

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

616-69 AUMENTO DE LA PRODUCCION DE CEMENTO Y MEJORA SIMULTANEA DE LA CALIDAD (Continuación)

Dr. J. Calleja Carrete

Mecanismo de la expansión debida al yeso, como medio de compensar la retracción

Desde hace mucho tiempo, E. Candlot (51) y W. Michaelis (52) han explicado la expansión de los cementos provocada por el yeso, aceptando la formación de hidrato de sales complejas, que en este caso son sulfoaluminatos cálcicos.

Esto aclara la influencia que, tanto en la retracción como en la expansión, tiene el  $Al_2O_3$  y el  $C_3A$  y la forma de encontrarse éstos en el clinker, sobre todo si el contenido en yeso de los cementos no es el correspondiente a su composición química. También explica la expansión de los cementos sulfosidúrgicos, en cuya composición no intervienen sus componentes (escorias, yeso y adiciones alcalinas) en la debida proporción (53).

El contenido en  $SiO_2$  no influye en la expansión producida por el yeso (54), si bien los cementos ricos en  $C_3S$  deben ser más insensibles a los efectos de la expansión que los ricos en  $C_2S$ , dada su mayor velocidad de endurecimiento.

La resistencia de un cemento a la expansión por el yeso es inversamente proporcional a su contenido en  $C_3A$  (55); para un contenido dado en  $Al_2O_3$ , el peligro de expansión es mayor si la alúmina se encuentra en forma de  $C_3A$  cristalino que si se halla como  $C_3A$  disuelto en la fase vítrea, o como  $C_4AF$  (56). Cuando el módulo  $A/F$  sobrepasa el valor 0,64 y las dosis en yeso son elevadas, se obser-

van expansiones tanto mayores cuanto mayor es el contenido en  $C_3A$  (57).

Se sabe que existen dos sulfoaluminatos cálcicos hidratados (58): el llamado "trisulfato"  $3 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3 CaSO_4 \cdot 30-32 H_2O$  y el llamado "monosulfato"  $3 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 10-12 H_2O$ , siendo cuestión debatida cual de los dos es el causante de la expansión. Atribuye ésta al monosulfato L. Forsón, K. Koyanagi (59) y F.E. Jones, si bien este último cree que la acción expansiva definitiva corresponde, no obstante, al trisulfato (60). Forsón (61) indica que, según demuestra la experiencia, cantidades considerables de yeso se combinan en el cemento para formar sales dobles, de modo que a los 28 días se ha combinado el 80% de  $SO_3$  en peso de  $Al_2O_3$ , lo que corresponde a la formación del sulfoaluminato monosulfato casi insoluble. Esto es el que, actuando como recubrimiento protector, retrasa la disolución de los aluminatos y por tanto el fraguado, lo cual sucede siempre que la fase líquida sea rica en cal, tanto si el yeso presente es hemihidrato o dihidrato. En disolución sobresaturada de yeso y pobre en cal no se forma el recubrimiento protector de sulfoaluminato monosulfato sino que, si el yeso es hemihidrato, tiene lugar el falso fraguado rápido; también admite Forsón la posibilidad de formación del trisulfato en disoluciones de gran concentración en  $CaSO_4$ .

L. Chassevent y P. Stiglitz (62) opinan a este respecto, que el sulfoaluminato monosulfato que siempre se forma en primer lugar, en presencia de un exceso de  $CaSO_4$  se transforma en el trisulfato, produciendo una expansión considerable.

Los mismos autores han estudiado la acción del yeso en un aluminato con menos cal que la correspondiente al  $C_3A$  y han encontrado que, en ausencia de cal, se forma el sulfoaluminato trisulfato cristalizado en agujas, mientras que en presencia de cal se forma el mono

sulfato floconoso y sin consistencia. Es lógico admitir que con cemento portland las cosas sucedan como en el segundo caso, puesto que la pasta se ha de hallar normalmente saturada o sobresaturada de cal. De cualquier manera, con el  $C_3A$ , más básico que el aluminato utilizado por Chassevent y Stiglitz en sus estudios, se forma el sulfoaluminato monosulfato aun en ausencia de cal sólida.

La considerable expansión producida por la formación del trisulfato, señalada por Chassevent y Stiglitz en el caso de los cementos portland con yeso en exceso, la explica H. Lafuma (63) admitiendo que dicha formación tiene lugar por contacto directo del yeso con el  $C_3A$  sólido, dada la escasa solubilidad de éste en agua de cal sobresaturada o muy concentrada. Esta falta de solubilidad explica el hecho de que la adición de  $CaO$ , o su presencia en estado libre en el clínker, contribuya al retraso del fraguado producido por el yeso (40bis), (64).

En cambio, el hecho notable de que los cementos aluminosos sean prácticamente inmunes a la expansión del yeso, y que se explicaría clásicamente por el hecho de formarse  $C_2A$  aq., en lugar del  $C_3A$  aq., a partir del cual resultan los sulfoaluminatos expansivos, lo explica Lafuma (63) por la escasa concentración de cal en la fase líquida de las pastas de estos cementos, en la cual se disuelve bien el  $C_3A$  aq, desarrollándose el sulfoaluminato trisulfato a partir de la disolución, en formaciones cristalinas que pueden alojarse en los poros de la masa. En el caso de los cementos supersulfatados también la formación del trisulfato tiene lugar en disolución, por lo que en ellos no se da la expansión debida al yeso; un caso intermedio es el de los cementos expansivos (65).

La explicación de H. Lafuma es, en realidad, la aplicación de una teoría general sobre la formación de hidratos cristali -

nos complejos, al caso particular de los sulfoaluminatos cálcicos hidratados. Si éstos cristalizan de una disolución, su formación no es peligrosa a efectos expansivos, pues los cristales creados se alojan en los poros de la pasta o mortero; pero si resultan de una reacción topoquímica del yeso con el  $C_3A$ , sin estar éste disuelto, la gran cantidad de agua precisa para formar los cristales del compuesto rico en agua debe emigrar al lugar de la reacción, dando lugar a expansiones (66) (67) (54).

La expansión debida al yeso puede darse también en cementos pobres en alúmina y ricos en hierro, por formación de complejos análogos a los sulfoaluminatos (68). Por otra parte, otros sulfatos, tales como el magnésico, ejercen una acción expansiva variable en relación con el contenido en  $C_3A$  de los cementos (39).

### 3. PARTE EXPERIMENTAL

#### Materiales y Ensayos

Se ha estudiado la retracción de pastas puras y morteros de un cemento portland al que se han adicionado cantidades crecientes de yeso.

El cemento empleado fué un portland ordinario, obtenido de un horno rotatorio de vía húmeda y conforme con las especificaciones de la correspondiente norma española. Se eligió de tal modo que fuese relativamente alto en alúmina y bajo en óxido férrico para que la relación A/F fuese del orden de 3 y su contenido en  $C_3A$  más bien alto. Al mismo tiempo, su contenido en  $SO_3$  fué de 2,5%, máximo tolerado por la norma española. Estos datos, así como los de composición

potencial calculada por el método de Bogue, se dan en el cuadro 1. El contenido en aluminato tricálcico potencial es como se ve, del orden del 14%, cifra admisible como media para los cementos españoles.

CUADRO 1

Datos analíticos %			
SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A/F
2,5	6,6	2,2 <sub>4</sub>	2,95
Composición potencial calculada %			
C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
51,9	21,6	13,7	6,8

A base de este cemento se prepararon las distintas muestras para la confección de las pastas y morteros, por adición de las respectivas cantidades de yeso en cada caso, según se detalla en el cuadro 2.

Las pastas puras se prepararon determinando previamente la cantidad de agua necesaria para obtener una pasta de consistencia normal con cada muestra, empleando para la determinación la sonda de Vicat. Las cifras obtenidas sirvieron para la dosificación del agua de los morteros correspondientes.

Con las pastas puras se llevaron a cabo ensayos de determinación del principio y fin del fraguado, según el método de Vicat; también se efectuó la prueba de Le Chatelier, en caliente. Para

CUADRO 2

Muestras Nº	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O co- rrespondien- te al SO <sub>3</sub> de la muestra 0 %	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O añadido a la muestra 0 %	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O total en la muestra resul- tante. %	SO <sub>3</sub> en la muestra 0 %	SO <sub>3</sub> correspon- diente al CaSO <sub>4</sub> . 2H <sub>2</sub> O añadido. %	SO <sub>3</sub> total en la muestra re- sultante. %
0 *	5,4	0	5,4	2,5	0	2,50
1	"	1	6,4	"	0,46	2,96
2	"	2	7,4	"	0,93	3,43
3	"	2,5	7,9	"	1,16	3,66
4	"	3	8,4	"	1,39	3,89
5	"	4	9,4	"	1,66	4,36
6	"	5	10,4	"	2,32	4,82
7	"	6	11,4	"	2,79	5,29
8	"	7	12,4	"	3,25	5,75
9	"	7,5	12,9	"	3,48	5,98
10	"	8	13,4	"	3,72	6,22
11	"	9	14,4	"	4,18	6,68
12	"	10	15,4	"	4,65	7,15
13	"	12,5	17,9	"	5,81	8,31
14	"	15	20,4	"	6,97	9,47
15	"	17,5	22,9	"	8,13	10,63
16	"	20	25,4	"	9,30	11,80

\* Muestra original de cemento a la que corresponden los datos del cuadro 1.

Esta se confeccionaron con cada muestra cuatro probetas de pasta normal que se conservaron bajo agua durante 24 horas. Al final de este periodo se midió la separación de las agujas y a continuación se elevó la temperatura del agua hasta 100°C, en un tiempo comprendido entre 15 y 30 minutos. Después de 3 horas de ebullición se midió de nuevo la separación de las agujas, sin esperar a que el agua se enfriase, tomando como resultado de la prueba la diferencia entre las separaciones inicial y final.

Los morteros con la composición que fija la norma española se prepararon, según las prescripciones de la misma, a base de 1 litro de arena normal del Manzanares, 600 gramos de cada muestra de cemento y la cantidad de agua correspondiente, según la consistencia normal de las respectivas pastas puras, aplicando la fórmula:

$$Q = 2/5 N + 93,$$

siendo Q la cantidad de agua del mortero normal en gramos por cada litro de arena y N la precisa para convertir 1 kilogramo de cemento en pasta pura de consistencia normal.

Con los morteros se efectuaron determinaciones de las cargas de rotura por tracción y por compresión, a 7 y 28 días, fabricando, para ello, probetas en forma de ocho y cúbicas de 7 cm de arista, respectivamente, las cuales se conservaron 24 horas dentro del molde y en ambiente húmedo, y, fuera del molde y bajo agua, el resto del tiempo hasta el momento de su rotura.

Los ensayos de retracción se llevaron a cabo, tanto con las pastas puras como con los morteros normales. Para los de unas y otros se obtuvieron de cada muestra, respectivamente, dos probetas prismáticas de dimensiones 25 x 25 x 250 mm, a fin de constatar la reproducibilidad de resultados y detectar, en un caso dado, cualquier anomalía. Estas probetas se conservaron en ambiente húmedo durante los 28 días que duraron los ensayos. En este período se determinó la curva retracción-tiempo de cada probeta, efectuando las correspondientes mediciones cada 24 horas.

### Resultados

#### 1. Porcentajes de agua para las pastas puras de consistencia normal.

Se detallan en el cuadro 3.

CUADRO 3

Muestras:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
% de agua	30	31	30	30	30,5	30,5	31	31,5	32	30,5	30,5	30	31	31,5	30	30,5	30,5

Como puede apreciarse, los porcentajes varían entre límites estrechos (30 - 32 %), sin que las distintas adiciones de yeso ejerzan en ellos una influencia notable.

## 2. Tiempos de fraguado de las pastas puras

En el cuadro 4 se indican los comienzos finales o intervalos de fraguado de las muestras, determinados con la aguja de Vicat\*

Se observa que las adiciones de yeso, en general modifican poco y de manera imprecisa el comienzo del fraguado. Lo mismo sucede respecto del final del fraguado para las seis primeras muestras. A partir de la séptima se observa una marcada aunque fluctuante tendencia al retraso.

Los intervalos de fraguado son prácticamente iguales para las seis primeras muestras y manifiestan tendencia a crecer, a partir de la séptima.

---

\* Los datos experimentales de este trabajo, pese a no haber sido publicados hasta ahora, fueron obtenidos el año 1949, fecha en que todavía no estaba puesta a punto una nueva técnica del autor, para el estudio del fraguado de los aglomerantes hidráulicos (3bis)

CUADRO 4

Muestras Nº	FRAGUADO					
	Principio		Fin		Intervalo	
	horas	minutos	horas	minutos	horas	minutos
0	4	15	7	30	3	15
1	4	55	8	10	3	15
2	5	00	8	05	3	05
3	4	25	7	40	3	15
4	5	10	8	25	3	15
5	4	55	8	10	3	15
6	4	20	7	05	2	45
7	6	20	11	00	4	40
8	6	25	10	50	4	25
9	7	15	12	00	4	45
10	6	10	10	35	4	25
11	6	05	10	20	4	15
12	6	10	10	35	4	25
13	5	15	9	30	4	15
14	5	00	10	00	5	00
15	5	50	12	00	6	10
16	5	45	11	45	6	00

3. Prueba de expansión Le Chatelier en caliente

En el cuadro 5 se dan las cifras medias de expansión Le Chatelier, correspondientes a cuatro probetas de cada muestra.

CUADRO 5

Muestras nº	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Expansión media mm		1,7	1,6	1,6	0,2	0,6	1,2	1,4	1,6	2,4	3,6	3,2	4,7	3,5	3,5	3,6	2,0

Se aprecia una expansión mínima correspondiente en las muestras 4 y 5 y un aumento a partir de la 9.

4. Resistencias a tracción y compresión con probetas de mortero normal

Se detallan en el cuadro 6, en el que se indican también las cantidades de agua correspondientes al mortero normal de cada muestra.

CUADRO 6

Muestras Nº	Agua en el mortero normal c.c.	Cargas de rotura, en Kg/cm <sup>2</sup>			
		A tracción		A compresión	
		a 7 días	a 28 días	a 7 días	a 28 días
0	213	24,2	29,3	427	463
1	217	29,1	30,2	438	478
2	213	21,7	30,9	448	487
3	213	26,6	34,9	446	513
4	215	26,7	31,3	437	555
5	215	20,3	28,6	366	520
6	217	13,0	26,4	265	519
7	219	12,4	14,7	217	445
8	221	10,9	12,7	226	318
9	215	10,0	10,5	162	215
10	215	11,4	10,1	176	210
11	230	8,9	10,6	177	220
12	217	9,2	10,8	160	195
13	219	11,2	9,6	142	164
14	213	8,7	8,2	132	165
15	215	8,3	8,9	134	140
16	215	10,0	7,8	115	145

En las resistencias a tracción, tanto a 7 como a 28 días, se observa en general un aumento al pasar de la muestra 0 a la muestra 4, disminuyendo después, progresivamente, a partir de la 5.

En las resistencias a compresión se advierte lo ya indicado para las de tracción, por lo que se refiere a la edad de 7 días. En las probetas de 28 días, al pasar de la 0 a la 6, se acusa un aumento de resistencia, la cual comienza a decaer a partir de la 7.

Globalmente consideradas las resistencias mecánicas, las mejores son las correspondientes a las muestras 3 y 4.

#### 5. Retracción de las pastas puras

Las curvas correspondientes se presentan en las figuras 1 a 3.

Se puede observar que la concordancia entre los resultados de las dos probetas de cada muestra es buena en todos los casos.

Se advierte una disminución de la retracción al pasar de la muestra 0 a la 3, correspondiente a 3,66% de  $SO_3$ , la cual presenta un valor mínimo de retracción. Esta aumenta de nuevo, a partir de la muestra 4 hasta la 6, correspondiente a 4,82% de  $SO_3$ , en la que el valor a 28 días es prácticamente el que corresponde a la muestra 0. En las muestras sucesivas los valores son progresivamente mayores que los de la muestra 0 original, hasta que en la muestra 9 (5,98% de  $SO_3$ ) parecen estabilizarse, observándose a partir de ésta y hasta la 16, valores poco distantes, aunque fluctuantes.

Particularmente en las muestras 1, 2, 3 y 4 se observa una ligera expansión inicial, que disminuye en el orden citado hasta anularse prácticamente en la muestra 4.

#### 6. Retracción de los morteros normales

Las curvas correspondientes son las representadas en las figuras 4 a 6.

Como en las pastas puras, también en los morteros es satisfactoria la concordancia entre cada dos probetas correspondientes a una misma muestra.

Los valores de la retracción son, naturalmente, menores que los correspondientes a los de las pastas puras, en cada caso.

Puede verse claramente una disminución de la retracción al pasar de la muestra 0 a la 3, que también en este caso parece presentar un mínimo. De las muestras 4 hasta la 6, desde la 7 hasta la 9 y desde ésta en adelante puede decirse lo mismo que respecto de las correspondientes probetas de pasta pura.

En el caso del mortero, no se observa expansión inicial en las muestras 1 a 4.

### Discusión

Si se observan los datos de los cuadros anteriores 3 a 6, referentes a porcentajes de agua en la pasta de consistencia normal, tiempos de fraguado, expansión y resistencias mecánicas de los morteros, así como los gráficos de retracción de éstos y de las pastas puras, puede advertirse que globalmente considerados dichos datos y características de calidad, el comportamiento óptimo corresponde a las muestras 3, 4 y 5 cuyos contenidos en  $SO_3$  son, respectivamente, 3,66, 3,89 y 4,36.

Tomando un valor medio de estas cifras puede decirse que el contenido óptimo de  $SO_3$  del cemento ensayado es, aproximadamente, de 3,97%.

Teniendo en cuenta la composición potencial del mismo dada en el cuadro 1, y en particular su contenido en  $C_3A$  potencial de

13,7%, es fácil ver que a este porcentaje de  $C_3A$  corresponde 4,06% de  $SO_3$  en el cemento, para que todo el aluminato tricálcico del mismo - se transforme en sulfoaluminato monosulfato.

La concordancia de ambas cifras es excelente y parece demostrar, de acuerdo con lo señalado por otros investigadores (20), que la dosificación de yeso que precisa un clínker para obtener de él un cemento de óptimas características, coincide sensiblemente con la que proporciona el cemento "correctamente retardado".

Todo esto parece también confirmar la idea de los investigadores, que aceptan la formación del sulfoaluminato monosulfato como causante de la expansión del cemento portland (59) (60) (61), al menos en primera instancia.

Corrobora lo expuesto los resultados de unos ensayos aislados efectuados con un cemento portland, que contenía 2,5% de  $SO_3$  y 15,5% de  $C_3A$  potencial y al que se añadieron cantidades de anhídrita químicamente pura, variables entre 0 y 10% (0 - 2,5 - 5 - 7,5 y 10%). El contenido total en  $SO_3$  de los cementos resultantes era, por tanto, de 3,97 - 5,44 - 6,91 y 8,38 respectivamente.

Las resistencias mecánicas, a 7 días, de los morteros españoles confeccionados con dichos cementos, están representadas en las curvas de la figura 7, en las que se ve que, tanto a tracción como a compresión, las resistencias máximas se obtienen con un porcentaje de anhídrita de alrededor de 3,5%, equivalente a 2,06% de  $SO_3$ , es decir, para un total de 4,56% de  $SO_3$  en el cemento. Obsérvese que el 15,5% de  $C_3A$  potencial del mismo precisaría 4,59% de  $SO_3$  para transformarse íntegramente en sulfoaluminato monosulfato, o sea, 2,09% de  $SO_3$  adicional, sobre el 2,5% que de por sí contiene.

(continuará)

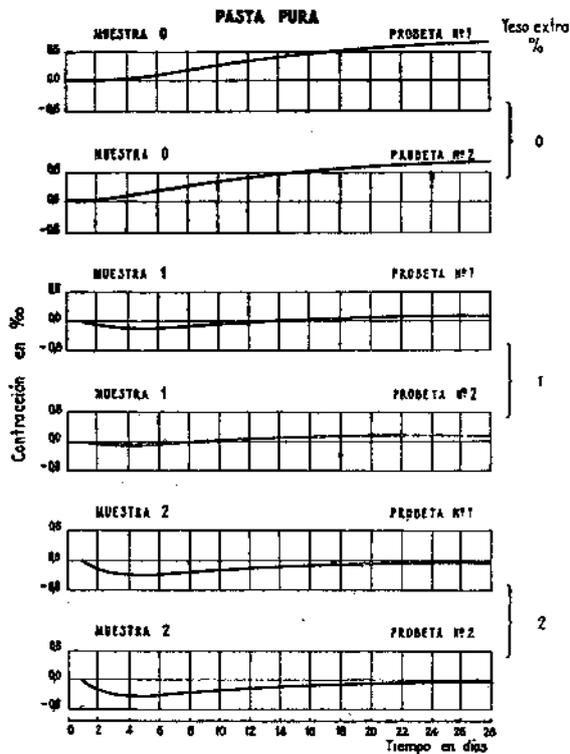


Fig. 1.

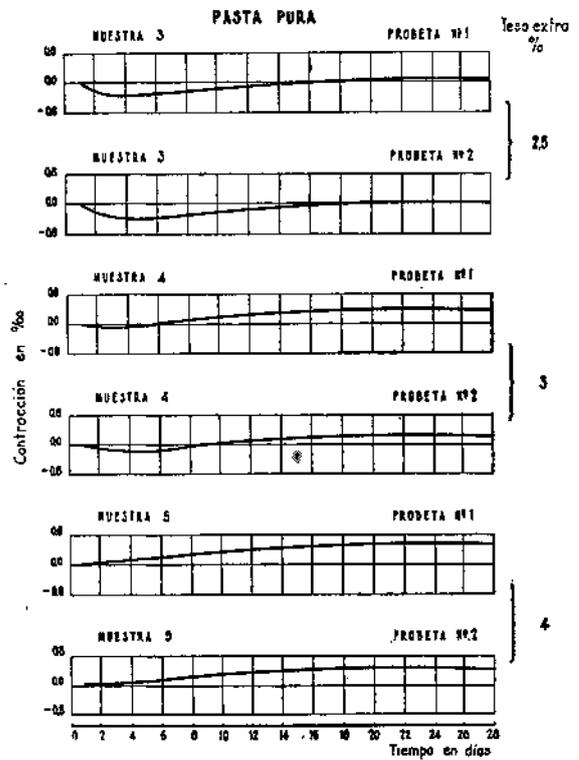


Fig. 2.

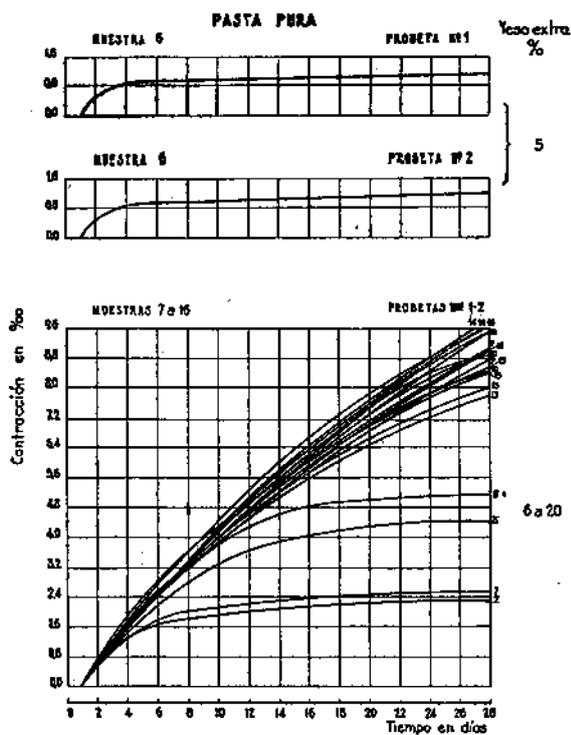


Fig. 3.

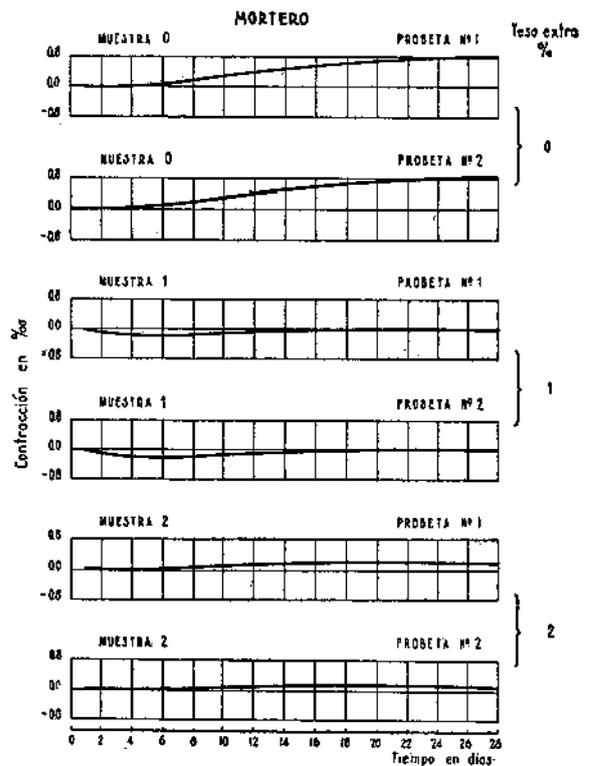


Fig. 4.

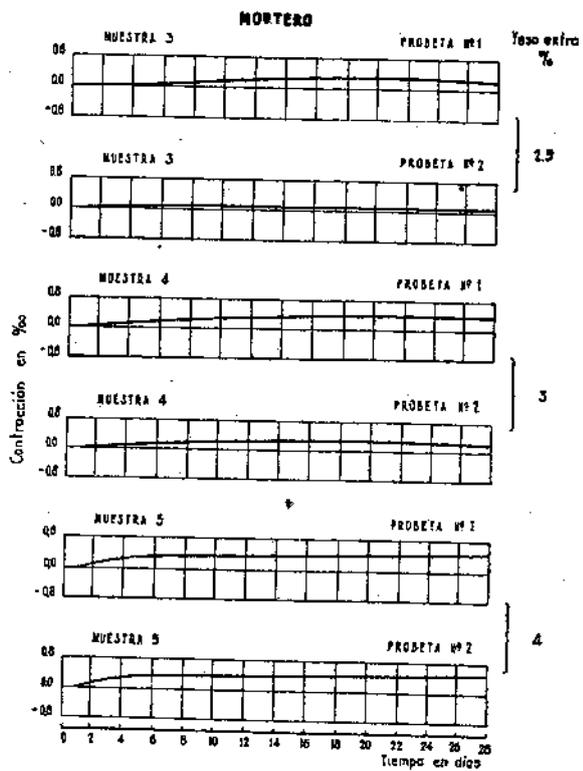


Fig. 5.

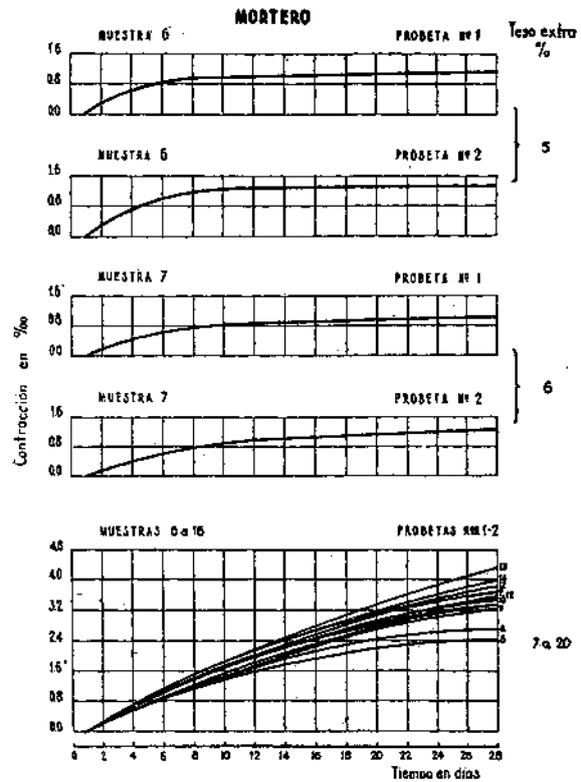


Fig. 6.

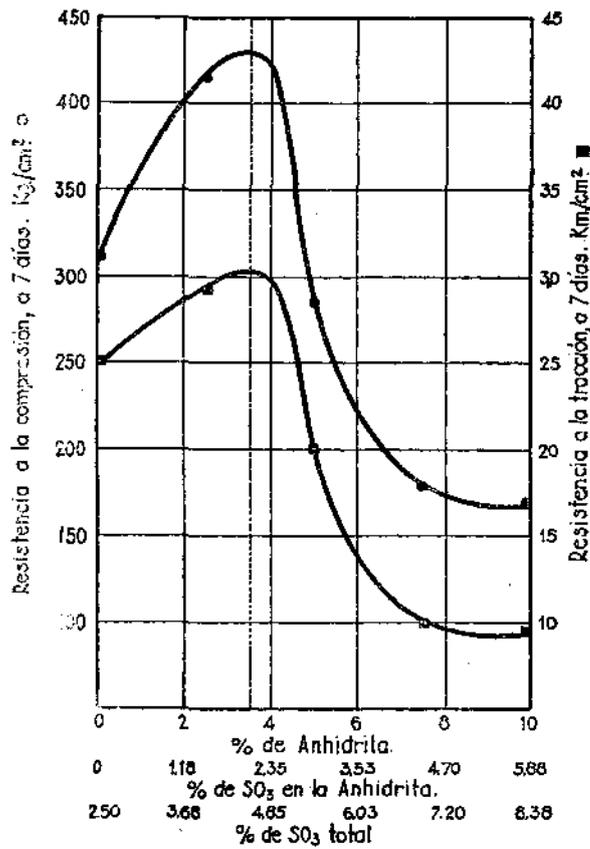


Fig. 7.