

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 [Continuación (1)] Parte I B

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

Fecha de recepción: 15-V-88

RESUMEN

En primer lugar el lector debe remitirse al resumen de la primera parte de este trabajo (publicada en el n.º 209 de *Materiales de Construcción*) con objeto de que pueda tener una idea más clara del tema que se desarrolla.

En esta parte se exponen los resultados experimentales del parámetro ECO (Evolución de las Características Organolépticas de las probetas) para su interpretación junto con los de los parámetros $\bar{\Delta} L$ (%) e $\bar{\Delta} L$ (%) / g cemento, expuestos en la parte I A (1).

Tales resultados experimentales han demostrado que:

- 1.º El cemento puzolánico PUZ-8 mostró un mejor comportamiento, ante el ataque del yeso, que el P-1 (14,11 % C_3A) y que el P-31 (7,62 % C_3A). Este mejor comportamiento no debe, ni puede, hacerse extensible sin más a todos los cementos puzolánicos, ni a todas las cantidades superiores al 30,11 % de yeso ($\approx 14,0$ % SO_3) empleadas como agresivo.
- 2.º El empleo de mayores cantidades de yeso como agresivo, que el 15,05 % (7,0 % SO_3), especificado expresamente por el método ASTM C 452, ha demostrado su posible interés para aquellos que hayan de juzgar y/o aconsejar el empleo, o no, de un cemento dado a la luz de su dictamen.
- 3.º El grado de respuesta:
 - del parámetro $\bar{\Delta} L$ (%), en el caso del 12,0 % de SO_3 y edad de las probetas de 28 días, y
 - del parámetro $\bar{\Delta} L$ (%) / g cemento, en el caso del 14,0 % de SO_3 , y edad de las probetas de 14 días,parecen ser los más apropiados para realizar una calificación más precisa de los cementos que de esta manera se ensayan.

SUMMARY

The reader should first refer to the summary of the first part of this work (published in *Materials de Construcción*, no. 209) in order to have a clearer idea of the subject being dealt with herein.

In this part of the work, the experimental results of the ECO parametre (Evolution of Organoleptic Characteristics of the Test Pieces) are given, in order that they be interpreted along with those of the $\bar{\Delta} L$ (%) and $\bar{\Delta} L$ (%) / g cement parametres, given in Part I A (1).

These experimental results have shown that:

- 1.º The pozzolanic cement PUZ-8 withstood plaster aggression better than the P-1 (14.11 % C_3A) and the P-31 (7.62 % C_3A). This better behaviour should not, cannot, be extended de facto to all other pozzolanic cements, nor to all quantities greater than 30.11 % plaster (≈ 14.0 % SO_3) used as aggressive agents.
- 2.º The use as aggressive agents of quantities of plaster greater than 15.05 % (7.0 % SO_3), specified expressly by the ASTM C 452 method, has proved of possible interest to those who must judge necessary and/or advise the use of a given cement resulting from their judgement.
- 3.º The degree of response
 - of the $\bar{\Delta} L$ (%) parametre, in the case of 12.0 % SO_3 and test pieces aged 28 days, and
 - of the $\bar{\Delta} L$ (%) / g cement parametre, in the case of 14.0 % SO_3 and test pieces aged 14 days,appear to be the most appropriate for grading more precisely cements being tested in this way.

I. INTRODUCCION

En la parte anterior de este trabajo (1) se daba cuenta, fundamentalmente, de la discusión de los resultados experimentales obtenidos en el mismo. En esta segunda parte se da cuenta

de la interpretación, deducción y conclusiones obtenidas de ellos. Adicionalmente, en esta parte del trabajo se encuentran, además, el resto de los resultados experimentales obtenidos, los cuales figuran en las fotografías de la 1 a la 16 inclusive.

II. INTERPRETACION CORRESPONDIENTE A LA DISCUSION DE LA PARTE I-A (1)

Continuando con lo expuesto en la primera parte de este trabajo, el hecho de que sea cual fuere el cemento de que se trate y el contenido de SO_3 (%) de su mezcla-conglomerante selenitosa respectiva, a partir de la del 7,0 % en adelante (10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de SO_3 , respectivamente) los valores de ΔL de las probetas correspondientes aumenten (con relativa mayor semejanza cualitativa en el caso del P-1 y del P-31, que en el caso del PUZ-8) durante el transcurso del ensayo hasta alcanzar, en su caso, un valor constante hasta la finalización del mismo^(*), induce a pensar con fundamento que ello ha de ser consecuencia directa, entre otros, del grado de estequiometría o relación $[C_3A/(CaSO_4)]$ que se alcance en cada caso de los dos cementos portland P-1 y P-31, o relación $[(C_3A/CaSO_4) + (Al_2O_3^-/CaSO_4)]$ ^(**) que se alcance en el caso del cemento puzolánico PUZ-8, para formar ettringita y/o cualquier otro sulfato-aluminato de calcio hidratado existente más o menos expansivo; debiéndose reconocer que tales relaciones anteriores son difíciles —por no decir imposible— de determinar con exactitud en tales medios, pues ya solamente el contenido de C_3A , determinado mediante las limitadas fórmulas de Bogue, no es exacto y sí únicamente aproximado o bastante aproximado, según se considere.

Pero ello, como se verá, no es óbice para que mediante las consecuencias expansoras derivadas de la formación intencionada de ettringita (2) (3) (7) se intente vislumbrar la posible causa de lo ocurrido en cada caso.

Así, por ejemplo, con el 5,0 % de SO_3 en la mezcla-conglomerante selenitosa se tiene que:

(*) Tanto más tarde cuanto mayor es dicho contenido de SO_3 y viceversa. En caso de menor contenido de SO_3 , como es el del 5,0 %, tal constancia de valores se mantiene de principio a fin del ensayo, de aquí la gran estabilidad de volumen alcanzada por las mismas.

(**) Mayormente:

C_3A = Aluminato tricálcico de la fracción clínker portland.

$Al_2O_3^-$ = Alúmina reactiva de la fracción puzolana.

CA = Aluminato monocálcico de la fracción escoria siderometalúrgica, en el posible supuesto de que dicho cemento PUZ-8 estuviese constituido, además, o en exclusiva por escoria(s) siderúrgica(s), en cuyo caso también se debería tener en cuenta su cociente $[CA/(CaSO_4)]$ respectivo, en la estequiometría.

C_2A = Aluminato bicálcico. Vale aquí, íntegramente, todo lo dicho para el CA, sólo que su cociente respectivo será $[C_2A/(CaSO_4)]$.

— la cantidad de ettringita formada ha de ser mínima con todos los cementos, pues mínimos han sido los valores de ΔL e $\Delta L/g \cdot$ cemento, originados por sus probetas correspondientes y, sobre todo, que

— dicha cantidad del 5,0 % de SO_3 ha de agotarse con todos los cementos durante los primeros 7 días de edad de sus probetas (*); de aquí la constancia y escasa magnitud de tales valores obtenidos en todos los casos a lo largo del resto de las edades del ensayo y aún posteriormente hasta hoy, ya que durante las mismas no deberá originarse ettringita secundaria expansiva por carecer, para entonces, del SO_3 necesario.

Todo lo expuesto confirma el hecho de que esto mismo debería ocurrir por idéntico o parecido motivo, aunque no lógicamente de principio a fin del ensayo, sino solamente a partir de una edad determinada del mismo en adelante, con la mezcla-conglomerante selenitosa mayor del 5,0 % más próxima a él, como es la del 7,0 % de SO_3 , con la cual las probetas del cemento portland P-1 han alcanzado la constancia de valores de ΔL citados a la edad de 60 días, mientras que las probetas de cemento portland P-31 la han alcanzado prácticamente a la edad de 120 días. Puede observarse, a propósito, la curiosa aproximación del valor de la relación:

$$\frac{14,11 \% C_3A \text{ del P-1}}{7,62 \% C_3S \text{ del P-31}} = 1,85$$

con el de la relación:

$$\frac{120 \text{ días del P-31}}{60 \text{ días del P-1}} = 2$$

tratándose sobre ello más adelante.

En definitiva, ante las características, constancia y escasa magnitud, durante el proceso del ensayo, de los valores de dichos parámetros, debe decirse, en el caso del 5,0 % de SO_3 , que la cantidad de SO_3 es:

a) Muy pegueña comparada con la que los cementos P-1 y P-31 necesitarían para que sus probetas respectivas no la mostraran —en este caso 12,54 % y 6,78 % de SO_3 , respectivamente—. De aquí que la constan-

(*) Por ello el interés que despierta la determinación del parámetro "contenido de iones SO_4^- de los líquidos de conservación de las probetas, y conocer de este modo su variación a lo largo del ensayo en futuras investigaciones afines".

cia de volumen de principio a fin del ensayo le haya ocurrido a tales probetas de los cementos anteriores con el resto de los contenidos de SO_3 de sus mezclas-conglomerante selenitosas empleadas (ver Figs. 1 y 2, y fotos de la 1 a la 12 inclusive), en las cuales la mayor presencia de yeso como agresivo acompañando a sus cementos P-1 y P-31 ha provocado una mayor y a veces proporcionada elongación, ΔL , de las probetas de los mismos (cuya evolución y desarrollo a lo largo del ensayo se estudia más adelante), por mayor cantidad de ettringita que se ha debido formar en todas ellas por estequiometría ya que existe, para entonces, como decíamos, cantidad de SO_3 :

- necesaria y suficiente para ello, caso del cemento P-1 con el 12,0 % de SO_3 y sobre todo, con el 14,0 % de SO_3 , y del P-31 con el 7,0 %, 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de SO_3 ;
- o bien, aunque no la hubiere, caso del cemento P-1 con el 7,0 % y 10,0 % de SO_3 , ser la suficiente para que, junto con un grado de endurecimiento adecuado de las mismas, provocar su ΔL ,

con auto-destrucción inclusive, como se ha podido demostrar en este trabajo con las correspondientes del 10,0 % de SO_3 (ver Fotos 1 y 2).

b) Muy próxima al tope máximo especificado expresamente, entre otros, por:

— el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la Recepción de Cementos, RC-75 (5), que:

- para los cementos portland P-450 y P-550 lo limita, como máximo, al 4,5 % de SO_3 y
- para los cementos portland P-350 lo limita, como máximo, al 4 % de SO_3 , mientras que
- para los PA y PUZ, tales límites máximos especificados son el 4 % y el 3,5 % de SO_3 , respectivamente;

— la vigente norma ASTM C 150-85 (6), que:

TABLA 1

| Determinaciones químicas (%) | Cementos | | | Yeso |
|------------------------------|---------------|--------------|----------------|--|
| | P-1 (15) | P-31 (15) | PUZ-8 (*) (17) | $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ (16) |
| P.F. | 1,60 | 3,45 | 2,70 | ver H_2O (40°C - 217°C) |
| R.I. | 0,70 | 0,86 | 4,46 | 0,75 |
| SiO_2 | 19,18 | 18,13 | 24,58 | 0,26 |
| Al_2O_3 | 6,44 | 5,30 | 8,21 | 0,04 |
| Fe_2O_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_2O | 0,90 | 0,76 | 0,39 | 0,02 |
| K_2O | 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_2O (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_3S | 51,05 | 58,70 | - | $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - 95,58$ |
| C_2S | 16,48 | 7,70 | - | $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ y/o |
| C_3A | 14,11 | 7,62 | - | CaSO_4 2,47 |
| C_4AF | 5,33 | 11,56 | - | CuCO_3 0,75 |
| | | | | MgCO_3 0,81 |
| | | | | H_2O a 40°C 0,41 |

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

- para los cementos portland de contenido de $C_3A > 8\%$ lo limita, como máximo, al 4,5 % de SO_3 ;
- para los cementos portland de contenido de $C_3A \leq 8\%$ lo limita, como máximo, al 3,5 % de SO_3 ;
- mientras que para los equivalentes a los PA y PUZ españoles, tales límites máximos son el 3 % y 4 %, respectivamente (5), según sea(n) escoria(s) o puzolana(s) el (los) constituyente(s) en exclusiva de los mismos(s), junto con la fracción clínker portland respectiva; siendo una característica primordial de estos tipos de cementos con sus especificaciones respectivas expuestas, su marcada **ESTABILIDAD DE VOLUMEN** en las condiciones normales de servicio no agresivas.

Por lo cual, todos los cementos ensayados con el 5,0 % de SO_3 en su mezcla-conglomerante selenitosa respectiva, habían de mostrarla igualmente por dicho motivo, según los valores correspondientes de ΔL obtenidos en este trabajo (ver Figs. 1, 2 y 3).

Igualmente se ha explicado, de forma indirecta, el comportamiento del resto de las probetas de los cementos portland P-1 y P-31 con 7,0 %, 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de SO_3 en su

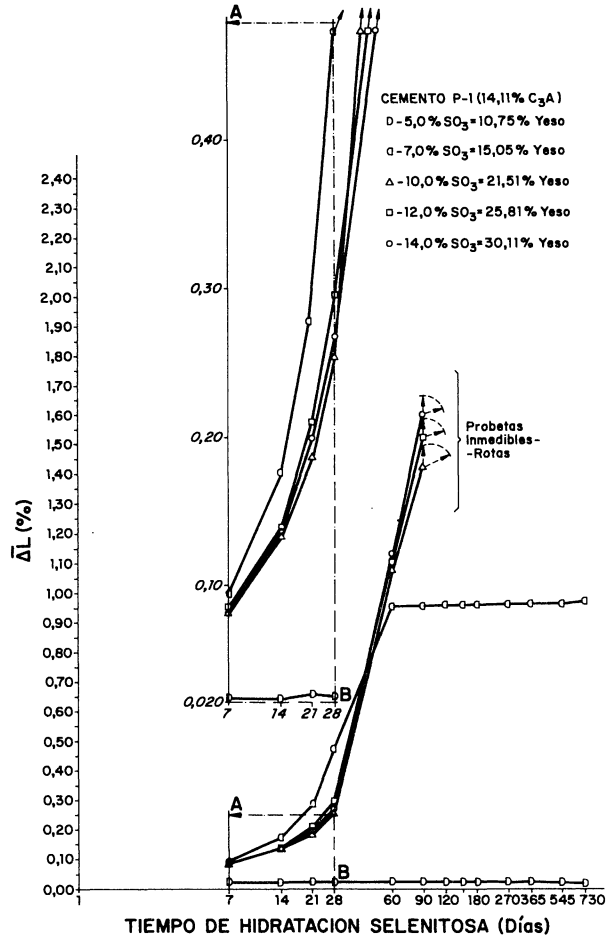


Fig. 1

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 ΔL % de sus probetas respectivas: |
|--|----------------------|---|
| 7 | $\Delta L_{(d)}$ (%) | 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% |

mezcla-conglomerante selenitosa respectiva. No así las correspondientes al PUZ-8, por carecer en este trabajo de los datos necesarios para ello. De todo esto se hablará seguidamente en dicho orden, con más detalle.

Así, pues, y volviendo de nuevo al resto de los contenidos de SO₃ ensayados, 7,0 %, 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de SO₃ respectivamente, se ha de decir que debido a la razón expuesta anteriormente, en a), para el caso del contenido de SO₃ del 5,0 %, y al pasar del 5,0 % al 7,0 % ó más, en todos los cementos ensayados, y a igualdad de edad tanto final como inicial lógicamente del ensayo, los valores de los parámetros ΔL (%) e ΔL (%) / g · cemento,

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 |

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 ΔL % de sus probetas respectivas: |
|---|---------------------|---|
| 7 | ΔL_{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 sí |
| Contenido de SO ₃ (%) mezcla-conglomerante cemento P-31 + yeso | | 5,0% < 7,0% < 10,0% < 12,0% < 14,0% |

alcanzados por las probetas homónimas correspondientes han sido mayores, no guardándose en todos los casos y edades del ensayo la proporcionalidad exacta entre los mismos, es decir, que $\bar{\Delta} L \neq f(\text{"x" \% SO}_3)$. De aquí que de los valores de ambos parámetros obtenidos cabe destacar lo siguiente:

Del $\bar{\Delta} L$ (%) y del $\bar{\Delta} L$ (%) / g · cemento ver lo expuesto, a propósito de este parámetro, en el apartado (C) de la Discusión de este trabajo Parte I-A (1).

No obstante, lo que más llama la atención, es el hecho referente a que, en general, tal grado de proporcionalidad citado se cumple, con mayor frecuencia, en todos los casos, y durante un mayor número de edades del ensayo, particularmente las iniciales de 7 a 28 días, con el parámetro relativo $\bar{\Delta} L$ (%) / g · cemento, que con el absoluto $\bar{\Delta} L$ (%). De aquí el posible interés científico-tecnológico (especificaciones correspondientes más apropiadas, quizás, que las actuales en vigor) que tal parámetro relativo, $\bar{\Delta} L$ (%) / g · cemento, puede llegar

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 |

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 $\bar{\Delta} L$ % 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 despertar en todos aquellos investigadores interesados en esta materia:

- tanto directamente por todo lo realizado hasta el momento sobre esta temática,
- como indirectamente por todo lo que que-

da y se deba realizar, a continuación, para tratar de averiguar si tal grado de respuesta del parámetro relativo continúa aumentando (mayores valores del mismo y quizás también del correspondiente absoluto $\bar{\Delta}L$, a igualdad de edad del ensayo) con la adición de yeso como agresivo a la mezcla-conglomerante selenitosa, hasta que la

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 |

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 | | | PUZ-8 < P-31 < P-1 | | PUZ-8 < P-31 < P-1 | |
| 365 | | | | | | |
| 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 | | | PUZ-8 < P-31 < P-1 | | | |
| 270 | | | | | PUZ-8 < P-31 < P-1 | |
| 365 | | | | | | |
| 545 | | | | | | |
| 730 | | | | | | |

misma posea un 21,0 % de SO₃, y si es aplicable para los cementos PA y PUZ especialmente, no debiéndose olvidar al respecto que un puzolánico —en este caso el PUZ-8— con un 14,0 % de SO₃ ha mostrado por lo general los mayores valores de los parámetros absoluto, $\bar{\Delta} L$, y relativo, $\bar{\Delta} L/g \cdot \text{cemento}$, a través de sus probetas respectivas, y durante un mayor número de edades iniciales del ensayo, que el resto de sus contenidos de SO₃ ensayados del mismo modo.

Por otra parte, y para el caso comparativo de los dos cementos portland, únicamente P-1 y P-31, llama poderosamente la atención el hecho de que tan sólo a partir del contenido de SO₃ del 7,0 % en adelante, 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de SO₃, respectivamente, en la mezcla-conglomerante selenitosa correspondiente:

- se cumpla que el valor del $\bar{\Delta} L$ (%) de las probetas aumente, a igualdad de edad del ensayo, con el contenido de C₃A del cemento portland conformante respectivo,

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 | $\bar{\Delta} L (\%)/g \cdot \text{cemento}] \times 10^{-4}$ | 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 | | | | | | | | | | | |

— y que no se cumpla, por el contrario, en el caso de que dicho contenido haya sido del 5,0 % [ver Tabla 8 en la Parte I-A (1) de este trabajo].

Pues bien, dejando de un lado la influencia del C_4AF , C_2F y sus s.s. en la fijación de parte de

la cantidad de SO_3 inicialmente presente, en cada caso, para formar los SFCH (*) respectivos

(*) SFCH.—Sulfato-ferritos de calcio hidratados.

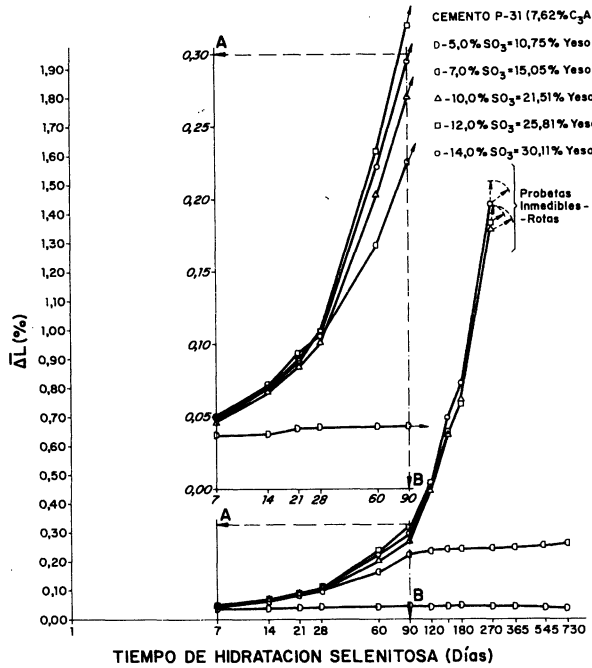


Fig. 2

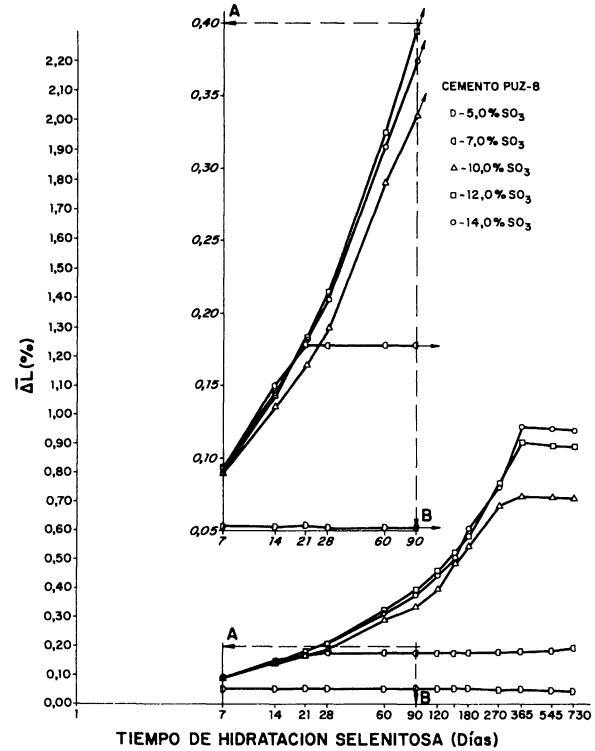


Fig. 3

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 $1'' \times 1'' \times 11 \frac{1}{4}''$ 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% |

y puesto que la velocidad de formación de los SACH (*) correspondientes es muy superior, esto se podría explicar, quizás, diciendo que es consecuencia directa del grado de estequiometría de la reacción de formación de ettringita alcanzando en cada mezcla-conglomerante selenitosá de los portland. Así se tiene que si la estequiometría perfecta se alcanza con la relación molecular $(C_3A/CaSO_4 \cdot 2 H_2O) = 1/3$, equivalente a esta otra $(C_3A/SO_3) = 1/3$, la misma se podría alcanzar más pronta y rápidamente a partir del instante mismo de entrar en contacto los tres reactivos necesarios y suficientes para ello (**), cuanto mayor sea la relación C_3A/SO_3 (ver Tabla 11) existente en la mezcla conglomerante selenitosa (en este caso la del 5,0 % del cemento portland P-1), la cual se deberá corresponder con los menores valores de ΔL (%) alcanzados a igual edad del ensayo, según lo ocurrido en este trabajo (ver Tablas 2 y 4). Todo esto se tratará de aclarar más adelante.

Por lo tanto, y en definitiva, se puede decir justificadamente que todo ello está íntimamente relacionado no sólo —como se dijo al comienzo de la presente interpretación— con el grado de estequiometría alcanzado en cada caso, sino también con el mecanismo de formación de la ettringita —tema éste de perma-

(*) SACH.—Sulfato-aluminato de calcio hidratado.

(**) En el cuenco en el que se vierten tales reactivos en forma de cemento portland, P-1 ó P-31, según los casos, yeso $CaSO_4 \cdot 2 H_2O$ como agresivo, y agua de amasado, respectivamente, para su mezcla y amasado adecuados correspondientes.

nente actualidad—, pues de todos los mecanismos e hipótesis explicativos existentes hasta hoy (4), aún no se ha podido precisar cuál es el verdadero de todos ellos, pese a que el de through-solution y el topoquímico, con o sin disolución previa, sean los que mayor participación parecen tener para poder llegar a explicar la formación de la ettringita y su comportamiento expansivo subsiguiente siendo, por tanto, el origen de la gran controversia existente entre todos los investigadores del

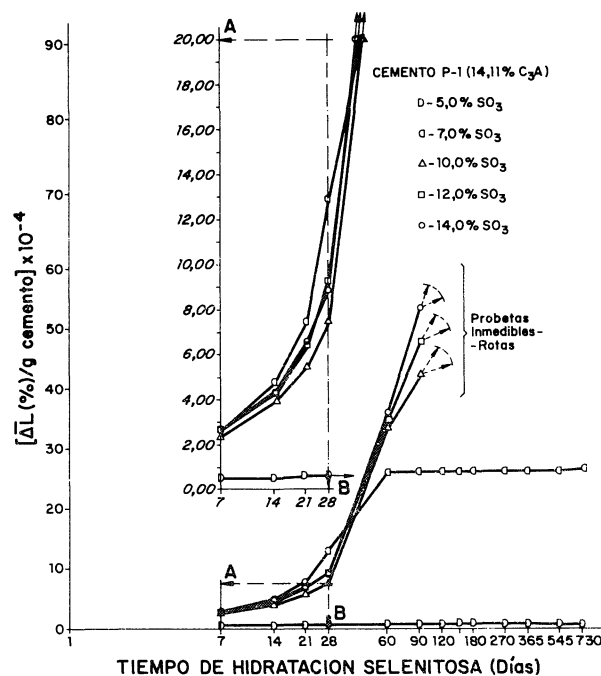


Fig. 4

TABLA 11

| | 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_3 , respectivamente, del: | | | | | | | | | |
|--|--|--------|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|--------|
| | Cemento P-1 con un contenido de SO_3 del: | | | | | Cemento P-31 con un contenido de SO_3 del: | | | | |
| | 5,0% | 7,0% | 10,0% | 12,0% | 14,0% | 5,0% | 7,0% | 10,0% | 12,0% | 14,0% |
| $\frac{n^{\circ} \text{ moles de } C_3A}{1 \text{ mol de } SO_3}$ | 0,91 | 0,55 | 0,36 | 0,28 | 0,23 | 0,44 | 0,30 | 0,19 | 0,15 | 0,12 |
| $\frac{n^{\circ} \text{ de moles de } SO_3}{1 \text{ mol de } C_3A}$ | (Δ Δ) | (Δ Δ) | (Δ Δ) | (Δ) | (Δ) | (Δ Δ) | (Δ) | (Δ) | (Δ) | (Δ) |
| | 1,24 | 1,83 | 2,83 | 3,59 | 4,45 | 2,28 | 3,35 | 5,19 | 5,59 | 8,17 |
| $\frac{n^{\circ} \text{ de moles } SO_3}{1 \text{ mol } C_3A}$ | Λ | Λ | Λ | V | V | Λ | V | V | V | V |
| n ^o de moles SO_3 necesarios para la estequiometría | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Cantidad total de ettringita a formar (g) | 103,01 | 144,22 | 205,02 | 205,57 | 194,37 | 103,01 | 129,12 | 119,16 | 112,51 | 105,87 |

(Δ) Mezcla-conglomerante selenitosa deficitaria de C_3A para alcanzar la estequiometría
(Δ Δ) Mezcla-conglomerante selenitosa deficitaria de SO_3 para alcanzar la estequiometría

ramo, de los cuales unos abogan por la mayor exclusiva participación del primero, mientras que otros abogan por la del segundo. Por tanto, si el mecanismo de formación de la ettringita fuera el de through-solution, en exclusiva,

+ por un lado, los valores del $\overline{\Delta L}$ (%) alcanzados por las probetas de ambos cementos portland P-1 y P-31 con 7,0 % SO_3 en sus mezclas-conglomerantes respectivas, hubiesen sido muy similares ya que, en ambas tandas de probetas, se hubiese formado: en las del cemento P-1, la cantidad de ettringita correspondiente a 7,87 % C_3A ($<>$ 7,0 % SO_3), o sea 36,3 %, y en las del cemento P-31, la cantidad de ettringita correspondiente a 7,62 % C_3A ($<>$ 6,78 % SO_3), o sea, 34,87 %, ambos valores, 36,03 % y 34,87 %, bastante aproximados, lo que llevaría implícito que los $\overline{\Delta L}$ correspondientes a la edad de estabilización respectiva también deberían serlo. Y ello no ha sido así sino lo contrario, ya que:

— si tal edad de estabilización hubiese sido común para ambos, posibilidad ésta compatible con el mecanismo de through-solution que se trata de justificar, e igual:

- a la de las probetas del cemento P-1 (o sea 60 días), el valor del $\overline{\Delta L}$ del P-1 = 0,954 %, habría resultado ser \approx y no $>$ $\overline{\Delta L}_{60 \text{ d.}}$ del P-31 = 0,168 %, ó
- a la de las probetas del cemento P-31 (o sea 120 días) el valor de $\overline{\Delta L}_{120 \text{ d.}}$ del P-1 = 0,961 %, habría resultado ser \approx y no $>$ $\overline{\Delta L}_{120 \text{ d.}}$ del P-31 = 0,240 %, ó

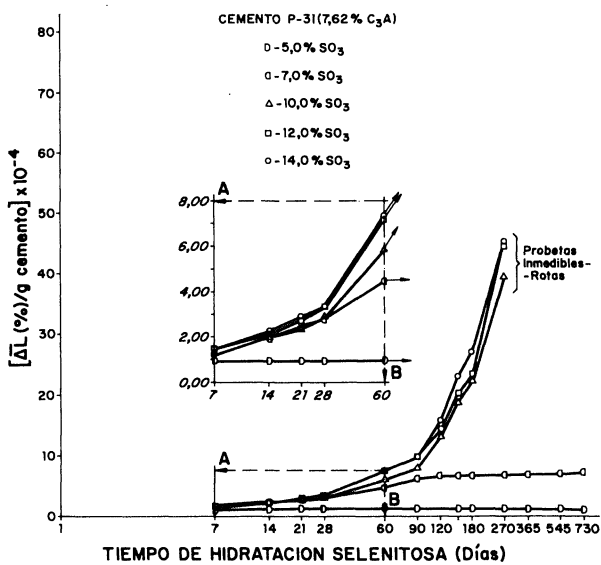


Fig. 5

— si tal edad de estabilización hubiese sido la de cada familia de probetas de cada cemento así ensayado (tal posibilidad no compatible, como se verá a continuación con el mecanismo de through-solution que se trata de justificar) el valor del $\overline{\Delta L}_{60 \text{ d.}}$ del P-1 = 0,954 %, habría resultado ser \approx y no $>$ $\overline{\Delta L}_{120 \text{ d.}}$ del P-31 = 0,240 %,

+ y, por otro, la edad de consecución de la estabilidad de volumen de las familias de probetas de tales cementos portland P-1 y P-31 así ensayados, con 7,0 % SO_3 , hubiese sido la misma o al menos muy aproximada, siendo achacables quizás las ligeras diferencias que hubiesen existido a la pequeña diferencia de ettringita y, por tanto de $\overline{\Delta L}$ (%), originada por ambos cementos portland según lo dicho al respecto con anterioridad, así como también junto al C_4AF respectivo, y a la posible menor porosidad de las probetas del P-31 sobre las del P-1 por mayor superficie específica del cemento P-31, 3.248 cm^2/g , sobre el cemento P-1, 3.192 cm^2/g , pues la escasa diferencia entre los valores de a/c, 0,52 y 0,51 respectivos no parecen ser tan determinantes (he aquí el interés que despierta la determinación de este parámetro porosidad o cualquier otro equivalente en objetivos, como bien pudiera ser la velocidad de ultrasonido en futuras investigaciones afines), lo cual tampoco ha sido el caso, ya que la diferencia entre ambas edades de estabilización respectiva, la de 60 días para las probetas del P-1 y la de 120 días para las del P-31, ha sido la notable de 60 días.

Por todo lo expuesto anteriormente, tal mecanismo de through-solution no deberá ser el único en exclusiva, por lo que y por exclusión, el topoquímico con o sin disolución previa puede llegar también, y en principio, a tener lugar incluso con igual o mayor supremacía. Y como prueba adicional de ello se tiene lo de-

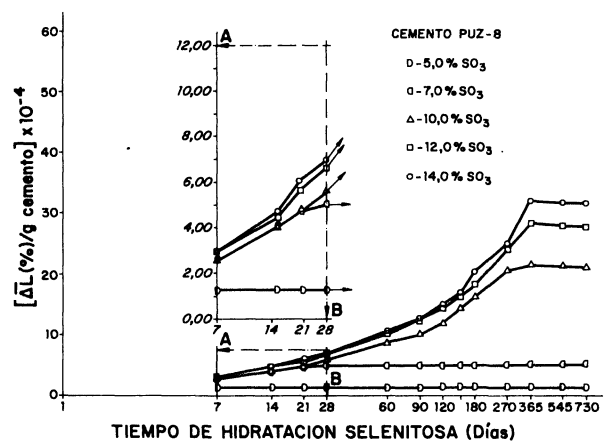


Fig. 6

nunciado con anterioridad referente a la notable aproximación existente entre los valores, 1,85 y 2,0 de las relaciones citadas antes, la cual se puede explicar de la siguiente manera:

Al ser constante la cantidad de SO_3 , 7,0 % en las familias de probetas de ambos cementos portland P-1 y P-31, lógicamente el tiempo a emplear en la formación de la cantidad total de ettringita respectiva o edad de consecución de la estabilidad de volumen correspondiente, habrá de ser la mitad en las probetas del cemento portland P-1 del empleado por las probetas del P-31, pues en aquéllas, las del P-1, en su origen, cada mol de SO_3 se deberá encontrar rodeado en el volumen total común de cada probeta, por más moles de C_3A — 0,55 > 0,30 (vease la Tabla 11), aproximadamente el doble ($0,55 \approx 0,3 \times 2$) que en las de P-31, ya que el contenido de C_3A de éste, 7,62 %, es

aproximadamente la mitad ($7,055 \% \approx 14,11 \% / 2$) del contenido de C_3A de aquél, el P-1.

Con lo cual, en las probetas del cemento P-1, cada mol de SO_3 , según el mecanismo topográfico antes aludido, debería tardar al menos aproximadamente la mitad de tiempo en alcanzar los moles correspondientes de C_3A para dar ettringita y, consiguientemente, finalizar la formación total de la misma o estabilización de sus probetas correspondientes 60 días antes, o sea en la mitad de tiempo que las homónimas del P-31, 120 días, para igual fin, como ha sido el caso $60 = 120 / 2$ (véase Figs. 1 y 2).

(*) Inicialmente en forma de $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ mayormente.

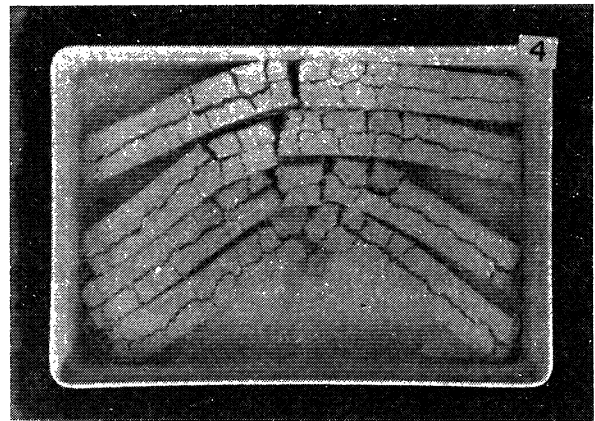
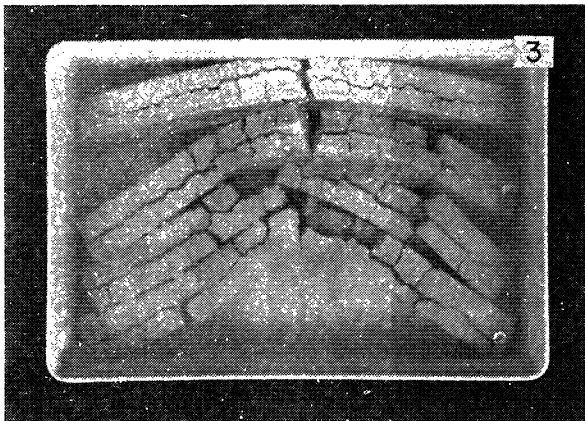


Foto 1.—Probetas de $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$ de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-1 (14,11 % C_3A) con 10,0 % SO_3 , expandidas y fracturadas. Edad: 180 días.

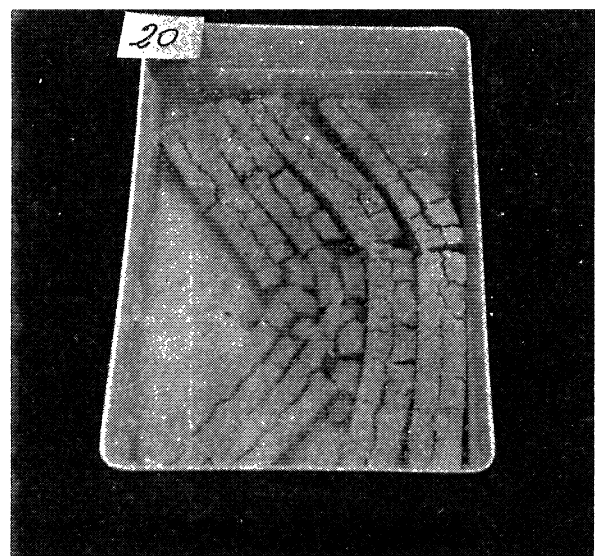
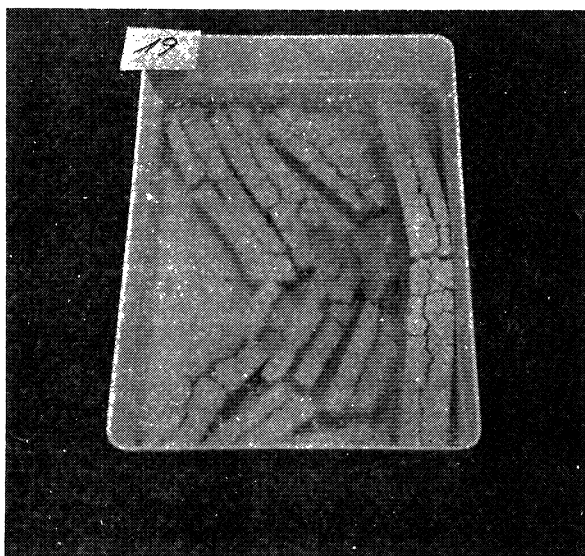


Foto 2.—Probetas de $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$ de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-1 (14,11 % C_3A) con 10,0 % SO_3 , expandidas y fracturadas. Edad: 730 días.

No obstante, y pese a todo lo anterior, no se es ajeno a que pueda existir una cierta crítica sobre que la buena precisión y coincidencia de valores vertidos en este último razonamiento son fruto, simplemente, de una gran casua-

lidad alcanzada en este trabajo. Respecto a ello, se ha de reconocer que en principio todo este razonamiento no queda exento de una cierta aproximación y relatividad. Pero ¿en qué medida? Ya que si razonamos con algo más

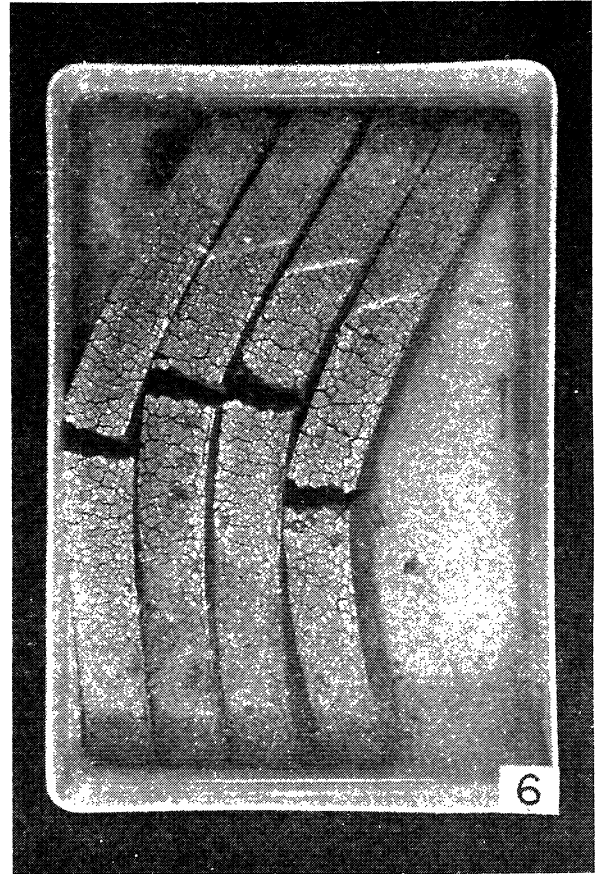
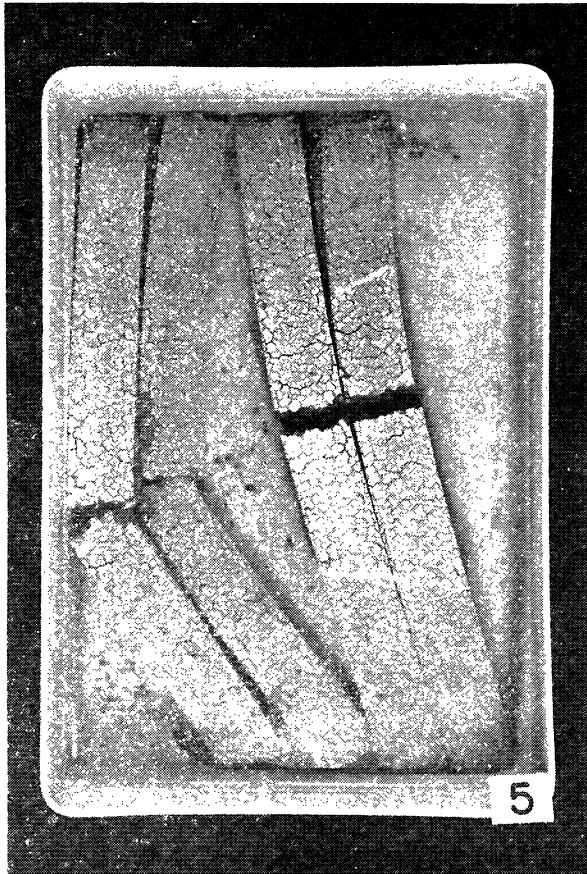


Foto 3.—Probetas de $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$ de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-1 (14,11 % C_3A) con 12,0 % SO_3 , expandidas y fracturadas. Edad: 180 días.

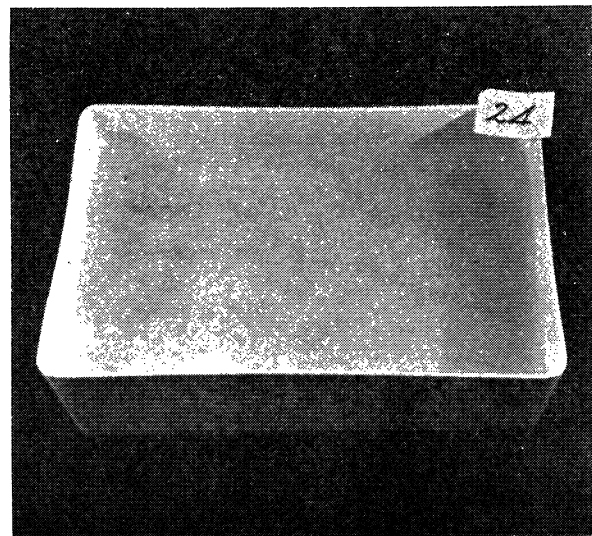
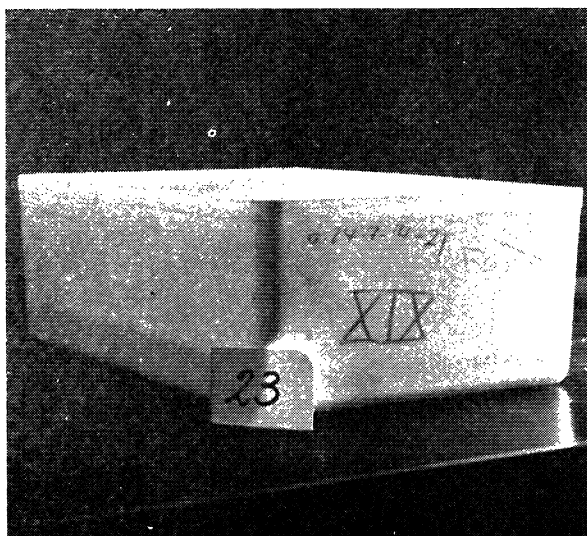


Foto 4.—Probetas de $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$ de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-1 (14,11 % C_3A) con 12,0 % SO_3 , deshechas. Edad: 730 días.

de detalle se ha de admitir que, en todo caso, la menor precisión y coincidencia de los cálculos llevados a cabo puede ser a lo sumo por defecto (edades de consecución de la estabilidad de volumen por parte de ambas familias

de probetas, las del cemento P-1 y las del cemento P-31, algo más cercanas entre sí, que no por exceso. Pues si bien la edad de consecución de la estabilidad de volumen por parte de las probetas del cemento portland

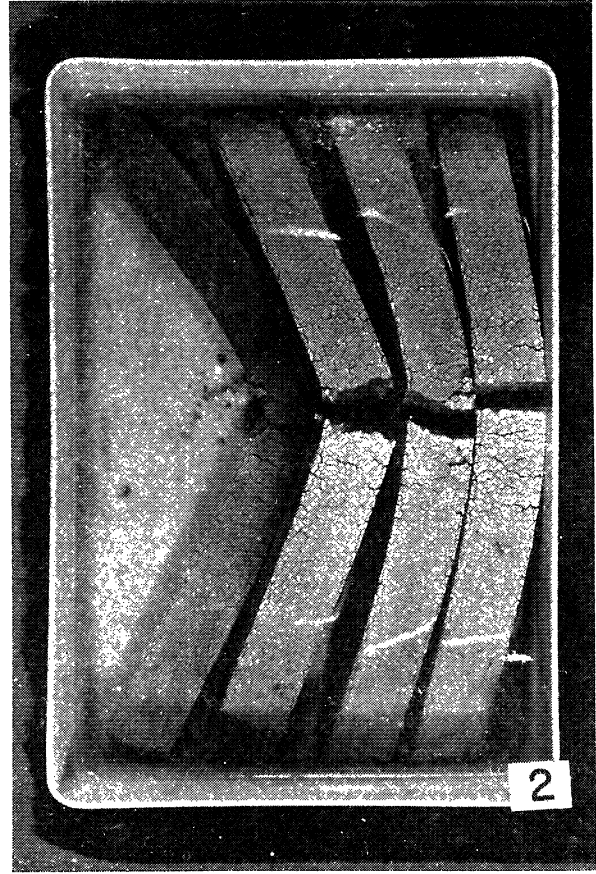
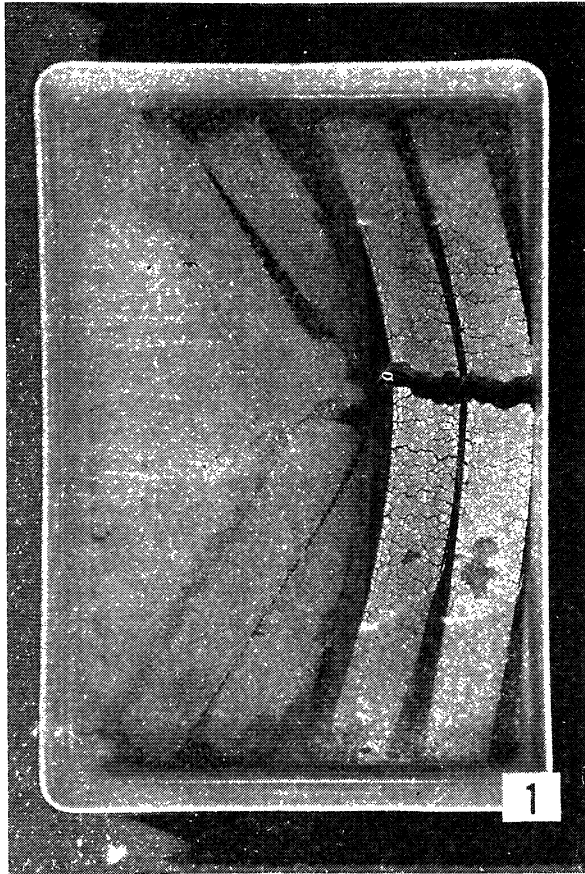


Foto 5.—Probetas de $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$ de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-1 (14,11 % C_3A) con 14,0 % SO_3 , expandidas y fracturadas. Edad: 180 días.

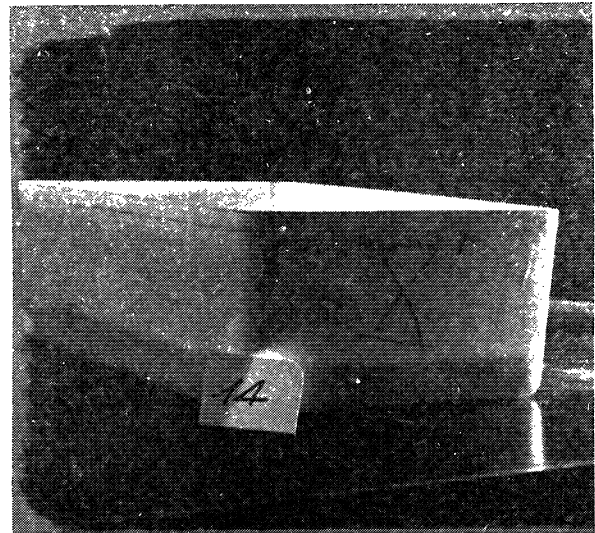
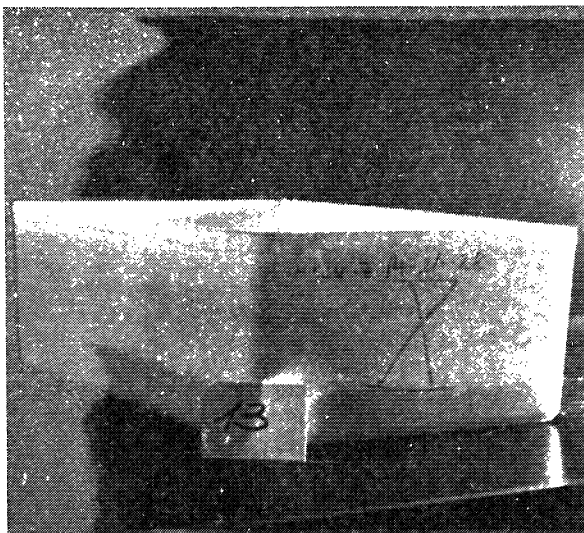


Foto 6.—Probetas de $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$ de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-1 (14,11 % C_3A) con 14,0 % SO_3 , deshechas. Edad: 730 días.

P-31, así ensayado, podría considerarse quizás la de 150 ó 180 días en lugar de la de 120 días citada anteriormente, otro tanto podría considerarse para las probetas del cemento portland P-1, aunque en este caso la edad de consecución de la estabilidad de volumen de las mismas podría ser a lo sumo de 90 días; con lo cual el cociente $150/2 = 75$ días se aproxima, mientras que el cociente $180/2 = 90$ días continúa coincidiendo con la edad de 90 días. Pudiéndose justificar esto quizás debido a que la diferencia entre los valores teórico,

$$7,055 \% \text{ de } C_3A = \frac{14,11 \% \text{ de } C_3A \text{ del P-1}}{2}$$

y real, 7,62 % de C_3A del P-31, es también por defecto y no por exceso.

De aquí que la cantidad total de ettringita a formar del 7,62 % de C_3A con exceso de SO_3 presente en el medio para alcanzar la estequiometría correspondiente, deberá tardar menos tiempo en formarse, posiblemente 75 días, que no estrictamente la mitad, o sea, 90 días, según la mecánica de los razonamientos empleados con anterioridad.

Por lo tanto, y en definitiva, todo ello se deberá traducir lógicamente en que sea cual fuere el mecanismo de formación de la ettringita se deberán considerar las situaciones o puntualizaciones siguientes:

Punto 1°

En el caso de que la cantidad presente de SO_3 sea deficitaria, para que la cantidad de C_3A

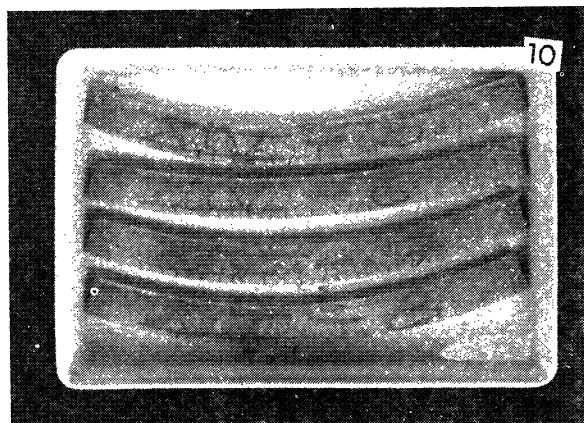
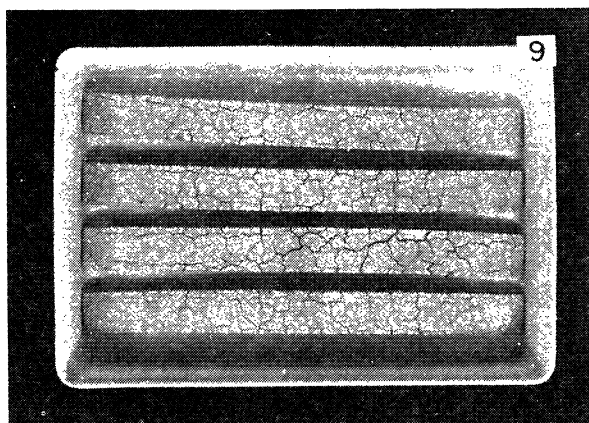


Foto 7.—Probetas de $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$ de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-31 (7,62 % C_3A) con 10,0 % SO_3 , expandidas y fisuradas. Edad: 365 días.

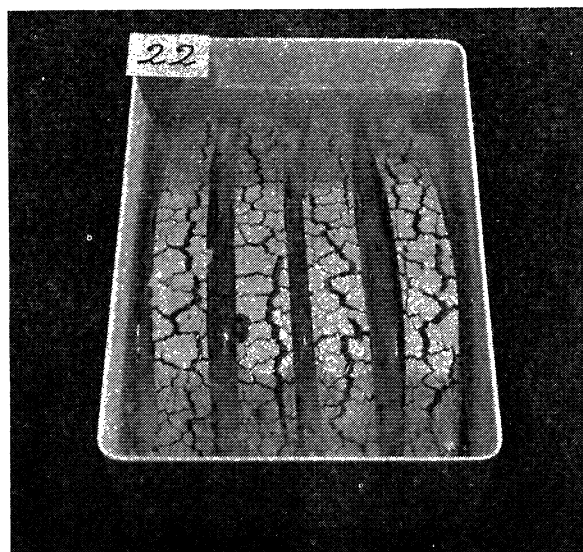
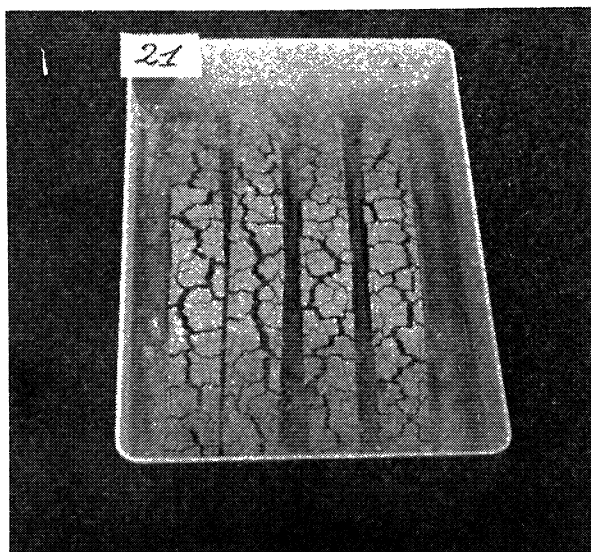


Foto 8.—Probetas de $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$ de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-31 (7,62 % C_3A) con 10,0 % SO_3 , expandidas y fracturadas. Edad: 730 días.

aportada por cada cemento portland, P-1 y P-31 a su mezcla-conglomerante respectiva, alcance la estequiometría perfecta, ocurre que en aquellas que contienen el 5,0 %, 7,0 % y 10,0 % de SO_3 respectivamente, y están constituidas por el cemento portland P-1, y el 5,0 % y 7,0 de SO_3 respectivamente, y asimismo están constituidas por el cemento portland P-31, ante la gran profusión de casos existentes, se va a estudiar cada uno por separado.

Así pues se tiene que en el caso común para ambos cementos portland del 5,0 % de SO_3 , el P-1 deberá formar lógicamente mayor cantidad de ettringita del total posible a formar por el mismo en este caso (25,75 % de ettringita \llcorner 5,0 % de SO_3) durante las fases de amasado, enmoldado, curado en C.H., desmoldado, marcado y medición inicial de sus probetas, de mortero correspondientes (o ettrin-

gita primaria o no nociva) que el P-31 (25,75 % también), el cual, de este modo, podría quizás disponer de una mayor cantidad de C_3A residual de su 7,62 % inicial que aquél (pese a que antes del amasado sea menor, 14,11 % de C_3A del P-1 $>$ 7,62 % C_3A del P-31), y consiguientemente originar, a igual edad del ensayo, mayores valores de ΔL en sus probetas correspondientes que el P-1, según lo ocurrido en este trabajo (Tabla 8). No obstante, y admitiendo que los tiempos empleados en el amasado, enmoldado, curado en C.H. y desmoldado de cada familia de probetas se pueden considerar prácticamente constantes, para que la razón anterior pueda ser cierta habría que admitir, o bien que la finura o superficie específica del cemento P-1 ha de ser notablemente mayor que la del P-31 —lo cual no ha sido el caso (3.192 cm^2/g del P-1 $<$ 3.248 cm^2/g del P-31), causa por la cual esta posibi-

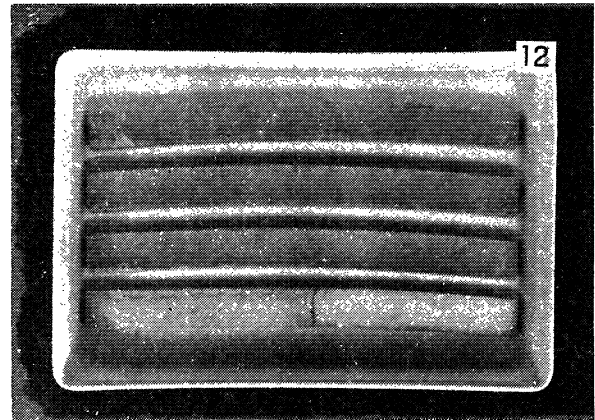
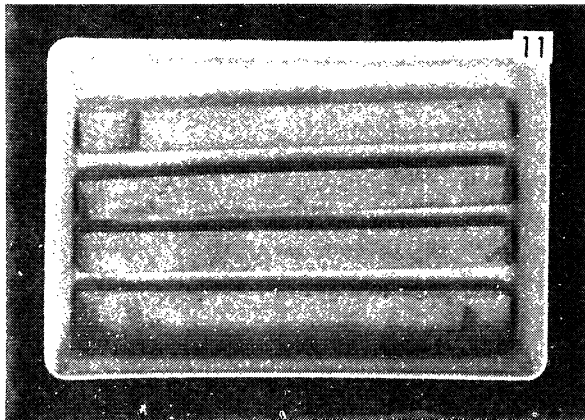


Foto 9.—Probetas de $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$ de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-31 (7,62 % C_3A) con 12,0 % SO_3 , expandidas y fisuradas. Edad: 365 días.

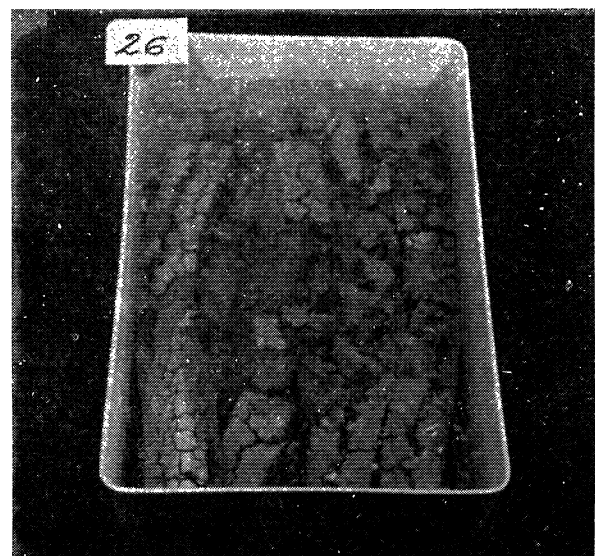
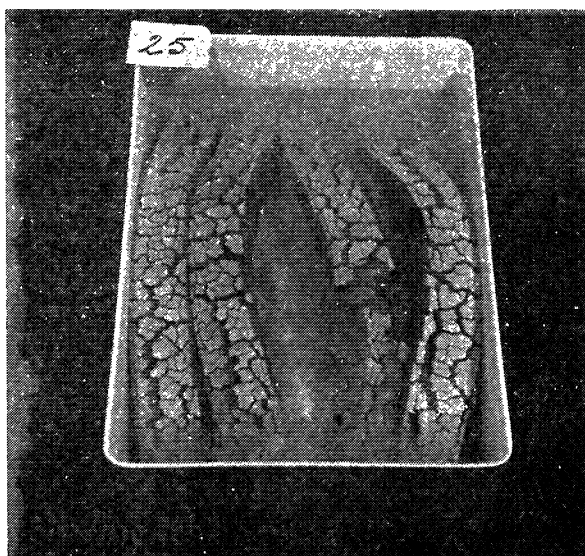


Foto 10.—Probetas de $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$ de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-31 (7,62 % C_3A) con 12,0 % SO_3 , expandidas y fracturadas. Edad: 730 días.

lidad queda invalidada o descartada—, o bien que la relación a/c (= 0,528) del P-1 ha de ser mayor que la a/c (= 0,518) del P-31 —en cuyo caso sí ha sido cierta, guardando estos datos una relación inversa con los datos de la respectiva superficie específica expuestos anteriormente—, o bien que al admitirse la supremacía del mecanismo topoquímico, con o sin disolución previa de formación de la ettringita sobre cualquier otro y en especial sobre el de through-solution, el cemento P-1 al poder disponer de mayor cantidad de C_3A , 14,11 % podrá, por distribución uniforme al azar de éste en toda la masa del mortero de sus probetas fijar mayor cantidad y más rápidamente del 5,0 % de SO_3 inicial, que el P-31, 7,62 % C_3A , por todo lo contrario; viéndose esta posibilidad lógicamente coadyuvada por el hecho de que la relación a/c haya sido mayor en el caso del P-1 que en el caso del P-31 (Tablas 3 y 5). Y

además, si tal supremacía de mecanismos fuera la contraria a la citada, las probetas de ambos cementos deberían haber proporcionado a igual edad del ensayo valores más similares o próximos de ΔL que los proporcionados en la realidad, lo cual no ha sido el caso, quedando por tanto invalidada tal supremacía del mecanismo de through-solution sobre el topoquímico, con o sin disolución previa, para poder explicar lo ocurrido.

Por otra parte, y antes de continuar adelante, se ha de admitir que aceptando la supremacía del mecanismo topoquímico citado sobre cualquier otro por las razones expuestas, este mismo principio se ha de mantener prácticamente: a igualdad de contenido de SO_3 de la mezcla-conglomerante selenitosa, es decir, ettringita primaria del P-1 con X% de SO_3 debe de ser > ettringita primaria del P-31 con

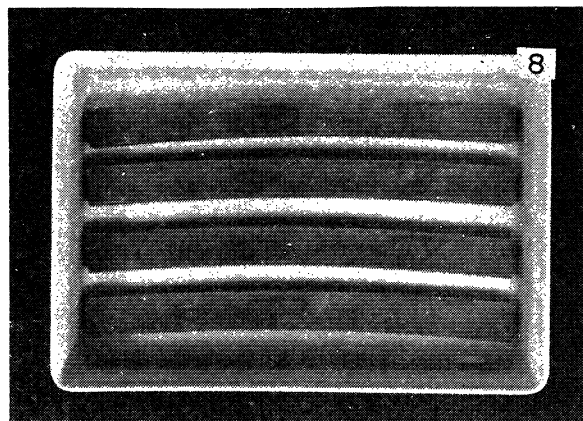
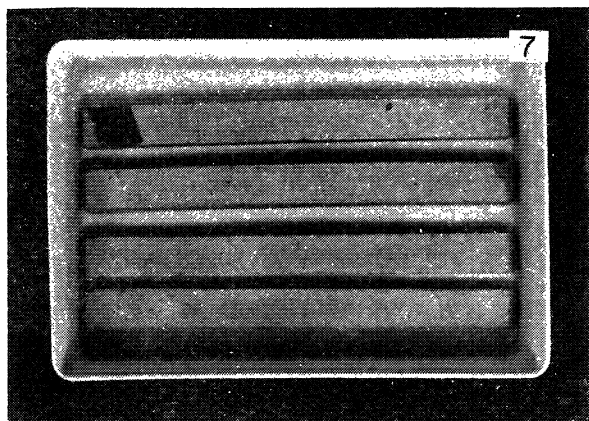


Foto 11.—Probetas de $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$ de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-31 (7,62 % C_3A) con 14,0 % SO_3 , expandidas y fisuradas. Edad: 365 días.

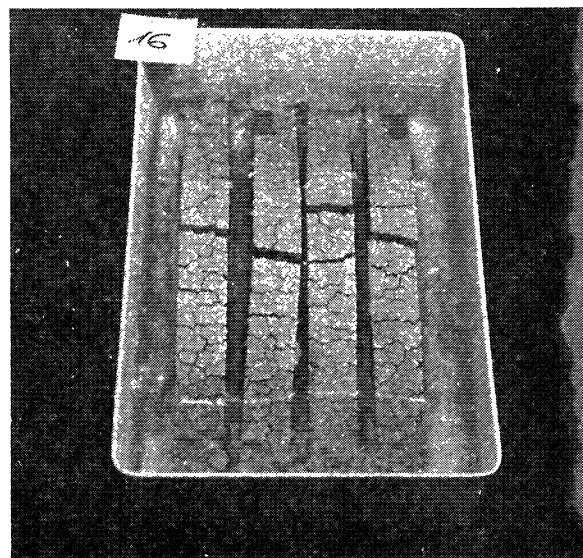
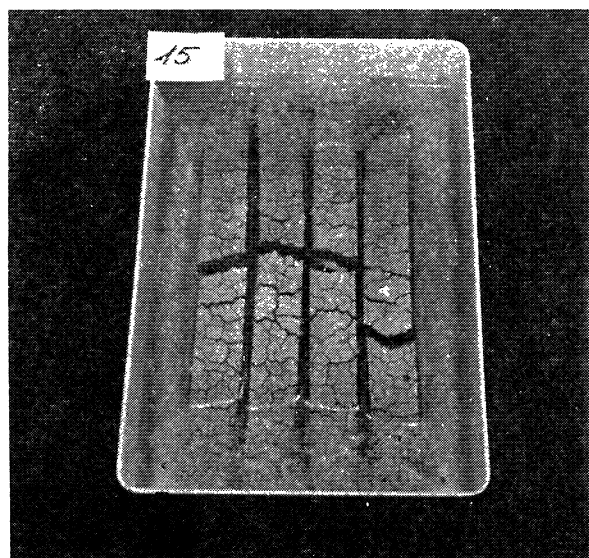


Foto 12.—Probetas de $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$ de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-31 (7,62 % C_3A) con 14,0 % SO_3 , expandidas y fracturadas. Edad: 730 días.

X % de SO_3 , y a igualdad de cemento portland; es decir: ettringita primaria del P-1 con 5,0 % de SO_3 debe de ser > ettringita primaria del P-1 con 7,0 % de SO_3 debe de ser > ettringita primaria del P-1 con 10,0 % de SO_3 debe de

ser > ettringita primaria del P-1 con 12,0 % de SO_3 debe de ser > ettringita primaria del P-1 con 14,0 % de SO_3 , y otro tanto con el P-31, lo cual se ha de traducir en definitiva en que en tanto en cuanto:

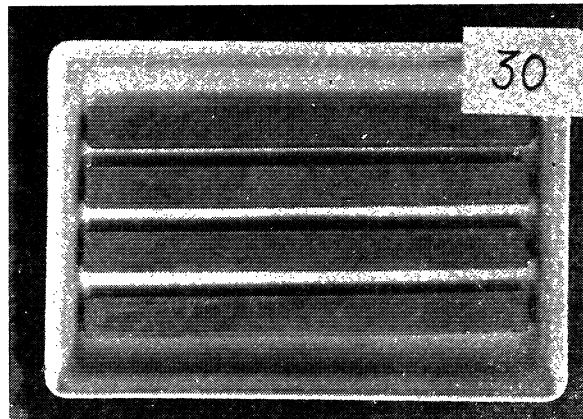
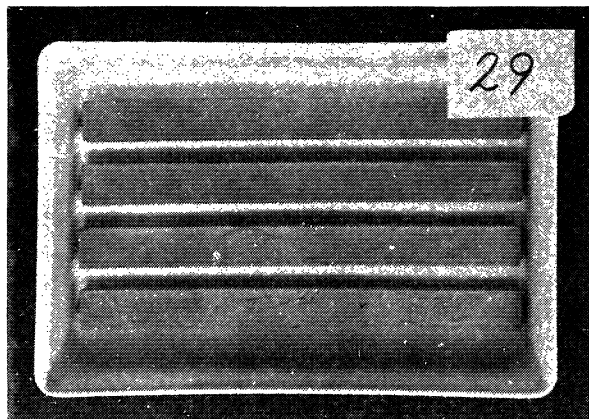


Foto 13.—Probetas de $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$ de mortero, 1 : 2,75, de cemento PUZ-8 con 10,0 % de SO_3 , expandidas, edad: 730 días.

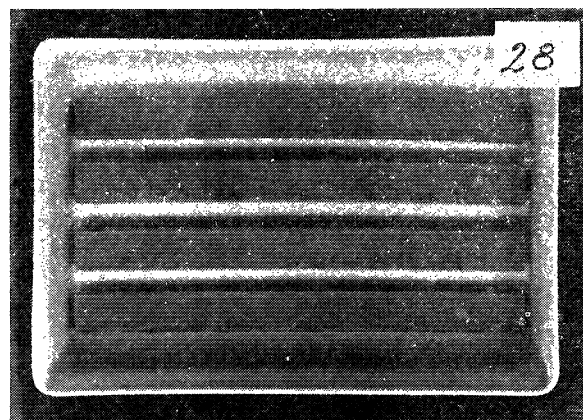
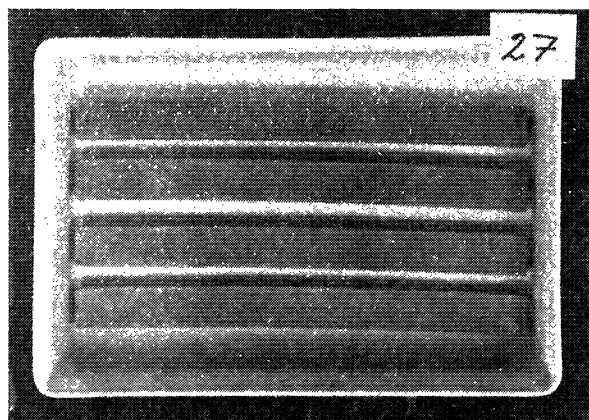


Foto 14.—Probetas de $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$ de mortero, 1 : 2,75, de cemento PUZ-8 con 12,0 % de SO_3 , expandidas, curvadas y ligeramente fisuradas. Edad: 730 días.

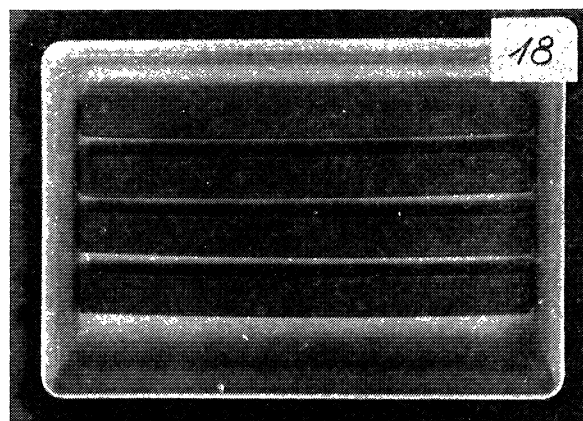
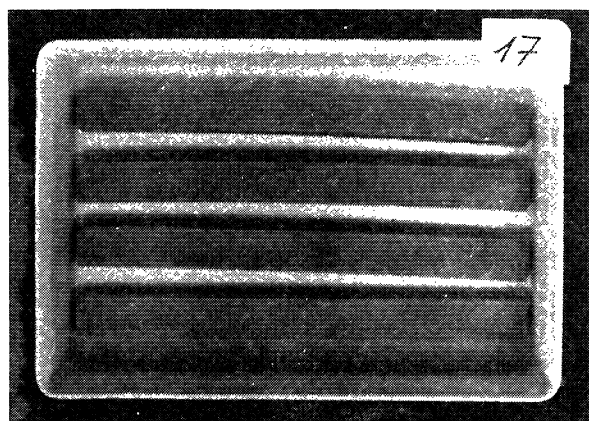


Foto 15.—Probetas de $1'' \times 1'' \times 11^{1/4}''$ de mortero, 1 : 2,75, de cemento PUZ-8 con 14,0 % de SO_3 , expandidas, curvadas y ligeramente fisuradas. Edad: 730 días.

- mayor sea el contenido de SO_3 de la mezcla-conglomerante selenitosa que se considere, y
- menor sea el contenido de C_3A del cemento portland que la constituya,
- menor deberá ser la cantidad de ettringita primaria que se origine, y
- mayor deberá ser la cantidad de C_3A sobrante o residual para poder originar ettringita secundaria con posterioridad y viceversa.

De este modo, e indirectamente, se está beneficiando por tanto —según se mire— bastante más al cemento portland P-1 que al P-31, a medida que se aumenta el contenido común de SO_3 de su mezcla-conglomerante selenitosa respectiva, aunque paradójica y aparentemente pareciera lo contrario, pues tal deducción anterior se verificaría más y mejor en su integridad (como se verá más adelante) cuanto más próximo en su contenido de C_3A respecti-

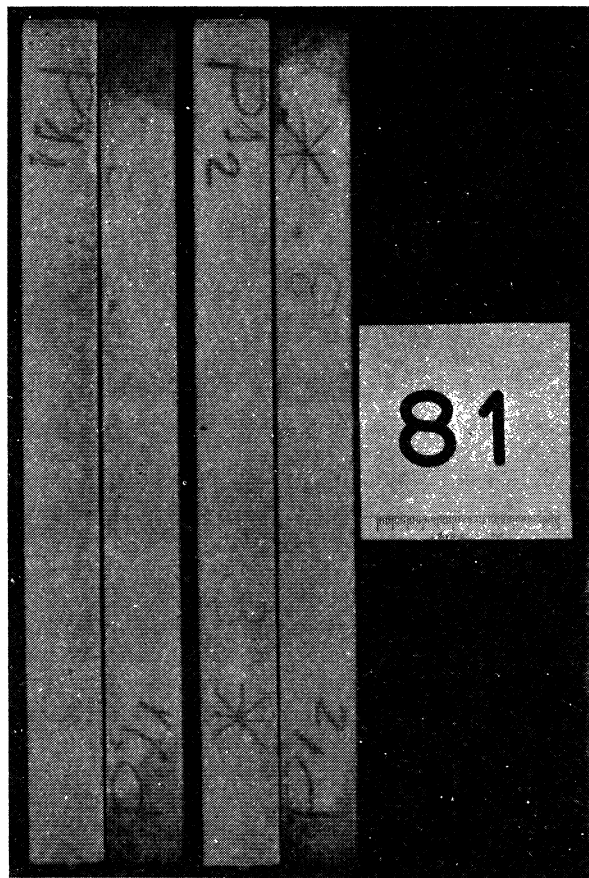


Foto 16.—Probetas de 1" × 1" × 11¹/₄" de mortero, 1 : 2,75, de cemento P-1 (14,11 % C_3A) con 7,0 % de SO_3 , expandidas. Edad: 365 días y edad: 730 días (prácticamente sin cambio notable alguno de ΔL (%) entre ambas edades).

vo fueren los cementos portland comparados, lo cual no ha sido el caso. De aquí que realmente se haya verificado con claridad ésto tan sólo con el menor de los contenidos de SO_3 y no lógicamente con el resto, dado que tales contenidos respectivos de C_3A son bastante dispares, pues el uno viene a ser prácticamente la mitad del otro, o sea,

$$7,62 \% C_3A \approx 7,055 \% C_3A = \frac{14,11 \% C_3A}{2}$$

En cuanto a la mezcla-conglomerante selenitosa con el 7,0 % de SO_3 , común para ambos cementos portland, P-1 y P-31 debe verse lo expuesto al respecto con anterioridad, no ocurriéndoles igual con la del 10,0 % de SO_3 , ya que tal cantidad de SO_3 es deficiente para alcanzar la estequiometría en el caso del cemento portland P-1, y excedente para alcanzar ésta en el caso del cemento portland P-31. Estos cementos portland van a ser estudiados por separado:

- En el caso del P-1, y aplicando el mismo razonamiento anterior, se comprende cómo por un lado le ocurre lo previsto del 7,0 % de SO_3 , lo cual se debe a que sus probetas correspondientes alcanzaron la estabilidad de volumen, permaneciendo íntegras hasta la finalización del ensayo a una edad dada —posterior, como se verá, a la del 7,0 %—, mientras que por otro lado, y con el 10,0 % de SO_3 , no, pues ya están fracturadas permaneciendo de esta manera hasta la finalización del mismo (ver detenidamente las fotos 1 y 2), señal inequívoca de que la estabilidad de volumen citada ha sido alcanzada por las mismas, desgraciadamente, cuando ya se habían fracturado a la edad de 180 días, o sea, 120 días (180 — 60) después que las homónimas del 7,0 % de SO_3 , según lo previsto. Y la causa por la que en esa fecha de 180 días se han fracturado, lógicamente se debe atribuir a que la ettringita secundaria expansiva originada de la cantidad residual de C_3A , del cemento P-1, aunque quizás no muy cuantiosa, ha de ser —junto con el mayor grado de endurecimiento previo de tales probetas (*) por menor contenido de yeso de las mismas que las homónimas del 12,0 % y 14,0 % de SO_3 , por este orden— la necesaria y suficiente para conseguirlo, o sea, fracturarlas sin más. De aquí que le haya ocurrido todo lo contrario a las homónimas del 12,0 %, y 14,0 % de SO_3 , las cuales por la razón opuesta, según el razo-

(*) De aquí el interés que despierta la determinación de cualquier parámetro de resistencias mecánicas, preferentemente a flexotracción, en futuras investigaciones afines.

namiento anterior, deberán continuar fracturándose y deshaciéndose totalmente, como así ha sido el caso (fotos 3, 4, 5 y 6). Y no les ocurre igual a las correspondientes del cemento portland P-31, porque en las mismas deberá faltar para entonces cantidad de C_3A (no de SO_3) necesaria y suficiente para llegar a deshacerse, según lo ocurrido en este trabajo (fotos 7, 8, 9, 10, 11 y 12), pudiendo considerarse como prueba adicional de ello el que, prácticamente, en los tres casos de exceso de SO_3 sobre el necesario para alcanzar el 7,62 % de C_3A del P-31 de la estequiometría, como son el del 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de SO_3 , respectivamente, las probetas correspondientes no se han deshecho totalmente en ningún caso, ni a 730 días ni con posterioridad, y muestran un grado de fracturación alcanzado a la edad de 730 días, relativamente aproximado y tanto más aproximado lógicamente cuanto menores fueren los contenidos de SO_3 respectivos, y viceversa, como ha sido el caso (fotos 8, 10 y 12, especialmente las 8 y 10), mientras que las del P-1 por todo lo contrario sí han llegado a deshacerse con el 12,0 % y el 14,0 % de SO_3 (fotos 3, 4, 5 y 6).

Punto 2.º

En el caso de que la cantidad presente de SO_3 sea excedentaria para idéntico fin estequiométrico, caso

- del 12,0 % y 14,0 % de SO_3 con el cemento portland P-1, y
- del 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de SO_3 con el cemento portland P-31,

se puede aplicar el mismo razonamiento empleado con anterioridad, sólo que en este caso la relación a/c respectiva sí podría imponer una limitación a la cantidad de ettringita primaria a formar por cada cemento portland del total posible que cada uno puede llegar a originar, 64,60 % ettringita, por el P-1, y 34,88 % ettringita, por el P-31, respectivamente, pero debiendo estar prácticamente, a igualdad de mezcla-conglomerante selenitosa, ambas cantidades de ettringitas primarias formadas por ambos cementos portland en la relación 2/1, o muy aproximada en todos los casos. Esto implicaría que tan sólo en el caso teórico de que durante las fases del amasado, enmoldado, curado en C.H., desenmoldado, marcado y medición inicial de las probetas del cemento portland P-1 pasara a ettringita primaria el 13 % de C_3A (en adelante) del 14,11 % que posee inicialmente dicho cemento portland, le quedaría una cantidad de C_3A

residual al cemento portland P-31 —1,12 % (*) para dicho caso teórico— mayor que al P-1 —1,11 % (*) para dicho caso teórico—, lo cual es prácticamente imposible, pues tales cantidades de C_3A respectivas no podrían llegar a originar con posterioridad los valores de ΔL producidos por sus probetas correspondientes, veáanse Figs. 1 y 2 y Fots. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12, y sí en cambio la práctica estabilidad de volumen de las de un cemento portland de bajo, escaso o nulo contenido de C_3A (que es lo ocurrido a los cementos de elevada resistencia al ataque de los iones sulfato PY-2 (1,23 % C_3A), PY-3 (0,79 % C_3A), PY-4 y PY-6 (0,00 % C_3A) de los trabajos de tesis doctoral [(4) del autor del presente artículo], como no ha sido el caso (Figs. 1 y 2 y fotos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12). De aquí, que en tales mezclas-conglomerantes selenitosas citadas, las probetas correspondientes al cemento portland P-1 originen:

- a igual edad del ensayo, de 730 días (2 años) mayores valores de ΔL (%) (Figs. 1 y 2) y, en su caso, mayor número de fisuras por centímetro cuadrado de superficie de probeta (fotos 4, 10, 6 y 12), por este orden comparativo, que las correspondientes al cemento portland P-31, y
- a desigual edad del ensayo, de 180 días para las probetas de P-1 y de 365 días para las probetas del P-31, mayor número de fisuras por centímetro cuadrado de probeta, y se fracturen, en su caso —deshaciéndose incluso en ocasiones—, 12,0 % y 14,0 % de SO_3 , a edades más tempranas que las correspondientes al cemento portland P-31, que ha sido lo ocurrido en este trabajo (fotos de la 1 a la 12 inclusive).

Referente al hecho de que tanto en el caso de la mezcla-conglomerante con el 5,0 % de SO_3 , o sea, la de menor contenido de yeso como agresivo de todas las ensayadas, como en el caso de las mezclas-conglomerantes con el 10,0 % y 14,0 % de SO_3 , respectivamente, y hasta la edad de 14 días de las mismas, las probetas del cemento puzolánico PUZ-8 ensayado han sido las que mayores valores de ΔL e ΔL (%)/g. cemento han mostrado, cabe decir que, aunque parezca paradójico, ello puede residir perfectamente en la misma causa: si la expansión de las probetas es equivalente a la formación de sulfato-aluminatos de calcio hidratados y, más concretamente, de ettringita (la cantidad de ettringita formada a igual contenido de SO_3 en la mezcla-conglomerante selenitosa de las probetas, en cada

(*) $14,11\% - 13\% = 1,11\% < 1,12\% = 7,62\% - 6,50\% = 7,62\% - 13\%/2$; P-1 = 14,11 % C_3A y P-31 = 7,62 % C_3A .

caso, durante las edades de 7 y 14 días de las mismas):

- 1) o bien ha de ser mayor que la correspondiente a la de los cementos portland P-1 y P-31; lógicamente por este orden (pues lógico es que la originada por el P-1 haya sido mayor que la del P-31 en casi todos los casos, menos en el 5,0 % de SO_3 por las razones anteriormente descritas al respecto) debido en todos ellos al mayor contenido de C_3A del P-1, 14,11 % de C_3A sobre el P-31, 7,62 % de C_3A (*);
- 2) o bien dicha cantidad total de ettringita del PUZ-8, a tales edades, es la mayor de todas, por causas desconocidas;
- 3) o bien siendo quizá menor, sus probetas durante dicho período de tiempo debieran haber estado algo más colmatadas (hecho éste posible) y endurecidas (hecho éste menos posible por la ya clásica menor velocidad de fraguado y endurecimiento de los cementos puzolánicos sobre los portland, más aún si se aumenta la cantidad de yeso presente en los mismos, como ha sido el caso) que las de los P-1 y P-31, de manera que la ettringita derivada del PUZ-8 pudiera llegar a producir mayores valores ΔL y, posteriormente, quizás su ulterior colmatación;
- 4) o bien todas o sólo algunas de las posibilidades anteriores, en mayor o menor grado.

Lo que sí queda claro es que una vez formada dicha cantidad de ettringita (de origen el cemento PUZ-8) en cada mezcla-conglomerante selenitosa:

- 1) o bien ésta se ha formado ya en su totalidad, dando lugar a que posteriormente no tuviera más formación de ettringita expansiva por falta de Al^{3+} de diverso origen y etiología (**) necesarios para ello;
- 2) o bien esta cantidad de ettringita, por su total acción expansiva y colmatante —debido a la mayor compacidad que normalmente suelen conferirle este tipo de cementos con puzolanas a sus morteros y hormigones tradicionales—, impediría el posterior

(*) No obstante, ello implicaría que el contenido de C_3A del cemento PUZ-8 tendría que ser mayor que el del portland P-1 con 14,11 % de C_3A , en el supuesto de que toda la ettringita originada por el PUZ-8 fuera únicamente de origen C_3A , lo cual es bastante improbable —por no decir imposible— según los resultados afines de la tesis doctoral del autor de este trabajo (4).

(**) Del clínker portland y/o de la puzolana y/o escoria siderúrgica en su caso.

acceso de más agua de hidratación selenitosa, con objeto de hidratar las fracciones todavía anhidras del cemento puzolánico PUZ-8, siendo probable este hecho ya que, comparativamente, mientras que en los morteros de ambos cementos portland se ha producido una aceleración del proceso expansor durante el ensayo, en las homónimas del PUZ-8 no, sino todo lo contrario, es decir, se ha producido una desaceleración hasta alcanzar éstas, en todos los casos, su estabilidad de volumen antes que las de aquéllos, y tanto más pronto cuanto menor ha sido el contenido común de SO_3 de su mezcla-conglomerante;

- 3) o bien porque ante tal impedimento éste no se debería a la causa expresada, sino a la propia puzolana que pudiera constituir aquél, la cual actuaría del modo y manera común que muchos investigadores preconizan (*) para todas las puzolanas en general, en base al descenso del pH y $[CaO]$ del medio, como consecuencia de la acción puzolánica cualitativa común en todas ellas (fijación de portlandita). De este modo se impediría, con posterioridad, la formación de ettringita, según el resultado obtenido en este trabajo con el cemento PUZ-8.

Esta hipótesis quizás pudiera verse favorecida por el hecho de que tal cemento PUZ-8 ha satisfecho el ensayo de puzolanidad según Fratini (5) a la edad de 7 días ($[CaO] = 0,00493$ y $[OH^-] = 0,05886$); por todo lo cual sería conveniente realizar ensayos adicionales con otros cementos puzolánicos que cumplimentaran el ensayo a la edad de 28 días y no a la de 7, manera ésta de comprobar si lo ocurrido en este trabajo con el PUZ-8, hasta las edades de 7 y 14 días, se repite de igual modo hasta la edad de 28 días, o solamente se repite desde los 14 ó 21 días hasta los 28, debido a que con anterioridad a estas edades se debería comportar como un portland. De todo ello se deduce que, sea cual fuere la causa, las probetas del cemento PUZ-8 alcanzan en todos los casos su estabilidad de volumen con más prontitud que las homónimas de los cementos P-1 y P-31, causa por la cual éstos acabarían más pronto, o más tarde, por aventajar a las de aquél, es decir, originar mayores valores de ΔL (%) e ΔL (%)/g. cemento, como ha sido el caso.

Asimismo se deduce también que si como se expuso al principio de esta interpretación, la expansión producida en las probetas es sinónimo de cantidad de ettringita expansiva originada por la cantidad de cemento PUZ-8 que las constituye en cada caso, la formación de la

(*) Menos R. Talero (4).

misma ha aumentado con la cantidad añadida de yeso como agresivo. Por esta causa urge continuar investigando si tal relación directa continúa conservándose, o no, incluso con mayores adiciones de yeso como agresivo, 45,16 %, equivalente a un 21,0 % de SO_3 , máxime si el protagonismo futuro del cemento está reservado a los portland con adiciones, y no a los portland en exclusiva.

Enfocando ahora la interpretación de este trabajo desde el punto de vista de igual edad del ensayo, se tiene que la misma habrá de pasar a estudiar y analizar, individual y colectivamente, las distintas clasificaciones obtenidas y expuestas en las tablas 2, 4 y 6.

Así pues, y en principio, llama poderosamente la atención el que sea cual fuere el cemento ensayado, las clasificaciones obtenidas a las edades finales del ensayo, en especial la de 730 días, son totalmente coincidentes entre sí, incluida la obtenida mediante los valores de SO_3 de las mezclas-conglomerantes selenitosas ensayadas en este trabajo y colocadas en orden crediente.

Por el contrario, y respecto a dichas clasificaciones de los dos cementos portland, únicamente (tablas 2 y 4) se puede decir que ambas no coinciden en absoluto con la que se obtendría mediante las cantidades totales de ettringita que, por estequiometría, debieran formar cada uno de ellos en cada caso (tabla 11).

De ello cabe deducir por tanto:

- a) Que a tales edades finales del ensayo los valores de ΔL de los dos cementos portland son función directa del cociente

$$\frac{\text{n.º de moles de } \text{SO}_3 \text{ (en forma de yeso)}}{1 \text{ mol de } \text{C}_3\text{A (en forma de cemento portland)}}$$

de donde se deduce una vez más el interés de ampliar esta investigación al 21,0 % de SO_3 anteriormente citado en futuros estudios a llevar a cabo sobre la hidratación selenitosa de los cementos y, en especial, los portland con adiciones.

- b) Que sea cual fuere el cemento que se considere, las probetas de la mezcla-conglomerante selenitosa con el 14,0 % de SO_3 acaban por originar en todos los casos los mayores valores de ΔL (%) e ΔL (%)/g. cemento. No obstante, centrándose únicamente en los portland P-1 y P-31, se puede decir que a pesar de que por estequiometría ambos cementos portland con tal contenido de SO_3 no puedan originar la máxi-

ma cantidad de ettringita de todas las mezclas con yeso llevadas a cabo con los mismos (véase la Tabla 11), probablemente es debido a las razones dadas al principio de esta interpretación.

- c) Que el cemento puzolánico PUZ-8 ensayado en este trabajo tiene un comportamiento cualitativo, no cuantitativo, desde la edad del ensayo de 14 días en adelante, similar al de los portland P-1 y P-31 igualmente ensayados. Por lo tanto el que las discrepancias entre los comportamientos entre ambos, PUZ-8 por un lado y P-1 y P-31 por otro, se circunscriban únicamente a la edad de 7 días —edad a la que el cemento PUZ-8 satisfizo el ensayo de Frattini—, ha de ser achacable necesariamente a la puzolana que constituye aquel PUZ-8, que es el principal componente que los diferencia; no pudiéndose precisar, mediante los datos obtenidos de este trabajo, qué grado de conexión puede existir entre tales hechos acaecidos y denunciados, y por tanto el modo y manera de actuar de los mismos, con objeto de poder conocer si todas ellas son capaces, o no, de comunicarle al cemento de mezcla del que formen parte, idéntica discrepancia inicial denunciada y asimismo una apreciable resistencia al ataque de los iones sulfato, como en cierta medida pudiera decirse en este trabajo del cemento puzolánico PUZ-8 respecto de los portland P-31 y P-1 por este orden; no obstante dada la escasa representatividad del mismo sobre el resto de los de su tipología, ello no permite asegurar sin más que el comportamiento de todos los cementos puzolánicos, e incluso los portland con adiciones (constituidos ambos únicamente por portland y puzolanas) va a ser siempre mejor o superior al de los portland solos o sin adiciones, debido al ataque de los iones sulfato. De aquí la necesidad de llevar a cabo con urgencia —dado el mayor protagonismo actual de los cementos con adiciones (y entre las adiciones puzolanicas) sobre los portland— los trabajos necesarios para tratar de conocer y precisar si cabe con más detalle tal tipo de actuación ante el ataque del yeso común de todas ellas, o no común, o de cada una de ellas, [como así ha sucedido según los resultados obtenidos por R. Talero en sus trabajos de Tesis Doctoral (4)].

No obstante, y en lo que respecta a los dos cementos portland, únicamente cabe decir que la coincidencia habida entre las clasificaciones derivadas de éstos a la edad de 7 días, y el que en ambos el máximo valor de ΔL (%) se haya alcanzado por las probetas del 7,0 % de SO_3 de ambos cementos portland, (ver tablas 2 y 4) se debe, necesariamente, a que gracias a la

posible y lógicamente mayor velocidad de fraguado y endurecimiento de las probetas de los mismos, respecto a las del 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de SO_3 , y dado su menor contenido de yeso como agresivo y retardador de fraguado en ellas, la cantidad de ettringita que se les forme hasta tal edad ha de originar mayores valores de ΔL , puesto que el alargamiento provocado por la expansividad y nocividad de la ettringita no sólo debe ser función de la cantidad total de la misma que se forme en cada caso, sino también del grado de endurecimiento existente en su entorno en el instante mismo de su formación. Y lógicamente las probetas del 7,0 % de SO_3 han de estar, a igual edad, más fraguadas y endurecidas que todas las homónimas que posean un mayor contenido de SO_3 que ellas. Y en este razonamiento no se pueden tener en cuenta las probetas del 5,0 % de SO_3 :

- a) por todo lo contrario —menor contenido de SO_3 que el 7,0 %—, y
- b) por las razones estequiométricas y de escasa expansividad, expuestas al inicio de esta interpretación sobre las mismas.

Por otra parte el giro dado por tal clasificación similar de los dos cementos portland a la edad de 7 días, hasta desembocar en otras clasificaciones distintas y, no comunes para ambos hasta la edad de 90 y 150 días respectivamente, ha de ser atribuido a la misma razón anterior, pero trasladado en este caso a las probetas del 10,0 %, 12,0 % y 14,0 % de SO_3 , por este orden, en su mezcla-conglomerante selenitosa respectiva, las cuales lógicamente deberán alcanzar —más tarde que la del 7,0 % de SO_3 — su máximo valor de endurecimiento respectivo absoluto, y tras proceder de la misma forma, comportarse como lo han hecho las del 7,0 % de SO_3 , sólo que al formarse más ettringita en esta fase (según lo expuesto al principio de esta interpretación) ésta deberá originar mayores valores de ΔL , incluso en ocasiones con autodestrucción selenitosa de las mismas como se ha comprobado (fotos de la 1 a la 12 inclusive). Y la causa por la que las probetas del cemento P-31 con 10,0 % de SO_3 no han podido llegar a originar un mayor valor de ΔL a ninguna edad del ensayo sobre las del resto de contenidos mayores de SO_3 ensayados y comparados con él (tabla 4), mientras que las homónimas del P-1 sí lo han conseguido a la edad de 60 días (tabla 2), podría deberse a que si bien aquéllas podían haber llegado a alcanzar su máximo endurecimiento, éste no se ha visto aprovechado y refrendado posteriormente por la formación de una cantidad de ettringita secundaria adicional para catapultar estas probetas a dichos máximos valores de ΔL , y éste a la máxima posición de

todos ellos, pudiendo ocurrir, por el contrario, en las del P-1 por idéntico motivo, o sea, por disponer de mayor cantidad de C_3A , 14,11 % para dicho fin antes y durante todo el ensayo (tabla 2).

Esta misma hipótesis explicaría de igual manera el por qué se han producido generalmente durante un mayor número de edades iniciales del ensayo la supremacía en ΔL de las probetas de las mezclas-conglomerantes selenitosas con el 12,0 % de SO_3 sobre el resto, en el caso de los cementos que han mostrado (dentro de lo malo) un mejor comportamiento ante tales medios agresivos tan severos como el P-31 y el PUZ-8 de este trabajo, y la supremacía en ΔL de las probetas de las mezclas-conglomerantes selenitosas con el 7,0 % ó el 10,0 % de SO_3 sobre el resto durante las edades anteriormente citadas (caso del P-1 en este trabajo). Esto ha de ser debido forzosa-mente a las mismas razones expuestas con anterioridad. Y es que en el caso de los primeros la hipótesis expuesta últimamente se debe satisfacer más y mejor en el caso del 12,0 % de SO_3 que en el resto.

Por ese motivo, y al ser acompañado tal contenido de SO_3 del 12,0 % por una mayor cantidad de aluminatos en el caso del cemento P-1 (teóricamente 14,11 % C_3A) que en el caso de los cementos P-31 (teóricamente 7,62 % C_3A) y PUZ-8 (desconocida) no se reunirán las condiciones de endurecimiento previo adecuadas para facilitar la máxima expansividad de sus probetas sobre las de los demás, condiciones éstas que sí se deberán reunir poseyendo dicho cemento P-1 menores contenidos de SO_3 que dicho 12,0 %. ¡Y a menores contenidos aún, mejor! Como así ha sido el caso de las probetas de dicho cemento P-1 con 10,0 % de SO_3 a la edad de 60 días, y sobre todo las homónimas del 7,0 % de SO_3 a las edades comprendidas entre la de 7 y 28 días, ambas inclusive.

III. CONCLUSIONES (de las Partes IA (1) e IB de este trabajo)

- 1.^a Los dos cementos portland ensayados P-1 y P-31, respectivamente, no pueden ser calificados como de "elevada resistencia al ataque de los iones sulfato", pues el valor del ΔL a la edad de 14 días de sus respectivas probetas (*) ha superado el valor máximo del 0,040 % a tal edad, especificado expresamente por la norma ASTM C 150-84 para dicho fin:

(*) Preparadas con cada uno de ellos según el método ASTM C 452-68, o sea, con 7,0 % de SO_3 .

- Cemento portland P-1 .
0,176 % > 0,040 %
- Cemento portland P-31 .
0,071 % > 0,040 %

No obstante, y como cabía esperar, el comportamiento del cemento portland P-31 ha sido, a igualdad de contenido de SO_3 , mejor que el del P-1 por el menor contenido de C_3A , 7,62 %, sobre este 14,11 % C_3A .

- 2.^a El cemento puzolánico PUZ-8, igualmente ensayado, no puede ser calificado mediante idéntica especificación anterior, puesto que la misma únicamente es aplicable a cementos portland.

No obstante, y a tenor de los resultados experimentales obtenidos, solamente se puede decir sobre él que:

- en general su comportamiento, a igualdad del medio agresivo (contenido de SO_3), ha sido mejor que el del P-31 y P-1, por este orden, de mejor a peor comportamiento;
- dicho mejor comportamiento no permite que se le pueda calificar como de "elevada resistencia al ataque de los iones sulfato", debido a que en la actualidad (**) no existe especificación alguna para dicho fin (*).
- dicho mejor comportamiento no debe ni puede hacerse extensible sin más, a todos los demás cementos puzolánicos constituidos únicamente por puzolanas

(*) Preparadas con cada uno de ellos según el método ASTM C 452-68, o sea, con 7,0 % de SO_3 .

(**) Referida a la fecha en la que se finalizó la parte experimental del presente trabajo, pues hoy ya se dispone de una posible especificación para tal tipo de cemento, los PUZ (y PA), surgida y propuesta (y adoptable en su momento si procede) por R. Talero a raíz de los trabajos de su Tesis Doctoral (4).

Dicha especificación, es la de que el valor máximo del ΔL_{28d} de las probetas ASTM C 452-68 correspondientes a tales cementos:

- no sobrepase el 0,054 %, para que los mismos puedan ser considerados como de "elevada RS", o
- no sobrepase el 0,073 % y sí por otro lado el 0,054 %, para que los mismos puedan ser considerados como de "moderada RS".

Tras lo cual, y para el caso que nos ocupa, el cemento puzolánico ensayado, PUZ-8, no se puede calificar de "moderada resistencia al ataque de los iones sulfato", ya que el valor del $\Delta L_{28d} = 0,177$ % de sus probetas correspondientes es superior al 0,073 % especificado y propuesto por dicho autor.

(que existen o puedan existir en el mercado) ya que la escasa representatividad del mismo sobre el resto de los de su tipología no da pie a poderlos generalizar con el comportamiento mostrado aquí por dicho PUZ-8.

- 3.^a El empleo de mayores cantidades de yeso como agresivo al cemento que se ensaya, que el del 15,0535 % (= 7,0 % SO_3), especificada expresamente por el método acelerado de ensayo ASTM C 452, ha demostrado su posible interés para aquellos investigadores, fabricantes y usuarios, interesados en esta temática, dada su indudable mayor especificidad para poder calificar con nitidez a los cementos de elevada resistencia al ataque de los iones sulfato de los que no lo son tanto.

- 4.^a A tenor de los resultados experimentales obtenidos del parámetro ΔL (%), en la parte IA(1) del presente trabajo y del *grado de respuesta*, el contenido de SO_3 del 12,0 % del cemento que así se ensaye y la edad de 28 días, parecen ser los más idóneos para alcanzar la máxima sensibilidad del mismo en su más adecuada y precisa calificación ante el mencionado ataque agresivo.

No obstante no se deja de reconocer que para otro(s) sector(es) industrial(es) implicado(s) en esta temática, los más idóneos para idéntico fin serían el 7,0 % de SO_3 y la edad del ensayo de 14 días.

- 5.^a El parámetro $\overline{\Delta L}$ (%)/g. cemento, empleado en este trabajo, ha demostrado su posible interés de utilización por aquellos investigadores, fabricantes y usuarios, interesados en esta temática, para la obtención de especificaciones correspondientes más adecuadas con el fin de poder discriminar con mayor precisión a los cementos de elevada resistencia al ataque de los iones sulfato de aquellos otros que no lo son tanto; además de la mayor especificidad para los primeros.

- 6.^a A tenor de los resultados experimentales obtenidos del parámetro ΔL (%)/g. cemento, en esta parte I del presente trabajo y del *grado de respuesta*, el contenido de SO_3 del 14,0 % del cemento que así se ensaye, y la edad de 14 días en este caso parece ser más idóneo para alcanzar la máxima sensibilidad del mismo, para su más adecuada y precisa calificación ante el mencionado ataque agresivo.

IV. RECOMENDACIONES

- 1.^a A tenor de todo lo vertido en la interpretación de esta parte del trabajo, así como de las conclusiones 5^a y 6^a del mismo, sería conveniente ampliar esta investigación al contenido de SO₃ de los cementos que así se ensayen con el 21,0 %, aportado como yeso (CaSO₄ · 2 H₂O) agresivo.
- 2.^a Como consecuencia de todo lo dicho al final de la conclusión 2^a de esta parte del trabajo, resulta conveniente y necesario ampliar esta investigación a un mayor número de cementos puzolánicos constituidos por portland y puzolana(s) únicamente a fin de confirmar, o no, si el comportamiento demostrado por el PUZ-8 en esta parte del presente trabajo es generalizable a todos ellos.
- 3.^a Así mismo y en razón de la recomendación anterior conviene prolongar el ensayo de este cemento PUZ-8 por más de 730 días con tales contenidos de SO₃ o bien con algún(os) otro(s) mayor(es), como puede ser en principio el anteriormente propuesto del 21,0 % de SO₃.

- 4.^a Por consiguiente, y a consecuencia de lo expuesto en la interpretación de esta parte del trabajo, ha quedado demostrado el interés que puede entrañar la determinación a lo largo del ensayo (en estos trabajos u otros afines) de los parámetros:
 - resistencia mecánica a flexotracción y compresión,
 - porosidad y/o cualquier otro objetivo similar,
 - cantidad de iones SO₄⁼ en los líquidos de conservación de las probetas,para poder llegar a interpretar más y mejor los fenómenos físico-químicos que tienen lugar y tratar de deducir con ello las consecuencias que, en su caso, se deriven de los mismos.
- 5.^a Ante lo dicho en la conclusión 2^a es necesario, e imprescindible, poder disponer de una especificación apropiada para calificar el comportamiento de los cementos portland con adiciones activas frente al ataque del yeso.

V. BIBLIOGRAFIA

- (1) R. TALERO: "Contribución al análisis y estudio de las posibilidades de modificación de la cantidad de yeso CaSO₄ · 2 H₂O, como agresivo, del método acelerado de ensayo ASTM C 452. Parte I A". *Materiales de Construcción*, n.º 209, págs. 49 a 63, 1988.
- (2) L. BLONDIAU: "Considerations diverses relatives à l'essai de resistance chimique au sulfate de calcium suivant le processus Le Chatelier-Anstett". *Rev. Mat. Constr. Trav. Publ.*, n.º 546, pp. 189-204, marzo 1961.
- (3) A. KOCH and M. STEINEGGER: "A rapid method for testing the resistance of cements to sulphate attack". *Zement-Kalk-Gips*, n.º 7, pp. 317-324, Julio, 1960.
- (4) R. TALERO: "Contribución al Estudio Analítico y Físico-Químico del Sistema: Cementos Puzolánicos-Yeso-Agua" (a 22° ± 3° C). Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, Ftad. de C. Químicas, noviembre 1986, MADRID.
- (5) RC-75: Pliego de Condiciones para la Recepción de los Cementos, B.O.E. n.º 205, 28-8-75.
- (6) ASTM C 150-85: "Standard Specification for Portland Cement". *ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS*, Section 04 Construction, Volume 04.01, Cement, Lyme, Gypsum, 1985.
- (7) ASTM C 452-68: "Standard Test Method for Potential Expansión of Portland Cement". *ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS*, Part 7 Cement, Lyme, Gypsum. 1968.

(Continuará)

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.^a Isabel Jiménez García y a Dña. Raquel Canellada Llavona, el mecanografiado de la misma y a D. Juan José López del Amor y D. José Díaz Salado las fotografías realizadas.