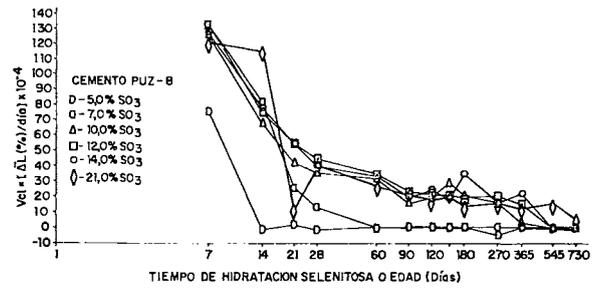


Fig. 9

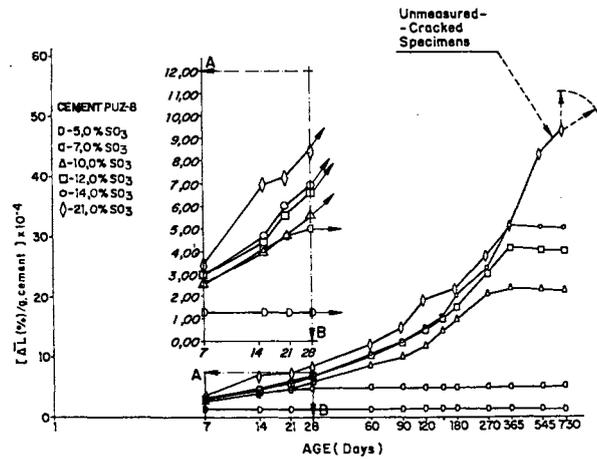


Fig. 6

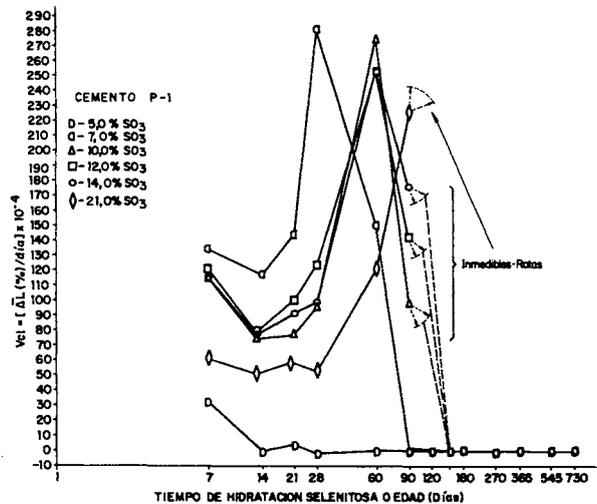


Fig. 7

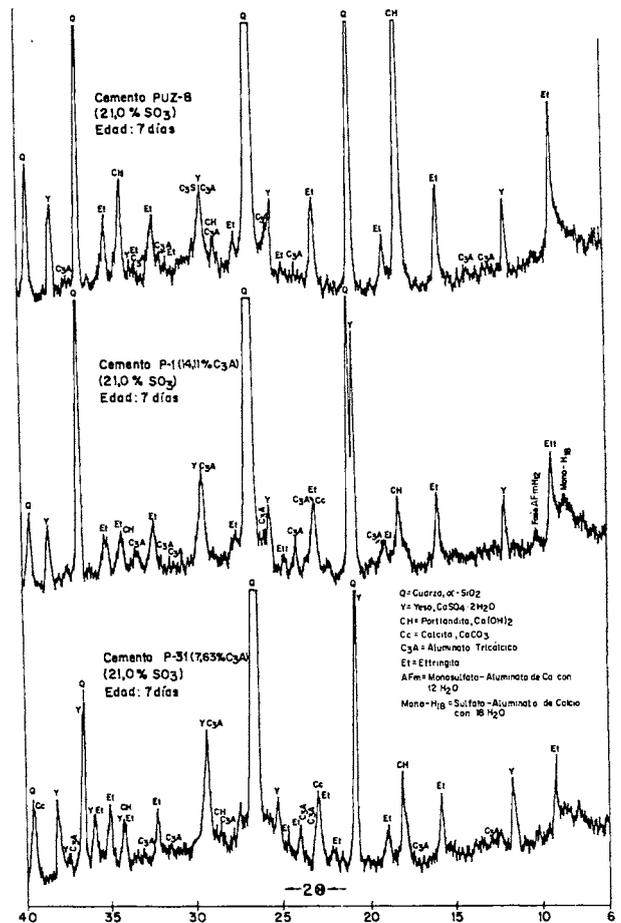


Gráfico nº 1

ciar con prontitud y mayor nitidez los cementos de elevada resistencia al ataque de los iones sulfato de aquellos otros que no lo son tanto (Tablas 3 y 5).

No obstante llama poderosamente la atención el hecho de que en la clasificación correspondiente obtenida del cemento P-1 (Tabla 1), la posición que ocupan las probetas constituidas por dicho P-1 con 21,0 % de SO<sub>3</sub>, vaya a continuación de las del 5,0 % de SO<sub>3</sub>. Esto podría inducirnos a error al pensar, sin fundamento, que lo que está ocurriendo en ambos tipos de probetas es cuantitativamente semejante o

muy aproximado. Por esta razón vamos a detener nuestra atención en esta —aparentemente anómala— situación, para tratar de llegar a comprenderla.

En la parte IB (2) de este trabajo, y más concretamente en su interpretación correspondiente, se hizo referencia a los distintos mecanismos de formación de la ettringita dándose una serie de razones, a tenor de los resultados experimentales allí obtenidos, sobre el posible mayor protagonismo del mecanismo topoquímico con o sin disolución previa sobre cualquier otro y, más concretamente, el de through-

TABLA 1

Edad (días)	Parámetro	Clasificación de las mezclas-conglomerantes selenitosas, cemento portland P-1 + yeso, con 5,0 %; 7,0 %; 10,0 %; 12,0 %; 14,0 %; y 21,0 % de SO <sub>3</sub> , respectivamente, en función de los valores de $\bar{\Delta}L$ (%) de sus respectivas probetas.
7	$\bar{\Delta}L_{xd}$ (%)	5,0% < 21,0% < 10,0% = 14,0% < 12,0% < 7,0%
⋮		⋮ ⋮ ⋮ ⋮ ⋮ ⋮
60		5,0% < 21,0% < 7,0% < 14,0% < 12,0% < 10,0%
90		5,0% < 7,0% < 21,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0%
⋮		⋮ ⋮ ⋮ ⋮ ⋮ ⋮
730		5,0% < 7,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0% < 21,0% inclasificable
Contenido de SO <sub>3</sub> (%) mezcla-conglomerante cemento P-1 + yeso		5,0% < 7,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0% < 21,0%

TABLA 2

	Contenido de SO <sub>3</sub> (%) de la mezcla-conglomerante cemento portland P-1 + yeso					
	5,0%	7,0%	10,0%	12,0%	14,0%	21,0%
Relación a/c	0,528	0,510	0,528	0,536	0,528	0,560

solution en la formación de la ettringita, así como también sus posibles consecuencias en aquellas mezclas-conglomerantes selenitosas con mayor presencia de SO<sub>3</sub>, en las cuales

debería quedar mayor cantidad de C<sub>3</sub>A residual para con posterioridad formar ettringita secundaria, y viceversa. Pues bien, este hecho se ve confirmado prácticamente en esta parte

TABLA 3

Edad (días)	Parámetro	Clasificación de las mezclas-conglomerantes selenitosas, cemento portland P-31 + yeso, con 5,0 %; 7,0 %; 10,0 %; 12,0 %; 14,0 %; y 21,0 % de SO <sub>3</sub> , respectivamente, en función de los valores de $\Delta L$ (%) de sus respectivas probetas.
7	$\bar{\Delta L}_{xd.}$ (%)	21,0% < 5,0% < 10,0% < 14,0% < 12,0% < 7,0%
14		5,0% < 10,0% < 14,0% < 12,0% < 7,0% < 21,0%
⋮		⋮
28		5,0% < 10,0% < 7,0% = 14,0% < 12,0% < 21,0%
60		5,0% < 7,0% < 21,0% < 10,0% < 14,0% < 12,0%
90		5,0% < 21,0% < 7,0% < 10,0% < 14,0% < 12,0%
120		5,0% < 7,0% < 21,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0%
⋮		⋮
180		5,0% < 7,0% < 21,0% < 12,0% < 10,0% < 14,0%
270		5,0% < 7,0% < 21,0% < 10,0% < 14,0% < 12,0%
⋮		⋮
730		5,0% < 7,0% < 21,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0% inclasificable entre sí.
Contenido de SO <sub>3</sub> (%) mezcla-conglomerante cemento P-31 + yeso		5,0% < 7,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0% < 21,0%

TABLA 4

	Contenido de SO <sub>3</sub> (%) de la mezcla-conglomerante cemento portland P-31 + yeso					
	5,0%	7,0%	10,0%	12,0%	14,0%	21,0%
Relación a/c	0,528	0,510	0,528	0,535	0,528	0,60

IIA (3) y B del trabajo, pues según aquella posible hipótesis parecida cantidad de ettringita primaria se deberá haber formado inicialmente en el caso del 5,0 % de SO<sub>3</sub> que en el caso del 21,0 % de SO<sub>3</sub>, aunque lógicamente por razones bien distintas:

— Mientras que en el primer caso, casi

toda la ettringita total a formar en el mismo deberá ser primaria, causa por la que al agotarse todo el 5,0 % de SO<sub>3</sub> que se ha puesto inicialmente como agresivo no ha lugar la formación de ettringita secundaria y, consiguientemente, expansividad alguna en sus probetas con posterioridad, al igual que en la parte IB de este trabajo (2).

TABLA 5

Edad (días)	Parámetro	Clasificación de las mezclas-conglomerantes selenitosas, cemento puzolánico PUZ-8 + yeso, con 5,0 %; 7,0 %; 10,0 %; 12,0 %; 14,0 %; y 21,0 % de SO <sub>3</sub> , respectivamente, en función de los valores de $\Delta L$ (%) de sus respectivas probetas.
7	$\bar{\Delta L}_{xd}$ (%)	5,0% < 21,0% < 10,0% < 14,0% < 7,0% = 21,0%
14		5,0% < 10,0% < 14,0% < 12,0% < 7,0% < 21,0%
21		5,0% < 10,0% < 7,0% < 21,0% < 14,0% < 12,0%
28		5,0% < 7,0% < 10,0% < 21,0% < 14,0% < 12,0%
60		5,0% < 7,0% < 21,0% < 10,0% < 14,0% < 12,0%
90		5,0% < 7,0% < 10,0% < 21,0% < 14,0% < 12,0%
⋮		⋮
150		5,0% < 7,0% < 21,0% < 10,0% < 14,0% < 12,0%
180		5,0% < 7,0% < 21,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0%
270		5,0% < 7,0% < 21,0% < 10,0% < 14,0% < 12,0%
365		5,0% < 7,0% < 10,0% < 21,0% < 12,0% < 14,0%
545		5,0% < 7,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0% < 21,0%
730		5,0% < 7,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0% < 21,0%
Contenido de SO <sub>3</sub> (%) mezcla-conglomerante cemento PUZ-8 + yeso		5,0% < 7,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0% < 21,0%

TABLA 6

	Contenido de SO <sub>3</sub> (%) de la mezcla-conglomerante cemento puzolánico PUZ8 + yeso					
	5,0%	7,0%	10,0%	12,0%	14,0%	21,0%
Relación a/c	0,544	0,540	0,542	0,538	0,534	0,560

TABLA 7

Edad (días)	Parámetro	Clasificación de los cementos ensayados a igualdad de contenido de SO <sub>3</sub> (%) de su mezcla-conglomerante selenitosa y edad del ensayo respectivas, 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%	21,0%
7	$\hat{\Delta}L_{xd} (\%)$				P-3i < P-1 < PUZ-8		P-3i < P-1 < PUZ-8
14							P-1 < P-3i < PUZ-8
21			P-3i < PUZ-8 < P-1				
28							
60					P-3i < PUZ-8 < P-1		
90							
120			P-1 < P-3i < PUZ-8				
150							P-3i < PUZ-8 < P-1
180							
270				PUZ-8 < P-3i < P-1			
365						PUZ-8 < P-3i < P-1	
545							PUZ-8 < P-3i < P-1
730							
b) $[\bar{\Delta}L (\%) / \text{g cemento}]$ de sus probetas respectivas de menor a mayor valor.							
7	$[\hat{\Delta}L (\%) / \text{g cemento}]$				P-3i < P-1 < PUZ-8		P-3i < P-1 < PUZ-8
14							P-1 < P-3i < PUZ-8
21			P-3i < PUZ-8 < P-1				
28							
60					P-3i < PUZ-8 < P-1		
90							
120			P-1 < P-3i < PUZ-8				
150				PUZ-8 < P-3i < P-1			P-3i < PUZ-8 < P-1
180							
270						PUZ-8 < P-3i < P-1	
545							PUZ-8 < P-3i < P-1
730							
c) $Vcl = [\bar{\Delta}L (\%) / \text{día}]$ de sus probetas respectivas de menor a mayor valor.							
7	$Vcl = [\hat{\Delta}L (\%) / \text{día}]$	P-1 < P-3i < PUZ-8			P-3i < P-1 < PUZ-8		
14			P-3i < PUZ-8 < P-1				P-3i < PUZ-8 < P-1
21							P-1 < P-3i < PUZ-8
28			PUZ-8 < P-3i < P-1				
60							
90						PUZ-8 < P-3i < P-1	
120				P-1 < PUZ-8 < P-3i			
150				PUZ-8 < P-1 < P-3i		P-1 (*)	
180						PUZ-8 < P-3i	
270							
365						P-3i y P-1 (*)	
545						PUZ-8	
730							

— En el segundo caso deberá ocurrir inicialmente otro tanto, pero por la hipótesis afín de la parte IB de este trabajo (2), mencionada con anterioridad, y lógicamente por causa de la misma y con posterioridad, deberá ocurrir todo lo contrario, es decir, sobrar  $C_3A$  y  $SO_3$  para originar más ettringita secundaria y con ella el crecimiento longitudinal de sus probetas respectivas con

*auto-destrucción selenitosa* incluso de todas ellas, como así ha ocurrido en esta parte del trabajo (Fot. 1); viéndose todo ello facilitado por el posible menor grado de endurecimiento de las mismas, el cual deberá aumentar lógicamente con el transcurso del ensayo; por ello a la edad de 90 días tales probetas "han ganado una posición" respecto a sus edades anteriores, no man-

TABLA 8

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 %; 14,0 %; y 21,0 % de $SO_3$ , respectivamente, en función de los valores del parámetro expuesto:										
		CEMENTO P-1										
7	$\left[ \frac{AL}{g.cemento} \times 10^{-4} \right]$	5,0%	<	21,0%	<	10,0%	<	7,0%	<	12,0%	<	14,0%
⋮		⋮		⋮		⋮		⋮		⋮		⋮
21		5,0%	<	21,0%	<	10,0%	<	12,0%	<	14,0%	<	7,0%
⋮		⋮		⋮		⋮		⋮		⋮		⋮
60		5,0%	<	21,0%	<	7,0%	<	10,0%	<	12,0%	<	14,0%
90		5,0%	<	7,0%	<	10,0%	<	12,0%	<	21,0%	<	14,0%
⋮		⋮		⋮		⋮		⋮		⋮		⋮
730		5,0%	<	7,0%	<	(*)	<	(*)	<	(*)	<	(*)
			CEMENTO P-31									
7			5,0%	<	10,0%	<	7,0%	<	21,0%	<	12,0%	<
14		5,0%	<	7,0%	<	10,0%	<	12,0%	<	14,0%	<	21,0%
21		5,0%	<	10,0%	<	7,0%	<	12,0%	<	14,0%	<	21,0%
28		5,0%	<	7,0%	<	10,0%	<	12,0%	<	14,0%	<	21,0%
⋮		⋮		⋮		⋮		⋮		⋮		⋮
90		5,0%	<	7,0%	<	10,0%	<	21,0%	<	14,0%	<	12,0%
120		5,0%	<	7,0%	<	21,0%	<	10,0%	<	12,0%	<	14,0%
⋮		⋮		⋮		⋮		⋮		⋮		⋮
365		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%	<	21,0%
⋮		⋮		⋮		⋮		⋮		⋮		⋮
730		5,0%	<	7,0%	<	10,0%	<	12,0%	<	14,0%	<	21,0%
Contenido de $SO_3$ (%) mezcla-conglomerante cemento + yeso		5,0%	<	7,0%	<	10,0%	<	12,0%	<	14,0%	<	21,0%
(*).- Probetas Rotas: Imposible la realización de su estudio comparativo												

teniéndose con posterioridad este proceso de "ganancia de posiciones" como lógicamente viene ocurriendo con las del 12,0 % y 14,0 % de SO<sub>3</sub>, por este orden e idéntico motivo, por haberse producido la auto-destrucción de tales probetas durante la progresión del mismo.

Lógicamente las homónimas del cemento P-31 se deberán auto-destruir, con posterioridad, como así ha sido el caso (Fot. 2).

Respecto a las razones de las clasificaciones obtenidas en la Tabla 8, se pueden ver en la parte IB de este trabajo (2). Y otro tanto se puede decir de las correspondientes a la Tabla 9, sólo que en este caso se confirma una vez más, al igual que en la parte IB (2), el posible interés de este parámetro,  $\Delta L$  (%)/g. cemento, a la vez que el empleo del contenido de SO<sub>3</sub> del 21,0 % por todos aquellos investigadores interesados en esta temática con el fin de calificar con precisión los cementos de elevada resistencia, o no, respectivamente, al ataque de los iones sulfato.

Por otra parte, y respecto del parámetro Vcl, se puede decir fundadamente que colabora en gran medida a intentar comprender mejor algunos de los fenómenos físico-químicos que pueden tener lugar en cada familia de probetas y que están relacionados mayormente con la formación de la ettringita correspondiente, a lo largo del ensayo, en cada una de ellas.

Así pues, y entrando con algo más de detalle en esta temática, se observa como en primer lugar la hipótesis vertida en la parte IB (2),

referente a que en el caso del menor contenido SO<sub>3</sub>, o sea el del 5,0 %, de los cementos que se ensayan y en razón del mecanismo topoquímico, con o sin disolución previa, la ettringita primaria del P-1 ha de ser > que la ettringita primaria del P-31 y, consiguientemente, la ettringita secundaria del P-1 ha de ser < que la ettringita secundaria del P-31, se ve aquí claramente confirmada, pues el área correspondiente al cemento P-1 (Fig. 7) es menor que la correspondiente a la del P-31 (Fig. 8) y ambas notablemente menores, en dicho orden, que la del PUZ-8, (Fig. 9).

Del mismo modo este último hecho viene a confirmar también lo allí vertido (2) sobre dicho cemento PUZ-8. Y es que él mismo ha debido formar la mayor parte de su total correspondiente de ettringita, en cada caso, de mezcla-conglomerante selenitosa ensayada, durante los primeros 28 días del ensayo, y dentro de ellos tanto más tarde cuanto mayor es su contenido de SO<sub>3</sub> y viceversa, en cuyo caso se cumple claramente lo expuesto anteriormente. Ello se ve igualmente confirmado mediante las Gráficas de DRX de la fracción enriquecida por tamizado (en tamiz de 88  $\mu$ m de luz de malla) del mortero selenitoso sobrante, correspondiente a sus probetas con 21,0 % de SO<sub>3</sub> (Gráfico 1). De aquí que resulte lógico el que tales probetas del PUZ-8 hayan mostrado, de entre todas, el máximo valor  $\Delta L$  (%),  $\Delta L$  (%)/g. cemento y Vcl, a la edad de 7 días del ensayo, (Figs. de la 1 a la 9 inclusive).

No obstante conviene resaltar que la igualdad de signo de las pendientes respectivas en este caso común del 5,0 % de SO<sub>3</sub>, entre los tres

TABLA 9

Valores de la relación $\frac{n^{\circ} \text{ moles } SO_3}{1 \text{ mol } C_3A}$ en cada mezcla-conglomerante selenitosa con el 5,0%, 10,0%, 12,0% y 14,0% (y 21,0%) de SO <sub>3</sub> , respectivamente, del:												
	Cemento P-1 con un contenido de SO <sub>3</sub> del:						Cemento P-31 con un contenido de SO <sub>3</sub> del:					
	5,0%	7,0%	10,0%	12,0%	14,0%	21,0%	5,0%	7,0%	10,0%	12,0%	14,0%	21,0%
$\frac{n^{\circ} \text{ moles de } C_3A}{1 \text{ mol de } SO_3}$	0,81	0,55	0,35	0,28	0,23	0,12	0,44	0,30	0,19	0,15	0,12	0,06
$\frac{n^{\circ} \text{ de moles de } SO_3}{1 \text{ mol de } C_3A}$	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	8,56	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	15,71
$\frac{n^{\circ} \text{ de moles } SO_3}{1 \text{ mol } C_3A}$ necesarios para la estequiometría	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Cantidad total de ettringita a formar (g)	103,01	144,22	206,02	206,57	194,37	151,68	103,01	129,12	119,16	112,51	105,87	82,62
(*) Mezcla-conglomerante selenitosa deficitaria de C <sub>3</sub> A para alcanzar la estequiometría												
(*) Mezcla-conglomerante selenitosa deficitaria de SO <sub>3</sub> para alcanzar la estequiometría												

cementos así ensayados y comparados, no nos debe confundir induciéndonos a pensar que el total de aluminatos originarios de la ettringita total, proveniente del cemento PUZ-8, ha de ser igual al de los de calcio del portland P-1 ó P-31, los cuales los poseen, como  $C_3A$  preferentemente y de los que se hablará más adelante. Como confirmación de ello, si tuvieran tal grado de similitud entre las curvas respectivas, se hubiese conservado por igual en el resto de los contenidos comunes de  $SO_3$  ensayados y comparados, lo cual no ha sido el caso, pues las diferencias existentes entre las curvas del PUZ-8 y las del P-31 y P-1, por este orden, han aumentado con el contenido de  $SO_3$  común empleado, y viceversa (Figs. 7, 8 y 9), debiendo ser lógicamente, por el contrario, relativamente más parecidas entre sí —dentro de lo dispar— las de estos dos portland últimos, P-31 y P-1, ya que sus aluminatos son del

tipo  $C_3A$  (independientemente de su distinto tipo de forma cristalina y cuantía de vidrio respectivas), donde ambas familias de curvas muestran una evolución y desarrollo sinusoidal de amplitud y período variables, pero ambas, en definitiva, sinusoidales.

Obsérvese cómo en alguna figura el valor de la ordenada a la edad de 7 días del cemento PUZ-8 con 5,0 % de  $SO_3$  (Fig. 9) es bastante aproximado al del P-31 con 7,0 %, 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de  $SO_3$ , pero en especial con el 7,0 %, (Fig. 8), y al del P-1 con 21,0 % de  $SO_3$  (Fig. 7), lo cual viene a demostrar que la expansividad de la ettringita formada del PUZ-8 con 5,0 % de  $SO_3$ , a dicha edad de 7 días (de aquí los mayores valores de  $V_{cl}$  mostrados a 7 días) ha de ser superior a la del resto de los casos comparados, lo cual puede ser lógico, y que la cantidad formada del P-31 con 7,0 % de

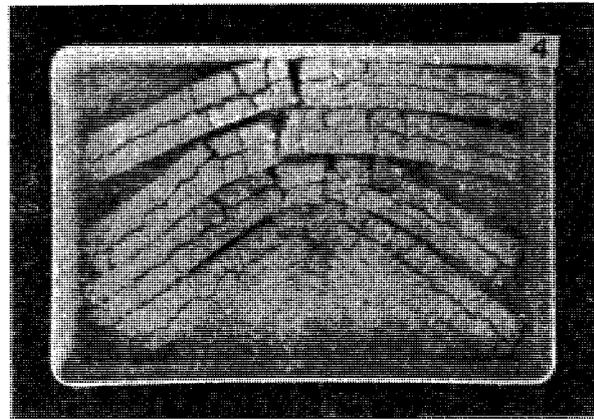
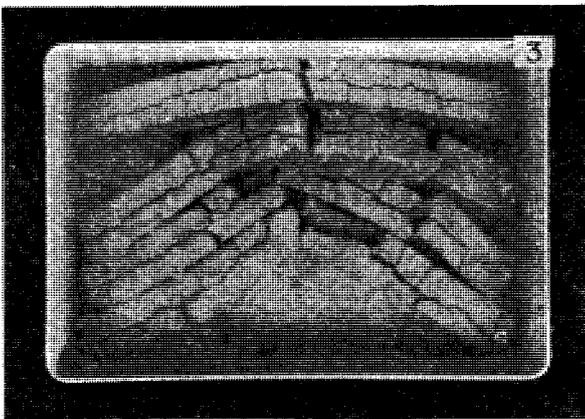


Foto 1.—Probetas de  $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$  de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-1 (14,11 %  $C_3A$ ) con 10,0 %  $SO_3$ , expandidas y fracturadas. Edad: 180 días.

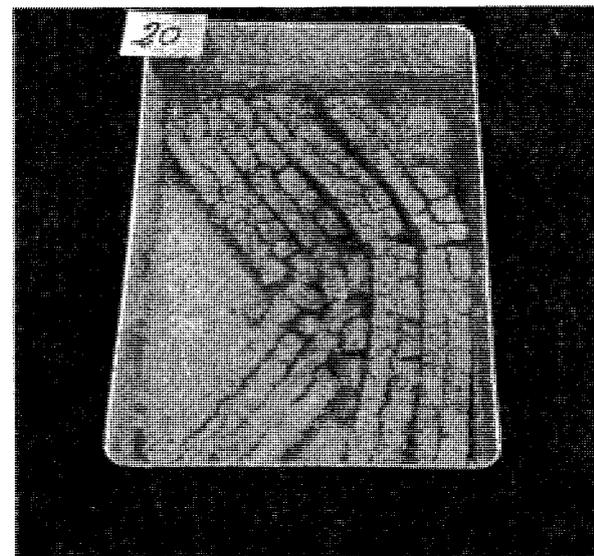


Foto 2.—Probetas de  $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$  de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-1 (14,11 %  $C_3A$ ) con 10,0 %  $SO_3$ , expandidas y fracturadas. Edad: 730 días.

SO<sub>3</sub> pudiera ser aproximadamente equivalente; no obstante, tanto si lo es como si no, lo único cierto es que la del PUZ-8 ha debido de encontrar un mayor grado de endurecimiento a su alrededor a la hora de formarse que la del

P-31; y es extraño que este mismo hecho continúe verificándose con el resto de los contenidos de SO<sub>3</sub> añadidos al PUZ-8, mientras que a los del P-31 y P-1 no. Ello induce a pensar, una vez más, que la causa más probable es la

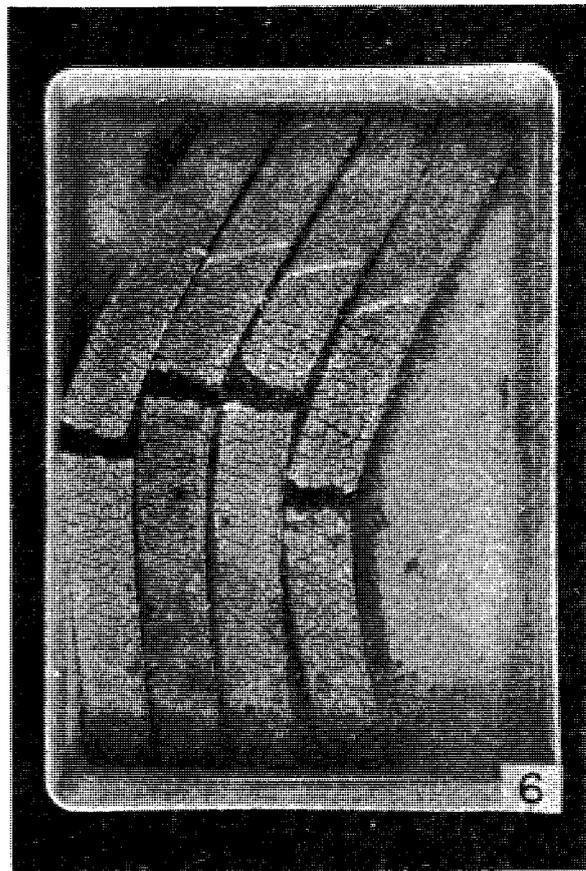
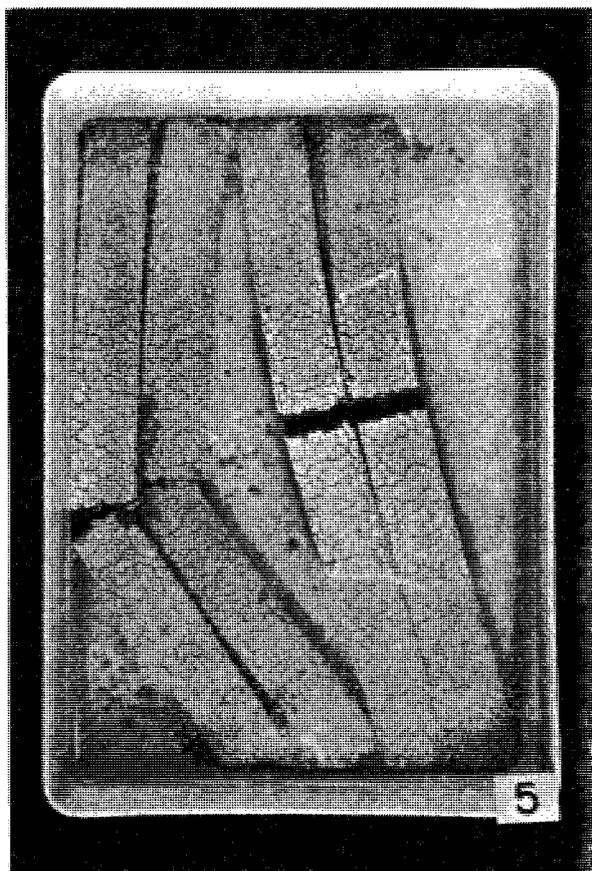


Foto 3.—Probetas de 1" × 1" × 11<sup>1</sup>/<sub>4</sub>" de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-1 (14,11 % C<sub>3</sub>A) con 12,0 % SO<sub>3</sub>, expandidas y fracturadas. Edad: 180 días.

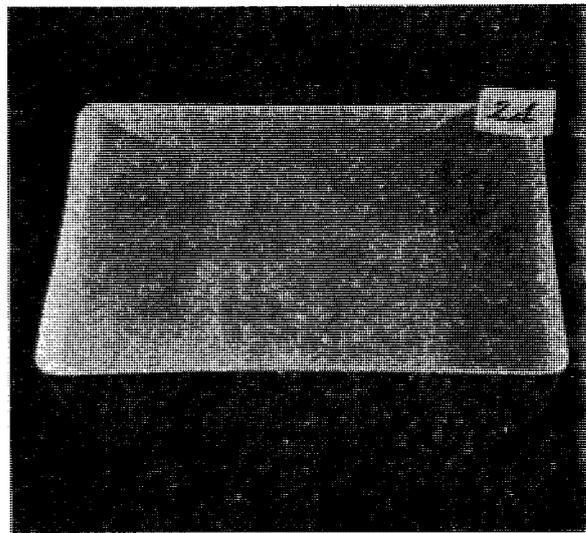
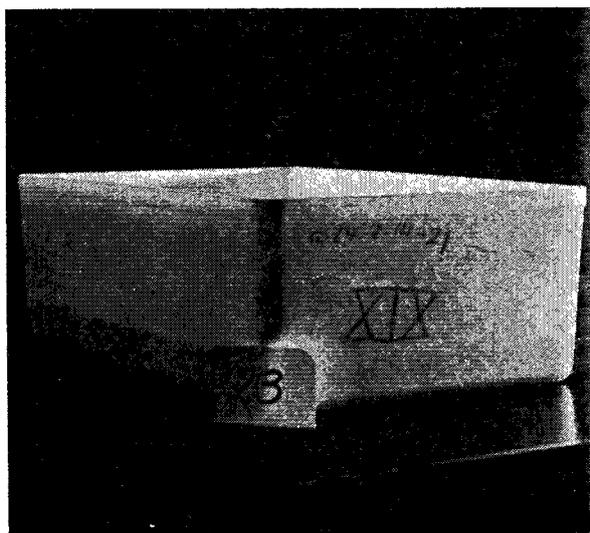


Foto 4.—Probetas de 1" × 1" × 11<sup>1</sup>/<sub>4</sub>" de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-1 (14,11 % C<sub>3</sub>A) con 12,0 % SO<sub>3</sub>, deshechas. Edad: 730 días.

apuntada al efecto por el autor a raíz de sus trabajos de Tesis Doctoral (4), la cual consiste en que cuando ambos tipos de aluminatos, los de una puzolana (actualmente sin definir con exactitud, aunque denominados por dicho

autor con el apelativo genérico de "alúmina reactiva",  $Al_2O_3^r$ , y adscritos más al número de coordinación 5 que 6 y los de un portland, en forma de  $C_3A$  preferentemente, se encuentran juntos en un medio portlandítico y selenitoso

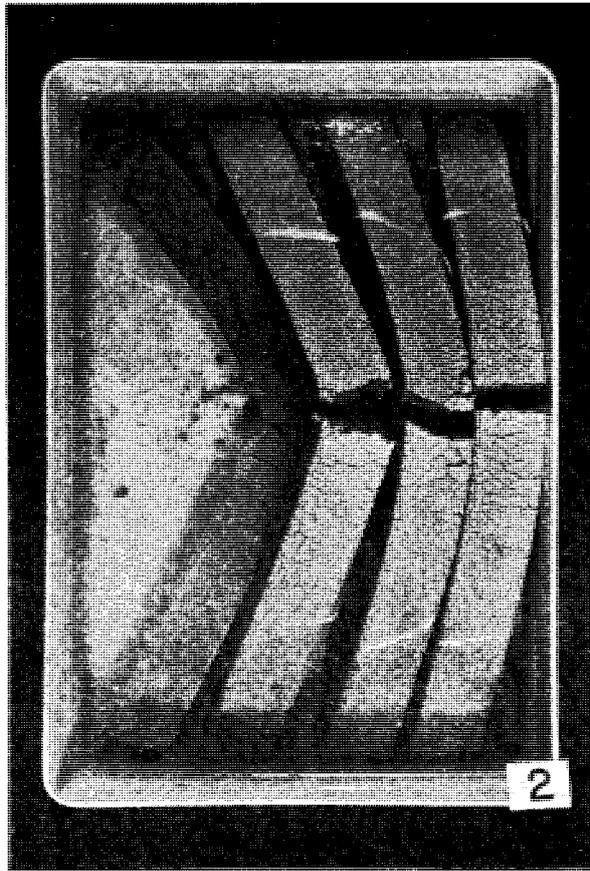


Foto 5.—Probetas de  $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$  de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-1 (14,11 %  $C_3A$ ) con 14,0 %  $SO_3$ , expandidas y fracturadas. Edad: 180 días.

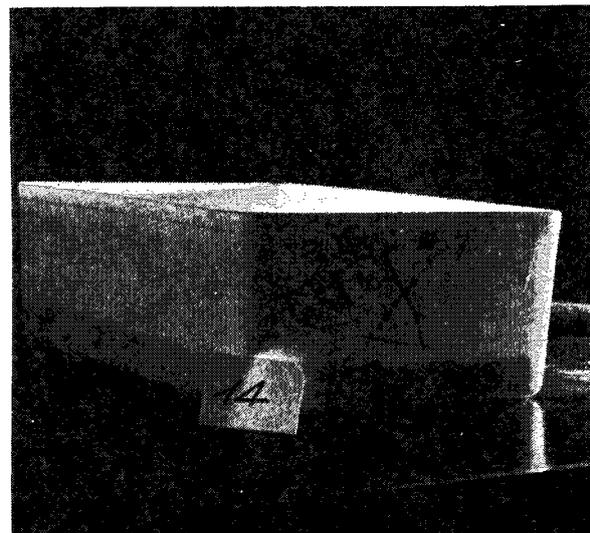
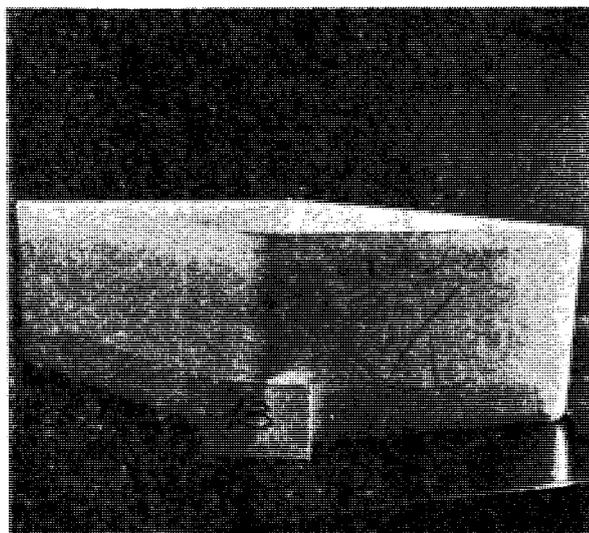


Foto 6.—Probetas de  $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$  de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-1 (14,11 %  $C_3A$ ) con 14,0 %  $SO_3$ , deshechas. Edad: 730 días.

apropiados se origina una "ACCION SINERGI-CA EXPANSIVA" entrambos —según las conclusiones de los trabajos de dicho autor—. Fruto de ella, tanto la cantidad de ettringita que se forma a las edades iniciales del ensayo, mayormente, como su velocidad de formación, han de ser bastante mayores que la que debería corresponderles si ambas se formasen por separado. Con lo cual y en todos los casos, los valores de este parámetro  $V_{cl}$  y del  $\Delta L$  (%) correspondiente a la edad de 7 días al menos de las probetas y a igualdad de contenido de  $SO_3$  de su cemento constitutivo, deberán ser mayores en el caso del cemento PUZ-8, que en el caso de los cementos portland P-31 y P-1, como así ha ocurrido en este trabajo (Figs. 7, 8 y 9).

Antes de todo, y a la vista de las Figs. 7, 8 y 9,

se ha de aclarar el hecho de que sea cual fuere la curva que las constituya, el que ésta, tarde o temprano, llegue a alcanzar el valor nulo, el cual suele mantenerse prácticamente hasta la finalización del ensayo y/o con posterioridad, se ha de interpretar en el sentido de que a tal edad de consecución de dicho valor nulo ha debido de finalizar, en general, el alargamiento de sus probetas correspondientes —si es que las mismas no se autodestruyen antes— y por consiguiente la causa que provocaba el mismo, en este caso la reacción de formación de ettringita nociva.

Seguidamente, y ateniéndose al orden establecido en la exposición correspondiente a esta parte del trabajo, se pasará a analizar y estudiar en primer lugar los valores de este parámetro  $V_{cl}$  correspondiente al cemento P-1, o sea, las curvas de la Fig. 7, para continuar con

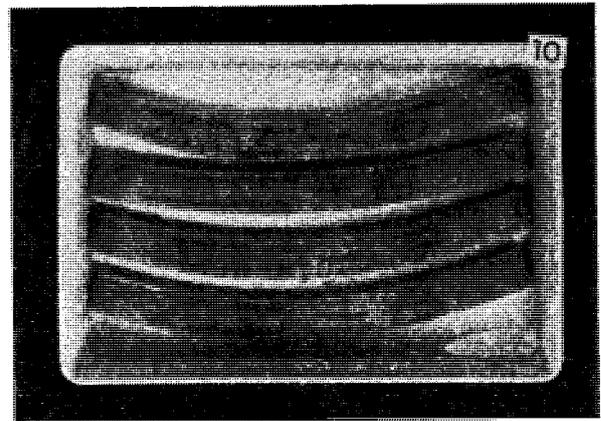
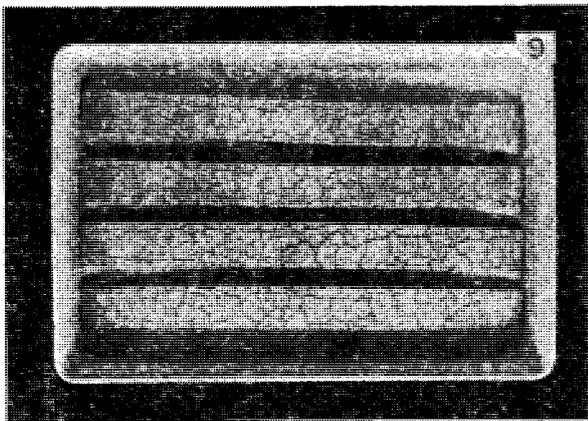


Foto 7.—Probetas de  $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$  de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-31 (7,62 %  $C_3A$ ) con 10,0 %  $SO_3$ , expandidas y fisuradas. Edad: 365 días.

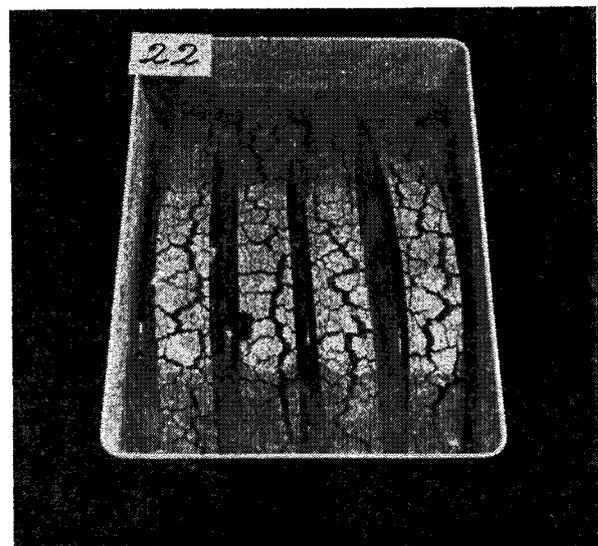
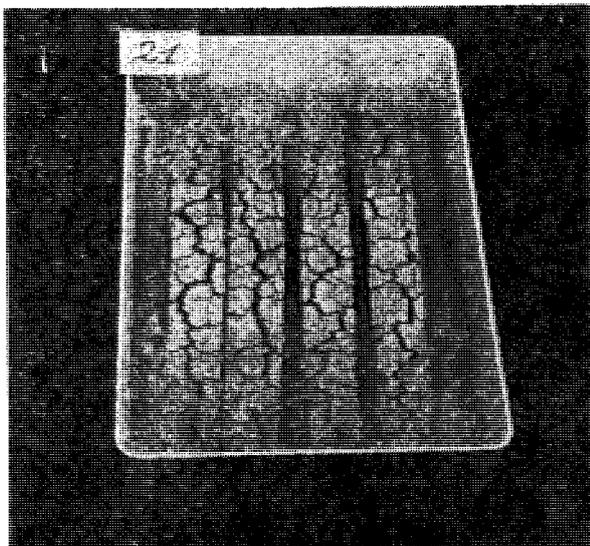


Foto 8.—Probetas de  $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$  de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-31 (7,62 %  $C_3A$ ) con 10,0 %  $SO_3$ , expandidas y fracturadas. Edad: 730 días.

los del resto de los cementos ensayados, P-31 y PUZ-8, por este orden.

Pues bien, en general y según lo expresado con anterioridad, todo signo negativo de la pendiente de la curva de que se trate, correspondiente a cualquiera de los cementos ensayados, sea cual fuere su valor absoluto, se ha de interpretar como que durante el período de tiempo de la duración del mismo —valor de su abscisa en días—, y aunque no disminuya la formación de la ettringita, por no haberse agotado aún sus reactivos originarios, sus efectos expansivos, o son, más colmatantes que expansivos, o son amortiguados por la falta de fraguado y/o endurecimiento del mortero que los constituye, cuanto más selenitoso sea el mismo, o ambas cosas a la vez, en mayor o menor grado.

Pero en cualquier caso su formación y sus efectos expansivos y/o sus consecuencias expansoras, se ven de algún modo frenados o ralentizados, lo cual se habrá de traducir en sus probetas correspondientes: o bien disminuyendo o ralentizándose su  $V_{cl}$  durante un período de tiempo —entre los 7 y 28 primeros días, de edad de las probetas—, tanto más corto cuanto menor fuese el contenido de  $SO_3$  del cemento portland P-1, caso del 7,0 % de  $SO_3$ , y viceversa, caso del 21,0 % de  $SO_3$ ; o bien aumenta la  $V_{cl}$  ligeramente, incluso en este último caso del 21,0 % de  $SO_3$  que es cuando los reactivos  $C_3A$  y  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  se encuentran en peores condiciones para llegar según el mecanismo topoquímico, a encontrarse y reaccionar; con lo cual se facilitaría que el endurecimiento del mortero progrese, aunque escasamente, pero un poco más de lo que debie-

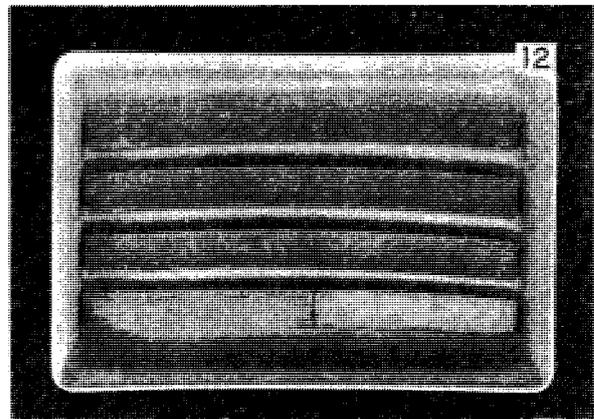
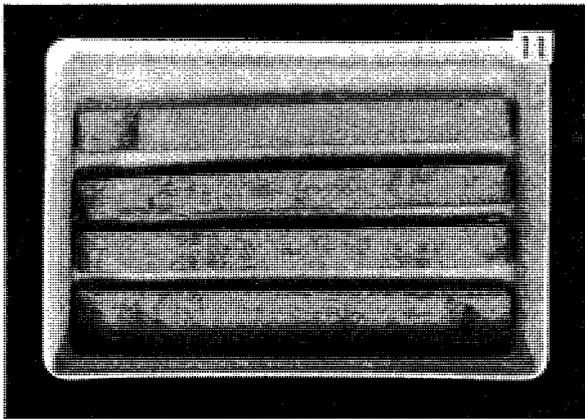


Foto 9.—Probetas de  $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$  de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-31 (7,62 %  $C_3A$ ) con 12,0 %  $SO_3$ , expandidas y fisuradas. Edad: 365 días.

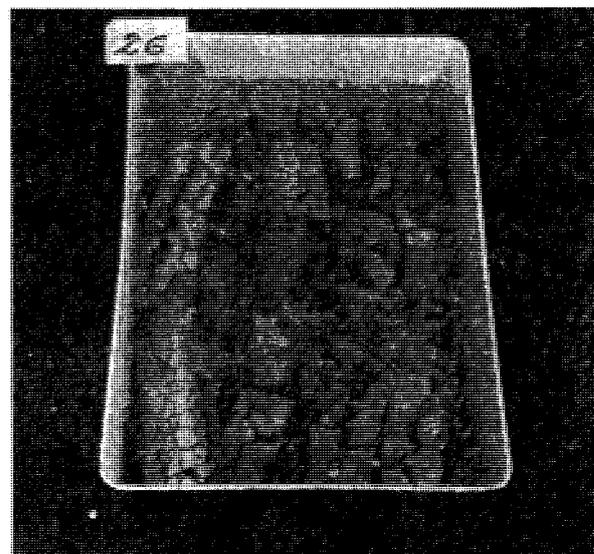
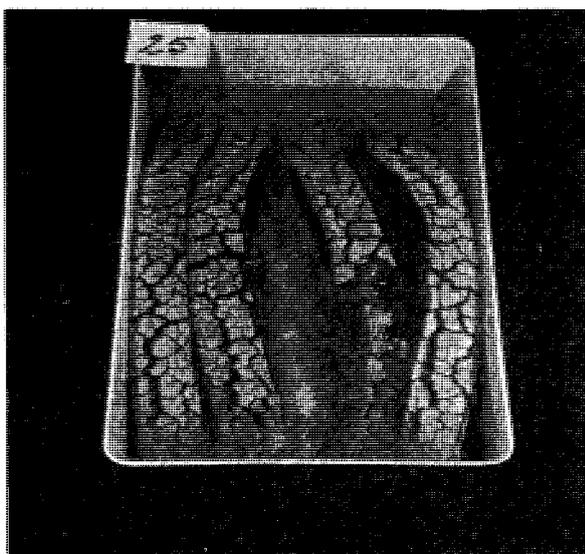


Foto 10.—Probetas de  $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$  de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-31 (7,62 %  $C_3A$ ) con 12,0 %  $SO_3$ , expandidas y fracturadas. Edad: 730 días.

ra a edades iniciales y, consiguientemente, que la poca cantidad de ettringita que se forme a la par pueda ser un poco más expansora que colmatante, y una vez superado este punto-edad de 7 días, caso del P-31 y PUZ-8, volver a la regla general anterior.

De esta manera y en cualquier cemento portland, tarde o temprano\* se deberá alcanzar en todos los casos de mezclas-conglomerantes

(\*) Lógicamente tanto más el primer caso (hasta la edad de las probetas de 90 días), que el segundo (hasta la edad de las probetas de 28 días), cuanto menor fuere el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado, como es el caso del P-31 (gracias al mecanismo topoquímico preferentemente) y mayor fuere el contenido de  $SO_3$  del mismo (gracias a su menor grado y velocidad de fraguado y endurecimiento), como es el caso del 21,0 % de  $SO_3$ .

selenitosas ensayadas un valor mínimo de Vcl en sus probetas respectivas, tras el cual, y a diferencia de los contenidos de  $SO_3$  del 5,0 %, las reacciones correspondientes de formación de ettringita ún no han finalizado —se podría decir, con cierta aproximación, que tan sólo se han “ralentizado” por uno u otro motivo— por el no agotamiento aún de sus respectivos reactivos, cuyas reacciones empezarán a ser entonces todo lo contrario, o sea, más claramente expansoras que colmatantes en todos los casos, pero debiendo comenzar antes en cantidad (máximo valor de Vcl) y tiempo-edad más temprana e inicial todavía (14 a 28 días) de sus probetas, cuanto menor fuese el contenido de  $SO_3$  del cemento, caso del P-1 con el 7,0 % y viceversa, según lo ocurrido en este trabajo, (Fig. 7). De aquí que el valor máximo de Vcl de dicho cemento, con 7,0 % de  $SO_3$ , se haya

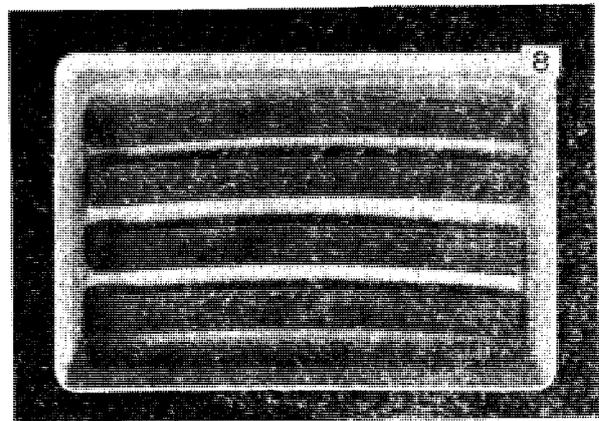
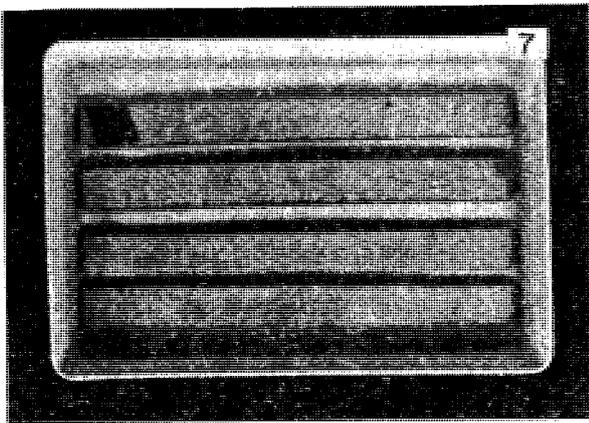


Foto 11.—Probetas de  $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$  de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-31 (7,62 %  $C_3A$ ) con 14,0 %  $SO_3$ , expandidas y fisuradas. Edad: 365 días.

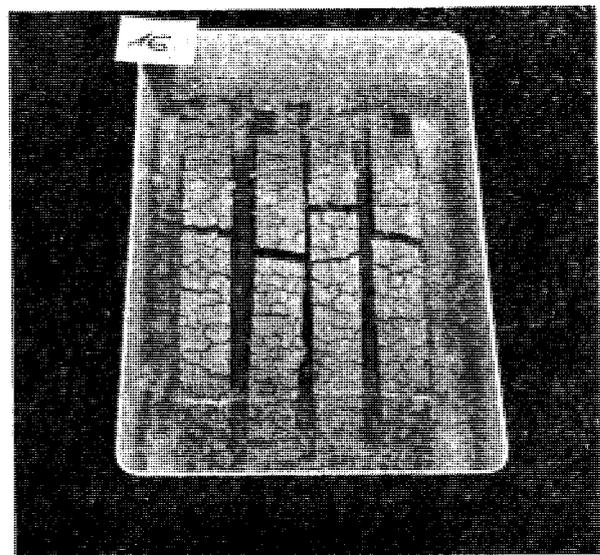
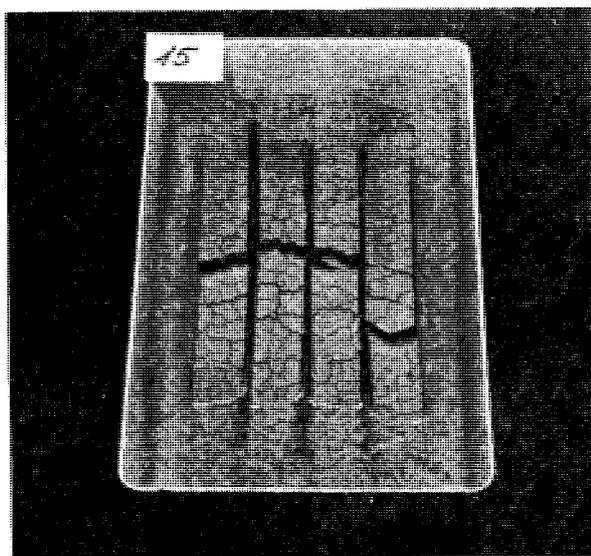


Foto 12.—Probetas de  $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$  de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-31 (7,62 %  $C_3A$ ) con 14,0 %  $SO_3$ , expandidas y fracturadas. Edad: 730 días.

alcanzado a la edad de 28 días de sus probetas, mientras que las del 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de  $\text{SO}_3$ , lo han alcanzado 32 días después.

Por tanto, en el caso de que el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  del cemento que se ensaye sea menor que el del P-1, caso del P-31 con 7,62 % de  $\text{C}_3\text{A}$ , alguno de los contenidos de  $\text{SO}_3$  citados

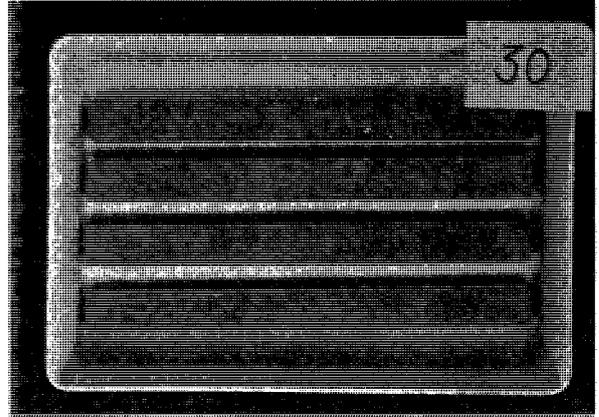
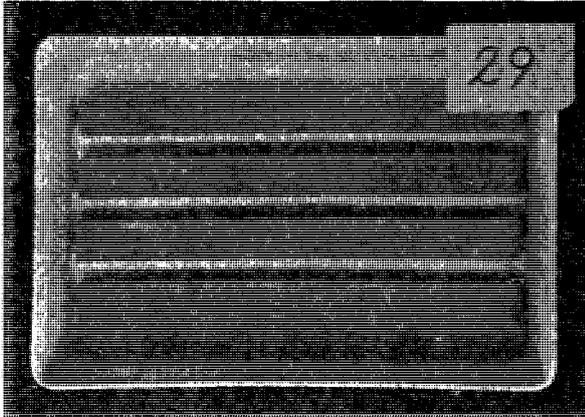


Foto 13.—Probetas de  $1'' \times 1'' \times 11\frac{1}{4}''$  de mortero, 1 : 2,75, de cemento PUZ-8 con 10,0 % de  $\text{SO}_3$ , expandidas, edad: 730 días.

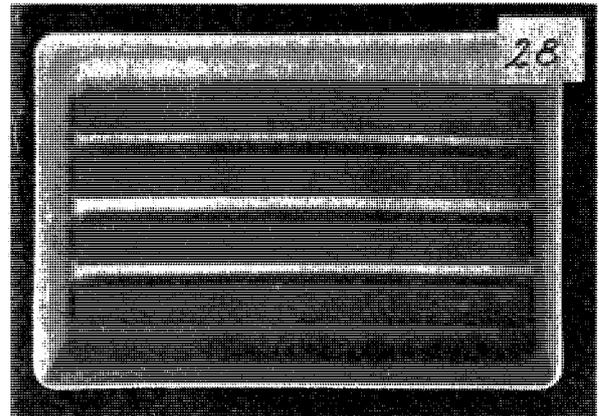
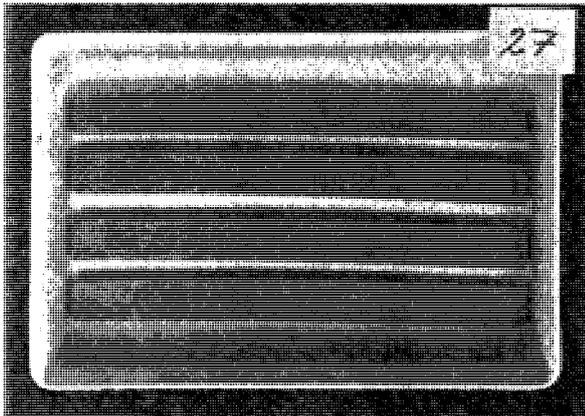


Foto 14.—Probetas de  $1'' \times 1'' \times 11\frac{1}{4}''$  de mortero, 1 : 2,75, de cemento PUZ-8 con 12,0 % de  $\text{SO}_3$ , expandidas, curvadas y ligeramente fisuradas. Edad: 730 días.

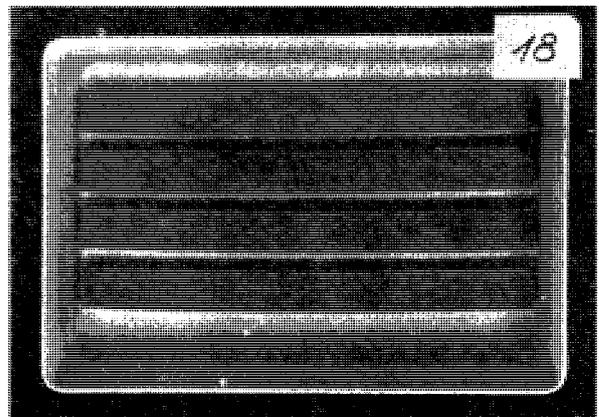
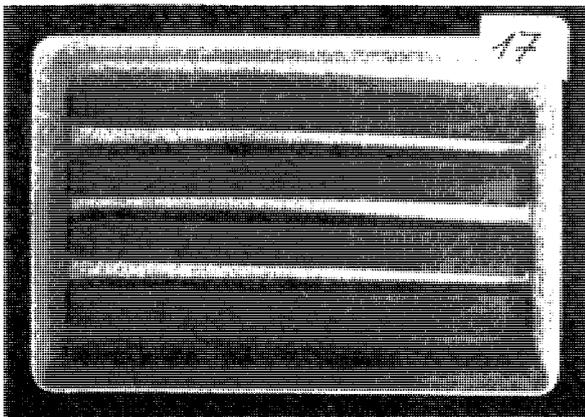


Foto 15.—Probetas de  $1'' \times 1'' \times 11\frac{1}{4}''$  de mortero, 1 : 2,75, de cemento PUZ-8 con 14,0 % de  $\text{SO}_3$ , expandidas, curvadas y ligeramente fisuradas. Edad: 730 días.

(lógicamente el menor, o sea, el 7,0 % y según el mecanismo topoquímico) puede que no llegue a ocurrirle el descenso y ulterior ascenso de valores de Vcl citado con anterioridad, sino lo que le ocurrió al del 5,0 %, o sea, descenso continuado hasta llegar al valor nulo, natural-

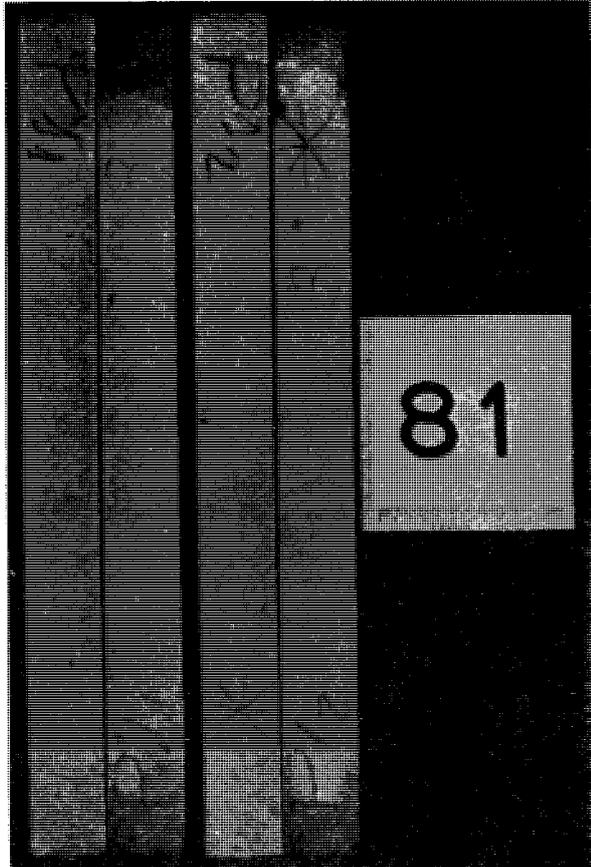


Foto 16.—Probetas de 1" × 1" × 11<sup>1</sup>/<sub>4</sub>" de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-1 (14,11 % C<sub>3</sub>A) con 7,0 % de SO<sub>3</sub>, expandidas. Edad: 365 días y edad: 730 días (prácticamente sin cambio notable alguno de Δ L (%) entre ambas edades).

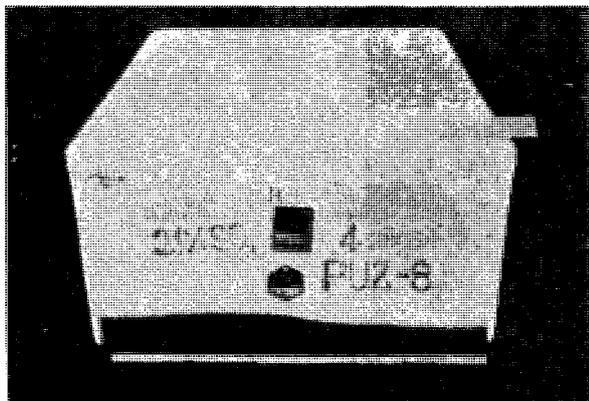


Foto 17.—Probetas de 1" × 1" × 11<sup>1</sup>/<sub>4</sub>" de mortero 1 : 2,75 de cemento PUZ-8 con 21,0 % de SO<sub>3</sub>, totalmente deshechas por ataque del yeso. Edad: 4 años.

mente a edad posterior al alcanzado por el del 5,0 % de SO<sub>3</sub>, como así ha sido el caso, (Fig. 8). Y abundando en el tema se puede observar en la Fig. 8 cómo su curva representativa asciende por dos veces, más o menos suavemente, a lo largo del ensayo (períodos de tiempo comprendidos entre las edades del ensayo de 14 y 21 días y 28 y 90 días, respectivamente) cumpliendo de este modo con la hipótesis anterior, sólo que este último aspecto, hace que, en definitiva, acabe por parecerse algo más claramente a la del 5,0 % de SO<sub>3</sub>, que al resto.

Por otra parte, otro aspecto que se observa en las Figs. 7 y 8 es que en gran medida las pendientes correspondientes a las ramas ascendentes y descendentes de cada valor máximo de Vcl alcanzado, sea cual fuere la edad a la que se alcanzase e independientemente de su signo puede considerarse, en general, bastante aproximadas.

Esto deberá interpretarse como que la "autoaceleración" que experimenta cada familia de probetas, hasta alcanzar su máximo valor de Vcl, debe ser aproximadamente de parecido valor absoluto y distinto signo que la "desaceleración" correspondiente que sufren las mismas en todos los casos, hasta alcanzar el valor nulo en todos ellos. Esto se debe al agotamiento, para entonces, de sus cantidades de reactivos CaSO<sub>4</sub> · 2 H<sub>2</sub>O y/o C<sub>3</sub>A que les quedaba como residuales. Por el contrario, la causa del período de tiempo de "autoaceleración" correspondiente ha de ser por distinto motivo y no por la simple y opuesta causa anterior, es decir, a "aumento para entonces de la cantidad de reactivos CaSO<sub>4</sub> · 2 H<sub>2</sub>O y/o C<sub>3</sub>A necesarios para ello", lo cual sería ir en contra de la ley de la conservación de la materia. Por tanto, si para entonces la cantidad de reactivos residuales ha de ser forzosamente menor que la inicial, lo único que cabe pensar de éstos es que los mismos, durante el período de tiempo de "autoaceleración" del proceso expansivo han pasado a encontrarse en mejores condiciones de reacción que sus homónimos iniciales: bien porque el mecanismo topoquímico posiblemente se está acabando de verificar para entonces en su totalidad; bien porque los C<sub>3</sub>A residuales se podrían encontrar en las mejores condiciones de reaccionabilidad para dar ettringita, según el modelo propuesto por Schwiete y colaboradores (5), o cualquier otro modelo más o menos afín; o bien por ambas causas y por cualquier otra adicional en mayor o menor grado.

Por último, queda confirmada en esta segunda parte B del trabajo, la premonición realizada en la primera (2) referente a que el mejor comportamiento ante el ataque del yeso del cemento PUZ-8 que el P-31 y el P-1, por este

orden, ante el ataque de los iones sulfato, no debería inducirnos a engaño. De aquí la tercera recomendación allí dada (2), por la cual las probetas de dicho cemento PUZ-8 se han autodestruido por ataque selenitoso muy severo (con 21,0 % de SO<sub>3</sub>) a la edad de 4 años. Ello no permite extrapolar el comportamiento de este cemento PUZ-8 ante el ataque sulfático agresivo, a TODOS LOS CEMENTOS PUZOLANICOS, PUZ y, a ser posible, también a sus hermanos menores los portland con Adiciones, PA, constituidos por portland y puzolanas únicamente. Por lo que urge realizar una investigación apropiada para confirmar, o no, si el comportamiento demostrado en esta segunda parte del trabajo por el cemento PUZ-8 es generalizable a TODOS ellos.

### III. CONCLUSIONES [de las Partes IIA (3) y IIB de este trabajo]

El lector puede remitirse:

- 1.<sup>a</sup> Integramente a las CONCLUSIONES de la parte IB de este trabajo (2).
- 2.<sup>a</sup> El empleo del contenido de SO<sub>3</sub> del 21,0 % ha confirmado todo lo dicho expresamente en las conclusiones 1.<sup>a</sup> y 2.<sup>a</sup> de la parte IB de este trabajo (2) sobre el grado de resistencia al ataque de los iones sulfato de cada cemento así ensayado, estando ello además de acuerdo respecto al cemento PUZ-8, con los resultados experimentales obtenidos por R. Talero mediante sus trabajos de Tesis Doctoral (4).
- 3.<sup>a</sup> El ensayo de un cemento portland o portland con puzolanas únicamente con otros contenidos de SO<sub>3</sub> mayores del 7,0 %, especificado expresamente por la norma ASTM C 452, para determinar su grado de resistencia al ataque de los iones sulfato, mediante dicho método acelerado de ensayo, ha demostrado su posible interés para aquellos investigadores, fabricantes y usuarios interesados en esta temática, dada su especificidad para alcanzar el objetivo propuesto: emitir con mayor pre-

cisión un juicio, consejo o decisión a la luz de su dictamen.

- 4.<sup>a</sup> De entre todos los contenidos de SO<sub>3</sub> mayores del 7,0 % ensayados en este trabajo, tanto el del 12,0 %\* como el del 21,0 % de SO<sub>3</sub> han confirmado ser los preferentes para dicho fin anterior mediante el parámetro  $\bar{\Delta} L$  (%) de las probetas respectivas. [Véase la conclusión 4.<sup>a</sup> de la parte IB de este trabajo (2)]. Por el contrario y mediante el parámetro  $\bar{\Delta} L/g$ . cemento, lo han sido el del 14,0 % y el del 21,0 %, aunque preferentemente este último.
- 5.<sup>a</sup> En general la cantidad total de ettringita originada por el cemento PUZ-8 en cada caso se ha tenido que formar antes que la correspondiente a los cementos portland P-31 y P-1, igualmente ensayados. Esta conclusión está totalmente de acuerdo con la correspondiente afín surgida de los trabajos de Tesis Doctoral de R. Talero (4).
- 6.<sup>a</sup> De los seis contenidos de SO<sub>3</sub> ensayados, tan sólo el del 21,0 % ha actuado como agresivo para el cemento PUZ-8. el resto ha actuado más bien a modo de regulador de fraguado, tanto más cuanto menor ha sido dicho contenido, el 5,0 % y, viceversa, el 14,0 %. Ellos, además, está de acuerdo con los resultados experimentales obtenidos por el autor mediante su Tesis Doctoral (4). En estos trabajos se puede apreciar expresamente el concepto de *acción sinérgica expansiva adecuada o máxima*, según sea el caso, de un cemento PUZ.

### IV. RECOMENDACIONES

- 1.<sup>a</sup> Urge realizar una investigación apropiada para confirmar, o no, si TODOS ó solamente UNOS POCOS cementos puzolánicos se pueden calificar de elevada resistencia al ataque de los iones sulfato.

(\*) Seguido comunmente del 14,0 %.

### V. BIBLIOGRAFIA

- (1) R. TALERO: "Contribución al análisis y estudio de las posibilidades de modificación de la cantidad de yeso, CaSO<sub>4</sub> .2 H<sub>2</sub>O como agresivo, del método acelerado de ensayo ASTM C 452" Parte IA.
- (2) R. TALERO: "Contribución al análisis y estudio de las posibilidades de modificación de la cantidad de yeso, CaSO<sub>4</sub> .2 H<sub>2</sub>O como agresivo, del método acelerado de ensayo ASTM C 452" Parte IB.
- (3) R. TALERO: "Contribución al análisis y estudio de las posibilidades de modificación de la cantidad de yeso, CaSO<sub>4</sub> .2 H<sub>2</sub>O como agresivo, del método acelerado de ensayo ASTM C 452" Parte IIA.
- (4) R. TALERO: "Contribución al Estudio Analítico y Físico-Químico del Sistema: Cementos Puzolánicos-Yeso-Agua". Tesis Doctoral Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas, 1986.

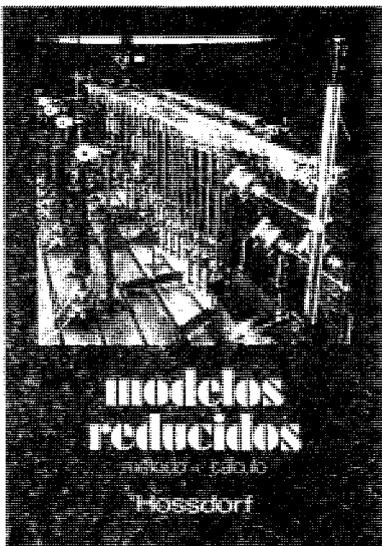
- (5) H. E. SCHWIETE, W. LUDWING y P. JÄGER: "Investigations in the System  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot\text{CaO}\cdot\text{H}_2\text{O}$ ". Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete, SP 90. Ed. Staff, 2101 Onst. Aven. Washington D. C. 20418, 1966.

## RECONOCIMIENTO:

Deseo agradecer a los componentes del E. I. Durabilidad, D. Felipe Cantero Palacios y D. Manuel Cantero Palacios la colaboración prestada en la realización de este trabajo. Asimismo a Dña. M.<sup>a</sup> Isabel Jiménez García y a Dña. Raquel Canellada Llavona, el mecanografiado de la misma y a D. Juan José López del Amor y a D. José Díaz Salado las fotografías realizadas.

\* \* \*

## publicación del IETcc/CSIC



### Modelos reducidos. Método de cálculo

H. Hossdorf, Ingeniero Civil

La técnica de los ensayos en modelos reducidos de estructuras sufre hoy día una decisiva metamorfosis. Hasta hace poco era un medio más bien de artesanía, que no siempre era tomado en serio por los académicos teorizantes para comprender el comportamiento resistente de las estructuras complejas y al que se acudió las más de las veces, como a un último remedio debido a sus indiscutibles insuficiencias. Sin embargo, en poco tiempo y gracias a su conexión con los ordenadores digitales, se ha transformado en un instrumento científicamente valioso, que no puede quedar a un lado en la práctica diaria del Ingeniero Proyectista.

Un volumen encuadernado en cartón plastificado con lomo de tela, de  $17 \times 24$  cm, compuesto de 250 páginas, 158 figuras y fotografías.

Precios: 1.800 ptas.; \$ USA 26.00.



### Cemento blanco

Julián Rezola  
Ingeniero Químico Dipl. I. Q. S.

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

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

La parte descriptiva del libro se complementa con gráficos, diagramas y fotografías de gran utilidad, destinados a conseguir la aplicación apropiada de este aglomerante.

Un volumen encuadernado en cartón policarado, de  $17,4 \times 24,3$  cm, compuesto de 395 páginas, numerosas figuras, tablas y ábacos.

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 pretensión de perennidad, a contracorriente de las tendencias de la civilización actual, caracterizada por lo fungible. Pueden evocarse las 10.000 grandes presas en funcionamiento o en construcción que están envejeciendo y reclaman los cuidados gerontológicos para mantener y perfeccionar su servicio y garantizar su inalienable pretensión de perennidad. En la medida en que todas nuevas obras, grandes o pequeñas, son portadoras de riesgos ecológicos y, a veces, catastróficos, que aumentan con el envejecimiento, la gerontología de las presas es todo un empuje. La acción adelantada de Arturo Rebollo en este terreno marca un camino a seguir para todos los que aman su propia obra con la devoción paternal que él ha puesto en Susqueda.

Un volumen encuadernado en cartón plastificado con lomo de tela, de  $18 \times 24,5$  cm, compuesto de 408 páginas, 330 figuras y fotografías y 39 tablas.

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