

Hormigones y morteros sin retracción (*)

Por TOMAS GARCIA MADRID
y PETER HORSTMANN LARGACHA

Existen numerosas aplicaciones en las que debe proscribirse la retracción inherente al fraguado del hormigón y la consecuente aparición de grietas y fisuras. Para evitar esos fenómenos existen diversas soluciones, que se exponen en el siguiente artículo, que obtuvo el Primer premio HALESA 1985 en el concurso convocado al efecto.

1. INTRODUCCION. GENERALIDADES

Una de las más importantes limitaciones de los morteros y hormigones normales de cemento es su retracción. Esta inestabilidad dimensional se produce en el transcurso de su fraguado, por asentamiento o segregación, así como durante el endurecimiento, por secado, y limita la eficacia del empleo de estos materiales en algunas aplicaciones donde la retracción tiene efectos inadmisibles.

Las consecuencias de la retracción son la aparición de fisuras y grietas superficiales y la creación de tensiones en el interior de la masa, con el consiguiente trastorno de las resistencias mecánicas y químicas a largo plazo.

El método más comúnmente usado para disminuir la retracción es reducir la relación agua/cemento (A/C), pero siguiendo este procedimiento no se puede eliminar totalmente esta, y además los morteros y hormigones con baja relación A/C son difícilmente trabajables, carácter este que es especialmente indeseable en el tipo de aplicaciones a las que se destinan este grupo de materiales.

Antes de pasar a describir los métodos que se utilizan actualmente para reducir, eliminar o cambiar de signo la retracción (expansión), nos detendremos brevemente en la descripción de este fenómeno.

1.1 El fenómeno de la retracción

Durante el proceso de endurecimiento y fraguado, el hormigón contrae de volumen cuando se verifica en el aire, y entumece cuando se

verifica en el agua. Al primer fenómeno se le denomina retracción.

La retracción puede explicarse por la pérdida paulatina de agua en el hormigón. Aunque el fenómeno es complejo, de una forma simplificada se puede decir que el hormigón contiene agua en cinco estados distintos:

- Agua combinada químicamente o de cristalización.
- Agua de gel.
- Agua zeolítica o intercrystalina.
- Agua adsorbida, que rodea los granos de árido y pasta, estando adherida a ellos formando meniscos.
- Agua capilar o libre.

El hormigón retrae por la pérdida de este agua, de uno u otro origen.

1.1 Mecanismo de la retracción

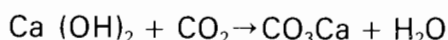
Cuando el mortero u hormigón saturado de agua es expuesto a la atmósfera seca (por ejemplo, al desencofrar), la superficie del mismo en contacto con la atmósfera comienza inmediatamente a perder agua. La velocidad con que se efectúa esta pérdida depende, inicialmente, de la humedad relativa (h_r), temperatura, relación agua/cemento (A/C) y del área de la superficie de contacto. El agua es eliminada en un proceso capilar, principalmente, perdiéndose progresivamente la de los meniscos de los poros mayores por evaporación. Las tensiones capilares que se desarrollan en los puntos en los que el agua permanece, induce tensiones de compresión en el cemento, y tienen como resultado la retracción de este.

Al progresar el proceso, los meniscos se alejan aún más de la superficie, y también se elimina el agua sujeta por fuerzas físicas. Esta nue-

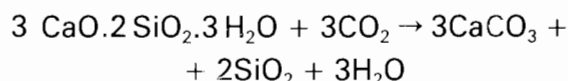
(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 28 de febrero de 1986.

va pérdida de agua reduce la energía superficial de la fase sólida e incrementa la retracción. Otra posible causa de incremento es la pérdida del agua libre de hidratación.

Por último, algunos autores atribuyen el origen de una cierta parte de la retracción a la desecación debida a la carbonatación. El CO_2 de la atmósfera se difunde en el hormigón y reacciona con el cemento formando carbonato cálcico, según la reacción:



y también descompone los silicatos, producidos en la hidratación del cemento:



Por este tipo de reacciones se erosionan químicamente partículas que estaban resistiendo las compresiones, por lo que se transmiten estas cargas a otras partículas, aumentando la contracción. De todos modos, el CO_2 no suele penetrar más de 1 cm., por lo que este mecanismo solo tiene importancia en piezas de pequeño espesor.

Dependiendo de la importancia relativa de cada uno de los posibles mecanismos de la retracción mencionados, podemos distinguir, entre otras de menos importancia, dos tipos fundamentales de retracción:

1. *Retracción plástica*, o disminución de volumen del hormigón o mortero fresco debido al agua desalojada. Cuando la pérdida de agua es debida a la sequedad de los áridos, a un soporte o encofrado absorbente o a la evaporación, este mortero u hormigón tiende a reducir su volumen en un grado que aproximadamente corresponde al volumen del agua desalojada.

2. *Retracción química*, por reducción del volumen de agua libre, como consecuencia de la reacción de hidratación del cemento.

1.1.B Factores que influyen en la retracción

Podemos concluir que el fenómeno de la retracción depende de los siguientes factores, en mayor o menor medida:

- a) Los que modifican la retracción de la pasta de cemento:

1. Relación A/C y grado de hidratación.
2. Humedad relativa.
3. Edad del hormigón en el momento de su exposición a la atmósfera. Además, la velocidad con que se pierde el agua varía con la edad del hormigón.
4. Tipo y características del cemento.
5. Área de la superficie expuesta.
6. Tamaño y forma de la pieza.
- b) Los que influyen en el grado de coacción que los áridos y las armaduras, en su caso introducen a la contracción de la pasta de cemento:
 7. Rigidez de los áridos y deformación del conjunto.
 8. Rigidez de la pasta.
 9. Dosificación de los áridos (principalmente concentración en volumen).
 10. Cantidad de las armaduras, y en menor medida, tipo de acero.
- c) Los que influyen en la retracción a través de otros mecanismos:
 11. Concentración de CO_2 .
 12. Diámetro de los capilares vacíos.
 13. Aditivos utilizados para actuar sobre otras propiedades diferentes del hormigón.

1.1.C Influencia de los factores más importantes

De todos los posibles factores que determinar el grado que alcanza la retracción, a continuación pasaremos revista de modo somero a aquellos que tienen una influencia más significativa.

A) Relación agua/cemento

La dosis de agua del amasado está en relación directa con la retracción que experimentará la pasta. Por ello, a igualdad de dosis de cemento por m^3 de hormigón, la retracción aumenta con la relación A/C; a igualdad de la relación agua/cemento, aumenta con la dosis de cemento.

Al tratar de la influencia de otros factores veremos como varía ésta en función de la relación A/C.

B) Humedad relativa

Al aumentar la humedad relativa del ambiente, la retracción decrece. En la figura 1 aparece el valor de la retracción a diferentes edades en función de la humedad relativa, h_r .

Un dato importante a efectos de nuestro trabajo es el observado por diversos autores, y es

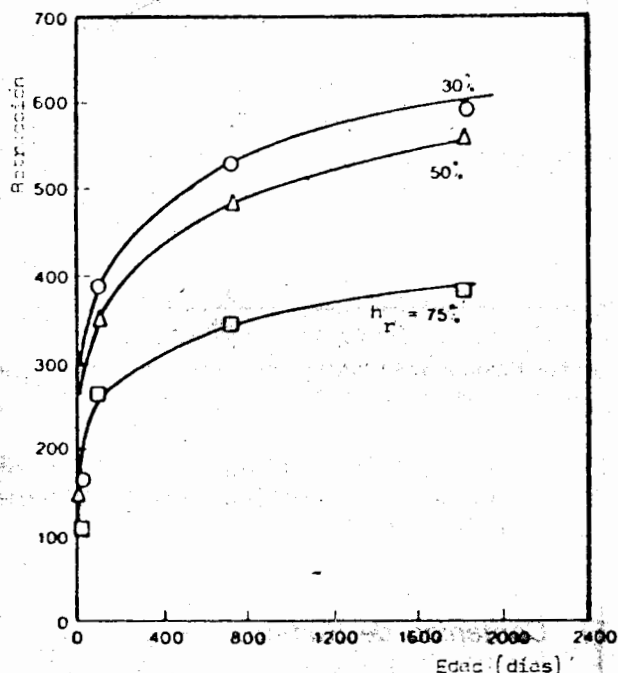


Figura 1.—Influencia de la humedad relativa (Hoobs y Parrot, 1979)

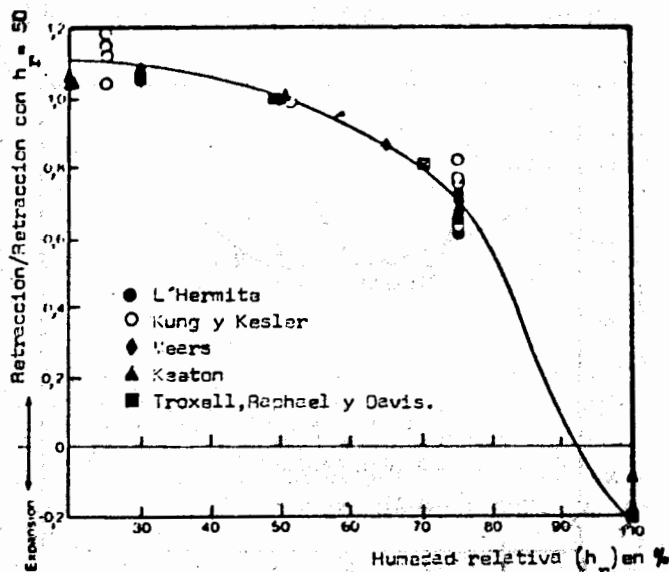


Figura 2.—Variación de la retracción con la humedad relativa (Lorman, 1974).

que en condiciones muy húmedas se puede invertir el signo, es decir, producirse una expansión. Existirá por tanto una humedad a la cual se alcanza el equilibrio hídrico, que según Schoerer es del 90 por 100 y según Lorman es del 94%. En la figura 2 aparece la relación entre la retracción que se obtiene con diferentes valores de la humedad relativa y la que se obtendría con humedad relativa del 50 por 100.

C) Edad del hormigón

La pasta de cemento presenta en el primer período de su endurecimiento una gran tendencia a la retracción, que es algo menor en el caso de curado y conservación en ambiente húmedo. Debido a que aumenta la cantidad de gel, y el número de granos de deficiente hidratación decrece, esta tendencia se ve gradualmente disminuida, especialmente a partir del instante en que se completa la hidratación.

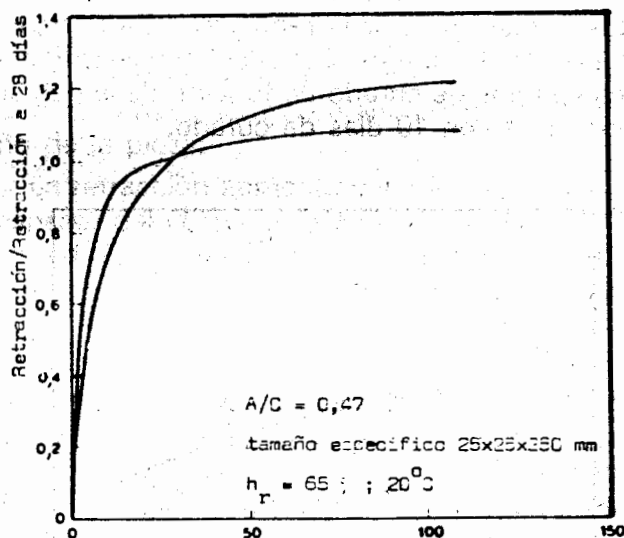


Figura 3.—Evolución de la retracción, con el tiempo (Hoobs y Parrot, 1979)

D) Tipo y características del cemento

La naturaleza coloidal de la pasta de cemento es la principal responsable de la retracción de la pasta endurecida, por lo que se puede admitir que cementos con productos de hidratación que originen geles «gruesos» presentan una tendencia menor a la retracción.

Los cementos ricos en silicato tricálcico presentan una menor retracción que los pobres en cal.

Los cementos ricos en aluminato presentan más fuerte retracción que aquellos que tienen bajo contenido en aluminato tricálcico.

También el grado de finura del cemento tiene influencia en la retracción de la pasta. Los cementos que han sufrido una exhaustiva molienda tienen mayor tendencia a la retracción, pues influye en la hidratación.

Una pasta de cemento fresca que contenga muchos gruesos (grumos), granos aún sin hidratar y algo de gel, presenta una retracción menor debido al hecho de que el grano de cemento juega el papel de un grano inerte.

E) Tiempo de curado del hormigón

El tiempo de curado, sobre todo para relaciones bajas A/C tiene poca importancia cuando es menor de 1 mes, aunque curados prolongados pueden reducir la retracción. En la figura 4 aparece el valor de la retracción para diferentes tiempos de curado en función de la que se obtendría con 10 días de curado.

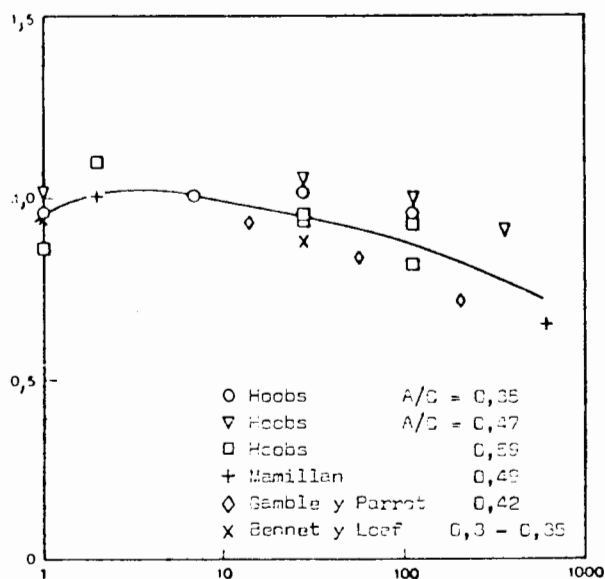


Figura 4. Efecto del tiempo de curado sobre la retracción (Hoobs y Parrot, 1979)

La dependencia de la retracción del tiempo de curado depende en gran medida de la rela-

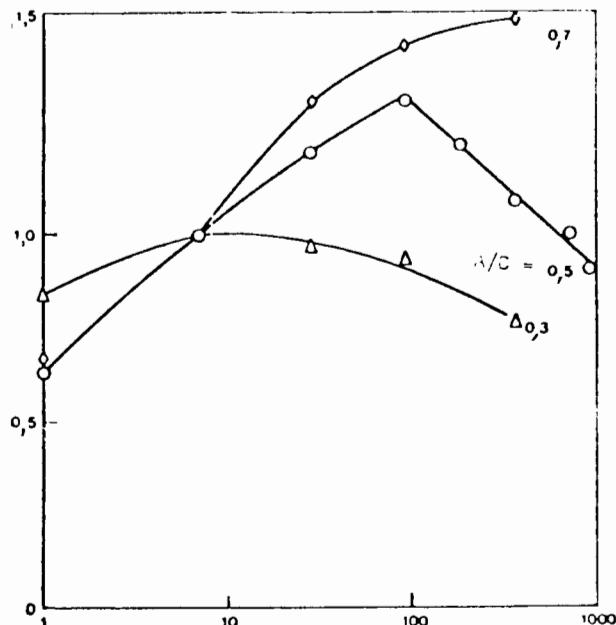


Figura 5. — Retracción en función, del tiempo de curado y de la relación agua/cemento (Hoobs y Parrott, 1979)

ción A/C de la pasta. En la figura 5 se observa como varía el índice del gráfico anterior variando la relación A/C.

F) Contenido de Sulfatos

La influencia del contenido de sulfatos depende de la presencia de otros productos, como el C_3A , así como de la finura del cemento.

Existe un porcentaje de estos para el cual la

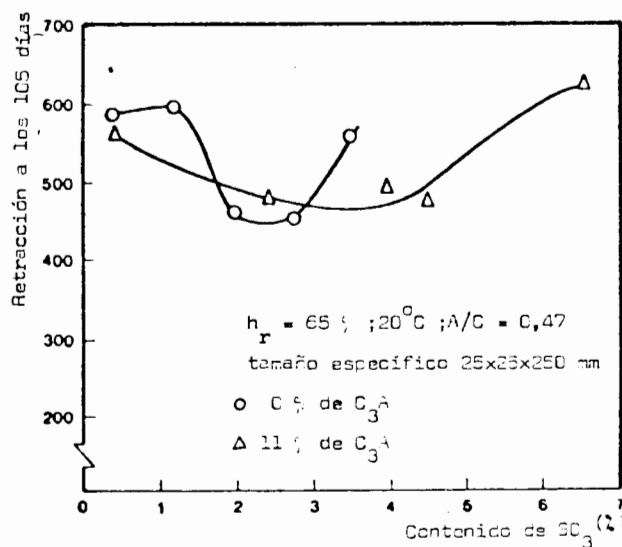


Figura 6. — Influencia del contenido de SO_3 en la retracción.

retracción es mínima, alrededor del 2 al 4 por 100 dependiendo de otros factores, como señala la figura 6. Para otras proporciones de SO_3 la retracción puede llegar a ser del 15 por 100 mayor.

G) Dosificación y tipo de los áridos

La presencia de finos en el hormigón aumenta apreciablemente la retracción de este.

El hormigón normalmente contiene entre el 55 y el 80 por 100 en volumen de áridos. Si los áridos tienen menos capacidad que la pasta para contraerse, estos coaccionan la retracción de aquella.

Al aumentar la cantidad de áridos, disminuye la retracción (S) en relación con la retracción que se obtendría en la pasta en las mismas condiciones (S_p) como indica la figura 7. Esta in-

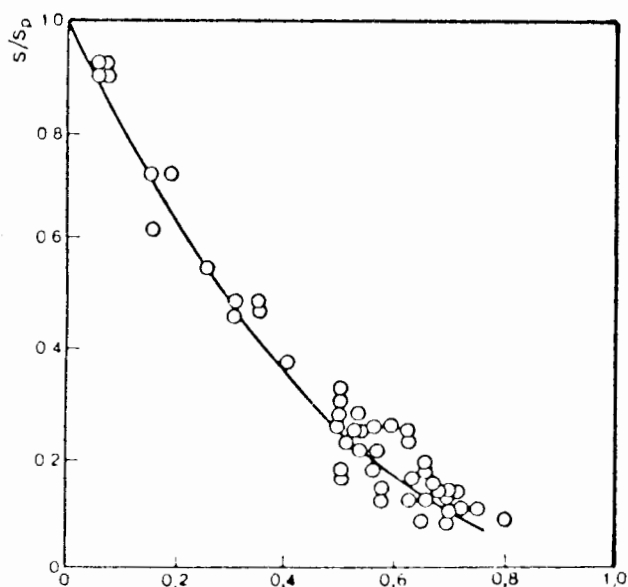


Figura 7.—Relación entre la retracción y la concentración en volumen de los áridos.

fluencia se ve condicionada tanto por el valor relativo de los módulos de elasticidad de la pasta (E_p) que varía con el tiempo, y del árido (E_a) como por la retracción de la pasta y la capacidad de deformarse del esqueleto de los áridos.

Como indica la figura 8. al aumentar la relación E_a/E_p disminuye la retracción, a igualdad del resto de las otras variables.

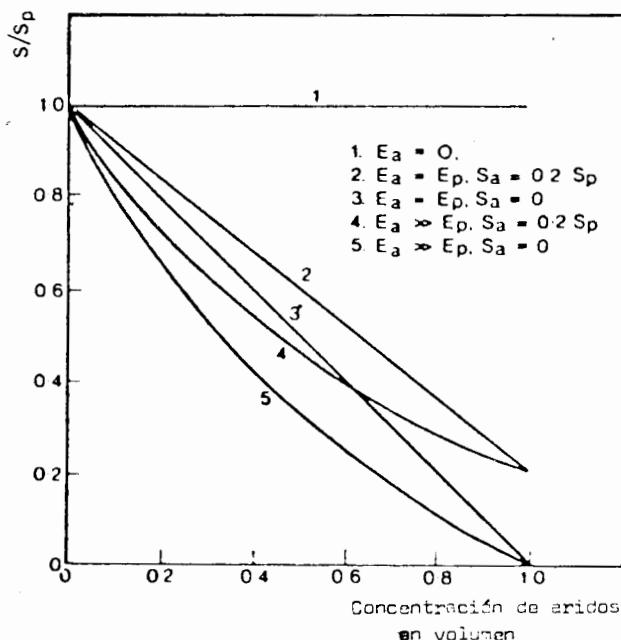


Figura 8.—Relación entre la retracción y los valores de E_a y S_a

H) Tamaño y forma de la pieza

Las piezas grandes se secan más lentamente que las pequeñas, por lo que la retracción a una edad dada se reduce al aumentar el tamaño de la pieza.

La retracción aumenta cuando disminuye el espesor del elemento y aumenta el área de la superficie expuesta, por ser mayor entonces el efecto de desecación en relación con el volumen de la pieza.

Keeton obtuvo que el parametro que determina la influencia de este factor es $(A/V)^n$, con n entre 1 y 2, y A = Área de la superficie expuesta, V = Volumen de la pieza. En la figura 9 aparecen los resultados obtenidos por dicho autor.

I) Aditivos

Según los trabajos de W. Manns y K. Zeus, la influencia de los aditivos en la retracción y posible fisuración del hormigón se puede resumir en:

- Los retardadores del fraguado suelen intensificar la formación de fisuras por retracción.
- Los fluidificantes y superfluidificantes tienen efectos diversos. Con altas relaciones A/C

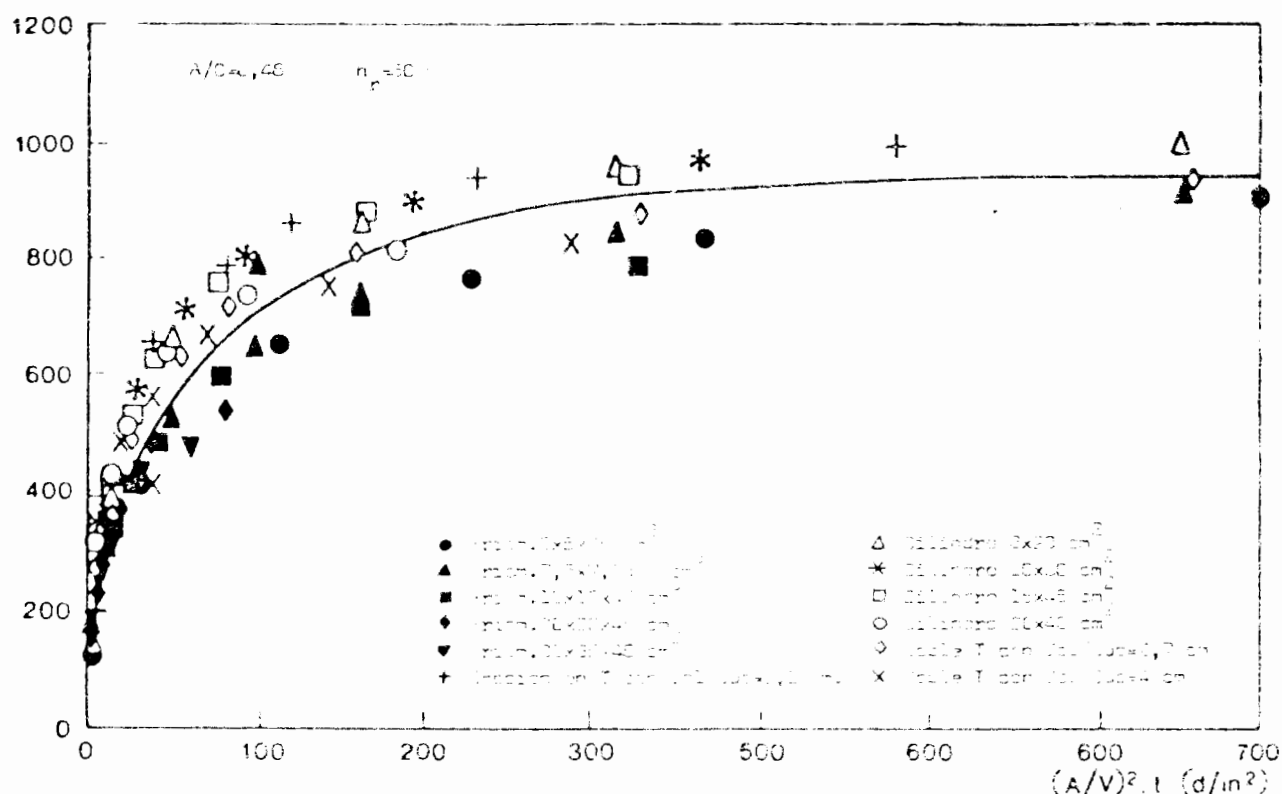


Figura 9 — Influencia del tamaño y forma de la piedra (Keeton).

(por ejemplo 0,75), la retracción es mucho mayor que si no estuvieran presentes, pero con relaciones A/C medias o bajas, la resistencia a la formación de grietas es menor que si no estuvieran presentes.

c) Los alcoholes grasos disminuyen la retracción para cualquier relación A/C.

2. METODOS PARA REDUCIR LA RETRACCION O CONSEGUIR EXPANSION

El método más comúnmente usado para disminuir la retracción es reducir la relación A/C, que como hemos visto determina en gran medida el valor de aquella, utilizando en su caso fluidificadores para mejorar la trabajabilidad del hormigón en cuestión.

Sin embargo existen otros métodos más eficaces para reducir la retracción o conseguir una expansión, y entre ellos se pueden citar:

I. Métodos basados en *generación de gas*, que hace que se formen vacuolas del mismo que se expanden en la pasta y producen un

aumento de volumen:

1. Formación de hidrógeno a partir de metales tales como Aluminio, Magnesio y Zinc.
2. Formación de nitrógeno a partir de hidracina.

3. Formación de gas a partir de peróxidos tales como el agua oxigenada. El agua oxigenada (H_2O_2), en presencia de hipoclorito de calcio ($Ca(OCl)_2$) libera oxígeno.

4. Formación de gas carbónico por reacción de ácido clorhídrico y bicarbonato cálcico.

5. Formación de C_2H_2 por reacción de carburo de calcio con el agua.

II. Métodos basados en la *modificación de la estructura del gel del cemento*, entre los que se pueden citar:

6. Expansión por reacción de óxidos alcalinos (naturales) terrosos, tales como MgO , periclase (MgO , CaO), etc.

7. Formación de orin a partir de polvo o granulado de hierro por medio de agentes oxidantes, tales como los clorados.

8. Modificación de la estructura del cemento por formación de nuevos constituyentes del

clinker, tales como sulfoaluminato cálcico hidratado (Ettringita).

8.a. A partir de yeso, cemento de alto contenido en alúmina y cemento Portland.

8.b. A partir de yeso, cemento de alto contenido en alúmina y aluminato cálcico.

8.c. A partir del sulfoaluminato cálcico.

8.d. A partir de sulfato de aluminio, yeso e hidróxido cálcico.

De estos métodos, sólo algunos se han utilizado con cierta frecuencia, y las preferencias han evolucionado a lo largo del tiempo. En España se pueden distinguir tres etapas principales, según los componentes utilizados para disminuir la retracción o conseguir una expansión, que son:

Primera Generación. Corresponde al grupo 7 antes citado, se comenzó a utilizar hace unos 50 años, y consistía en la adición de elementos metálicos oxidables y cloruros que colaboran en su oxidación a la pasta de cemento. Al oxidarse se produce un aumento de volumen (expansión) que contrarresta en parte la retracción natural del cemento. Estos elementos metálicos en general eran gránulos o limaduras de hierro, que se solían incluir en los fluidificantes y aceleradores del fraguado y endurecimiento.

Los principales problemas derivados de su uso se debían a la presencia de humedad en etapas posteriores al endurecimiento, por lo que continuaba la oxidación de forma prácticamente incontrolada, pudiendo llegar a destruir el elemento (generalmente bancadas para maquinaria), produciendo en cualquier caso un efecto indeseable, por tener una acción no prevista. Se recurría por ello al sellado de la pieza con material impermeable que evita la presencia de agua, lo cual encarece la obra, además de ser difícil de conseguir la impermeabilidad total.

Segunda Generación. Con uso no muy extendido, corresponde al grupo 1 de los antes citados. Se basaba por tanto en la adición de elementos que contienen polvo de aluminio, de zinc o de magnesio, los cuales con los álcalis presentes en el cemento producen hidrógeno, que da lugar a una expansión.

Los problemas derivados son principalmente tres:

i. La presencia de hidrógeno aumenta el peligro de corrosión y acelera esta.

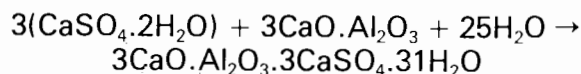
ii. Las burbujas de hidrógeno se desarrollan durante el fraguado. Cuando endurece, no son capaces de vencer la resistencia del hormigón, por lo que la retracción sigue presente. Por tanto su efecto es en cierto modo ficticio, pues se puede asociar a un aumento inicial de volumen, que se compensa con las disminuciones debidas a la retracción posterior al endurecimiento.

iii. La presencia de vacuolas rompe la homogeneidad del mortero, reduciendo generalmente la resistencia, y en su caso (hormigón), la adherencia con las armaduras.

Tercera generación. Pertenecen al grupo 8 de los anteriormente señalados y se basan en la formación de ettringita o sal de Candlot.

Los cementos de esta clase son los que más se utilizan actualmente en el mundo y los de más reciente desarrollo. Permiten una fabricación y uso a gran escala y eliminan los problemas de los grupos principales. Por ello en lo sucesivo nos centraremos en ellos.

El desarrollo de este tipo de cementos expansivos se puede decir que se originó al investigar la presencia de la ettringita en el cemento Portland. Candlot (1890) indicó que este producto era un resultado de la reacción de aluminato tricalcico ($3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) con sulfato cálcico (CaSO_4), según:



Michaelis en 1892 sugirió que este compuesto era responsable de la destructiva expansión del cemento Portland en presencia de sulfatos.

Pero fue Lossier en 1930 el primero que reconoció la posibilidad de utilizar esta propiedad para eliminar la retracción. El cemento que desarrolló consistía en cemento Portland, un componente expansivo y un elemento estabilizador de acción retardada, principalmente escoria básica de alto horno. El elemento expansivo se obtenía por la molienda conjunta de yeso, bauxita y margas y su posterior clinkerización. El elemento estabilizador se incluía para fijar el período de acción del agente expansivo y detener su acción en el momento deseado.

Lafuna (1954) demostró que tal cemento estaba formado por una mezcla de sulfato cálcico (CaSO_4), un aluminato cálcico como el $5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ y silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$). Posteriormente señaló que el proceso de fabricación del cemento de Lossier era innecesario, puesto que la ettringita se podía desarrollar durante la hidratación de una mezcla de Portland, anhidrita y yeso.

Mikaelov (1960) obtuvo un cemento expansivo moliendo cemento aluminoso, yeso y aluminato tetracálcico hidratado, que acelera la formación de ettringita. La expansión se controla controlando el contenido de yeso y el proceso de curado.

Estudios recientes de Klein y otros en la Universidad de California se basan en la formación de un sulfoaluminato cálcico anhidro ($4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$), obtenido por calentamiento a aproximadamente 1300°C de una mezcla de bauxita, margas y yeso. Aunque los ingredientes son similares a los de Lossier, se controla la formación de tal compuesto mediante una adecuada selección de los materiales y de las condiciones de clinkerización. Mezclándolo con cemento se obtiene un cemento tan manejable como el normal, y ajustado para compensar la retracción e incluso producir expansiones netas.

Actualmente existen productos comerciales que desencadenan un proceso similar, y a ellos nos referiremos posteriormente.

3. CARACTERISTICAS FISICO QUIMICAS DE LOS AGENTES EXPANSIVOS ACTUALES

3.1 Introduccion

3.1.2 Objetivos de los cementos sin retracción

Los hormigones sin retracción son hormigones de cementos expansivos que se usan para minimizar la fisuración causada por la retracción por secado en losas, pavimentos y estructuras de este material.

Como ya hemos visto, se define la retracción por secado como la contracción causada por la

pérdida de humedad del hormigón endurecido. No se incluyen los cambios de volumen plásticos que son debidos a una evaporación en superficie mayor que la capacidad de expulsión de agua antes del asentamiento.

Ya sabemos que el valor de la retracción depende de las cantidades de los materiales, de la dosificación y de los métodos de colocación y curado.

Cuando se coacciona la retracción en pavimentos, losas y otros elementos estructurales, por rozamiento con el suelo, armadura u otros elementos de la estructura, aparecen tracciones en el hormigón. La resistencia a tracción del hormigón normalmente oscila entre 22 kg/cm^2 y 57 kg/cm^2 , y como las tracciones que aparecen superan fácilmente estos valores, el hormigón se fisura.

El cemento de baja retracción o expansivo, está preparado para que se produzca un aumento de volumen en el hormigón una vez colocado y durante el endurecimiento. La expansión inducirá una tracción en la armadura y una compresión en el hormigón. Durante el secado la retracción solo reduce esta compresión en el hormigón, por lo que con la expansión se compensa el efecto desfavorable de la retracción por secado.

3.1.1 Definiciones

En lo que sigue nos referimos a los cementos y hormigones definidos en la ASTM C 845, norma sobre cementos expansivos de uso en EE.UU., ya que actualmente no existe normativa al respecto en España y no se prevee que la haya en un futuro próximo.

Los conceptos más importantes que usaremos en lo que sigue son:

1) *Cemento Expansivo*, cemento que una vez curado con agua forma una pasta que aumenta de volumen en grado muy superior a un cemento Portland normal, de manera que se compensa la posterior retracción por secado y/o se reducen las tracciones en la armadura. La norma ASTM antes mencionada distingue tres tipos principales de cemento expansivo, que son:

1.1) *C. Exp. Tipo K*, mezcla de cemento Por-

tland, sulfato tetracálcico trialuminato anhidro ($4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$), sulfato cálcico (CaSO_4) y cal viva (CaO).

1.2) *C. Exp. Tipo M*, mezcla de cemento Portland, cemento aluminoso ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ y $12\text{CaO} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y sulfato cálcico.

1.3) *C. Exp. Tipo S*, cemento Portland con alta dosificación de aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) y sulfato cálcico.

2. *Cemento sin retracción*, cemento expansivo que dosificado apropiadamente con los áridos y el agua forma un mortero u hormigón sin retracción.

3. *Hormigón sin retracción*, hormigón de cemento expansivo que sufrirá un incremento de volumen igual o mayor a la posterior retracción por secado en el caso de controlar la expansión, coaccionándola con armaduras u otros medios.

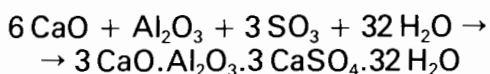
4. *Ettringita*, compuesto de vital importancia a nuestros efectos, se trata de un sulfoaluminato cálcico altamente sulfatado, ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot (30 \text{ a } 32)\text{H}_2\text{O}$), y que también es conocida por la expresión $\text{Ca}_6(\text{Al}(\text{OH})_6)_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O} \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 1\frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$; se forma por el ataque de los sulfatos a los morteros y hormigones y es el principal agente expansivo en los cementos. También es conocido comúnmente por Sal de Candlot o «bacilo del cemento».

3.2 Química de la hidratación de los cementos expansivos

3.2.1 Condiciones principales para la formación de ettringita

A pesar de que todavía no se han determinado todos los aspectos de la hidratación del cemento expansivo, se admite de forma general que la formación de ettringita es la causa de la fuerza expansiva, siendo esta una característica común a todos los cementos considerados aquí.

La ettringita está formada por cuatro componentes principales CaO , Al_2O_3 , SO_3 y H_2O , siendo la reacción para su formación:



Todos los componentes salvo el agua pueden provenir de una gran variedad de reactantes.

Los materiales deben ser solubles o como mínimo debilmente solubles.

Otra condición es que se deben dar las concentraciones necesarias de CaO , SO_3 y Al_2O_3 para la estabilización de la ettringita en la fase acuosa. La concentración de SO_3 es el factor condicionante, pues esta concentración deberá ser igual o superior a la solubilidad de la ettringita.

3.2.2 Componentes principales

1. *Cal viva* en forma de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que se forma a partir de la hidrólisis de silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) y del silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) y la hidratación de la cal libre, CaO en el componente expansivo y en el cemento Portland. En el caso de existir CaSO_4 este aportaría también CaO .

2. *Aluminatos*, que se obtienen del $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ y del ferrito aluminato tetracálcico, ($4\text{Ca} \cdot \text{Al}_2\text{O}_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) del cemento Portland y el sulfoaluminato cálcico anhidro del cemento tipo K.

3. *Sulfatos*, que provienen del yeso o de la anhidrita y parcialmente del sulfoaluminato cálcico anhidro.

3.2.3 Dosificación

La dosificación de los componentes expansivos no se realiza según las cantidades teóricas marcadas por la combinación C_6AS_3 . Lo importante es que el CaO , el SO_3 y especialmente el Al_2O_3 estén disponibles para la formación de ettringita en el momento preciso.

La ettringita comienza a formarse durante el amasado y continúa durante el curado con agua hasta que se agota el SO_3 o el Al_2O_3 . La mayor parte tiene que formarse una vez que el hormigón alcanza un cierto grado de resistencia, pues sinó la expansión se producirá en un instante en el que se disiparán las fuerzas en deformaciones del hormigón plásticas o semiplásticas, y no generará ninguna compresión en este, que es lo que se pretende inicialmente.

Si por otra parte continúa el crecimiento rápido de la ettringita una vez alcanzada la ma-

yor parte de la resistencia inicial por la hidratación del cemento, se podría producir una expansión quebrantadora. En resumen, podemos concluir que existe un período óptimo para la formación de la ettringita que coincidirá con la hidratación y el desarrollo de la resistencia.

Nota.— En lo sucesivo utilizaremos las siguientes abreviaturas:

C = CaO S = SO₃ S = SiO₂
A = Al₂O₃ H = H₂O F = Fe₂O₃.

Aroni propone una teoría de la expansión por etapas en la que se describe un número de ciclos de expansión, coacción interna, roturas locales y expansión revitalizada.

El control de la reacción de formación de la ettringita es fácil porque todo el SO₃ y Al₂O₃ no se combina para formar ettringita, sino que el $\bar{S}$ se combina con los silicatos hidratados y el A de manera similar. Esta distribución exige un gran cuidado en la dosificación de $\bar{S}$ y A y los silicatos. Se consigue la expansión deseada a base de hacer ensayos previos.

3.2.4 Productos causantes de la expansión

Ludwig y Jager proponen que los cristales de ettringita se forman directamente sobre la superficie de los granos de C₃A sin que estos se disuelvan. Los restantes granos de C₃A están completamente rodeados de productos hidratados y el crecimiento de los cristales de ettringita genera las compresiones para la expansión.

3.2.5 Calor de hidratación

Se ha comprobado que los cementos expansivos tienen en sus primeras edades un calor de hidratación mayor que los cementos portland, aunque a edades mayores es sensiblemente menor.

3.3 Factores que afectan a la expansión

3.3.1 Tipo de cemento

Aproximadamente el 90 por 100 de los componentes del cemento sin retracción son los mismos que los del cemento Portland, siendo el resto aluminatos y sulfatos cálcicos. En un análisis químico se observa un incremento de SO₃ del 4 al 7 por 100, y a veces un incremento en el contenido de aluminatos del 5 al 9 por 100; también suele haber más $\bar{C}$ libre de la normal en un cemento Portland.

Los tres tipos de cemento expansivo difieren en la forma de los compuestos de aluminio, según se observa en la tabla (Fig. 10).

Tipo de Cemento Expansivo	Constituyentes Principales	Aluminatos disponibles para formación de ettr.
Tipo K	a) Cemento Portland b) Sulfato cálcico c) Cemento tipo Portl. que contenga C ₄ A ₃ $\bar{S}$	C ₄ A ₃ $\bar{S}$
Tipo M	a) Cemento Portland b) Sulfato cálcico c) Cemento aluminoso	CA y C ₁₂ A ₇
Tipo S	a) Cemento Portland con alto contenido de C ₃ A b) Sulfato Cálcico	C ₃ A

Figura 10.—Tipos de cementos sin retracción y sus constituyentes.

Según se utilice uno u otro aluminato se consigue una velocidad de formación de la ettringita y una cantidad de la misma, y con ello una cierta expansión durante el proceso de fraguado y endurecimiento.

3.3.2 Composición química y grado de finura

Geenning observo que: a) La velocidad de expansión depende de la cantidad de aluminatos preparados para hidratarse, siempre y cuando exista CaSO₄ accesible. b) Para una cantidad dada de aluminatos, el tiempo que dura la expansión depende de la cantidad de sulfato cálcico presente.

Según Lerch, como se muestra en la Fig. 11, la expansión, para una cantidad fija de C_3A depende del contenido de sulfatos, aumentando con este.

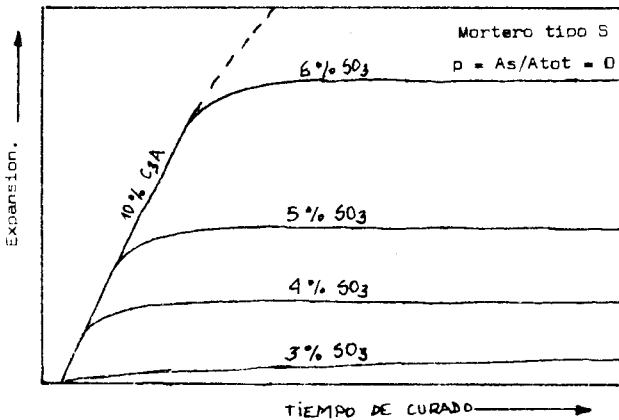


Figura 11.—Efecto del contenido de sulfatos sobre el tiempo de expansión con contenido de aluminatos constante.

En cuanto al grado de finura, se puede afirmar que un aumento de la superficie específica produce un descenso de la expansión. Esto es debido a que el aumento de la superficie produce una aceleración del proceso de formación de etringita en los primeros momentos produciéndose deformaciones plásticas, con los que se anula el efecto expansivo. Esto se observa en la figura 12.

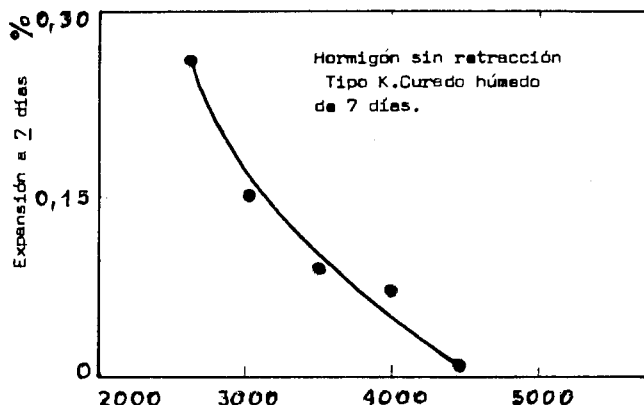


Figura 12.—Efecto de la superficie específica en la expansión.

3.3.3 Cantidad de material expansivo

La cantidad de material expansivo, así como la composición química del cemento influyen de manera decisiva en el nivel de expansión. En la

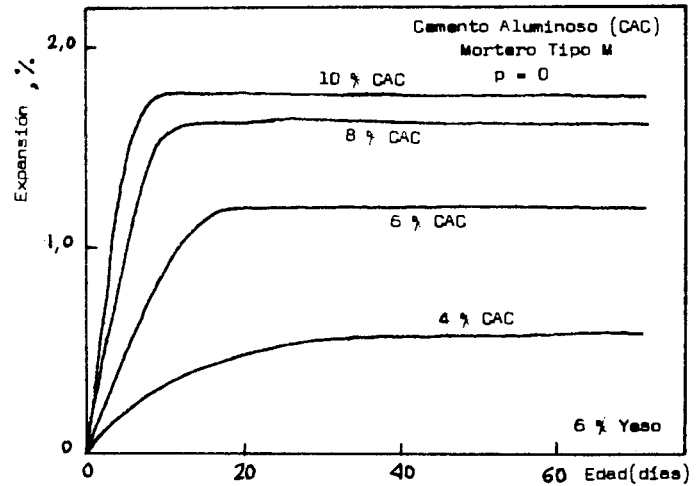


Figura 13.—Efecto del contenido de aluminatos en la velocidad y nivel exp.

figura (Fig. 13) se muestra la velocidad de expansión y la duración de esta en función de la cantidad de C_3A .

En la Fig. 14 se observa la relación entre la expansión máxima, el contenido de sulfatos, aluminatos y C_3A .

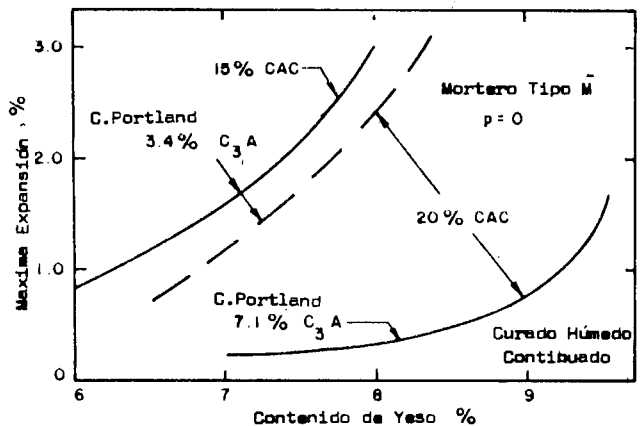


Figura 14.—Efectos del contenido de aluminatos, sulfatos y C_3A .

De aquí se deduce que los ingredientes expansivos esenciales se pueden dosificar para cada tipo de cemento de modo que se cubra todo el espectro de expansiones.

Los cementos tipos K y S se obtienen expansiones prefijadas de pequeñas amplitud y se usan para hormigones sin retracción. El tipo K contiene un 10 al 15 por 100 de componentes expansivos, de los cuales del 25 al 50 por 100 es C_4A_3S . Se consigue un incremento de la

expansión aumentando la proporción de cemento, según se muestra en la figura 15. Las curvas corresponden a diferentes cantidades de cemento por m³ de hormigón.

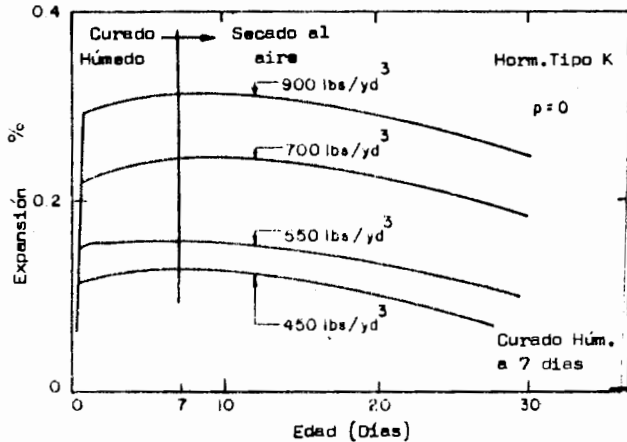


Figura 15.—Efecto del contenido en cemento en las características de la expansión.

3.3.4 Relación agua/cemento

En general se aprecia un incremento de la expansión al disminuir la relación agua/cemento, pero esto ocurre para una consistencia media, según se observa en la figura 16; para una cantidad de cemento constante tenemos un asiento en el cono mayor si aumentamos la relación A/C.

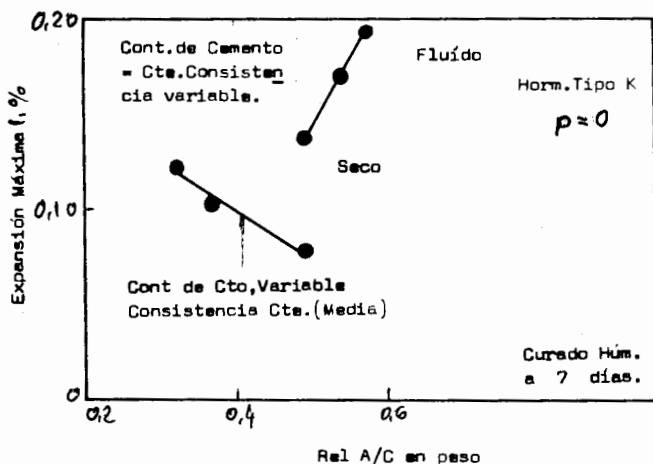


Figura 16.—Efecto de la relación A/C para contenido de cemento constante y variable.

3.3.5 Curado

Las necesidades de curado son aún más estrictas que para un cemento Portland normal.

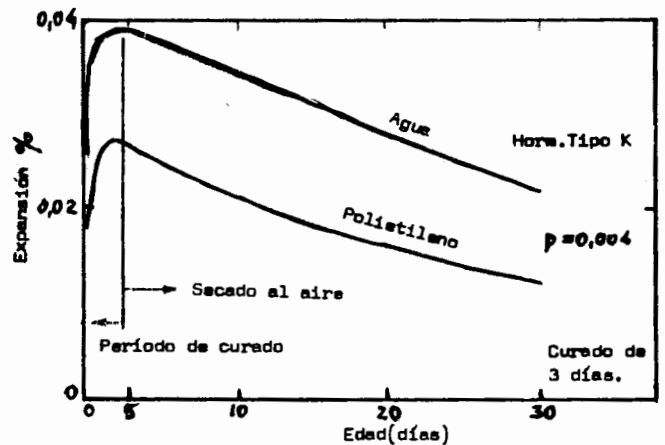


Figura 17.—Efecto de los distintos tipos de curado.

Existen dos reacciones de hidratación diferentes. La formación de los silicatos cálcicos hidratados y la formación de la ettringita que determina la expansión están afectados de forma diferente por la temperatura y disponibilidades de agua durante el curado. Un curado descuidado puede reducir el nivel de expansión.

En la figura 17 se observa la diferencia entre un curado con agua y otro polietileno.

3.3.6 Temperatura

En la figura 18 se observa que para un cemento tipo K precomprimido sin coacción, la expansión aumenta con la temperatura de curado. Sin embargo, en el caso de coacción por armaduras se observa un ligero descenso de la expansión con el incremento de la temperatura.

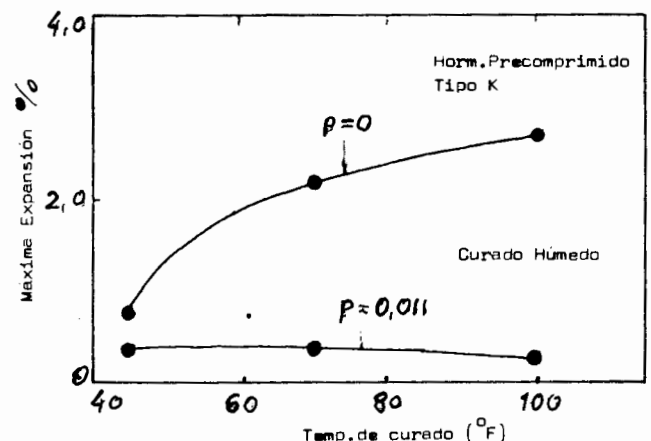


Figura 18.—Efecto de la temperatura de curado para diferentes cuantías (p)

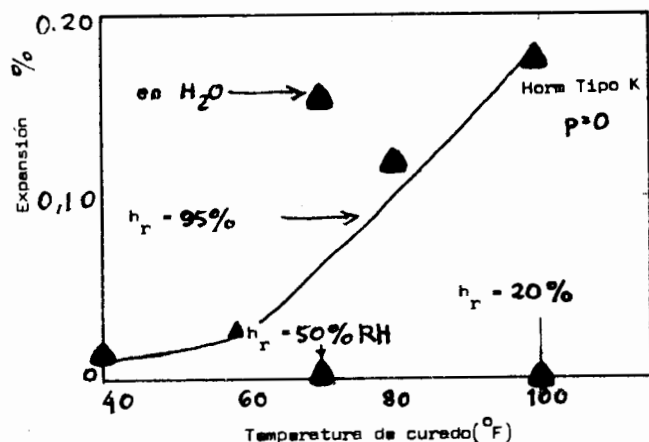


Figura 19. — Efecto de la temperatura de curado y la humedad relativa.

ra. En la figura 19 se ve que para humedades relativas bajas, manteniendo la temperatura constante se produce un descenso en la expansión.

3.3.7 Tamaño y forma de la probeta

Se ha comprobado que aumentando el tamaño de las probetas la expansión es menor, por lo que se puede suponer que lo mismo ocurriría si aumentamos el tamaño de la pieza. En cuanto a la forma de las mismas no se han podido obtener datos concluyentes.

3.3.8 Coacciones a la expansión

La coacción de la expansión se puede hacer

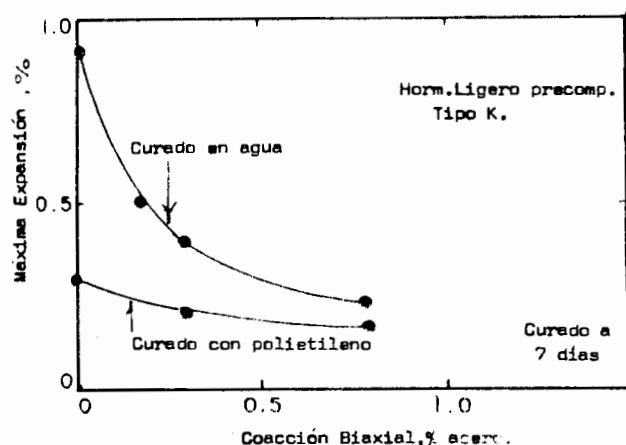


Figura 20. — Efecto del grado de coacción y el ambiente de curado.

por medios externos (p.ej. en estructuras hiperestáticas) o internos (por medio de armaduras). La mayoría de los ensayos se han hecho con barras rectas y armando en dos direcciones perpendiculares. La coacción determina de manera decisiva la expansión final, como se puede observar en la figura 20, donde se relacionan la expansión máxima y la cuantía de armadura simétrica.

Si la armadura no es simétrica se pueden producir alabeos.

En definitiva, la coacción, ya sea interna o externa (rozamiento de la base, estructuras adyacentes, etc...) produce una compresión en el hormigón del orden de 2 a 7 kg/cm², y con ello se consigue minimizar la aparición de fisuras causadas por la retracción por secado.

3.3.9 Tiempo de amasado

El aumento del tiempo de amasado produce un descenso de la expansión para todos los tipos de cemento. El amasado acelera la formación de ettringita y se pierde la disponibilidad de la misma para la expansión posterior. En la figura 21 se observa como con un cemento del tipo K se reduce la expansión al aumentar el tiempo de amasado. En la figura 22 se observa que un amasado prolongado incrementa la cantidad de agua necesaria para mantener una consistencia dada.

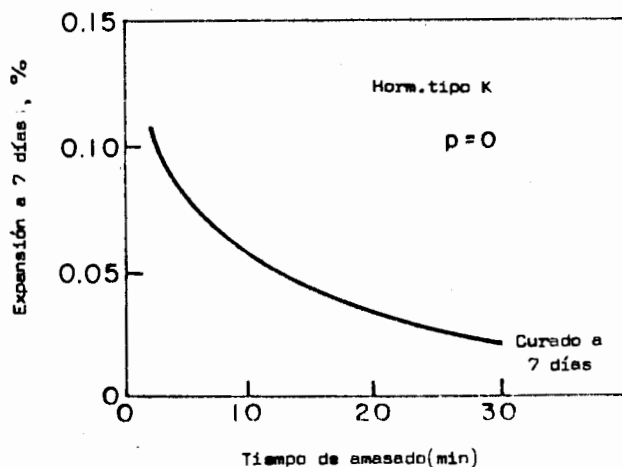


Figura 21. — Efecto del tiempo de amasado en la expansión.

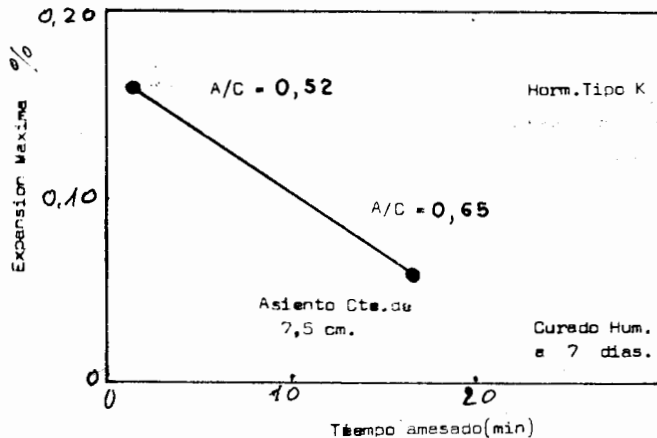


Figura 22. — Efecto del tiempo de amasado y el agua añadida.

3.3.10 Aditivos

El tema de la influencia de los aditivos en la expansión no se ha estudiado mucho, en unos casos la aumentan y en otros la disminuyen. Por ejemplo, el cloruro cálcico utilizado como acelerador del fraguado reduce la expansión.

3.3.11 Tamaño y tipo de los áridos

En la figura 23 se ve como influye el tipo y tamaño de los áridos en la cantidad y velocidad de la expansión, de modo que un hormigón con áridos ligeros se expande mucho más que un hormigón con áridos normales para la misma dosificación.

Se ensayaron tres tipos de áridos, pizarra, granito machacado y gravilla de río en un hormigón precomprimido con cemento del tipo K,

apareciendo los resultados en la figura 24, de la cual se deduce que la influencia del tipo de árido no es determinante, aunque se pueden obtener diferencias de 0,2 por 100 según el tipo de árido que se use, diferencias estas poco significativas.

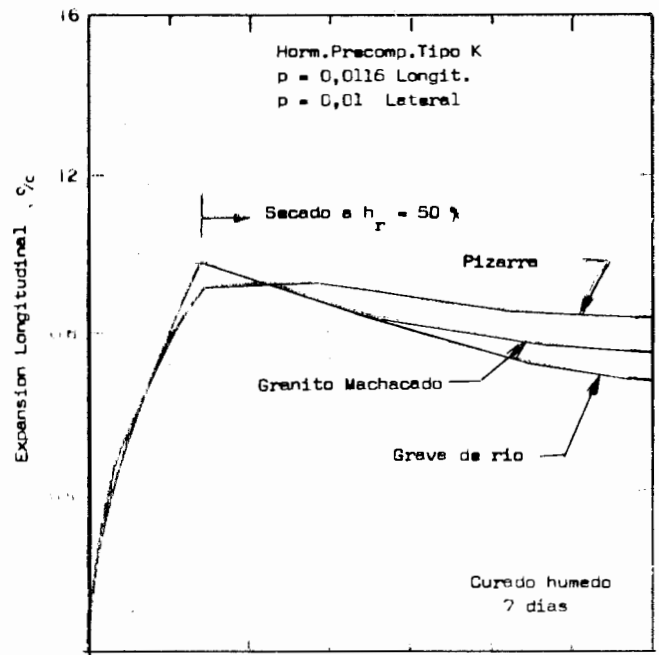


Figura 24. — Efecto del tipo de áridos.

3.3.12 Actividad del cemento expansivo

Un tiempo de almacenaje prolongado, en esta clase de cementos, disminuye la expansión total. En la figura 25 aparece el efecto del factor mencionado, y tanto para el caso de curado con

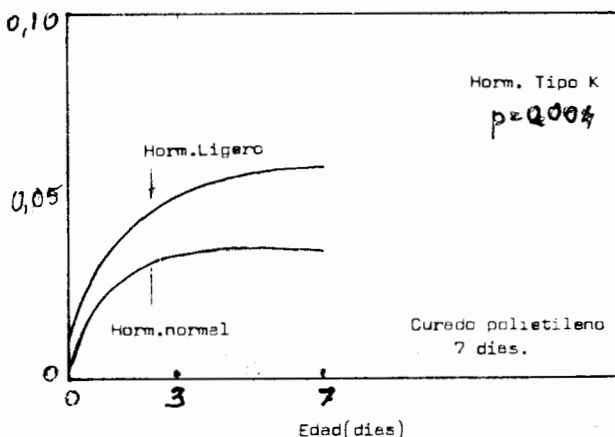


Figura 23. — Efecto de los áridos ligeros y áridos normales.

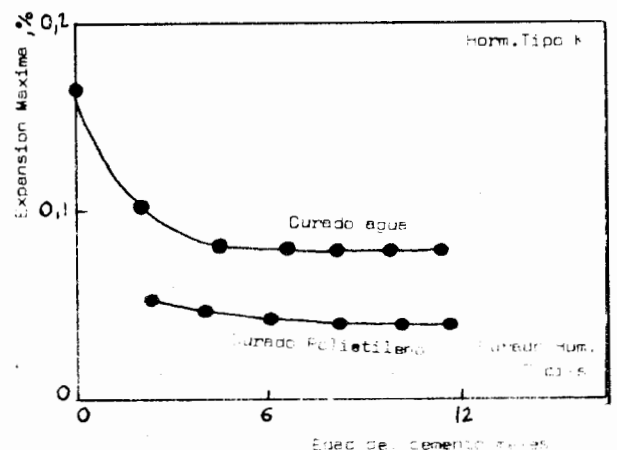


Figura 25. — Efecto de la edad del cemento en la expansión.

agua como en el caso de curado con polietileno. Asimismo se ha comprobado que si se reduce la cantidad de cal libre, este efecto se ve disminuido.

También se reduce la expansión final por la exposición prolongada del cemento al aire, por efecto tanto del CO_2 como del agua. Por todo ello se recomienda reducir el tiempo de almacenaje, y si no es posible, hacerlo en lugar bien protegido.

3.4 Propiedades del hormigón expansivo

3.4.1 Hormigón precomprimido

Este tipo cementos son similares a los cementos normales en su comportamiento, y lo que pretenden es prevenir la fisuración mediante la creación de un estado de compresiones en el hormigón. Por tanto, se puede asociar a la manifestación tensional del fenómeno de deformación que supone la expansión.

En lo sucesivo nos referiremos principalmente a los hormigones expansivos o de baja retracción, y las consideraciones que sobre ello hagamos se pueden aplicar en su práctica totalidad a estos.

3.4.2 Hormigón sin retracción

Las principales propiedades que caracterizan a estos hormigones y en su caso morteros (si sólo se incluyen áridos finos, o sin apenas áridos en el caso de lechadas para inyección o relleno) son las siguientes:

A) Docilidad

La docilidad o trabajabilidad de los hormigones con cementos tipo K, M o S es la misma que la del cemento Portland normal, siempre que tenga la misma consistencia.

Sin embargo, en los hormigones con cemento del tipo K se observa un asiento en el cono de Abrams mayor que en el hormigón normal, aumentando la diferencia con el tiempo de amasado. Por ello se necesita una relación A/C me-

nor para un asiento del cono dado, con amasados prolongados.

En los hormigones con cemento tipo M parece que el aumento del asiento está relacionado con las proporciones relativas de aluminato cálcico y yeso. Como regla general es conveniente no permitir que las concentraciones de los dos anteriores productos esten en una relación mayor que 1.

Los hormigones con cemento del tipo S se comportan de modo similar en este sentido a los de cemento Portland normal.

B) Tiempo de amasado

En general no difieren mucho de los de cemento Portland.

En los hormigones con cemento de los tipos K y S se puede modificar el tiempo de asiento inicial y final usando aditivos diversos, que es conveniente ensayar en cada caso.

C) Exudación de agua

Este tipo de hormigones han presentado un considerable descenso en la exudación, y en algunos casos una completa ausencia de esta. En el caso de losas, esto ha permitido un terminado mas temprano del hormigón, pero tomando las precauciones precisas para que no se produzca un secado demasiado rápido de la superficie.

D) Densidad

El peso específico de estos hormigones no se sale del rango de variación del de los de cemento Portland, pero en general se mantienen por debajo de la media de aquellos.

E) Resistencia

Las resistencias a compresión, tracción y flexión son equivalentes a las de los hormigones normales de cemento Portland. La única diferencia es la mayor absorción de agua para una consistencia dada, lo cual supone que a igual resistencia, el hormigón de cemento expansivo tiene una consistencia más seca.

F) Expansión y retracción

Después de la expansión inicial que se produce en los primeros 7 días de curado en ambiente húmedo, la retracción por secado de los hormigones expansivos tiene características similares a la del resto de los hormigones. Al igual que en estos influye la relación A/C, el tipo de áridos, la cantidad de cemento, etc... En la figura 26 se observa la evolución de los volúmenes de un hormigón normal y de otro de cemento expansivo. En cada caso, la curva superior es de un hormigón con menor contenido en agua. A partir de los 7 días, las dos curvas (de los dos hormigones) son aproximadamente paralelas, estando la del hormigón expansivo desplazada una cantidad igual a la expansión alcanzada durante estos 7 primeros días. En el caso de un hormigón expansivo con gran cantidad de agua de amasado se puede llegar a anular dicha expansión, resultando una pequeña retracción final.

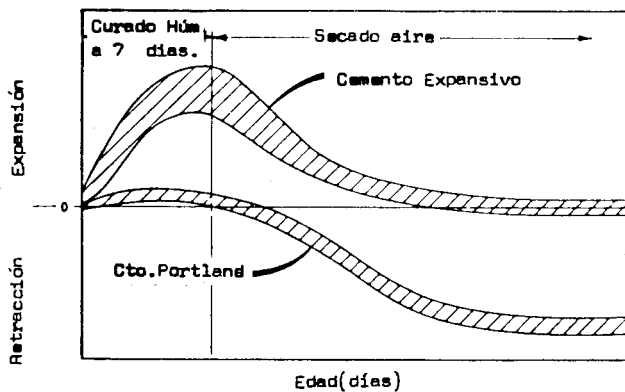


Figura 26.—Características típicas de la deformación en el tiempo.

G) Módulo de elasticidad

En los ensayos, tanto dinámicos como estáticos, realizados para determinar el módulo de Elasticidad o de Young de los hormigones con cemento del tipo K, M y S se han obtenido resultados que permiten afirmar que este es similar al de un hormigón de cemento normal.

H) Coeficiente de dilatación térmico

Los ensayos para la determinación del coeficiente de dilatación térmica se han realizado a

diferentes temperaturas, que varían entre los 4° C y los 70° C, y en todos ellos se ha llegado a los mismos resultados que con hormigón de cemento Portland.

I) Resistencia a la helada

la resistencia a la helada de este tipo de hormigones depende de la cantidad de poros vacíos (esto es, llenos de aire) que contenga la masa, al igual que ocurre en los hormigones de cemento Portland.

J) Resistencia al ataque de sulfatos

La resistencia al ataque de los sulfatos depende de la cantidad de aluminatos presentes en la mezcla. En los hormigones con cemento expansivo, esta resistencia depende de la velocidad de reacción inicial de los aluminatos con los sulfatos, así como del grado que alcance esta y de la cantidad disponible de sulfatos. Si la reacción es suficientemente rápida para que en pocos días se conviertan todos los aluminatos en ettringita (siempre que la cantidad de sulfatos presente sea suficiente), tendremos un hormigón resistente a los ataques de aguas selenitosas. Si no es así, se puede formar posteriormente más cantidad de aquella, con las consiguientes expansiones incontroladas e indeseables.

Después de realizar multitud de ensayos se ha llegado a la conclusión de que el único método eficaz para aumentar esta resistencia es una correcta dosificación de los sulfatos presentes en la mezcla. Los ensayos de probetas así dosificadas dieron buenos resultados.

K) Resistencia a la fisuración

Los hormigones sin retracción se calculan para que no aparezcan retracciones que puedan ser causa de fisuración. El resto de los agentes causantes de fisuras pueden seguir actuando, por lo que habrá que tomar las mismas precauciones que en el caso de un hormigón de cemento Portland normal.

L) Módulo de Poisson

En los ensayos realizados para la determina-

ción del módulo de Poisson no se ha observado ninguna diferencia, por lo que se admite que su valor es el mismo que en el resto de los hormigones.

M) *Resistencia a la abrasión*

El hormigón de cemento sin retracción tiene, si se dosifica correctamente, una resistencia a la abrasión entre un 30 y un 40 por 100 mayor que un hormigón de cemento Portland normal en proporciones de mezcla similares; de aquí una de las causas de su utilización, sobre todo en EE.UU., como pavimento, generalmente industrial y a veces para carretera.

N) *Estabilidad frente a los ciclos de humectación y secado*

Los hormigones de cementos del tipo K, M o S sin sus deformaciones coaccionadas han dado un excelente resultado frente a los ciclos alternos de humectación y secado.

Ñ) *Fluencia*

Los coeficientes de fluencia se mueven en el mismo rango de valores que los correspondientes a un hormigón de cemento Portland normal.

4. UTILIZACION DE LOS MORTEROS Y HORMIGONES DE BAJA RETRACCION Y EXPANSIVOS

Actualmente un solo tipo de relleno, o en general de hormigón expansivo, no puede cumplir todos los requisitos que se encuentran en la construcción y en el mantenimiento de lo ya construido. Las necesidades varían según se trate de relleno en una central nuclear o térmica, en una siderúrgica o en una fábrica de productos químicos, un gran edificio, un estadio, una presa o un túnel. En cualquiera de estos proyectos puede haber cimentaciones de placas extremadamente grandes, turbinas, generadores, compresores, trenes de laminación pesados, motores, bombas, raíles de puente grúa, cables postesados, barras y anclajes y placas de asiento de grandes pilares.

Según las aplicaciones requeridas se alcanzarán diferentes grados en la expansión:

a) *Retracción controlada*, es decir, una simple reducción de la retracción propia de la lechada, ya sea por pequeñas adiciones de componentes expansivos o por la simple reducción de la relación agua/cemento.

b) *Retracción anulada*, caso límite teórico, que se alcanza con mayor o menor exactitud mediante la adición de las cantidades apropiadas de los agentes expansivos ya mencionados.

c) *Expansión controlada*, considerando como tal la que es menor del 0,1 por 100, y es la que se intenta conseguir en la mayoría de los casos, pues se eliminan los problemas que aparecen a causa de la retracción.

d) *Expansión libre*, esto es, mayor del 0,1 por 100, que sólo es admisible en casos muy específicos, por ejemplo, en el relleno de barras de anclaje, pero que en general no es recomendable, pues si la expansión es excesiva, pueden aparecer los problemas contrarios a los causados por la retracción, que son igual de indeseables.

Por todo ello, podemos distinguir dos grandes grupos de productos en los que se usan los cementos de baja retracción o expansivos de los que nos estamos ocupando, que son, por un lado, los morteros para relleno, y por otro lado, los hormigones.

4.1 Morteros para relleno

Es en este campo donde actualmente se ha alcanzado mayor desarrollo y hacia donde se dirigen la mayoría de los productos existentes en el mercado. Se trata de actuaciones con un gran carácter puntual o específico, en las que el control de puesta en obra, la elección del producto y el mantenimiento son más sencillos que en el caso de grandes masas de hormigón.

Dentro de él, a su vez, distinguiremos dos grupos principales:

4.1.A *Rellenos para bancadas*

En estos casos el relleno sirve para proporcionar un apoyo completo y uniforme de la maquinaria y hacer de eslabón entre la misma y la fundación para distribuir y transmitir uniformemente todas las cargas y fuerzas derivadas de su funcionamiento.

Por tanto, el fin de un relleno es proporcionar un apoyo completo y uniforme con el objeto de:

a) Apoyar la maquinaria o el elemento estructural al nivel exacto; no pegar o sujetar, pues es el sistema de anclaje el que proporciona la sujección.

b) Contribuir a mantener la alineación exacta.

c) Unir la maquinaria o el elemento estructural a la fundación para distribuir de manera uniforme todas las cargas y fuerzas originadas por el funcionamiento.

Para cumplir estas funciones, el relleno ha de cumplir tres requisitos básicos:

a) Llenar completamente el espacio durante la operación de llenado.

El método de *Relleno por Gravedad* (verter mortero de consistencia autonivalente, fluida o preferiblemente muy fluida por uno de los lados hasta que salga por el otro lado), proporciona la garantía máxima de que el espacio a cimentar queda relleno por completo. Con ello se minimiza la posibilidad de mano de obra deficiente o error humano.

En el caso de *Relleno Inyectado*, las presiones necesarias para efectuar la inyección garantizan en gran medida que todo el espacio ha sido llenado. También en este caso es precisa una consistencia fluida y una aptitud para el bombeo.

Además de una consistencia autonivalente, es necesario que disponga de un suficiente tiempo de manipulación.

b) Mantener el espacio relleno por tiempo indefinido.

Esto quiere decir que no puede aparecer la más mínima exudación, movimiento de agua libre hacia la superficie, donde quedará almacenada debajo de la maquinaria o el elemento

estructural, ocupando un espacio que quedará sin rellenar al desaparecer.

También toda retracción, ya sea por segregación (que ocurre durante el fraguado), o por secado (que ocurre durante el endurecimiento) debe ser evitada o contrarrestada.

Por estas razones es muy conveniente el uso de cementos de baja retracción, o mejor, expansivos, pues cualquier retracción, por pequeña que sea, induce resultados negativos, pues una carga desigual de la fundación, calzos y tornillos de nivelación y un apoyo no suficientemente uniforme de la estructura o del equipo relleno producen desnivelación o fallo estructural.

c) Proporcionar más resistencia que la correspondiente a la carga estática.

Efectivamente, además de las cargas estáticas de la pieza, habrá de soportar en su caso las cargas dinámicas de funcionamiento, difíciles de evaluar. Algunas propiedades especiales, tal como una resistencia máxima a la fatiga, son deseables para resistir convenientemente las cargas repetidas. Cualquiera que sea la resistencia obtenida, no sirve para mucho si no son cumplidos los dos primeros requisitos.

4.1.B *Relleno para cables y anclajes*

Especial atención merece otro amplio campo de utilización de los morteros para relleno, que es el relleno de las vainas de los cables de pretensar o de las barras de anclaje. El acero altamente tesado (aprox. por encima de unos 6.000 kg/cm²) es extremadamente sensible a la corrosión bajo tensión. Un relleno con cemento Portland endurecido en contacto con este acero no ofrece una suficiente protección, pues pueden aparecer tanto sulfatos como cloruros, altamente corrosivos. En los rellenos para estos nudos, los cloruros de cualquier origen se han de mantener en una proporción ínfima.

Se ha comprobado que es imprescindible mantener el contenido de sulfatos de cualquier procedencia en una proporción próxima a cero. Debido a la naturaleza misma del procedimiento de fabricación del cemento, es extremadamente difícil conseguirlo.

Por otro lado, la formación de exudaciones, o la presencia de bolsas de aire, debidas a los procedimientos de bombeo, pueden dejar secciones pequeñas de acero tesado sin protección.

En cables colocados verticalmente, el agua del relleno tiene tendencia a introducirse entre los cables, que actúan como desagüe. El agua sube rápidamente hasta la parte superior, ocupando mucho espacio, e impidiendo al relleno ocupar esta parte del cable y proporcionarle la protección debida.

A todos estos requisitos, hay que añadir adherencia sin retracción y resistencia inicial y final altas, especialmente cuando las extremidades de los cables han de ser anclados en agujeros perforados en roca o en hormigón antes de que puedan ser tesados.

En resumen podemos indicar que los requisitos de los rellenos para estos menesteres son:

- a) Ausencia de agentes corrosivos.
- b) Ausencia de exudaciones.
- c) Ausencia de agentes que contribuyan a la friabilidad por presencia de hidrógeno.
- d) Consistencia extremadamente fluida, sin perder por ello resistencia, de modo que penetre al máximo en los hilos de los cables y se bombee fácilmente en conductos de cables largos, horizontales o verticales.

Para la cimentación de barras o pernos de anclaje altamente tesados, es conveniente, a diferencia de los cables de acero, utilizar un relleno que contenga árido fino, si el espacio anular lo permite.

4.1.C Características técnicas

Expansión media del 0,06 por 100, en ensayo normalizado en autoclave. La variación media de longitud, ensayando en cámara húmeda, a los 28 días.

Fluencia y coeficiente de dilatación iguales a los del mortero de cemento normal.

El módulo de elasticidad en todos los casos es superior a $4 \cdot 10^5$ kg/cm².

Con composiciones granulométrica entre 0 y 3 mm. se han obtenido densidades aparentes

de alrededor, 1,26 tn/m³, mientras que las densidades después de fraguado, a los 28 días, oscilan entre 2,20 y 2,30 tn/m³.

4.1.D Modo de empleo

Este tipo de morteros se presentan ya ensacados y con las dosificaciones adecuadas, faltando solo por adicionar el agua de amasado en el momento de su utilización. La cantidad de agua depende de la consistencia que se desee obtener, siendo en general de 3,5 a 5 l por cada saco de 25 kg.

El amasado se realiza en dos etapas, la primera con los 3/4 del agua aproximadamente, y durante 1 min., y la segunda con el resto del agua y durante 1 a 1,5 min. Una vez confeccionado el mortero no es recomendable añadir más agua. Para evitar su pérdida por absorción del encofrado o soporte en general, es conveniente saturar éste previamente, pero cuidando de que no queden charcos. La temperatura adecuada durante el mezclado es de 10 a 30° C.

Cuando las temperaturas sean superiores a 25° C se recomienda realizar un curado superficial.

Respecto al proceso de relleno, es conveniente hacerlo también en dos etapas, rellenando en primer lugar los cajetines de los pernos de anclaje, y posteriormente, a las 24 horas aproximadamente, cuando ya estén endurecidos, realizando el relleno total. El tiempo de empleo óptimo es de hasta 20 min., dependiendo de la temperatura ambiente. Las alturas adecuadas de relleno están comprendidas entre 7 y 150 mm.

En cuanto al tiempo de almacenaje, aunque no conviene que sea prolongado, puede ser de hasta 1 año, siempre que sea en sacos sin abrir y en lugar a resguardo de la lluvia o la humedad.

La consistencia del amasado puede variar de plástica a autonivelante, según sean las necesidades. En general, con 25 kg. de estos morteros se obtienen volúmenes finales de relleno de 12,5 a 14 lts, según la cantidad de agua empleada.

Una vez endurecido resiste a las temperaturas extremas (de -50 a 210° C), y también es resistente a los aceites, grasas y derivados del

petróleo, resultando un producto impermeable, ignífugo y no tóxico.

La resistencia, tanto a compresión como a tracción es muy superior a la de un hormigón normal, siendo también buena la resistencia a las cargas repetidas. Existen algunos especiales para este fin, que incorporan granalla metálica dúctil como refuerzo. Indirectamente se aumenta la resistencia a la abrasión.

4.2 Hormigón para pavimentos y estructuras

I. Generalidades

El cemento tipo K se comercializó en EE.UU. en 1.963, y fue utilizado como único agente expansivo en los años posteriores, sobre todo en EE.UU., algo en Gran Bretaña y menos en la URSS.

En 1968 se comenzó a utilizar y se puso a la venta el cemento tipo S, con el fin, al igual que el anterior, de eliminar las grietas y fisuras debidas a la retracción por secado, como ya hemos indicado reiteradamente.

En España, actualmente, no se fabrican cementos expansivos a gran escala, disponiéndose en cambio de productos que se mezclan con el cemento normal, como veremos posteriormente.

II. Coacciones a la expansión

La coacción por medio de armaduras, encofrados, elementos estructurales adyacentes, como losas, muros, etc..., es la que almacena la energía de la expansión en los primeros 7 días, generando una compresión en el hormigón. Esta compresión disminuye posteriormente, dejando una compresión pequeña que evite las tracciones. Para que se pueda asegurar el efecto expansivo habrá de disponerse una cuantía mínima de armadura, aprox. de un 15 por 100 de la sección de hormigón; según se observa en la figura 27 la expansión a los 7 días (que es la máxima si el curado termina a esa edad) disminuye con el aumento de la cuantía de armadura. Aparecen cuatro curvas, según el contenido

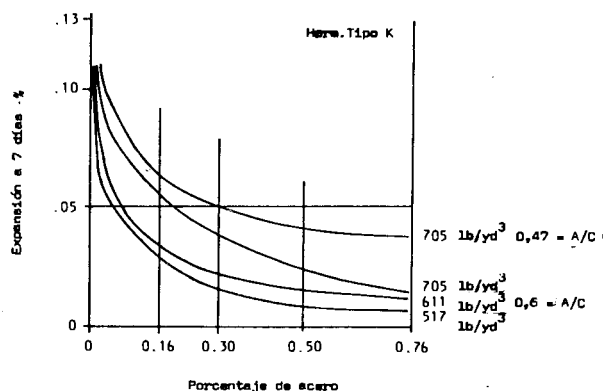


Figura 27. — Efecto del grado de coacción en la expansión a 70 días.

do de cemento, la relación agua/cemento y el tipo de probeta.

III. Aridos

Se han utilizado áridos ligeros y normales, en estado natural y machacados. Sus características e influencias en la expansión y retracción se han puesto de manifiesto de la misma manera que en hormigones de cemento tipo Portland.

IV. Temperatura

Las temperaturas del ambiente observadas han variado entre -18 y 35° C. Solo se han detectado algunos problemas accesorios de menor importancia. El hormigón sin retracción exuda menos agua que un hormigón de cemento Portland, y en tiempo cálido se incrementa la tendencia de acortamiento plástico. También ha habido algún problema en losas expuestas, en invierno, con los cambios de temperatura bruscos. Normalmente se utiliza entre un 1 por 100 y un 2 por 100 del peso del cemento de cloruro cálcico (CaCl_2) en hormigonado en tiempo frío.

V. Contenido de cemento

Se recomienda un mínimo contenido de cemento de 306 kg/m^3 , que producirá una ex-

pansión del orden del 0,03 al 0,1 por 100, coaccionada por el 0,16 por 100 = p de armadura, en probetas curadas en ambiente húmedo. Con menores cantidades de cemento no se alcanzan resultados satisfactorios. Las resistencias a compresión a los 3,7 y 28 días han sido similares a las de un hormigón con cemento Portland. con la misma cantidad de cemento.

VI. Contenido de agua

El contenido en agua de algunos cementos sin retracción puede ser del orden de 10 a 15 por 100 mayor que en los cementos Portland. Estos mayores consumos de agua se explican por las variaciones de las velocidades de hidratación que estan influenciadas por la composición químico del cemento, y las propiedades físicas de este, como temperatura, grado de finura y procedimiento de amasado. El agua adicional se combina rápidamente con los agentes expansivos, con lo que el agua libre en la puesta en obra es aproximadamente igual a la de un cemento Portland. A posteriori se ha demostrado que las resistencias son iguales. Un incremento de agua por encima del necesario llevaría al igual que en los cementos normales a una menor resistencia, mayor permeabilidad y a una menor durabilidad.

VII. Aditivos

a) *Aireantes*: Siempre que se cumplan las recomendaciones de la ASTM 260, los efectos de estos en hormigones sin retracción seran los mismos que en hormigones de cemento Portland. En cuanto a la resistencia a los hielos y deshielos en parámetros exteriores se han utilizado siempre hormigones aireados, y después de tres años no ha aparecido defecto alguno en diferentes estructuras y autopistas, salvo en casos donde un ensayo posterior de laboratorio confirmó un contenido de aire demasiado bajo, o donde se habian aplicado sales contra el hielo antes de tener el hormigón un mes de edad.

b) *Fluidificantes, retardadores y combinación de ambos*: Algunos aditivos (según la ASTM C 494 los tipos A,B y D), no son com-

patibles con algunos cementos expansivos. No se han realizado investigaciones profundas por lo que se aconseja ensayar en cada caso con multitud de probetas. En general se ha comprobado que el uso de estos aditivos en combinación con cementos expansivos ha provocado un aumento excesivo de la fluidez, una pérdida sustancial de la expansión y una retracción por secado excesiva.

c) *Acelerante*: No se recomienda el uso de cloruro cálcico junto con cementos expansivos por su efecto reductor de la expansión y la consiguiente retracción. Algunos cementos expansivos permiten el uso de hasta el 1 por 100 de CaCl_2 .

VIII. Consistencia

Se pueden obtener buenos resultados usando hormigones con consistencias en el momento de la puesta en obra dentro del margen especificado por la ACI 211.1, cuando la temperatura no excede de 24° C. Para mayores temperaturas se requieren las siguientes consistencias medidas por el asiento en el cono de Abrams.

TIPO DE OBRA	ASIENTO (cm)
Muros de cimentación armados	13
Placas, vigas y muros armados	15
Soportes de edificación	15
Pavimentos	10
Hormigón en masa	10

Figura 28.

Cuando el hormigón no se amasa en obra, el tiempo que transcurre entre la fabricación y la puesta en obra puede llegar hasta 1,5 horas. En este período se comienza a formar la ettringita en hormigones de cementos expansivos, resultando una perdida de fluidez y una mayor rigidez de la pasta, perdiendose de 5 a 8 cm en el asiento del cono, y aún más en tiempo muy caluroso. Por esto, es esencial que la planta de hormigón fabrique un hormigón con una consistencia más fluida, dentro de los límites marcados por el máximo contenido de agua. Es comprensible que se debe mantener un control

estricto en obra sobre el aumento del contenido en agua, con objeto de aumentar la fluidez, porque se puede rebasar el límite especificado.

Para evitar estos problemas se puede hacer lo mismo que cuando se pierde fluidez en tiempo caluroso. Se recomienda la utilización de agua fría, virutas de hielo, áridos gruesos enfriados por evaporación, reducción de la velocidad de giro del tambor de la hormigonera a un mínimo durante el viaje, y reducción del tiempo de espera en obra. En definitiva hay que alcanzar el mínimo absoluto del tiempo entre el amasado y la puesta en obra.

Si se realiza el amasado en seco, con posterior adición del agua en obra. En definitiva hay ciones óptimas de la hormigonera y que se vierta el cemento sobre los áridos dentro de esta sin que gire el tambor para que no se inicie la hidratación del cemento por la humedad de los áridos.

IX. Puesta en obra

Las características plásticas de los tres tipos de cementos expansivos son similares a las de los cementos Portland, y no se requieren tratamientos especiales para su colocación.

En general el hormigón sin retracción tiene una mayor cohesión y una menor tendencia a la segregación que los hormigones normales. Por esta razón está especialmente cualificado para el bombeo. También se ha utilizado en tuberías, prefabricados y con máquinas pavimentadoras sin ningún problema.

X. Acabado

La mayor cohesión en el cemento expansivo dá lugar a una excelente calidad de acabado. Al igual que los hormigones aireados el agua exudada es mínima, por esto se tiende a comenzar demasiado pronto con el acabado.

XI. Curado

Al igual que en hormigones de cemento Portland, los hormigones sin retracción requieren un curado continuado a temperaturas moderadas durante unos días después de las operacio-

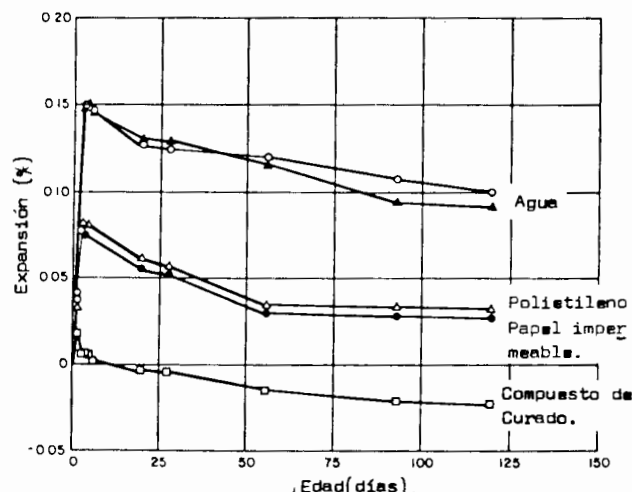


Figura 29.—Efecto de los diferentes tipos de curado.

nes de acabado para evitar una retracción temprana y para desarrollar la resistencia, durabilidad y otras propiedades. En la figura 29 se puede ver el efecto de diferentes métodos de curado en la expansión. En general se recomiendan los métodos que añaden humedad al hormigón, como inundación, regado continuado, y cubriciones húmedas para asegurar el agua necesaria para la formación de ettringita. Otros métodos, como los que evitan la pérdida de humedad son buenos siempre y cuando exista un aislamiento total. El curado se debe prolongar por un tiempo mínimo de 7 días y se deberá proteger el hormigón contra temperaturas extremas según lo indicado en ACI 305 R y ACI 306 R.

XII. Campo de aplicación

El cemento expansivo tipo K se ha venido utilizando con éxito en losas armadas, losas pretensadas postesas, losas apoyadas en el terreno, muros de retención, soportes, pavimentos de autopistas, cimentación de torres petrolíferas, etc....

4.3 PRODUCTOS EXPANSIVOS MAS UTILIZADOS EN ESPAÑA

El desarrollo de la técnica en el área de los cementos expansivos ha sido aprovechado por diversas empresas españolas que han comercializado ciertos productos expansivos. Estos pro-

ductos son en su mayoría aditivos para el cemento que se mezclan con este en mayor o menor proporción para producir la expansión desada en un mortero u hormigón. Se comercializan de dos modos: como simple aditivo a mezclar con el cemento y preparados para su uso en sacos de 25 y 50 kgs. Entre otros se pueden citar el «Feb-Grout», «Compact-Grout», «Embeco-Grout» y «Sika-Grout». El agente expansivo en cada caso contiene parte o todos los componentes de los cementos expansivos tipo K, M y S estudiados en los aparatos anteriores. Se trata de aluminatos de unos u otro tipo que reaccionan con los sulfatos y se hidratan formando etringita o Sal de Candlot.

Uno de los primeros agentes expansivos utilizados en España fue el «Dilacon», sujeto a patente hasta hace poco tiempo (de procedencia italiana), que una vez mezclado con el cemento tiene unas características similares a las del cemento expansivo tipo K.

La diferencia con los cementos expansivos utilizados en otros países (principalmente en EE.UU.), en cuanto a su empleo, estriba en que si estos ya vienen ensacados, dosificados según se trata del tipo K, S o M y preparados para mezclar con los áridos y el agua, los productos comercializados en España son aditivos que se añaden al cemento Portland en fábrica o en obra según el nivel de expansión requerido.

La velocidad y el nivel de la expansión dependen de la cantidad de aditivo añadida (en el caso de «Dilacon», la relación D/C varía entre el 6 y el 16 por 100)

Con estos aditivos se pueden amasar hormigones con retracción compensada, hormigones precomprimidos químicamente, morteros y hormigones expansivos igual que con los cementos expansivos tipo K, M y S.

Las características de estos hormigones y morteros son similares a las ya estudiadas y no nos parece oportuno enumerar todas las propiedades de nuevo. Los resultados obtenidos con ellos en general son muy satisfactorios.

4.4 NORMATIVA

No existe por el momento ninguna norma española que regule el uso de cementos expansivos en morteros y hormigones aunque se está

trabajando en ello. En este sentido es importante señalar los trabajos de la Comisión Técnica 83 Hormigón (CT-B3 H), que en su grupo de trabajo número 2 (GT-2 Aditivos), presidido por don Demetrio Gaspar, está trabajando en la actualidad para redactar la futura norma española de aditivos, pero actualmente no se incluyen los aditivos para reducir la retracción.

En cuanto a la Normativa existente en los EE.UU., que es la más completa sobre este tema, se pueden mencionar las siguientes normas:

- ASTM C-157 y C-596 para la medida de la expansión libre.
- ASTM C-806 para la medida de la expansión coaccionada de morteros de cementos expansivos.
- ASTM C-878 para la medida de la expansión coaccionada de hormigones de retracción compensada.

En general en el resto de los países del mundo que han tratado este tema se han basado en la norma anterior para la realización de ensayos. En España por ahora se hacen ensayos de adherencia, resistencia a compresión con morteros y hormigones de este tipo en el «Laboratorio Central de Estructuras y Materiales».

4.5 APLICACIONES MAS IMPORTANTES

- Relleno de cimentación de maquinaria entre hormigón y placas en toda clase de máquinas (Turbinas, motores, bombas, trenes de laminación, molinos, compresores, etc...).
- Relleno entre tuberías y paredes, fisuras y grietas, tuberías machiembradas, juntas de tuberías (metálicas o de cemento).
- Relleno de huecos o separaciones, incluso en elementos resistentes (por ejemplo, construcción de pilares nuevos para soportar vigas antiguas sin separación de ambos elementos por causa de retracciones).
- Revestimiento interior de tuberías de fundición y de acero.
- Anclaje de pernos.
- Anclaje de pilares.
- Anclaje de tubos pasantes, pasarelas, postes, raíles, etc....

- Reparación de desconches en pavimentos.
- Recubrir superficies de mortero para hacerlas más resistentes a la abrasión, además de impermeables.
- Relleno de huecos, grietas, fisuras o coquerías en el hormigón.
- Apoyo de puentes y de grúas.
- para mejorar el reparto de cargas entre zapatas y pilares, o estructuras en general.
- Rellenos sin retracción (armaduras posteadas adherentes, etc.).
- Rejuntados de paneles de fachadas.
- Gunitado de tableros rocosos, canales, tuberías, galerías, etc....
- Pavimentación industrial y de carreteras.
- Anclajes en roca (bulones, etc...).

BIBLIOGRAFIA

GENERAL

1. TAYLOR, M. F. W.: «*The Chemistry of Cement*». Academi Press. 1978.
2. SORIA, F.: «*Estudio de Materiales; Conglomerantes Hidráulicos*». 1980.
3. MONTOYA, MESEGUER y MORAN: «*Hormigón Armado*». Ed. G. Gili. 1981.
4. CEMENT and CONCRETE ASSOCIATION.: «*International conference on the Structure of Concrete*». Londres, 1968.
5. SCHOERE, H.: «*Prediction of Dryng Shinkage*».
6. LORMAN, W. R.: «*The theory of Concrete Creep*».
7. KEETON, J. R.: «*Study of Creep in concrete*». Technical Reports, 1965.
8. CEMENT ASSOCIATION OF JAPAN: «*Review of the 26 th General Meting*». Tokyo, 1972.
9. CEMENT ASSOCIATION OF JAPAN (CAP): «*5 th International Symposium on the Chemistry of Cement*». Tokyo, 1969.

ESPECIFICA

10. A. C. I.: «*Klein Symposium on Expansive Cement Concretes*». Pub. SP-38. Detroit, 1980.
11. A. C. I.: «*Credic Wilson Symposium on Expansive Cement*». Pub. SP-64. Detroit, 1980.
12. A. C. I.: «*Expansive Cement Concretes - Present State of Knowledge*». 1970.
13. A. C. I.: «*Recomended Practice for the Use of Shrinkage Compensating Concrete*». 1976.
14. A. C. I.: «*Standard Practice for the Use of Shrinkage Compensating Concrete*». 1980.
15. CEMENT and CONCRETE RESEARCH.: «*Expansion and Shrinkage of Oversuphated Portland Cements*». 1978.

16. TOGAWA, NAKAMOTO y NAKANO.: «*Effect of Curing Temperature on Expansi3n Characteristics of Expansive Concrete*». CAJ, 1981.
17. TSUJI, YOKOTA, SUZUKI y MORIMOTO.: «*Adiabatic Temperature Rise in Expansive Concrete*». CAJ Review, 1982.
18. W. MANNS y K. ZEUS.: «*Zum Einfluss von Zusatzmitteln auf die Entstehung sogenannter Schrumpfrisse*». Betontechnische Bericthe. 1979.
19. «*Expansive Cements Open Era of New Concretes*». Chemical and Engineering News. 1964.
20. «*Expansive Cement: Answer to Cracking*». Contractor News. 1964.
21. «*Expanding Cements*». Cement and Concrete Association. 1950.
22. ALESENKO, N. V.: «*Physicochemical Fundaments for the Production of Expanding Portland Cement with Addition of Unslaked Lime*». Chemical Abstracts, 1962.
23. ARONI, S.: «*Influence of Aggregate Types on Expanding Concrete Properties*». 1965.
24. ARONI, S.; POLIVKA, M., y BRESLER, B.: «*Expansive Cements and Expanding Concrete*». 1966.
25. KLEIGER, P., y GREENING, N. R.: «*Properties of Expansive Cement Concretes*». CAJ Review, 1969.
26. KESLER y CLYDE.: «*Control of Expansive Concretes During Construction*». Porceeding ASCE, 1976.
27. SPELLMAN, WOODSTROM y BAILEY: «*Evaluation of Shrikage - Compensating Cement - Final Report*». California, 1973.
28. «*The Uses of Expansive Cement*». Cement and Lime Manufacture. 1951.
29. SHALON, RAVINA y JAEGERMANN.: «*Hot - Dry Climate Effect on Stress Development in Shrinkage - Compensation Concrete*». Proc. ACI, 1977.
30. CARLSON y PIRTZ.: «*Expansive Cement for Mass Concrete*» Conference on Expansive Cement Concrete. 1972.
31. COLLEPARDI, TURRIZIANI y MARCIALIS: «*Paste Hydration of 4CaO, 3Al₂O₃, SO₃. In Presence of Calcium Sulfate*». Cement and Concrete Research, 1972.
32. GASKILL, CHARLES y JACOBS: «*Utilization of Shrinkage - Compensating Concrete*». ACI, 1980.
33. HOFF y MATHER: «*A Look at Type K Shrinkage Compensating Cement Production and Specifications*». ACI, 1980.
34. HUMMEL y CHARISUS: «*Low - Shrinkage Cement and Expanding Cement*». Library Communication, 1949.
35. KALOUSEK: «*Admixtures for Expansive Cements*». Conference on Expansive Cement Concretes. Berkeley, 1972.
36. KAWERT: «*Development of a Shrinkage - Compensating Cement*». Zement-Kalk-Gips, 1969.
37. METHA: «*Mechanism of Expansi3n Associated with-Ettringite Formation. Cement and Concrete Association.*» 1973.