

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

680 - 14 FORMA EN QUE LOS CAMBIOS DE TEMPERATURA Y DE HUMEDAD PUE-
DEN AFECTAR LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN

(How temperature and Moisture Changes May affect the durability of
Concrete)

S. L. Meyers

"ROCK PRODUCTS" Nº 8, pág. 153, 1951

- - - - -

Si prescindimos del calor de hidratación en el hormigón recién puesto en obra, los efectos térmicos de diferencias de temperatura en el hormigón pueden clasificarse en cuatro grupos posibles del siguiente modo:

(1) Cambios exclusivamente en los áridos, al ser frecuentemente de composición no uniforme, o estar constituidos por cristales diferentes, como los granitos, pudiendo presentar cada tipo de cristal una expansión térmica diferente.

(2) Modificaciones en la pasta de cemento; la magnitud de la expansión de las pastas de cemento endurecidas varía con la humedad relativa y con el tiempo transcurrido.

(3) Expansión del conjunto pasta más arena o árido fino (mortero) y tensiones provocadas entre la pasta y el árido fino - por diferencias en los coeficientes de dilatación térmica de los dos materiales.

(4) Expansión del hormigón, considerando éste constituido por árido grueso y mortero (y suponiendo que el mortero se dilata como si estuviera integrado por un sólo componente) y tensiones térmicas desarrolladas entre el mortero y el árido grueso. La unión entre el árido grueso y el mortero parece ser de gran impor

tancia para resistir las tensiones, debido a las diferencias térmicas entre ambos elementos.

Efecto de los áridos

La mayor parte de las propiedades físicas del hormigón - están más íntimamente relacionadas con la calidad de la pasta que con el árido, pero esto no es cierto en lo que se refiere a las - propiedades térmicas. Estas vienen determinadas de un modo aproximadamente proporcional al volumen de cada constituyente del hormigón, y, como el hormigón corriente contiene alrededor del 75% de áridos en volumen, se comprende fácilmente por que las propiedades térmicas del árido son importantes en la consideración de cualquier tipo de problemas térmicos en el hormigón.

Los áridos proceden fundamentalmente de rocas ígneas y - sedimentarias, a veces también metamórficas, como el cuarzo y el - mármol. Las rocas ígneas varían desde una estructura vítrea, sin rasgo cristalino alguno, pasando por las felsitas, compactas, de - grano fino, hasta los granitos, de grano grueso, y las pegmatitas de grano muy grande. Las felsitas de grano fino, se consideran casi estables desde un punto de vista térmico. Los granitos y riolitas, de grano grueso, presentarán tensiones mayores en las superficies de separación de los cristales durante un cambio de temperatura, a causa de las diferentes dilataciones que experimentan los granos contiguos de distinta clase. Estas rocas se meteorizan fácilmente, como pone de manifiesto la frecuencia de granitos descompuestos en altitudes elevadas y secas, donde la variación de temperatura entre el día y la noche es bastante grande. Cuando estas - rocas se protegen con pasta de cemento, su durabilidad es muy buena para variaciones normales de temperatura.

El tamaño de los cristales y el coeficiente de dilatación térmica de los diferentes tipos de cristales influyen sobre las tensiones producidas en la superficie de separación de los mismos para un cambio de temperatura y un módulo de elasticidad de los cristales determinados.

Griffith indica que la magnitud de la dilatación térmica en las rocas está frecuentemente relacionada con el porcentaje de sílice presente, aumentando con el contenido de ésta; además, su efecto sobre el coeficiente de dilatación es mayor cuando se trata de sílice libre, en forma de cuarzo, horsteno, areniscas. Cuando la sílice se encuentra combinada con otros elementos, los silicatos resultantes poseen coeficientes menores. Además, pone Griffith de manifiesto que existe alguna relación entre el coeficiente de dilatación térmica y el contenido de alúmina. Si bien es cierto que, generalmente las rocas silíceas poseen unos coeficientes elevados, los de granitos, basaltos y dolomitas son medios, y los de calizas y mármoles bajos, varían entre amplios límites, como demuestran los siguientes ejemplos.

TABLA I - Resumen de una tabla de dilataciones térmicas de hormigón de piedra y cemento Portland

<u>Tipo de roca</u>	<u>Límites observados del coeficiente de dilatación térmica lineal medio $\times 10^{-6}$, grado F.</u>		
Granitos y riolitas	1,0	a	6,6
Dioritas y andesitas	2,3	a	5,7
Gabros, Gabasas y Diabasas.	2,0	a	5,4
Areniscas	2,4	a	7,7
Dolomitas	0,5	a	6,8
Horstenos	4,1	a	7,3
Mármoles	0,6	a	8,9

El coeficiente de los cristales que tienen ejes en distintas direcciones y a veces de distinta longitud, varía con la dirección de los ejes. Parsons y Johnson han encontrado $4,1 \times 10^{-6}$ a lo largo de un eje de cuarzo, y $7,5 \times 10^{-6}$ a lo largo de otro. En la calcita es $14,3 \times 10^{-6}$ en una dirección y $-2,8 \times 10^{-6}$ perpendicularmente al primer eje. La ortoclasa en el feldespato es otro mineral que posee coeficientes muy diferentes a lo largo de los distintos ejes cristalográficos.

En un grupo de cristales de calcita distribuidos al azar en el seno de una pasta de cemento se pueden desarrollar tensiones térmicas considerables entre dos cristales, cuando una cara que se dilata coincide con una que se contrae. Sonder y Hibbert han demostrado que algunas rocas manifiestan un aumento continuo de longitud, cuando son sometidas a repetidos cambios de temperatura. La magnitud de este aumento de longitud decrece con el tiempo, pero persistió en mayor o menor escala mientras se realizaron los ensayos.

En el caso de rocas sedimentarias que constan de granos cementados, puede originarse cierta tensión térmica entre los granos y el cemento de fondo. También aquí, la magnitud de la tensión para un cambio de temperatura y un módulo de elasticidad dados, depende del tamaño de los granos y de los coeficientes diferenciales de los constituyentes.

Un módulo de elasticidad elevado opone una mayor resistencia al movimiento introducido por la tensión aplicada a un cuerpo que un módulo bajo, lo que tiene como resultado una menor acomodación a la tensión aplicada. Para una deformación térmica determinada, han de esperarse una deformación de grietas y una disgregación menores en los áridos de módulo de elasticidad bajo.

Otra propiedad de los áridos, de importancia en los cambios de temperatura, es la difusividad térmica, o sea la facilidad con que se propagan dichos cambios. La difusividad térmica es igual

al cociente de la conductividad por el producto del calor específico por la densidad. Las siguientes rocas están dadas en orden creciente de difusividades: basalto, riolita, granito, caliza, dolomita y cuarcita.

Pasta de cemento

Al considerar el efecto de los cambios de temperatura sobre la pasta de cemento endurecida, encontramos que no se comporta como la mayoría de los sólidos cristalinos, que poseen un coeficiente de dilatación térmica constante (a una temperatura dada) sino que el coeficiente aparente de dilatación es una variable. Esto fue sugerido por Freysinnet, quien llegó a esta conclusión a partir de sus estudios sobre los cambios de volumen producidos en los cementos por variaciones de humedad, temperatura y por fluencia plástica, relacionados por los huecos y humedad en el interior del cemento u hormigón con el estado higrométrico del aire. Meyers demostró que el coeficiente de dilatación térmica lineal de la pasta de cemento endurecida varía con el tiempo, composición química y humedad. Powers puso de manifiesto que esto era de esperar a partir de consideraciones teóricas y sugirió que este coeficiente aparente de dilatación se compone de dos factores: la dilatación térmica verdadera más la debida a la presión de hinchamiento. Bonnell y Harper confirmaron los resultados de Meyers de que el coeficiente de dilatación de las pastas es mínimo en condiciones de humedad y sequedad extremas y máxima para una humedad relativa intermedia entre los extremos. Meyers demostró que este coeficiente máximo se encontraba aproximadamente para un 70 % de humedad relativa en pastas relativamente recientes y para una humedad relativa algo menor en pastas no recientes; además el coeficiente máximo de éstas es menor que el de las pastas recientes.

Puesto que puede suponerse que el coeficiente verdadero de dilatación de la pasta es constante, la reducción que experimenta con el tiempo el coeficiente aparente de las pastas es debido a

una disminución de la presión potencial de hinchamiento. Y puesto que el origen de esta presión se encuentra en el interior del gel de cemento, esto indica que tiene lugar con el tiempo una conversión del gel en una forma microcristalina o cristalina del material. Esto es confirmado también por una disminución de la superficie específica de la pasta con el tiempo. En la tabla siguiente se supone que el vapor de agua absorbido a una humedad relativa del 43 % - está relacionado con la cantidad de gel (superficie) existente.

TABLA II

"Edad" de la pasta endurecida, hecha con cemento Tipo I, mezclado con un 24% de agua.	Agua evaporable adsorbida para un 43 % de humedad relativa (por ciento del cemento inicial).
1 año	4,80
2 años	4,40
14 años	2,45

La energía superficial (tensión superficial) de los sólidos es mucho mayor que la de los líquidos. Esto unido a la enorme superficie del gel de cemento sugiere la existencia de una fuerza considerable que tiende a reducir la superficie del gel y a aumentar el tamaño de las partículas, pero coartada por la rigidez del gel; no obstante, podría esperarse cierta reducción del gel o disminución de la superficie, al cabo de un largo periodo de tiempo, a causa de modificaciones volumétricas en el interior del gel.

Doelter dice, al discutir los minerales coloidales, "sólo un número limitado de compuestos tienen la propiedad de resistir en forma de geles un periodo de tiempo largo; la mayoría se hacen cristalinosa en seguida". S. Giertz-Hedstrom afirma, al discutir la estructura física de los cementos hidratados, "el gel de cemento en su forma coloidal no es un producto final estable, sino que, por -

crecimiento cristalino debe seguir el mismo camino que otros coloides inorgánicos en la naturaleza".

Se ha demostrado la existencia de las siguientes características en la pasta de cemento endurecida respecto a los coeficientes aparentes de dilatación:

Este coeficiente es máximo para un 70 % aproximadamente de humedad relativa en el interior de la pasta. Es mínimo en condiciones de sequedad extrema, esto es, cuando ha sido eliminada la mayor parte del agua evaporable.

El coeficiente aparente de dilatación, así como su margen de variación, disminuye con la "edad" de la pasta aunque exista la humedad favorable para producir un coeficiente máximo. Esta misma humedad favorable desciende por debajo del 70 % y se aproxima al 50 % de humedad relativa en pastas muy antiguas.

La composición química y la finura del cemento afectan el coeficiente de dilatación de una pasta endurecida sólo en cuanto afectan la cantidad del gel presente en la pasta y la estructura de la misma, su velocidad de hidratación o su estado higrométrico.

Existe una relación entre los cambios de volumen originados por variaciones de humedad y los límites de variación del coeficiente aparente de dilatación. Los materiales con grandes cambios de humedad presentan grandes variaciones en los coeficientes de dilatación. Ambas variaciones son originadas por la misma causa, cambios en la presión de hinchamiento que interviene en la ley de Koloin de las presiones de vapor.

La presencia en la pasta de huecos ocupados por aire o la cantidad de éstos, tiene poco efecto sobre el coeficiente de dilatación.

El coeficiente de dilatación de las pastas de cemento tratadas en autoclave es constante, lo que indica la ausencia de

gel de cemento después de este tratamiento.

Los líquidos que no poseen una gran afinidad por el gel de cemento, o que tienen moléculas demasiado grandes para penetrar en los poros del mismo, no afectan el coeficiente de dilatación de la pasta, es decir, éste permanece constante para una temperatura determinada. Los líquidos ensayados para reemplazar al agua en la pasta de cemento sin efecto alguno son alcohol, glicerina, benceno y queroseno.

Algunos materiales distintos del cemento, pero que poseen una estructura porosa fina que se aproxima al diámetro de los poros del gel de cemento, o tienen una gran afinidad por el agua, presentan presión de hinchamiento y un coeficiente aparente de dilatación variable. Existe cierta relación entre los cambios de humedad, tanto de la pasta de cemento como de estos materiales, y los límites de variación de sus coeficientes de dilatación.

El margen de variación del coeficiente de dilatación de los hormigones es menor que el de las pastas puras. Su coeficiente es función de las proporciones y coeficientes de los áridos y de la pasta. El coeficiente de dilatación de los áridos es constante a una temperatura dada (para cada tipo de árido); únicamente la pasta introduce un coeficiente variable, que, como en las pastas puras, es máximo para un 70 % de humedad relativa, de modo que el coeficiente de dilatación máximo del hormigón corresponde también a 70 % de humedad relativa. (Continuará)

- - - - -