

## **expansión térmica inicial de los hormigones refractarios aislantes**

(Initial thermal expansion characteristics of insulating refractory concretes)

M. S. CROWLEY

De: «American Ceramic Society Bulletin», vol. 35, núm. 12, 15 diciembre 1956, pág. 465

### S I N O P S I S

Se presentan los resultados experimentales, obtenidos en el laboratorio por medidas de los cambios de longitud de unas probetas calentadas uniformemente en un horno cilíndrico horizontal, con velocidades controladas para alcanzar 450°F (231°C) en una hora. Se han encontrado relaciones entre la forma general de la curva y la composición del hormigón, y entre la forma de la curva y la velocidad de calefacción. Como resultado práctico se ofrecen unos ejemplos que aclaran cómo se han de utilizar estos valores al realizar el proyecto de un horno.

### INTRODUCCION

Cuando se proyectan hornos monolíticos y revestimientos de calderas se necesita información sobre las características de expansión y retracción de los hormigones refractarios aislantes. Los valores de los fabricantes incluyen los coeficientes de expansión térmica y los valores de la retracción total. Sin embargo, estos datos no dicen nada sobre la forma en que se producen los cambios dimensionales durante el primer calentamiento de un hormigón aislante. Estos cambios son complejos; suelen comprender un período de expansión, a temperaturas bajas, y una fuerte retracción en el intervalo de 400 ... 700° F (202 ... 371° C), seguida de una retracción o de una nueva expansión, a temperaturas superiores, según la naturaleza del hormigón. La importancia, e incluso posiblemente la existencia, de algunos de estos cambios, depende de la velocidad de calefacción.

Tales cambios dimensionales determinan la aparición de tensiones que, a su vez, pueden provocar la deformación o el agrietamiento en los hormigones aislantes monolíticos. Ciertos tipos de deterioro pueden reducirse o eliminarse totalmente si se conocen las características de expansión inicial del hormigón, mediante cambios del proyecto o ajustando las velocidades de calefacción, especialmente con algún conocimiento de las condiciones de calefacción y de las propiedades de conducción del calor del hormigón.

Para los ensayos se seleccionó un grupo de 30 hormigones refractarios aislantes, procedentes de 13 fabricantes. Estos hormigones tenían una densidad de 30 ... 90 libras pie cúbico (480-1.441 kg/m<sup>3</sup>), y comprendían la mayoría de las combinaciones prácticas de cementos y áridos. La mayoría de los hormigones estaban preparados con un cemento portland (predominantemente, silicato cálcico), de alta resistencia inicial, o un cemento de aluminato cálcico impuro, designado como "cemento A". También se sometieron a ensayo dos hormigones, con árido de hierro, preparados con cemento de aluminato cálcico puro.

## PROCEDIMIENTO

Las probetas, de  $6 \times 1 \times 1$  pulgadas ( $152,4 \times 25,4 \times 25,4$  mm) se calentaron uniformemente en un horno cilíndrico horizontal; los cambios de longitud de las probetas se midieron con un indicador Ames de limbo. Los cambios dimensionales se transmitieron, a través de los extremos del horno, a los limbos, mediante varillas Vycer.

La velocidad normal de calefacción fué de  $300^\circ\text{F}$  ( $149^\circ\text{C}$ ) por hora, hasta  $1.000^\circ\text{F}$  ( $538^\circ\text{C}$ ), y de  $200^\circ\text{F}$  ( $93^\circ\text{C}$ ) por hora, de  $1.000$  a  $1.500^\circ\text{F}$  ( $815^\circ\text{C}$ ). No se han determinado valores por encima de  $1.500^\circ\text{F}$ . Las lecturas de los cuadrantes se anotaron cada  $100^\circ\text{F}$  ( $38^\circ\text{C}$ ), e incluso con más frecuencia, según la velocidad de calefacción. También se emplearon probetas de pasta pura de cemento, con objeto de observar el efecto de la deshidratación del cemento.

La expansión se midió con una precisión de 0,001 pulgadas (0,025 mm) (0,0167 %); además, los valores se corrigieron por consideración de la expansión de las varillas de transmisión. En ciertos casos se varió la velocidad de calefacción de  $100^\circ\text{F}$  ( $38^\circ\text{C}$ ) por hora a  $450^\circ\text{F}$  ( $232^\circ\text{C}$ ). Otras veces, se mantuvo una determinada temperatura durante varias horas, con objeto de determinar la influencia del tiempo sobre el grado de deshidratación del cemento.

## RESULTADOS

Las curvas de expansión inicial de las probetas de pasta pura de cemento A, con contenidos diferentes de agua, calentadas a la velocidad normal de calefacción, quedan representadas en la figura 1. Los efectos de las otras diversas velocidades de calefacción sobre la expansión de la pasta pura de cemento A se han representado en la figura 2; y en las figuras 3 y 4, respectiva-

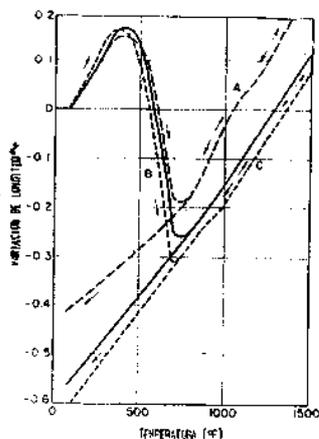


Fig. 1.

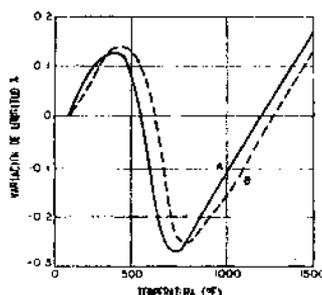


Fig. 2.

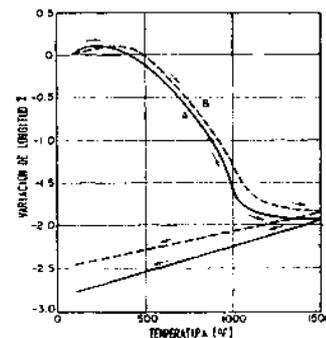


Fig. 3.

mente, las curvas de expansión y los efectos de la velocidad de calefacción en un cemento portland de altas resistencias iniciales y en un cemento de aluminato cálcico puro.

Se observó, en el hormigón que contenía el cemento A, que, en el intervalo de deshidratación de  $500$  a  $700^\circ\text{F}$  ( $260$ - $371^\circ\text{C}$ ), al mantener constante la temperatura aumentaba la retracción del hormigón para esta temperatura, en comparación con la curva de expansión normal. La retracción máxima, a unos  $800^\circ\text{F}$  ( $427^\circ\text{C}$ ) no descendió apreciablemente.

En la figura 5 se puede observar la influencia que tiene, en el caso de pasta pura de cemento A, el detener en diversos momentos el proceso de deshidratación, enfriando hasta la temperatura ambiente y después volviendo a calentar. El cemento portland de altas resistencias y el aluminato cálcico puro se comportan de un modo semejante cuando se interrumpe el proceso de deshidratación.

En la Tabla I se presentan la retracción total, después de calentamiento, y el coeficiente de expansión térmica de las tres pastas puras de cemento ensayadas. Las variaciones de la retracción total se deben a diferencias en el ciclo de calentamiento y en los contenidos de humedad de las muestras. Los coeficientes de expansión térmica se calcularon a partir de las curvas de recalentamiento, que en la mayoría de los casos se aproximan a líneas rectas y siguen la curva de enfriamiento.

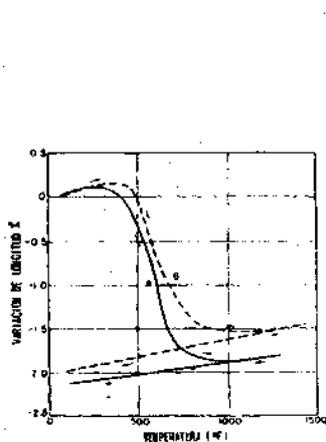


Fig. 4.

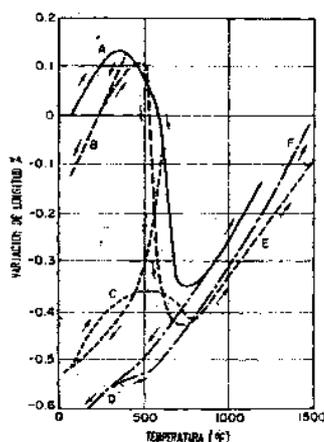


Fig. 5.

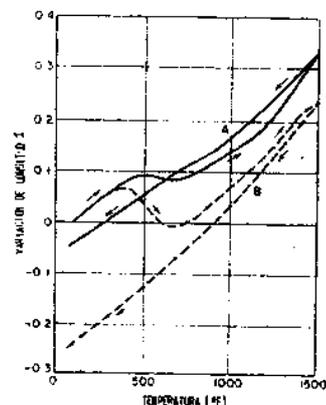


Fig. 6.

En las figuras 6-9 se han representado las curvas de expansión de diversos hormigones. Debe recordarse que estos materiales son productos comerciales, de modo que la granulometría de los áridos y los contenidos en cemento variaban considerablemente entre los diferentes tipos de hormigones. Las curvas de cada figura, es decir, de cada tipo de hormigón, corresponden a hormigones que tienen, esencialmente, la misma distribución granulométrica de áridos.

## DISCUSION

Las curvas obtenidas para los hormigones mostraban una tendencia hacia una mayor retracción a medida que aumentaba el contenido en cemento. Posiblemente, la distribución granulométrica de los áridos tiene una mayor importancia. Se observó que la retracción total de un hormigón, con una pobre distribución granulométrica del árido, puede ser superior a la de un hormigón, con una granulometría perfecta y un contenido superior en cemento (20 %).

Los ensayos de laboratorio realizados han puesto de manifiesto que un ciclo térmico de las pastas puras de cemento era más perjudicial para el cemento portland de altas resistencias iniciales que para el cemento A o para el aluminato cálcico puro. Se ha comprobado, también, mediante las curvas de análisis térmico-diferencial, que en el cemento portland se forma  $\text{Ca(OH)}_2$  y  $\text{CaCO}_3$ , después de calentamiento y enfriamiento. Los cementos de aluminato cálcico impuro forman cantidades muy pequeñas de estos compuestos, y los aluminatos cálcicos puros sólo pro-

TABLA I

CEMENTO	Retracción total después de calentamiento a 1.500°F (815°C) %	Coefficiente de expansión térmica (por °F) (por 1,8°C)
Cemento A.	0,55-0,85	$4,9 \cdot 10^{-6}$
Cemento portland de altas resistencias iniciales.	2,4 - 3,0	$6,2 \cdot 10^{-6}$
Aluminato cálcico puro.	1,85-2,3	$5,2 \cdot 10^{-6}$

ducen trazas de los mismos. La deshidratación y la rehidratación del  $\text{Ca(OH)}_2$ , y la formación de  $\text{CaCO}_3$ , tienden a perturbar la estructura, produciendo grietas y la desintegración general. Con una distribución granulométrica racional se puede eliminar este efecto en una gran proporción.

Los diagramas de deformación de secciones de muro sin empotrar, para temperaturas de la superficie caliente de 700° F (371° C) y 1.200° F (649° C) quedan representados en la figura 10. Estos diagramas se han determinado a partir de los gradientes de temperatura calculados y de los valores de la expansión térmica. En los hormigones núms. 6 y 16, las deformaciones no son lineales, e indican que las deformaciones por tracción, existentes en la superficie caliente a 700° F (371° C) progresan hacia la superficie fría, a medida que se eleva la temperatura por encima de 700° F (371° C). Este hecho determina, probablemente, el agrietamiento de la superficie caliente de las placas a 700° F (371° C) o a temperatura inferior, y la propagación gradual de las grietas a través de la placa, al elevar la temperatura, aunque las de la superficie caliente se encuentren más cerradas a temperaturas superiores.

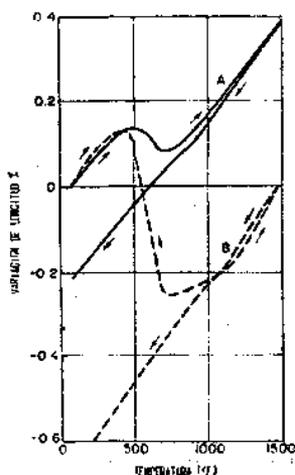


Fig. 7.

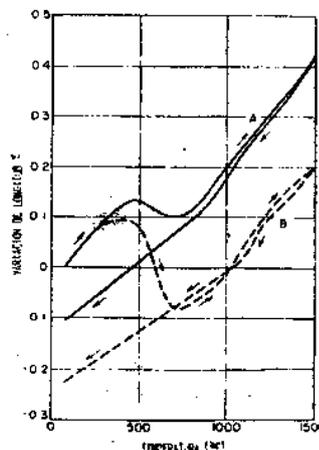


Fig. 8.

En las placas empotradas parcialmente, los diagramas de tensiones corresponden a los presentados para las deformaciones. Resulta, pues, que las tensiones en el hormigón núm. 6 son, principalmente, tensiones por compresión, con una ligera tensión por tracción sobre la superficie caliente, que se encuentra a 700° F (371° C) (diagrama B). En el hormigón núm. 16 se ha producido una tensión por tracción en el centro del muro, cuando la superficie caliente se hallaba a 1.200° F (649° C) (diagrama C). Esta misma tensión aparece en la zona de la superficie caliente, cuando ésta se encuentra a 700° F (371° C) (diagrama D). Se ha comprobado que en los hormi-

gonés de este tipo aparecen grietas en la superficie caliente si ésta se calienta a una temperatura de 700-900° F (371-482° C). A medida que crece la temperatura, las grietas se cierran, debido a la expansión del hormigón, como se puede observar en los diagramas A y C. En cambio, los diagramas E y F indican que los esfuerzos a tracción se manifiestan en los hormigones, preparados con cemento portland de altas resistencias iniciales, tanto cuando la superficie caliente se encuentra a 700° F (371° C), como cuando se halla a 1.200° F (649° C). Junto a los tipos de diagramas de deformación ilustrados en la figura 10, existen un cierto número de hormigones que sólo presentan expansión. Estos hormigones presentarán, en todo momento, tensiones por compresión en las placas empotradas.

El diagrama A de la fig. 10 da la distribución de temperaturas a distancias de 1 pulgada (2,54 cm), a través de un muro de 4 pulgadas (10,1 cm) de espesor, de hormigón ligero, de 50 libras/pie cúbico (800 kg/m<sup>3</sup>) calculada a partir de los datos encontrados en la literatura y de los determinados experimentalmente. La curva se encuentra, como máximo, un 16 por 100 por debajo de la línea recta que representa el gradiente entre las temperaturas de la cara caliente y de la fría. Para los diagramas con la cara caliente a 700° F (371° C), la distribución de temperatura, que es casi lineal, se determinó mediante los valores, determinados experimentalmente, para la conductividad.

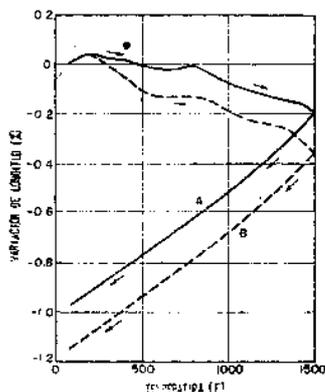


Fig. 9.

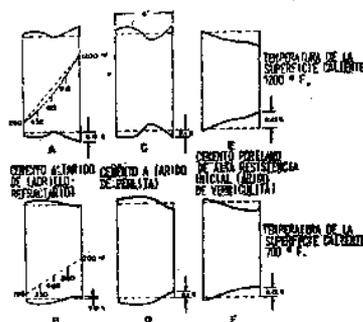


Fig. 10.

## CONCLUSIONES

Las características de expansión térmica de un hormigón ligero no pueden deducirse únicamente, a partir del conocimiento del tipo y cantidad de cemento en el hormigón. Debido a la complejidad de la estructura del hormigón, el único método viable es la determinación experimental de la expansión. Sin embargo, ni los valores hallados en el laboratorio pueden aplicarse rigurosamente a las instalaciones, debido al empotramiento indefinido que se da en la práctica, a las variaciones en el contenido en agua y a los métodos de hormigonado. Puede decirse, sin embargo, que los hormigones, preparados con cemento portland de altas resistencias iniciales, presentan, en general, una retracción superior a la de los hormigones de cemento A o de aluminato cálcico puro, y una expansión pequeña (o nada) en cualesquiera condiciones. Para hormigones con dosificaciones iguales, los de cemento A. son los que presentan la retracción mínima.

Durante el proyecto y la ejecución deben tenerse en cuenta la expansión y la retracción que se producen en el calentamiento inicial. La retracción que se produce después de la calefacción significa que, en muchos casos, no sólo no se requieren juntas de dilatación, sino que se han de disponer, por el contrario, juntas de retracción. Esta distinción puede ser importante cuando se exige que los muros presenten una hermeticidad total frente a los gases. En muchos casos, sin

embargo, se necesitan unas pequeñas juntas de dilatación con el único objeto de acomodar la expansión al principio del primer ciclo de calentamiento; el espacio necesario para la junta puede calcularse a partir de los valores de expansión térmica. Después de un calentamiento a 1.500° F (815° C), la mayoría de los hormigones presentan, al volver a calentar, una curva de expansión muy próxima a una recta.

Es casi axiomático que en los grandes bloques de hormigones refractarios aislantes debe esperarse la formación de algunas grietas, especialmente en la superficie caliente. La mayor parte de estas grietas se debe, no a una retracción permanente, sino a los cambios dimensionales que caracterizan al ciclo inicial de calefacción. Mediante un empleo adecuado de datos como los presentados en este trabajo, se pueden realizar proyectos con un mínimo de grietas; tal cosa es, particularmente, útil en aquellas instalaciones que constan de muros libres de hormigón armado, o de grandes paneles no protegidos por revestimientos refractarios. S. F. S.