

615 - 48

propiedades de los cementos expansivos, hechos con cemento portland, yeso y cemento aluminoso

G. E. MONFORE, *Físico, Investigador de la P. C. A.*

Journal of the P. C. A., Mayo 1964 (pág. 2)

sinopsis

Los cementos expansivos se han desarrollado durante las tres décadas pasadas, principalmente por las investigaciones llevadas a cabo en Francia, URSS y Estados Unidos.

Los cementos expansivos que fueron utilizados en los estudios de los cuales se da cuenta en el presente trabajo se obtuvieron mediante la mezcla de cemento Portland, cemento aluminoso y yeso. En las investigaciones se utilizaron morteros con los cuales se pudo determinar los efectos de la composición, tiempo y temperatura de curado sobre las resistencias, dilatación libre, retracción y desarrollo de resistencias en probetas pretensadas.

Se hace una revisión sobre los estudios hechos con cementos expansivos y desarrollados en la Universidad de California. Las propiedades de tales hormigones son, en términos generales, comparables a aquellos obtenidos con mezclas de cementos portland, cemento aluminoso y yeso.

Es necesaria más información sobre pérdidas de tensión en los aceros y durabilidad de los hormigones autopretensados.

RESUMEN DEL DESARROLLO DE LOS CEMENTOS EXPANSIVOS

Durante las tres décadas pasadas, investigadores de diferentes países han efectuado experiencias con cementos expansivos intentando encontrar un medio para compensar la retracción que se produce cuando se seca el hormigón. Más recientemente se ha intentado utilizar el cemento expansivo para producir esfuerzos de tracción en aceros empotrados. Lafuma (1), en un artículo, discute el trabajo de Lossier y Hendrickx en Francia, y cita 23 referencias de trabajos de varios investigadores modernos. Los estudios realizados en la URSS han sido descritos recientemente por Mikhailov (2), y unas investigaciones en curso de la Universidad de California han sido publicadas por Klein y Troxell (3), Klein, Korby y Polivka (4), Lin y Klein (5).

Existen ciertas incertidumbres sobre cómo pudo sugerirse la aplicación práctica de los cementos que contengan un componente expansivo. Lossier (6) afirma que puede considerarse que empezaron a usarse hacia 1925, pero Kühl (7) atribuye las primeras sugerencias a Gutmann en 1920.

Significado de los agentes que pueden producir inestabilidad

Los componentes que pueden provocar expansiones en los cementos se conocieron con anterioridad a 1920. Sin embargo, estos componentes producen generalmente una dilatación retardada del hormigón, quizás con un retraso de muchos meses después de su moldeo, lo cual puede dar lugar a agrietamientos o, incluso, a desintegración. Este fenómeno de “inestabilidad” fue reconocido con anterioridad a 1878, ya que por aquel tiempo se publicó en Alemania una Norma que incluía un ensayo de estabilidad de volumen (8).

Los componentes que pueden provocar expansiones destructivas a largo plazo cuando están presentes en cantidad excesiva en el cemento portland, incluyen la cal calcinada a muerte, la magnesia calcinada a muerte y el sulfato cálcico. Todos estos materiales han sido también propuestos para ser utilizados en la fabricación de cementos expansivos, y se han publicado patentes para tales aplicaciones. Una discusión sobre los cementos expansivos puede, por consiguiente, abarcar una revisión del mecanismo de inestabilidad dimensional.

Un exceso de cal libre provocará cambios dimensionales cuando la cal es del tipo llamado cocida a muerte o cristalina. La reacción entre la cal suavemente calcinada y el agua se verifica rápidamente mientras que el hormigón se encuentra todavía en estado plástico y no se producen daños. La cal fuertemente calcinada, por el contrario, se hidrata lentamente. La velocidad exacta dependerá del tamaño de las partículas, y gran parte de la reacción tiene lugar después del endurecimiento del hormigón. En consecuencia, la expansión diferida debida a la formación del hidróxido puede agrietar el hormigón.

Otro material que puede ocasionar averías, si se encuentra en cantidad suficiente, es el óxido de magnesio. La reacción es similar a la del óxido de calcio; es decir, la expansión es debida a la formación del hidróxido. También, como en el caso de la cal, la magnesia debe ser de la variedad denominada calcinada a muerte, para que se produzca una expansión destructiva una vez que el hormigón ha endurecido.

Una tercera causa de inestabilidad es un exceso de sulfato cálcico. El mecanismo en este caso se considera que es una expansión debida a la formación de sulfoaluminatos cálcicos hidratados. El sulfato cálcico dihidrato (yeso) se añade normalmente al cemento para regular las reacciones de hidratación del cemento, y en general se combina rápidamente mientras el hormigón se encuentra en estado plástico. Sin embargo, si se encuentra en cantidad excesiva, puede continuar la formación de sulfoaluminatos cálcicos hidratados después de haber endurecido el hormigón y se producen deterioros.

En consecuencia, pueden producirse anomalías cuando existe cal muy calcinada, magnesia calcinada a muerte y yeso, bien cada uno de ellos aisladamente o juntos, en cantidades tales y en tales estados físicos, que la expansión debida a la formación de hidróxidos ocurra después que el hormigón ha endurecido. La principal diferencia entre un cemento “expansivo” y un cemento “inestable”, parece ser que es el tiempo durante el cual se produce la expansión. Si puede controlarse la expansión, de tal modo que se produzca cuando el hormigón empieza a desarrollar resistencias, pero que, sin embargo, sea capaz de dilatarse, el hormigón puede acomodarse a la expansión con un mínimo de fisuración. Tal cemento puede denominarse cemento expansivo “útil”. Pero si la expansión se produce después de haber perdido el hormigón su deformabilidad y se hace tan frágil que no puede acomodar ampliamente la expansión sin un grave agrietamiento o desintegración, el cemento puede ser llamado, indudablemente, inestable.

Agentes capaces de formar sulfoaluminato cálcico hidratado

Aun cuando la cal y la magnesia calcinadas a muerte han sido propuestas para la fabricación de cementos expansivos, la mayoría de los trabajos realizados han ensayado cementos en los que la formación de sulfoaluminatos cálcicos hidratados es el principal medio del mecanismo de expansión. En los trabajos llevados a cabo en Francia, en la URSS y en la Universidad de California, y los estudios publicados en el presente artículo, se han efectuado utilizando cementos de este tipo.

Los cementos expansivos elaborados en Francia consisten en una mezcla de cemento portland, un agente expansivo y un estabilizador. El agente expansivo, que se obtiene cociendo una mezcla de yeso, bauxita y marga, se pensó en un principio que era un sulfoaluminato cálcico anhidro; sin embargo, más tarde se informó que era simplemente una mezcla de sulfato cálcico, aluminatos, silicatos y ferritos. Klein y Troxell (3) prepararon, de una manera similar, un agente expansivo cociendo una mezcla que contenía calcita, sulfato de aluminio y bauxita, los cuales forman un clínker expansivo que afirman contiene sulfoaluminato cálcico anhidro. Este clínker expansivo se molió y mezcló con cemento portland y una pequeña cantidad de escoria molida. Posteriores publicaciones (4-5) no mencionan el uso de la escoria. La expansión es atribuida a la formación de sulfoaluminatos cálcicos hidratados.

Los estudios realizados en la URSS se efectuaron en un principio mediante molienda de mezclas de cemento portland, cemento aluminoso y yeso, que con el agua forman los ingredientes necesarios para la formación de sulfoaluminatos cálcicos hidratados. Se reguló la expansión mediante las proporciones relativas de los componentes, y con la temperatura del agua de curado.

INVESTIGACIONES SOBRE LAS MEZCLAS DE CEMENTO PORTLAND, YESO Y CEMENTO ALUMINOSO

En los laboratorios de la Portland Cement Association se han realizado estudios sobre las mezclas de cemento portland, cemento aluminoso y yeso. Estos estudios sobre tales morteros se realizaron para calcular los efectos de la composición, tiempo y temperatura de curado sobre las resistencias, la expansión libre, la retracción y el desarrollo de resistencias en probetas pretensadas. En contraste con los estudios realizados en la URSS, en donde las mezclas se obtuvieron por molienda simultánea, los cementos expansivos para las investigaciones de la PCA se obtuvieron por simple mezcla de cemento portland comercial, cemento aluminoso y yeso en una amasadora de hormigón poco antes de añadir los áridos y el agua. En la tabla 1 se identifican los diversos cementos utilizados en el programa, dándose también sus composiciones químicas. El yeso era de calidad reactivo.

Aunque la mayoría de las mezclas presentaban una docilidad normal, algunas se endurecían rápidamente y se enmoldaban con dificultad. La docilidad probablemente dependerá de la composición de cada tipo particular de cemento portland y del cemento aluminoso utilizado.

Inmediatamente después de moldear los prismas de mortero en sus moldes, se colocaron en sacos adecuados de material plástico que se dejaron cerrados. Esta técnica permitió tener la seguridad de que durante este período en que estuvieron las probetas en los moldes dispu-

sieron de la cantidad de agua prevista. A continuación de este “almacenamiento en el molde” dentro de las bolsas cerradas, se desmoldaron las probetas y se las sometió a un período de curado en agua y en una atmósfera con una humedad relativa del 100 %. Terminado el curado, algunas probetas se dejaron secar en una atmósfera con una humedad relativa del 50 % y a una temperatura de 75° F (23° C).

TABLA 1
ANÁLISIS DE LOS CEMENTOS

Cemento	A	B	C	D	E
Tipo	Portland ASTM-1	Portland ASTM-1	Portland ASTM-1	Aluminoso	Aluminoso
SiO ₂ (%)	21,1	21,6	20,8	9,6	7,5
Al ₂ O ₃ (%)	5,8	5,1	5,5	40,6	41,9
Fe ₂ O ₃ (%)	2,0	3,2	2,3	11,4 ^a	11,5 ^a
Total CaO (%)	62,7	61,6	63,1	35,9	36,3
MgO (%)	3,3	3,5	3,0	1,3	1,3
SO ₃ (%)	2,2	2,4	2,5	0,24	0,61
Pérdida al fuego (%)	1,8	1,3	1,8	0,6	0,93
Na ₂ O (%)	0,12	0,23	0,15	0,09	0,04
K ₂ O (%)	0,12	1,3	0,18	0,10	0,15
Mn ₂ O ₃ (%)	0,83	0,05	0,63	—	0,25
CaO libre (%)	1,4	1,0	1,3	0,00	0,00
Residuo insol. (%)	0,21	0,15	0,12	0,72	—
Sup. especif. Blaine (cm ² /g)	3.740	3.230	3.740	2.760	—

^a Hierro total, calculado en forma de Fe₂O₃

A no ser que se especificase otra cosa, los cambios dimensionales se midieron en las probetas inmediatamente después de desmoldadas.

Al discutirse los efectos de los diversos factores en los párrafos siguientes, se han sugerido algunos mecanismos para explicar las expansiones observadas. Estos mecanismos son admisiblemente más simplificados, y se presentan en principio como un medio para explicar los hechos experimentales.

Composición

Los cementos moderadamente expansivos se prepararon por mezcla de un 90 a un 84 % de cemento portland, un 6 % de yeso y un 4 a un 10 % de cemento aluminoso. En la figura 1 pueden verse las expansiones de los prismas de mortero de 1 × 1 × 6 pulg (25,4 × 25,4 × 125,4 mm) preparados con una parte de cemento expansivo, 2 partes de arena de Elgin y 0,4 partes de agua, todo ello expresado en peso. Dichas expansiones se expresan en función del tiempo de curado, en una atmósfera con una humedad relativa del 100 % y a una temperatura de 73° F (21° C). Las probetas se mantuvieron en los moldes durante 24 horas a 73° F (21° C), antes del curado en ambiente húmedo. Se observará que la expansión de todas las probetas creció hasta un máximo y después se mantuvo constante. Estos valores máximos, probablemente, se alcanzaron cuando el yeso reaccionó por completo. Las velocidades de

reacción dependen aparentemente de las cantidades de aluminato disponibles para poder reaccionar con el yeso. Se puede observar en la figura 1 que una mezcla que contenga un 4 % de cemento aluminoso y un 6 % de yeso precisa cerca de 60 días para quedar estabilizada, mientras que una mezcla que contenga un 10 % de cemento aluminoso y un 6 % de yeso precisará sólo 7 días. Por otra parte, cuanto mayor es la velocidad de expansión, tanto mayor es la expansión máxima, probablemente debido a que los lazos tensionales debidos a la hidratación normal del cemento son más débiles en las primeras edades.

En la figura 2 se pueden ver los efectos que se obtienen al utilizar un 8 % de yeso y de un 5 a un 50 % de cemento aluminoso. Los prismas de mortero, que están hechos a base de una parte de cemento expansivo, una parte de arena de Ottawa normalizada y 0,27 partes de agua se curaron durante 6 horas en agua a 160° F (71° C). Un cemento expansivo que contenía 87 % de cemento portland, 5 % de cemento aluminoso y 8 % de yeso provocó solamente una pequeña expansión del 0,2 %, pero cuando el cemento aluminoso se aumentó hasta un 25 %, la expansión se incrementó hasta un máximo del 2,5 %. Mayores incrementos en la cantidad de cemento aluminoso reducen la expansión, y cuando se utilizó un 50 % de cemento aluminoso la expansión se redujo a cero. Aunque probablemente existen diversos factores que influyen sobre la curva de expansión que se muestra en la figura 2, uno de los más importantes es el de las velocidades de reacción.

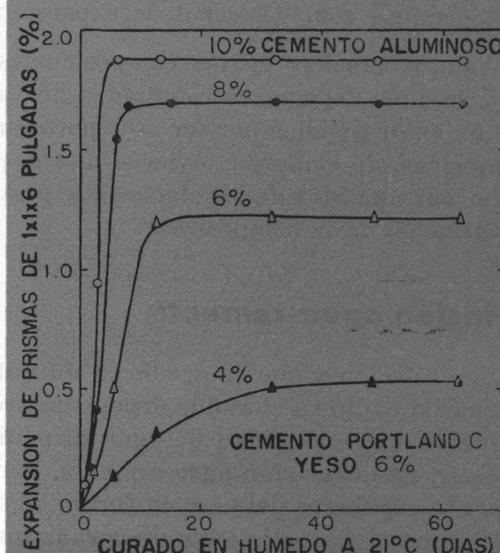


Fig. 1.—Influencia del cemento aluminoso a 21° C. (Mortero 1:2, relación a/c = 0,40, conservación en molde 24 horas.)

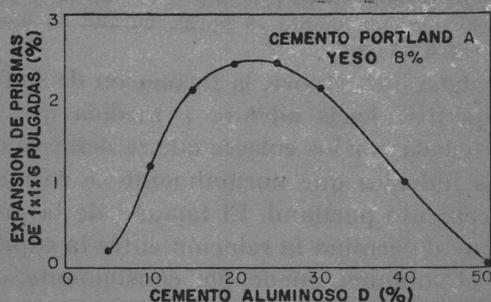


Fig. 2.—Influencia del cemento aluminoso por curado a 71° C. (Mortero 1:1, relación a/c = 0,27, conservación en molde 18 horas, curado en agua 6 horas a 71° C.)

La curva de la figura 3 muestra los efectos del yeso sobre la expansión de los prismas de mortero. La expansión fue esencialmente cero cuando el cemento expansivo estuvo constituido por un 80 % de cemento portland, 15 % de cemento aluminoso y 5 % de yeso, pero a medida que se incrementaba la cantidad de yeso aumentaba la expansión, alcanzando la cifra del 6 % cuando se utilizó un 20 % de yeso.

Se presume que cuando el cemento aluminoso está presente en un 20 a un 25 %, la totalidad del yeso tiene que reaccionar hasta que finaliza el período de curado; posteriores incrementos en cemento aluminoso forzarán más y más la reacción hasta su terminación durante el tiempo que el material está en el molde, con la correspondiente reducción de la expansión durante el curado. Finalmente, con un 50 % de cemento aluminoso, todas las reacciones de expansión aparentemente se completaron mientras la probeta se encontraba en el molde, y de aquí que la expansión durante el posterior curado en agua caliente sea cero.

En consecuencia, esto indica que se alcanzan los valores máximos para la expansión cuando se incrementa el contenido de yeso, y que para un contenido de yeso dado, la expansión máxima y la velocidad de expansión dependen de la cantidad de cemento aluminoso.

Aunque muchas de las composiciones de los cementos expansivos estudiadas no tuvieron un valor práctico por ser muy poco o muy expansivas, sin embargo, tuvieron interés para poder dar una idea de los efectos que produce la variación de la composición.

Relación agua-cemento

Las relaciones que se producen durante el almacenamiento en el molde dependen, probablemente, de la cantidad de agua disponible; es decir, de la relación agua-cemento. Para el cemento expansivo del caso en forma de mortero, y con el procedimiento de curado que se indica en la figura 4, la expansión fue del 4,2 % para una relación agua-cemento de 0,25 y ésta decreció con aumento del agua hasta un valor del 3,2 % para una relación agua-cemento de 0,30. De un incremento en el agua de amasado cabe esperar un aumento en la cantidad de sulfoaluminato cálcico hidratado, formado durante el almacenamiento en los moldes y, por consiguiente, decrecerá la cantidad formada durante el subsiguiente curado en agua.

Tamaño de las probetas

Durante el curado de las muestras expansivas en agua o en el aire, la formación de sulfoaluminatos cálcicos hidratados se realiza desde la superficie hacia adentro a medida que el agua penetra en la probeta, y esta expansión será frenada por los enlaces que se desarrollan

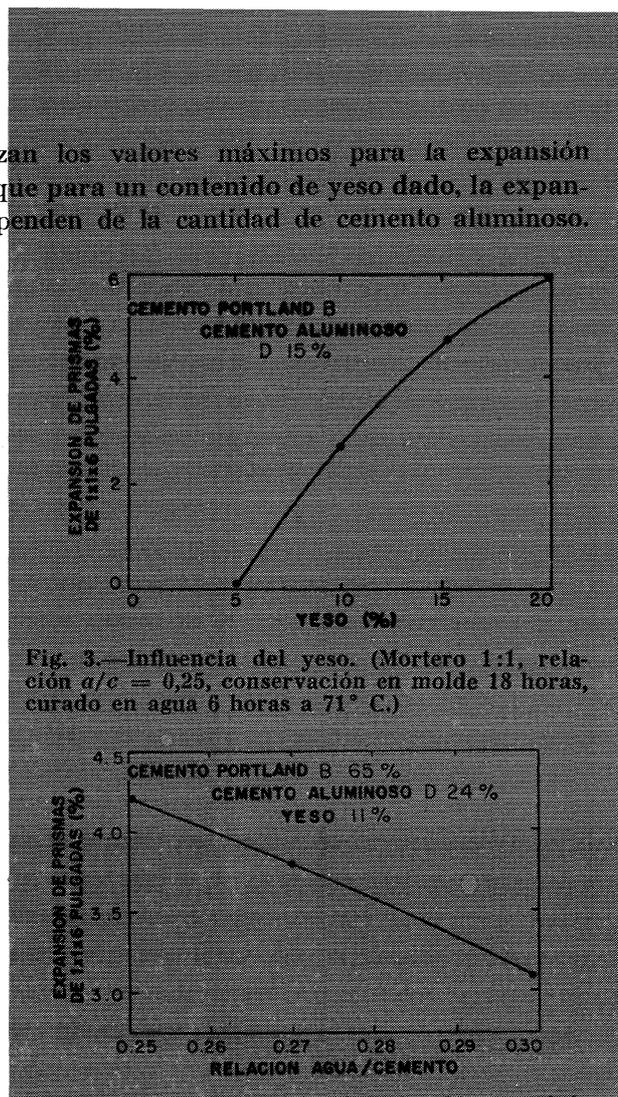


Fig. 3.—Influencia del yeso. (Mortero 1:1, relación $a/c = 0,25$, conservación en molde 18 horas, curado en agua 6 horas a 71°C .)

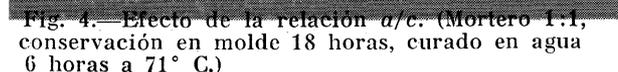


Fig. 4.—Efecto de la relación a/c . (Mortero 1:1, conservación en molde 18 horas, curado en agua 6 horas a 71°C .)

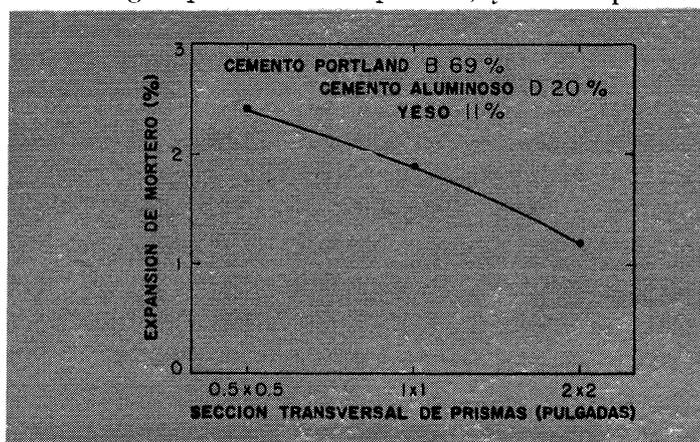


Fig. 5.—Efecto de la sección transversal de la probeta. (Mortero 1:1, relación $a/c = 0,30$, conservación en molde 24 horas, curado en agua 24 horas a 71°C .)

por los hidratos que normalmente se forman en el cemento portland. El tamaño de la probeta, que determina la relación entre la superficie y el volumen, puede, por consiguiente, esperarse que influya sobre el desarrollo de la expansión, y tal cosa fue observada, como puede deducirse por los datos de la figura 5. La expansión de unos prismas de mortero de $0,5 \times 0,5$ pulg ($12,7 \times 12,7$ mm) fue del 2,4 % mientras que la de los prismas de mortero similar de 1×1 pulg ($12,4 \times 12,4$ mm) fue de 1,9 % y la de los prismas de 2×2 pulg ($50,8 \times 50,8$ mm) fue solamente del 1,2 %.

Resistencia

El efecto disruptivo del mecanismo expansivo puede verse por el diagrama de la figura 6. La resistencia a compresión de un determinado mortero se ha observado que es de 2.800 libras/pulg² (196,8 kg/cm²) después de haber sido conservado en moldes durante 24 horas a 73° F (21° C). Después de un período adicional de curado en agua a 71° C, la resistencia a compresión aumentó a 7.300 libras/pulg² (513,32 kg/cm²) en los cubos que se mantuvieron comprimidos en los moldes durante el curado, descendiendo, sin embargo, a 1.500 libras/pulg² (105,4 kg/cm²) en los cubos que se dejaron expandir libremente. La expansión de este mortero cesó después del curado de 24 horas en agua a 160° F (71° C); por consiguiente, el curado adicional en húmedo a 73° F (21° C), que sirvió para provocar una posterior hidratación regular del cemento portland, incrementó las resistencias tanto de los cubos expansionados libremente como de los cubos comprimidos sobre los valores medidos directamente después del período de curado en agua a 160° F (71° C).

Temperatura de curado

El efecto de la temperatura del agua de curado sobre la expansión producida puede apreciarse por las curvas de la figura 7. Los prismas de 1 × 1 × 6 pulg (25,4 × 25,4 × 152,4 mm) se guardaron en moldes durante 18 horas a 73° F (21° C) y se curaron en agua a las temperaturas de 73, 100 y 190° F (21, 38 y 88° C). La expansión en agua a 73° F (21° C) incrementó desde 0,8 % al cabo de 24 horas, hasta un 9,3 % en 7 días y se estacionó en este valor durante el curado subsiguiente en agua a 73° F (21° C). El aumento posterior de la temperatura de curado hasta 190° F (88° C) colocó la expansión en un valor estable de cerca de 2,3 % en 6 horas. En consecuencia, el efecto de aumentar la temperatura del agua de curado fue completar la expansión en un tiempo más corto y a un valor más bajo.

Retracción

Una aplicación que se ha sugerido para un cemento ligeramente expansivo, es la de obtener hormigón "sin retracción" mediante la adecuada compensación de la retracción que se

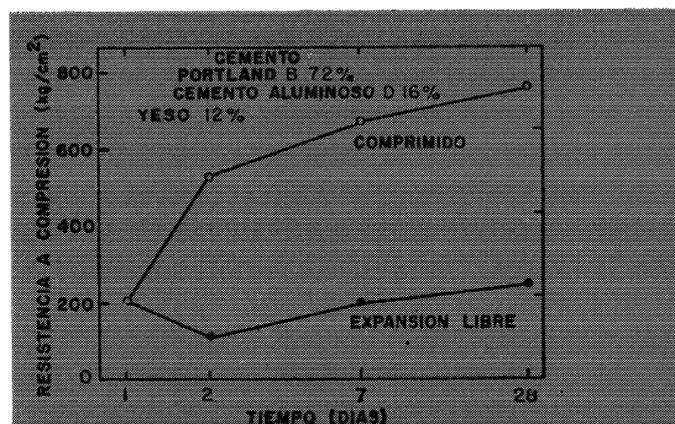


Fig. 6.— Resistencia a compresión de cubos de 2 pulgadas de lado, comprimidos y con libre expansión. (Mortero 1:1, relación a/c = 0,30.)

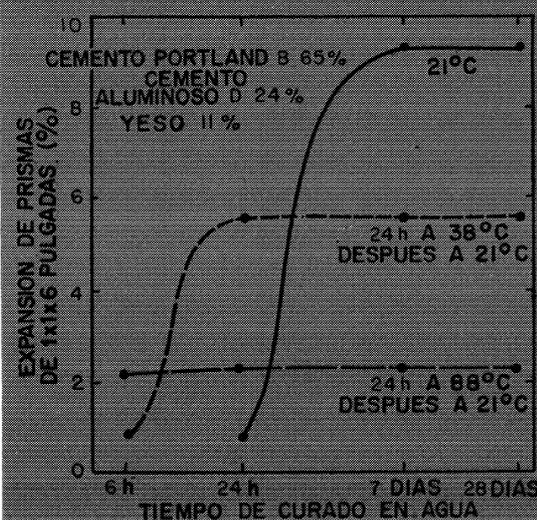


Fig. 7.— Efecto de la temperatura del agua de curado. (Mortero 1:1, relación a/c = 0,27, conservación en molde 18 horas.)

produce cuando el hormigón tradicional pierde humedad. Es posible calcular un hormigón o un mortero que dilate durante el curado en la misma cantidad que retrae durante el subsiguiente secado, teniendo así la misma longitud en seco que tenía en el mismo momento del desmoldado. Todas las mezclas expansivas estudiadas retrajeron durante el secado y como consecuencia se sometieron a alabeo o tensiones de retracción resultantes de un secado no uniforme. En la tabla 2 se facilitan datos sobre las expansiones y retracciones por secado de los morteros fabricados con diversas mezclas moderadamente expansivas. Los prismas de $1 \times 1 \times 6$ pulg ($25,4 \times 25,4 \times 152,4$ mm) estaban hechos con un mortero constituido por

TABLA 2

EXPANSION Y RETRACCION MAXIMAS DE PRISMAS DE $1 \times 1 \times 6$ PULGADAS

Cemento Portland C-Mortero 1:2-Relación $a/c = 0,40$.

Conservación en el molde, 24 horas.

Curado en húmedo, 60 días a 21° C.

Conservación en seco, 45 días a 50 % de humedad relativa y 21° C

Yeso (%)	Cemento aluminoso E (%)	Expansión máxima (%)	Retracción, desde su máxima longitud (%)
4	4	0,12	0,08
4	6	0,14	0,10
4	8	0,14	0,12
4	10	0,12	0,12
5	5	0,50	0,11
5	6	0,58	0,11
5	7	0,57	0,11
5	8	0,61	0,10
5	9	0,60	0,12
6	4	0,54	0,10
6	6	1,20	0,16
6	8	1,70	0,14
6	10	1,90	0,16

una parte de cemento expansivo, 2 partes de arena de Elgin y 0,4 partes de agua. Las expansiones se calcularon a partir de las longitudes de las probetas inmediatamente después de desmoldadas, y las retracciones se computaron basándose en las longitudes una vez expandidas y estabilizadas después del curado en atmósfera húmeda a 73° F (21° C) durante dos meses. Es de interés hacer constar que, aunque la expansión máxima varió de 0,12 a 1,88 %, las retracciones fueron razonablemente constantes y su promedio fue de 0,12 %. Swayze (9) informó sobre las retracciones de morteros 1:2 hechos con diferentes cementos de cada uno de los 6 tipos de la ASTM. Las retracciones medias de los prismas de $1 \times 1 \times 11$ pulgadas ($25,4 \times 25,4 \times 279,4$ mm) hechos con cemento del Tipo I una vez ya desecados durante 28 días en una atmósfera con una humedad relativa del 50 % y a una temperatura de 73° F

(21° C), fue ligeramente menor del 0,10 %. Esto está en buena correspondencia con el valor del 0,12 % de retracción de los cementos expansivos después del secado bajo condiciones parecidas al cabo de 45 días.

Como era de esperar, las correspondientes retracciones de los morteros más ricos constituidos por una parte de cemento expansivo y una parte de arena se observaron que eran mayores, del orden de un 0,2 por ciento.

Desarrollo de las resistencias

Otra aplicación posible de los cementos expansivos es la de inducir tensiones en los aceros de pretensado. Para inducir una tensión de, por ejemplo, 120.000 libras/pulg² (8.437 kg/cm²) en el acero se precisa una deformación del 0,4 %. Por consiguiente, si ésta es inducida por expansión del hormigón, la expansión de este hormigón también debe ser del 0,4 % bajo la carga del acero. La tensión correspondiente en el hormigón será igual a 120.000 libras/pulg² veces la relación de la sección transversal del acero a la sección transversal del hormigón, o de 120 libras/pulg² por cada 0,1 % del acero.

En la figura 8 puede verse el tipo de probeta utilizada para estudiar el desarrollo de tensiones en las probetas de mortero pretensadas. Los prismas eran de 2 × 2 × 10 pulg (50,8 × 50,8 × 254 mm) y contenían un 0,4 % de acero a lo largo de su eje en forma de un solo alambre de pretensado de 0,142 pulg (3,607 mm) de diámetro. Los extremos de los alambres se sujetaron mediante mordazas de acero, que se apoyaron contra placas gruesas de acero en cada extremo de la probeta. A medida que se expansionaba el mortero, el alambre fue entrando en tensión y las tensiones que se producían en el hormigón se computaban por los cambios dimensionales del alambre.

La tensión que se desarrolló en una determinada probeta de mortero de dosificación 1:1 (fig. 9) fue de 280 libras/pulg² (19,6 kg/cm²) después de curada en agua a 160° F (71° C) durante 24 horas, incrementándose a 350 libras/pulg² (24,6 kg/cm²) después de un curado adicional en atmósfera húmeda durante 7 días. La tensión de 350 libras/pulg² (24,6 kg/cm²) permaneció constante durante otras 3 semanas de curado en humedad. Durante los 2 años de secado en un ambiente con una humedad relativa del 50 % a 73° F (21° C), que siguió al curado en humedad, las tensiones en el mortero decrecieron hasta aproximadamente la mitad del valor máximo.

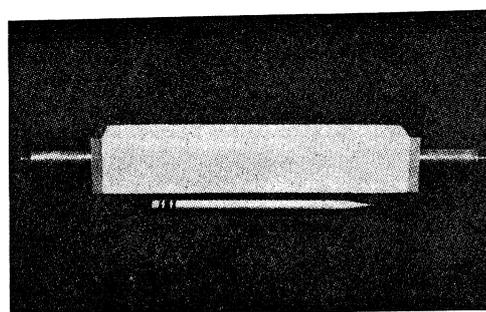


Fig. 8.—Prismas de 2 × 2 × 10 pulgadas empleados en los estudios tensionales.

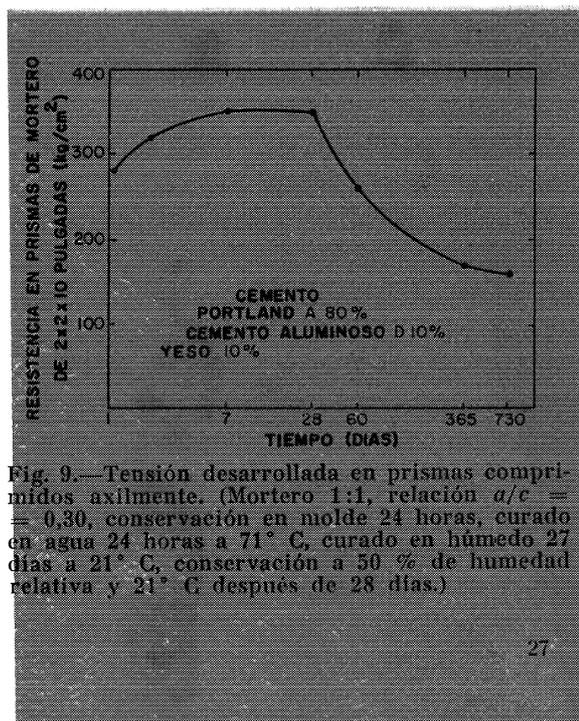


Fig. 9.—Tensión desarrollada en prismas comprimidos axialmente. (Mortero 1:1, relación $a/c = 0,30$, conservación en molde 24 horas, curado en agua 24 horas a 71° C, curado en húmedo 27 días a 21° C, conservación a 50 % de humedad relativa y 21° C después de 28 días.)

discusión

Los cementos expansivos que se incluyen en el presente estudio fueron mezclas de cemento portland, cemento aluminoso y yeso, siendo similares a los "cementos tensionales" utilizados en la URSS. La principal aplicación de los cementos tensionales en dicho país (2) es, sin duda, la producción de tuberías de hormigón autopretensadas de diámetro del orden de 6 a 40 pulg (152 a 1.016 mm). La técnica de su construcción parece estar muy avanzada e implica una considerable cantidad de maquinaria automática para producir tales tuberías autopretensadas.

Los cementos expansivos desarrollados en la Universidad de California son una mezcla de un compuesto expansivo especialmente preparado y cemento portland, y a este respecto es similar al cemento expansivo creado por los franceses. Ha despertado gran interés el cemento expansivo en la Universidad de California por su probable aplicación a las pistas autopretensadas para carreteras (10) y por la reciente construcción de tramos con retracción compensada cerca de Palmdale, California y de Lodi, California (11), que fueron realizados para eliminar las juntas de contracción y los correspondientes problemas de conservación.

Los presentes estudios han demostrado que pueden producirse expansiones en diferentes porcentajes con mezclas de cementos expansivos de cemento portland, cemento aluminoso y yeso. La magnitud de la expansión puede regularse por la composición de la mezcla y por la temperatura de curado. Estos resultados están de acuerdo con los estudios realizados en la URSS y expuestos por Mikhailov (2). También se han conseguido expansiones en diferentes porcentajes con hormigones hechos con cementos de la Universidad de California. La magnitud de estas expansiones puede controlarse por la composición del componente expansivo y por las cantidades relativas del componente expansivo y del cemento portland. En los estudios de California (4 y 5) el componente expansivo estaba constituido por 20-30 % del cemento expansivo, y los contenidos de cemento expansivo fueron de 7 a 10 sacos/yarda³ de hormigón (390 a 558 kg/m³). No se ha informado sobre los efectos de la temperatura de curado.

Estudios realizados en la Universidad de California, en la URSS y en la PCA han demostrado que cuanto más baja es la relación agua-cemento de la mezcla, tanto mayor es la correspondiente expansión. Se da cuenta de que en la URSS se han utilizado relaciones agua-cemento tan bajas como 0,16 para morteros expansivos aplicados por medios neumáticos.

Las investigaciones de la Universidad de California y de la URSS también concuerdan con los resultados que se facilitan aquí sobre la expansión libre, la cual afecta de modo adverso a la resistencia a la compresión. Sin embargo, si se restringe la expansión de un mortero o un hormigón expansivo, pueden alcanzarse elevadas resistencias a la compresión.

En los estudios de la PCA los morteros expansivos que se curaron suficientemente para completar la expansión y que se dejaron seguidamente secar en un ambiente con una humedad relativa del 50 % se retrajeron en la misma cantidad, aproximadamente, que los morteros convencionales, es decir, del 0,1 al 0,2 %. Sin embargo, como la expansión que precede a la retracción puede ser de un bajo porcentaje, se dispone de una considerable expansión neta para inducir tensión en el acero de pretensar.

Aunque las condiciones del ensayo no fueron estrictamente comparables, las tensiones de compresión inducidas por un hormigón expansivo por una precompresión uniaxial fueron considerablemente más altas en los ensayos de la Universidad de California que los correspon-

dientes que se realizaron con morteros similares en la PCA o en la URSS. Klein, Karby y Polivka (4) dan cuenta de una tensión de compresión inducida máxima de 1.200 libras/pulg² (84,3 kg/cm²) en comparación con las 530 libras/pulg² (37,2 kg/cm²) de los ensayos de la PCA y las 700 libras/pulg² (49,2 kg/cm²) de los ensayos de la URSS (2).

Futuros estudios de los hormigones autopretensados incluirán una valoración de las pérdidas de tensión en el acero como consecuencia de la retracción y fluencia del hormigón, así como el deslizamiento de la armadura. La resistencia del hormigón autopretensado a la helada y a la acción química del deshielo se estudiará más adelante.

bibliografía

1. LAFUMA, H.: "Expansive Cements", *Proceedings of the Third International Symposium on the Chemistry of Cement*, London (1962), 581-97.
2. MIKHAILOV, V. V.: "Stressing Cement and the Mechanism of Self-Stressing Concrete Regulation", Paper VIII-1 of *Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement*, Washington, D.C. (1960), vol. II, 927-55.
3. KLEIN, A., y TROXELL, G. E.: "Studies of Calcium Sulfoaluminate Admixtures for Expansive Cements", *American Society for Testing Materials, Proceeding* 58, 986-1008 (1958).
4. KLEIN, ALEXANDER, KARBY, TSEVI y POLIVKA, MILOS: "Properties of and Expansive Cement for Chemical Prestressing". *Journal of the American Concrete Institute* (July 1961); *Proceedings* 58, 59-82 (1961).
5. LIN, T. Y., y KLEIN, ALEXANDER: "Chemical Prestressing of Concrete Elements Using Expanding Cements", *Journal of the American Concrete Institute* (September 1963); *Proceedings* 60, 1187-1216 (1963).
6. LOSSIER, HENRY, y CAQUOT, A.: "Expanding Cements and Their Application— Self Stressed Concrete", *Le Genie Civil*, 121, No. 8, 61-65 and No. 9, 69-71 (April 15 and May 1, 1944). In French, Abstract in *Proceedings American Concrete Institute* 41, 238-40 (1945).
7. KÜHL, HANS VON: "Quellzement [Expansive Cement]", *Silikattechnik* 6, No. 11, 476-77 (1955). In German.
8. GONNERMAN, H. F.: "Development of Cement Performance Tests and Requirements", *Research Department Bulletin* 93 (March 1958), *Portland Cement Association*, 35 pages.
9. SWAYZE, MYRON A.: "Volume Changes in Concrete", *Materials Research and Standards*, 1, No. 9, 700-703 (1961).
10. "Self-Stressing Concrete Tested", *Engineering News-Record*, 170, No. 12, page 171 (March 21, 1963).
11. SPELLMAN, D. L.: "Living Pavements", *California Highways and Public Works*, 42, No. 9-10, 51-54 (September-October 1963).

Traducido y adaptado por C. Sánchez Castro