

682-6

conocimiento actual de los principios fundamentales de la retracción del hormigón

**Samuel Aroni, Prof. adjunto y Povindar K Mehta, Prof. ayudante
Department of Civil Engineering, University of California.**

(«The Indian Concrete Journal» 39, diciembre 1965, pág. 485)

resumen

La retracción es, con frecuencia, responsable del agrietamiento del hormigón. Este trabajo resume el estado actual de conocimientos en cuanto a los principios que gobiernan el fenómeno de retracción en el hormigón. La tobermorita es el producto principal de los cementos portland hidratados y es, generalmente, la mayor fuente de retracción por secado en el cemento endurecido. Consecuentemente, la explicación de la retracción por secado se basa en la estructura cristalográfica de la tobermorita, en la naturaleza del agua asociada con ella y en los cambios de volumen que corresponden con los cambios de agua asociada. También se discute brevemente la influencia de otros factores, tales como la composición del cemento, el contenido de árido, la proporción de mezcla y las condiciones de curado.

La retracción es una propiedad inherente al hormigón de cemento, es decir, no existe una estructura de hormigón que, expuesta a las condiciones atmosféricas normales, no retraiga. La retracción *per se* no es perniciosa, pero se considera como una característica del hormigón que presenta desventajas, porque, frecuentemente, es la responsable de las fuerzas tensionales que conducen al agrietamiento.

El agrietamiento de suelos, techos, paredes y pavimentos de hormigón debido a la retracción exige una reparación posterior. Esto no sólo se adiciona al costo de la estructura, sino que también permite el acceso de flúidos agresivos que eventualmente destruyen la obra.

Numerosos investigadores han contribuido al estado actual de nuestros conocimientos sobre distintos aspectos de la retracción del hormigón. Los autores de este trabajo han revisado algunas de las investigaciones publicadas para presentar una información general sobre tipos de retracción, explicación de la retracción por secado a partir de la estructura cristalográfica de la fase tobermorita *, naturaleza del agua asociada con la fase tobermorita y el efecto de la tensión de vapor sobre el agua asociada (fenómeno que puede ser

* Las características fisicoquímicas de la fase tobermorita, que es el principal producto de hidratación en los cementos portland hidratados, se discutirán más adelante.

directamente responsable de los cambios de volumen en el hormigón). También se ha incluido una breve discusión sobre cómo se afecta la retracción por secado por otros factores, tales como la composición del cemento, tipo de árido, proporciones de mezcla en el hormigón, condiciones de curado, etc.

tipos de retracción

La retracción del hormigón por exposición a las condiciones atmosféricas normales se considera usualmente como retracción por secado; sin embargo, hoy día se sabe que el hormigón también retrae por carbonatación. Además, las discusiones sobre retracción por secado llevan consigo con mucha frecuencia el uso de términos tales como retracción reversible, retracción residual, y retracción diferencial. Por lo tanto, haremos un breve resumen de los tipos de retracción encontrados en el hormigón.

Retracción por carbonatación: Durante la hidratación, los silicatos cálcicos del cemento portland forman hidróxido cálcico y fase tobermorita (silicatos de calcio hidratados). La acción del dióxido de carbono sobre los cementos hidratados conduce a la formación de carbonato cálcico y gel de sílice, proceso que tiene lugar aún a la baja presión del dióxido de carbono en la atmósfera ($3 - 12 \times 10^{-4}$ atmósferas), y que va invariablemente acompañada de retracción.

Verbeck ha demostrado que la velocidad a que se realiza la carbonatación varía con la humedad relativa del ambiente. La retracción debida a la carbonatación se encontró que era máxima alrededor del 50 por 100 de humedad relativa; las retracciones por carbonatación inferiores encontradas en condiciones de humedad relativa mayores y menores del 50 por 100, se atribuyen a la velocidad de difusión más baja del dióxido de carbono en estas condiciones.

Generalmente, la carbonatación no penetra mucho en la masa del hormigón. Las grietas por retracción, por lo tanto, se limitan a la superficie y son criticables sólo donde la condición primordial es el aspecto decorativo de la superficie. A fin de diferenciar este fenómeno de la formación de fisuras sobre la superficie debidas a grietas de retracción por secado, a las primeras se les designa como "crazing" (cuarteamiento). Las grietas de retracción por secado no sólo son más profundas, sino que también aparecen antes una vez que el hormigón queda expuesto a las condiciones atmosféricas normales. Debido a la baja concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, el cuarteamiento sobre las superficies de hormigón, normalmente, no se hace apreciable hasta pasado un año.

Los resultados sobre medidas de retracción contienen, generalmente, el efecto de ambos tipos de retracción (secado y carbonatación). Si las medidas se hacen sobre probetas delgadas, es de esperar que la carbonatación contribuya de modo apreciable en la retracción total. En el caso de elementos de hormigón de gran espesor, la carbonatación, por tratarse de un fenómeno de superficie, puede alcanzar una proporción insignificante en la retracción total.

Retracción por secado: Los elementos de hormigón pierden agua expuestos a condiciones de secado. La pérdida de agua libre crea poca retracción, pero, más tarde, la eliminación del agua adsorbida, así como del agua intercapa de la fase tobermorita, va acompañada de la correspondiente retracción en el hormigón.

La pérdida de humedad y, consecuentemente, la retracción por secado, comienza en la superficie del hormigón y, gradualmente, progresa hacia el interior. De acuerdo con l'Her-

mite, la desecación en los elementos de hormigón alcanza una profundidad de 8 cm en un mes, aunque sólo unos 60 cm en 10 años². El establecimiento de un gradiente de humedad en el hormigón conduce a una *retracción diferencial por secado* que puede causar alabeo y cracking de la estructura.

La figura 1, debida a Lea, ilustra el comportamiento típico del hormigón expuesto alter-

nativamente a las condiciones de secado y mojado³. Si un elemento de hormigón que se ha secado al aire hasta retraer a ciertas dimensiones se sumerge en agua, intenta recuperar las dimensiones originales*. Sin embargo, aún por curado prolongado en agua no alcanza en su recuperación las dimensiones originales. La diferencia entre la longitud original y la longitud obtenida después de someter el elemento de hormigón a un tratamiento alternativo de secado y mojado, se llama *retracción irreversible* o *retracción residual*. De acuerdo con l'Hermite, la retracción irreversible representa del 30 al 60 por 100 de la retracción por secado en la

mayor parte de los hormigones y puede influenciarse notoriamente por la longitud del primer período de curado y por la extensión de la carbonatación durante el secado². Se encontró que las pastas puras de cemento, curadas bajo agua durante 6 meses, secadas y posteriormente vueltas a mojar, presentaban poca retracción irreversible. Por otra parte, la carbonatación durante el secado puede rellenar los poros con carbonato cálcico tanto como para prevenir la permeabilidad al agua en el nuevo mojado, aumentando así la retracción irreversible.

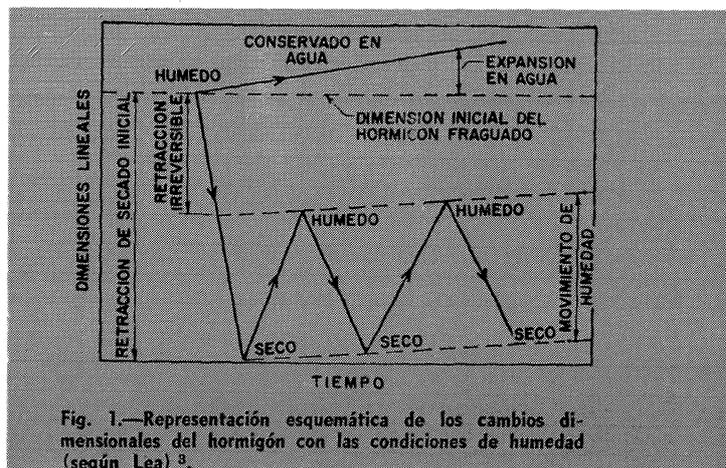


Fig. 1.—Representación esquemática de los cambios dimensionales del hormigón con las condiciones de humedad (según Lea)³.

la fase tobermorita en el cemento portland hidratado

Durante la hidratación, los silicatos bicálcico y tricálcico, que constituyen casi las tres cuartas partes de los compuestos del cemento portland normal, se produce un gel de silicato cálcico hidratado cuyas características cristalográficas se parecen al mineral natural tobermorita y cuya composición química final se aproxima a la fórmula $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Es preferible denominar la fase tobermorita porque su composición química no es fija y porque indefectiblemente contiene pequeñas cantidades de iones aluminato, sulfato y ferrito en solución sólida. Generalmente se considera que la fase tobermorita es la responsable de las importantes propiedades mecánicas de morteros y hormigones. Entre estas propiedades se encuentran la resistencia mecánica, la retracción y la fluencia. Puesto que para que cualquier fenómeno sea adecuadamente controlado es esencial previamente conocer los aspectos fisicoquímicos que lleva consigo, presentaremos más adelante un breve resumen del estado actual de los conocimientos acerca de la fase tobermorita.

* Dimensiones del hormigón curado en agua justamente antes de exponerlo a las condiciones de secado por primera vez.

Aun cuando parece que el primer estudio cuidadoso del endurecimiento de morteros fue hecho por Lavoisier⁴ hacia 1765, la introducción del método científico en este campo es debido a Le Chatelier⁵. El propuso la “teoría de la cristalización”, según la cual el entrelazado de los cristales fibrosos de los silicatos cálcicos hidratados es el responsable de los fenómenos de fraguado y endurecimiento en los cementos hidratados. Diez años más tarde, esta teoría era rebatida por Michaelis (1892)⁶. La “teoría coloidal” de Michaelis, consideraba que los silicatos cálcicos hidratados eran coloidales en su naturaleza y que el endurecimiento de las pastas de cemento se debía a la coagulación de las partículas coloidales. A esto siguió un período de debate entre las hipótesis rivales y surgió la idea de que en relación con la naturaleza de los silicatos cálcicos hidratados no hay incompatibilidad real entre ambas, puesto que el hábito criptocristalino del material puede conferirle características coloidales.

Jesser parece que fue el primero en estudiar la relación entre el contenido de agua y la tensión de vapor para pasta endurecida a temperatura constante, e indicó la analogía entre el comportamiento de la pasta endurecida y el de sustancias coloidales típicas tales como el gel de sílice⁷. Surgió un progreso muy importante con la publicación, en 1938, de la teoría de Brunauer, Emmett y Teller (B.E.T.) de la adsorción multimolecular⁸. Esta teoría señala que, a una tensión de vapor dada, la cantidad de líquido adsorbida es directamente proporcional al área de superficie interna del sólido. Haciendo uso de la teoría B.E.T., las investigaciones en la Portland Cement Association Research Laboratories condujeron a importantes publicaciones⁹ que representaron un paso importante en el conocimiento de las propiedades físicas de la pasta de cemento portland endurecida. Además de los estudios de adsorción multimolecular, las técnicas de microscopio electrónico y difracción de rayos X han conducido a un mejor conocimiento de la naturaleza de la tobermorita presente en las pastas de cemento endurecido.

naturaleza de la fase tobermorita

La fase tobermorita no es un compuesto químico sencillo, sino una serie de hidratos de composiciones que varían continuamente. Los límites observados en las relaciones CaO/SiO₂ oscilan entre 1,39 y 1,75, valores mucho más altos de la relación 0,83 encontrada para el mineral natural tobermorita. También el mineral natural está bien cristalizado, mientras que la fase tobermorita no. Asimismo es una “anomalía curiosa”¹⁰ el que la hidratación del silicato tricálcico conduce a una relación CaO/SiO₂ de 1,5, mientras que la del silicato bicálcico nos lleva a una relación CaO/SiO₂ de 1,65¹¹.

Por estudios de adsorción de vapor de agua, Powers y Brownyard determinaron el peso de agua requerido para cubrir totalmente la superficie interna de la pasta de cemento portland endurecida con una sencilla capa de moléculas adsorbidas⁹. Suponiendo un área de 10,6 Å para una molécula de agua adsorbida, se encuentra que la superficie de un cemento casi totalmente hidratado es de 200-300 m²/g. Esta área superficial es enorme y del orden de 1.000 veces la superficie específica de un cemento portland anhidro. Suponiendo que las partículas de tobermorita son esféricas, el diámetro medio calculado resulta ser de 140 Å. En cualquier otra forma, una de las dimensiones sería inferior a 140 Å. Esto prueba que la sustancia es coloidal* por naturaleza. La gran superficie de la pasta endurecida es, probablemente, la propiedad física más importante que afecta los cambios de volumen, la resistencia, etc.

* Por definición, cualquier sustancia con, al menos, una dimensión menor de 1.000 Å, se considera como coloide.

Powers y Brownyard⁹ han supuesto que las partículas del gel tobermorita* son esféricas de forma. Esto era mantenido por los estudios en el microscopio electrónico de Swerdlow y Heckman¹². Sin embargo, Bernal, y más recientemente Brunauer, han demostrado que el gel tobermorita consta predominantemente de largas fibras rectas^{11 y 13}. La mayor parte de las fibras son mayores de una micra, en tanto que su espesor es sólo del orden de magnitud de la célula unidad. El estudio de la célula unidad, llevado a cabo por Bernal, Megaw y Kelsey¹⁴, se hizo difícil por la pobre naturaleza cristalina del material. De acuerdo con Bernal, las longitudes de ejes son: $a = 5,6 \text{ \AA}$; $b = 7,3 \text{ \AA}$; y en la dirección c , la dimensión de la célula unidad varía entre 9 y 14 \AA . Existe cierta unanimidad en que, en la dirección c , la tobermorita tiene una estructura de dos o tres capas, de modo similar a los minerales arcillosos. Cada una de estas capas es realmente una capa triple¹⁴ y sigue muy disputada aún la composición química exacta de las capas¹¹. El punto importante, sin embargo, es la existencia de la estructura en capas y el hecho de que el agua puede moverse entre estas capas, creando cambios dimensionales importantes.

estructura física de la pasta de cemento portland endurecida

Es importante darse cuenta de que la pasta de cemento portland endurecida no es exactamente un producto químico. Mientras que las características fisicoquímicas de las partículas individuales del gel son aproximadamente las mismas en todas las pastas, la estructura global de la masa depende del grado en que el gel llena el espacio disponible y, también, de la manera en que se produce el endurecimiento, particularmente en las fases iniciales de la hidratación. Es obvio que la pasta contendrá muchos poros rellenos con aire o agua. Powers ha clasificado los poros en las siguientes categorías^{9, 15 y 16}:

a) *Poros de gel*.—Estos son los poros entre las partículas de gel. Son características de los geles y alcanzan del 20 al 30 % del volumen total de la pasta. El tamaño medio de estos poros de gel es aproximadamente de 15 \AA , o sea, casi cinco veces el diámetro de la molécula de agua.

b) *Poros capilares*.—Normalmente, el volumen total de los productos de la hidratación es menor que el volumen del cemento anhidro y el agua de amasado. Esto teniendo en cuenta la presencia de grandes poros que se designan como poros capilares. Estos poros, que se presentan entre los aglomerados de las partículas de gel, pueden alcanzar hasta el 40 % del volumen de la pasta y son los principales responsables de la permeabilidad de la pasta, porque se considera que existen como un sistema interconectado de canales submicroscópicos. Estos poros capilares deben necesariamente incluir una amplia variedad de formas y tamaños, que pueden oscilar desde 0,01 a 0,001 mm de diámetro¹⁷.

naturaleza del agua asociada con la pasta endurecida

El agua presente en la pasta endurecida se mantiene de diferentes formas y, por lo tanto, con un grado variable de firmeza. Este agua puede clasificarse, de acuerdo con su situación en la estructura, de la siguiente manera:

- 1) agua de constitución o agua ligada por enlaces químicos;

* Algunos autores han empleado el término gel tobermorita para designar la fase tobermorita.

- 2) agua adsorbida en superficie y agua adsorbida intercapas, unida por fuerzas físicas;
- 3) agua capilar.

Puesto que no hay ninguna técnica utilizable para determinar el agua en cada uno de los tipos anteriores, esta clasificación tiene poco interés práctico. Para fines de investigación es posible una clasificación de conveniencia en agua *evaporable* y agua *no evaporable*.

Esta clasificación es arbitraria porque depende del método de secado de la pasta. El agua de constitución es el agua químicamente combinada que forma parte de la estructura cristalina de los hidratos. El agua no evaporable no es necesariamente igual al agua de constitución. De acuerdo con Powers, el agua no evaporable incluye, probablemente, la mayor parte del agua de constitución; pero no toda, porque al menos uno de los hidratos, particularmente el sulfoaluminato cálcico, se descompone parcialmente al eliminar el agua evaporable⁹. Por otra parte, el agua no evaporable puede incluir parte del agua fuertemente adsorbida. En contraste con los hidratos cristalinos, la relación entre la tensión de vapor y el contenido de agua se manifiesta como algo continuo, sin aparición de variaciones bruscas.

La forma diferencial en que el agua se mantiene en la estructura viene a parar en el agua diferencial, que tiene una entropía más baja que el agua adsorbida. Esto conduce a cambios de volumen hidrotérmicos, es decir, el coeficiente de expansión térmica depende del contenido de humedad. Finalmente debe señalarse que el agua no evaporable (agua de constitución, más agua fuertemente adsorbida) es proporcional a la cantidad de gel hidratado y puede servir como medida del grado de hidratación del cemento.

relación entre la tensión de vapor y el contenido de agua

En el hormigón endurecido, el agua en los poros capilares es casi completamente evaporable a humedades por debajo del 40 %¹⁷. En la figura 2 se expresa una relación idealizada entre la pérdida de agua y la humedad relativa. El agua libre se refiere a la parte del agua capilar que se pierde con un pequeño cambio de humedad (línea AB). La línea BC, de trazado recto, representa la pérdida del resto del agua capilar y gran parte del agua adsorbida. Por debajo de la humedad OD no ocurre ninguna pérdida de agua, indicando

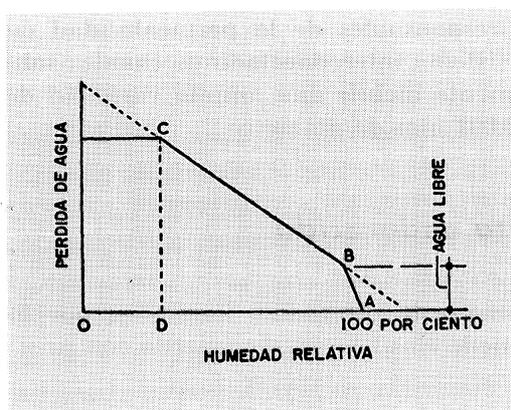


Fig. 2.—Relación ideal entre la pérdida de agua y la humedad relativa (según l'Hermite)².

que el agua que permanece en la estructura a esta humedad constituye la parte de agua evaporable que requiere condiciones de secado especiales. La comparación de la curva ideal de la figura 2 con los resultados de los ensayos reales demostró que presenta una aproximación razonable para humedades por encima de OD, pero no por debajo.

El estudio de la relación entre el contenido de agua y la presión de vapor para pastas endurecidas a temperatura constante fue estudiado por Jesser y, más tarde, por Powers y Brownyard^{7 y 9}.

Algunas de las conclusiones alcanzadas por Powers son las siguientes:

a) a saturación el agua total retenida, así como el agua no evaporable, aumentaron con la edad (longitud del período de curado). Esto es lógico porque al progresar la hidratación crece también la cantidad de productos de hidratación, creando, en consecuencia, un aumento proporcional en el agua retenida, y en el agua de constitución. Por otra parte, la formación de cantidades crecientes de gel de tobermorita con la edad crea cada vez mayores cantidades de superficie y, en correspondencia, cantidades mayores de agua adsorbida en la masa hidratada;

b) a cualquier tensión intermedia, el agua total retenida aumenta con la edad;

c) el contenido de agua evaporable (diferencia entre el agua total y el agua no evaporable) disminuye con la edad. Esto se debe a ir aumentando la relación gel-espacio a medida que progresa la hidratación. Una disminución en los espacios capilares llevaría consigo una disminución en el agua capilar que forma el volumen de agua evaporable;

d) la comparación del agua total retenida en pastas que tienen la misma relación agua/cemento no evaporable, aunque hidratadas inicialmente con una relación agua/cemento diferente, mostró valores similares para presiones relativas de vapor inferiores al 50 % aproximadamente.

Por lo tanto, por debajo de una presión de vapor del 50 % el agua total en la pasta no depende del agua capilar, sino de la cantidad de gel tobermorita (que es aproximadamente proporcional a la cantidad de agua no evaporable). Para presiones de vapor más altas las pastas con relación agua/cemento alta, teniendo gran volumen de capilares y mucha agua capilar, muestran un contenido de agua total mayor; es decir, por encima del 50 % de presión de vapor el contenido de agua total de la pasta se influencia por su porosidad.

relación entre los cambios en el contenido de agua y el volumen

Examinemos ahora el efecto de los cambios en el contenido de agua sobre el volumen de la pasta de cemento hidratada. Normalmente uno espera que cuando el agua se separa de un material, éste debe retraer, y que cuando se añade, debe hinchar. Esto, sin embargo, no ocurre siempre. Pueden existir cambios de volumen sin cambios en el contenido de agua (movimientos internos de agua) y, por otra parte, pérdida de agua sin retracción.

La figura 3, de acuerdo con l'Hermite, muestra una relación ideal entre la retracción y la pérdida de agua². A una edad avanzada, para pastas puras de cemento se sugiere una relación lineal (OA), mientras que los morteros y hormigones se comportan de distinto modo (OCD) y OCD'). Debido al agua capilar, que tiene poco efecto sobre la retracción, la pérdida inicial de agua va acompañada por una pequeña retracción. De acuerdo con Copeland, "una pasta típica de cemento portland endurecido que está saturada con agua es capaz de entregar un agua igual, que puede ser la mitad de su propio volumen con sólo cambios en sus dimensiones externas"¹⁸.

Por lo tanto, podría establecerse que la mayor parte de la retracción es motivada por sólo una parte de la pérdida de agua total. Pickett encontró que la retracción durante el secado podría representarse por una ecuación sencilla del tipo de las del flujo del calor¹⁹.

Suponiendo que la pérdida de agua total es igual a la suma del agua no relacionada con la

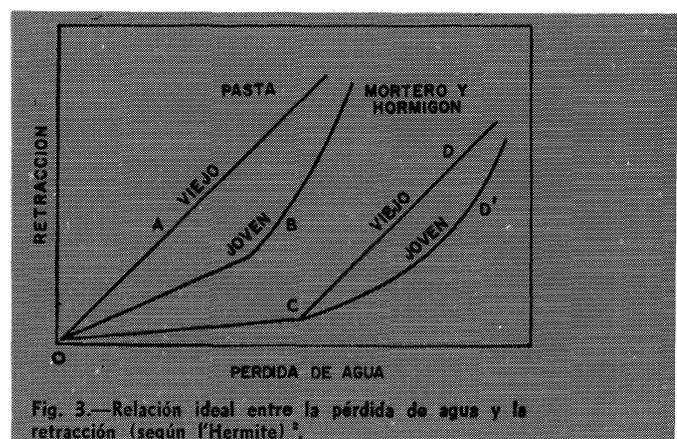


Fig. 3.—Relación ideal entre la pérdida de agua y la retracción (según l'Hermite)².

retracción, W_a , y el agua de retracción, W_b , y que los dos tipos de agua se pierden simultáneamente durante el secado, era posible representar los resultados experimentales por medio de dos ecuaciones (fig. 4). El siguiente problema es identificar W_a y W_b con el agua perdida en zonas determinadas de la estructura. De la figura 4 puede deducirse que W_a se pierde muy rápidamente, es decir, durante los tres primeros días de secado. Powers sugiere que ésta es el agua capilar²⁰. Es la misma agua que llamaba “agua libre” l’Hermitte en la figura 2. Posteriormente, W_a permanece constante, mientras que la pérdida de W_b puede relacionarse con la retracción. La gran proporción de W_b de la pérdida de agua total sugiere que la fuente de W_b puede no ser sólo la primera agua adsorbida. Parece que un número de capas de agua intercapas adsorbida contribuye al vapor de W_b . Puede también incluirse en W_b una pequeña cantidad de agua capilar, pero su efecto sólo se aprecia en la primera fase del secado cuando la humedad es aún alta.

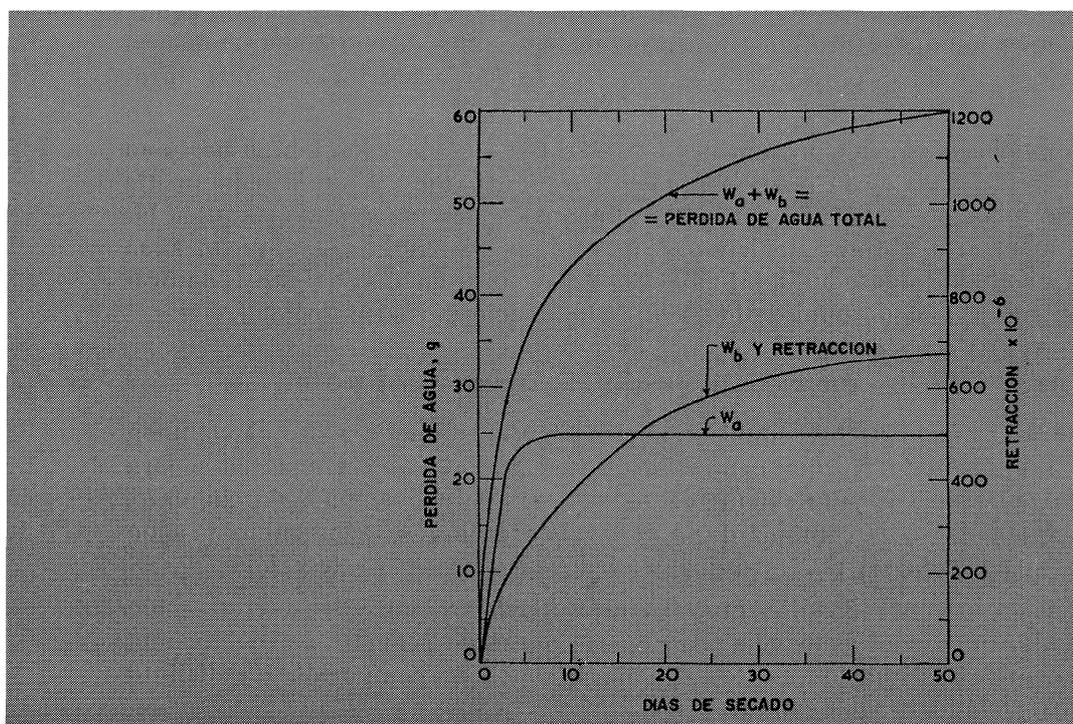


Fig. 4.—Relación con el tiempo entre la retracción y la pérdida de agua para una probeta de hormigón almacenada en aire con una humedad relativa del 50 % (según Pickett)^{19 y 9}.

mecanismos de cambio de volumen

Al considerar los factores físicos responsables de los cambios de volumen, Freyssinet² fue el primero en sugerir el *fenómeno capilar*. De acuerdo con esta teoría de la tensión capilar, el agua en los poros capilares está sometida a una tensión que es directamente proporcional a la tensión superficial del líquido e inversamente proporcional a los radios de curvatura del menisco que limita la fase líquida. Empleando la ecuación básica de Kelvin, la tensión y el cambio de volumen debidos a cambios de ambiente pueden escribirse en términos de temperatura, humedad relativa y volumen líquido. Como señala Powers, la

teoría capilar predice retracción con pérdida de agua hasta que el contenido de agua evaporable y la presión de vapor pasa el límite bajo el cual un menisco no puede existir⁹. Pasado este límite, el material expansionará. Esto no se observa en el hormigón, que retrae e hincha con los cambios de humedad aun cuando el contenido de humedad sea tan bajo como para que pueda existir un menisco. Aparentemente, pues, la teoría capilar sola no es suficiente.

Powers y Brownyard sugieren que los cambios de volumen son un *fenómeno de adsorción de líquido*⁹. La gran cantidad de agua que se encuentra con la retracción (W_b en la fig. 4) demuestra que existen alrededor de cuatro capas de agua adsorbida. Además de indicar que “el hinchamiento debido a cambios en el contenido de agua adsorbida está dentro del límite de las posibilidades”, Powers y Brownyard advierten que “queda para experimentos futuros probar o desaprobar la deducción de que la parte (de agua) responsable de los cambios de volumen es el agua adsorbida”.

En 1954, Kalousek señaló las diferencias entre el agua adsorbida y el nitrógeno adsorbido por las pastas endurecidas²¹. Cuando se empleó nitrógeno en lugar de agua, la cantidad adsorbida observada se redujo a la mitad. En otras palabras, la cantidad de agua adsorbida por la tobermorita era aproximadamente el doble de la requerida para cubrir la superficie interna, tal como se determina por adsorción de nitrógeno. Esta gran diferencia se consideró importante porque los diámetros de las dos moléculas (2,7 y 3,1 Å) no son muy diferentes. La conclusión inevitable es que la mitad del agua admitida por la tobermorita debe consumirse en alguna otra parte que no sea el área de superficie interna.

En algunas sustancias tales como “Xonotlita”^{*}, que no muestra retracción por secado apreciable, no se encontraron tales diferencia entre el agua y el nitrógeno adsorbidos. Kalousek, por esta razón, dice “que es la cantidad de agua intercapa la que es proporcional a la retracción”. Bernal¹³ fue el primero que empleó la misma explicación para la retracción en la dimensión c , de la célula unidad de tobermorita durante el secado.

En 1962, Brunauer sugirió el siguiente mecanismo para la retracción e hinchamiento del gel de tobermorita¹¹:

- a) cambios en el agua intercapa de las láminas de tobermorita;
- b) cambios en el agua de superficie, incluyendo el agua en la superficie interna de las láminas enrolladas de tobermorita;
- c) cambios en el agua de poro de gel (los espacios interfibra se consideran por Brunauer como poros de gel);
- d) cambios en el agua de poros capilares (poros entre los agregados de partículas).

Debe señalarse que los mecanismos de Brunauer antes señalados incluyen todos los fenómenos previamente mencionados, tales como los capilares, intercapa y de adsorción, que explican la retracción por secado. El único factor adicional que podría ser importante es el agua que existe dentro de las láminas enrolladas. Basándose en sus observaciones en el microscopio electrónico, Brunauer manifestó que el gel de tobermorita en las pastas hidratadas existe como láminas enrolladas. Esta opinión no se acepta unánimemente por otros investigadores de la especialidad, porque la microscopía electrónica (condición de alto vacío) de las muestras podría crear fácilmente el enrollamiento de las láminas. Pero

* Xonotlita es un silicato monocálcico hidratado que presenta gran área de superficie interna.

si se confirma que el gel de tobermorita existe como láminas enrolladas, entonces el agua que entra en la superficie interna de las fibras enrolladas podría crear un cambio de volumen "espiral". Otros puntos mencionados para ser establecidos serían si esto es un fenómeno de adsorción y si es este espacio, o parte de él, el que es inaccesible a las moléculas de nitrógeno durante la determinación del área superficial de los cementos hidratados por el método B.E.T.

Las conclusiones de Kalousek sobre los mecanismos de retracción por secado son las siguientes:

a) con humedades altas, la retracción se produce por fuerzas de tensión capilar (esto es, durante la fase en que los poros capilares están parcialmente rellenos con agua);

b) con humedades bajas, simultáneamente con la expansión debida al relajamiento de la tensión capilar (cuando el agua capilar evapora completamente) hay algo de pérdida de agua intercapa;

c) la retracción que tiene lugar a humedades relativas del 25 % o menos puede ser debida, en gran parte, a la pérdida de agua intercapa y agua de superficie adsorbida.

Resumiendo la discusión sobre las relaciones entre los cambios de volumen y de contenido de agua de las pastas de cemento hidratadas, el autor considera que se han hecho avances importantes, durante las dos últimas décadas, en el conocimiento de los factores básicos que gobiernan los fenómenos. No obstante, es preciso hacer más antes de llegar a establecer relaciones cuantitativas, que son necesarias para ejercer un control completo sobre el problema de la retracción por secado.

otros factores que influyen sobre la retracción por secado

Cemento.—Hasta aquí se ha supuesto que los cambios de volumen están gobernados por factores físicos más que por factores químicos. La mayor parte de los hechos mantienen este punto de vista. Sin embargo, merece la pena examinar algunos de los factores químicos que pueden afectar en la retracción. Por ejemplo, la composición del cemento afecta la superficie específica de los productos de hidratación^{9 y 11}, y esto, por variar las cantidades de agua adsorbida, influenciará la retracción. Las retracciones más altas manifestadas en hormigones hechos con cementos de bajo calor que contienen una proporción relativamente grande de silicato bicálcico, pueden deberse al hecho de que, por consideraciones estequiométricas, los productos de hidratación del silicato bicálcico producen alrededor del 80 % de gel de tobermorita si se comparan con los productos de hidratación del silicato tricálcico, que crea sólo alrededor del 60 % de dicho gel.

El efecto del yeso sobre la retracción está bastante bien conocido. Durante las primeras fases de la hidratación del cemento portland, el yeso aporta los iones sulfato que retardan la solubilidad del aluminato tricálcico, previniendo así el rápido fraguado del cemento debido a la formación de aluminatos cálcicos hidratados. En el proceso se forma un sulfato-aluminato cálcico hidratado, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$. En condiciones adecuadas, la formación de este compuesto va acompañada de expansión y, en consecuencia, puede dar lugar a una compensación de la retracción en el hormigón de cemento portland. El contenido óptimo de yeso en el cemento portland para compensar la retracción es, no obstante, más elevado que el requerido para retrasar el fraguado²².

De acuerdo con l'Hermite, la retracción aumenta en el siguiente orden para distintos

cementos: portland ordinario, cementos aluminosos, cementos de escoria y cementos portland de alta resistencia inicial². La variabilidad de resultados, sin embargo, es francamente amplia. Los ensayos de retracción sobre varios tipos de cementos portland han sido publicados por Swayze²³. La retracción sobre muestras de pasta pura aumentó al cambiar el tipo de cemento del I al III. Swayze atribuye esto al aumento de la finura de los cementos (de acuerdo con él, las partículas más gruesas ejercen un efecto de freno sobre la retracción), más que a diferencias químicas. Por ensayos en muestras de mortero y hormigón, Swayze no observó ningún efecto del tipo de cemento sobre la retracción.

Aridos.—El efecto de restricción del árido es un factor importante para atenuar la retracción del hormigón. Esto ya fue señalado por Carlson²⁴ y demostrado concluyentemente por Pickett²⁵, tanto teórica como experimentalmente. Basado sobre ciertas suposiciones simplistas en un análisis elástico teórico, Pickett llegó a la siguiente relación teórica²⁵:

$$S = S_0(1 - g)^n,$$

donde:

S = retracción del hormigón;

S_0 = retracción de la pasta pura de cemento;

g = proporción volumétrica de árido en el hormigón;

n = un coeficiente empírico.

Empleando dos relaciones agua/cemento distintas y tres áridos diferentes, los experimentos de Pickett demostraron buena concordancia con la ecuación anterior para $n = 1,7$. La figura 5 demuestra la influencia del contenido de árido sobre la retracción, tal como predice la ecuación de Pickett.

Neville cita valores experimentales de n desde 1,2 a 1,7 con diferentes áridos²². También l'Hermite ha hecho ensayos de retracción de hormigón con diferentes áridos². Debido a sus diferentes propiedades elásticas, un hormigón hecho con cuarcita como árido demostró la tercera parte de retracción que un hormigón hecho con árido calizo. La presencia de arcilla en el árido rebaja su efecto restrictivo sobre la retracción, porque la propia arcilla está sometida ya a retracción. Se ha demostrado experimentalmente que los áridos arcillosos resultan en un aumento de la retracción de hasta el 70 %²⁰.

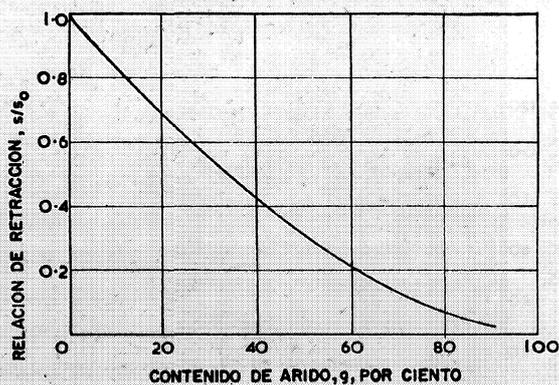


Fig. 5.—Efecto del contenido de árido sobre la retracción (según Pickett, con $n = 1,7$)^{22 y 25}.

tenido de árido aumentará automáticamente la retracción y viceversa. El contenido de agua, *per se*, de las masas de hormigón fresco, se toma a veces erróneamente como indicativo de una futura retracción. Esto puede justificarse, si los cambios de agua en la mezcla alteran el contenido de árido, influenciando así la retracción.

Puesto que la retracción de las pastas puras de cemento es siempre mayor que la retracción del hormigón, es evidente, como se deduce de la ecuación de Pickett, que cualquier factor que reduce el contenido de árido aumentará automáticamente la retracción y viceversa. El contenido de agua, *per se*, de las masas de hormigón fresco, se toma a veces erróneamente como indicativo de una futura retracción. Esto puede justificarse, si los cambios de agua en la mezcla alteran el contenido de árido, influenciando así la retracción.

Condiciones de curado y secado.—Bajo cualquier tipo de condiciones, el equilibrio no se establece instantáneamente. La figura 6 demuestra la relación entre los cambios de volumen del hormigón y el tiempo, para diferentes humedades relativas. El comportamiento como función del tiempo puede explicarse por la estructura del material. En tanto que el agua capilar se pierde con relativa facilidad, el agua adsorbida, que se encuentra sujeta por fuerzas mucho mayores, ha demostrado tener viscosidades de unas 50.000 veces mayor que la del agua normal²⁶. Por lo tanto, no es difícil comprender la respuesta lenta de los movimientos del agua en estas condiciones.

Los valores de retracción relativa, referidos a un período de 28 años, estudiados por Troxell y colaboradores²⁷, se muestran en la figura 7.

Se ha observado que el cambio en la temperatura de curado puede afectar, de un modo apreciable, al comportamiento en la retracción. La retracción por secado de una probeta curada hidrotérmicamente, es del orden del 1 al 2 % si se compara a la retracción por secado de una probeta curada normalmente. El tratamiento térmico produce un silicato cálcico hidratado cristalino, afwillita, en lugar de una fase tobermorita coloidal, y esto explica las diferencias en el comportamiento en la retracción por secado de ambas probetas.

Resumiendo: existen diversos factores, aparte de las características físicas de la fase tobermorita, que pueden ser importantes para estudiar el comportamiento de los hormigones en cuanto a retracción. La influencia de la composición potencial del cemento, las propiedades elásticas y cantidad del árido, el efecto de las condiciones de curado, etc., se conocen sólo en términos cualitativos. Entre las dificultades para lograr una medida cuantitativa de la retracción como resultante de los factores antes mencionados, se encuentra el efecto del tamaño del elemento constructivo. Las condiciones de secado crean un gradiente de humedad en dicho elemento, y la magnitud de la retracción dependerá, por lo tanto, de la forma, tamaño y relación superficie/volumen del elemento constructivo²⁸.

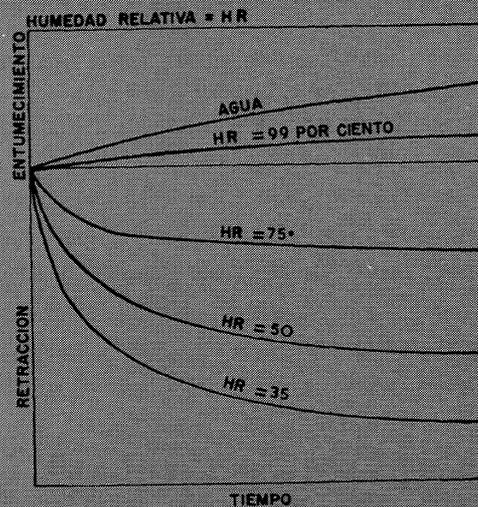


Fig. 6.—Cambios de volumen del hormigón curado a diferentes humedades relativas (según l'Hermitte)².

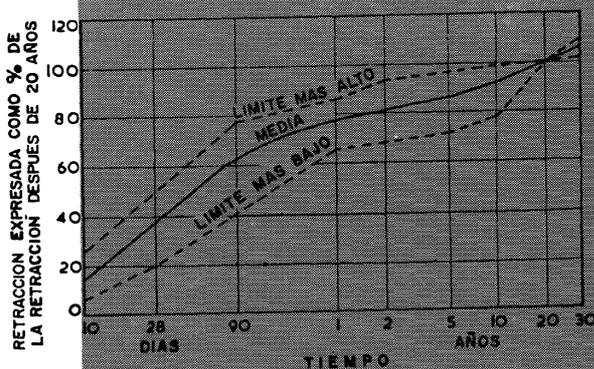


Fig. 7.—Retracción de diferentes hormigones conservados a humedades relativas de 50 y 70 % (según Troxell, Raphael y Davis)^{24 y 27}.

conclusiones

El agrietamiento de las estructuras debido a la retracción es, sin duda alguna, la desventaja más importante del hormigón. Una revisión del trabajo de investigación llevado a cabo sobre la retracción en el hormigón ha dejado establecido, más o menos, lo siguiente:

- 1) la retracción en el hormigón es directamente atribuible a la pasta de cemento;
- 2) la pasta de cemento hidratada consta principalmente de fase tobermorita, que tiene una estructura de capas característica;
- 3) además del agua de constitución mantenida químicamente, la fase tobermorita es capaz de retener físicamente grandes cantidades de agua, como agua absorbida en superficie y como agua intercapa. En el hormigón puede estar presente también gran cantidad de agua capilar o agua que no está asociada con la fase tobermorita;
- 4) debido a cambios en la humedad relativa de los alrededores, puede perderse el agua capilar y una parte importante del agua retenida físicamente por la fase tobermorita;
- 5) la pérdida de agua capilar lleva consigo pequeños cambios dimensionales en el hormigón, pero la pérdida de agua absorbida en superficie y agua intercapa en la fase tobermorita puede dar lugar a cambios dimensionales de cierta importancia;
- 6) las características del cemento y los áridos, la proporción de mezcla y las condiciones de curado del hormigón pueden también afectar el comportamiento del hormigón en la retracción;
- 7) la mayor parte de la información disponible sobre retracción es de tipo empírico. Manejando las distintas variables se consiguen con mucha dificultad algunos datos sistemáticos. Se han sugerido ciertos modelos mecánicos para explicar los hechos observados sobre retracción²⁹. Pero hasta el momento, los investigadores no han intentado normalizar el tamaño de las probetas de ensayo, los materiales, las condiciones de curado y las condiciones de secado. La utilidad de los datos es, por lo tanto, limitada por el hecho de que la retracción puede deberse tanto al secado como a la carbonatación de la fase tobermorita: la contribución de cada tipo de retracción sigue dependiendo, a su vez, del tamaño de la probeta de ensayo;
- 8) todavía no se ha encontrado una contestación satisfactoria al problema cracking-retracción en el hormigón. El desarrollo de cementos expansivos³⁰, sin embargo, promete resolver este problema por compensación de las tensiones creadas en la retracción por secado.

bibliografía

1. VERBECK, G. J.: *Carbonation of hydrated Portland cement*. Special Technical Publication No. 205. *American Society for Testing Materials*, 1958, pp. 17-36.
2. l'HERMITE, R. G.: Volume changes of concrete, *Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement*, Washington, D. C., 1960. Vol. I, pp. 659-694.
3. LEA, F. M.: *The chemistry of cement and concrete*. Edward Arnold (Publishers) Ltd. Second edition, 1956, p. 351.
4. LAVOISIER, A. L.: Analyse du Gypse, *Mémoires de mathématique et de physique, Académie des sciences*, Paris, 1768, Vol. 5, pp. 341-351. (read to the Académie des sciences, Paris, on February 25, 1765).

5. LE CHATELIER, H.: Experimental researches on the constitution of hydraulic mortars, *Comptes rendus*, 1882, Vol. 94, p. 13.
6. MICHAELIS, W.: Der Zement-Bacillus, *Tonindustrie Zeitung*, 1892, Vol. 16, pp. 105-106.
7. JESSER, L.: Kolloidchemische Reaktionen des Tonerdezementmörtels, *Zement*, 1927, Vol. 16, pp. 741-746.
8. BRUNUER, S., EMMET, P. H. and TELLER, E.: Absorption of gases in multimolecular layers, *Journal of the American Chemical Society*, 1938, Vol. 60, p. 309.
9. POWERS, T. C. and BROWNYARD, T. L.: Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste, *Journal of the American Concrete Institute*, October, November, and December 1946, and January, February, March, April, 1947. *Proc.*, Vol. 43, pp. 101-132, 249-342, 469-504, 549-595, 669-712, 845-880, 933-992.
10. LEA, F. M.: Cement Research: Retrospect and Prospect. *Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement*, Washington, D. C., 1960, Vol. I, p. 5.
11. BRUNAUER, S.: Tobermorite gel - the heart of concrete. *American Scientist*, 1962, Vol. 50, p. 210.
12. BRUNAUER, S.: *Some aspects of the physics and chemistry of cement*. Bulletin 80. Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association, 1957.
13. BERNAL, J. D.: The structure of cement hydration compounds. *Third International Symposium on the Chemistry of Cement*, London, 1952, pp. 216-236.
14. MEGAW, H. D. and KELSEY, C. H.: The crystal structure of tobermorite. *Nature*, London, 1956, Volumen 177, p. 390.
15. POWERS, T. C.: The nonevaporable water content of hardened Portland-cement paste - its significance for concrete research and its method of determination. Bulletin 29. Research and Development Laboratories of Portland-Cement Association, June 1949.
16. POWERS, T. C.: *The Chemistry of Cements*. Chapter 10, edited by Taylor, H. F. W., Academic Press, 1964.
17. VERBECK, G. J.: *Hardened concrete — pore structure*, Bulletin 73. Research and Development Laboratories of Portland Cement Association, August 1956.
18. COPELAND, I. E.: *Specific volume of evaporable water in hardened Portland cement pastes*, Bulletin 75. Research and Development Laboratories of Portland Cement Association, July 1956.
19. PICKETT, G.: *Research reports of the Portland Cement Association Research Laboratories*, Appendix 3, July 1942 (unpublished).
20. POWERS, T. C.: Cause and control of volume changes, *Journal of the Portland Cement Association Research and Development Laboratories*, January 1959, Vol. 1, pp. 29-39.
21. KALOUSEK, G. L.: Fundamental factors in the drying shrinkage of concrete block, *Journal of the American Concrete Institute*, November 1954, Vol. 51, pp. 233-248.
22. NEVILLE, A. M.: *Properties of concrete*, John Wiley and Sons, 1963.
23. SWAYZE, M. A.: Discussion on Ref. (2), 1960, pp. 700-702.
24. CARLSON, R. W.: Drying shrinkage of large concrete members, *Journal of the American Concrete Institute*, January-February 1937, Vol. 33, pp. 327-336.
25. PICKETT, G.: *Effect of aggregate on shrinkage of concrete hypothesis concerning shrinkage*, Bulletin 66, Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association, February 1956.
26. POWERS, T. C.: Discussion on Mechanisms of Creep in Concrete, by Ali, I. and Kesler, C. E. given orally at 60th Annual American Concrete Institute Convention, Texas, March 4, 1964.
27. TROXELL, G. E., RAPHAEL, J. M. and DAVIS, R. E.: Longtime creep and shrinkage tests of plain and reinforced concrete, *Proceedings of the American Society for Testing Material*, 1958, Vol. 58, pp. 1101-1120.
28. ROSS, A. D.: Shape, size and shrinkage, *Concrete and Constructional Engineering*, August 1944, Vol. 39, pp. 193-199.
29. HRENNIKOFF, A.: Shrinkage, swelling and creep in concrete, *Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers*, 1959, vol. 85, No. EM 3, Part I.
30. MEHTA, P. K.: A review of development and chemistry of expansive cements, *Pit and Quarry*, November 1965, Vol. 58, pp. 113-120.