

Capítulo 1

Fundamentos del Concreto

El concreto (hormigón) es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada, piedra machacada, pedrejón), creando una masa similar a una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química del cemento con el agua (Fig. 1-1). Otros materiales cementantes (cementicios, cementosos) y adiciones minerales se pueden incluir en la pasta*.

Generalmente los agregados (áridos) se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos pueden ser arena natural o artificial (manufacturadas) con partículas de hasta 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ pulg.); agregados gruesos son las partículas retenidas en la malla 1.18 mm (tamiz no.16) y pueden llegar hasta 150 mm (6 pulg.). El tamaño máximo del agregado grueso comúnmente empleado es 19 mm o 25 mm ($\frac{3}{4}$ pulg. o 1 pulg.). Un agregado de tamaño interme-



Fig. 1-1. Componentes del concreto: cemento, agua, agregado fino, agregado grueso, son combinados para formar el concreto. (IMG12501)

* El texto está dirigido para la utilización del cemento portland en la producción del concreto. El término "cemento portland" se refiere al cemento hidráulico de silicato de calcio, producido por el calentamiento de los materiales que contienen calcio, silicio, aluminio y hierro. El término "cemento" usado a lo largo del texto se refiere al cemento portland o al cemento adicionado (mezclado o compuesto), a menos que se señale de otra manera. El término materiales cementantes significa cemento portland o cemento adicionado, usados con o sin materiales cementantes suplementarios.

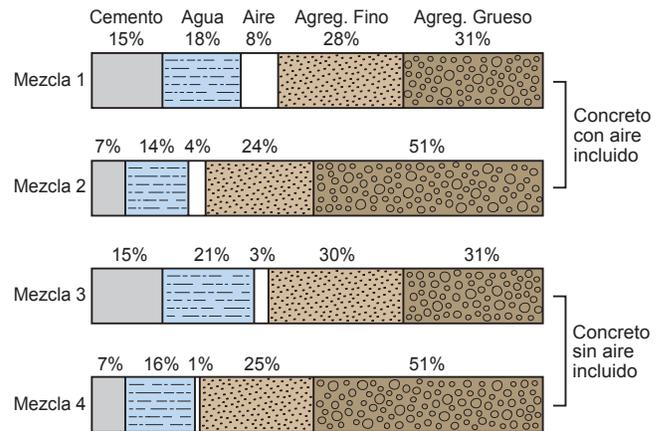


Fig. 1-2. Variación de las proporciones usadas en concreto, en volumen absoluto. Las barras 1 y 3 representan mezclas ricas con agregados de pequeño tamaño. Las barras 2 y 4 representan mezclas pobres con agregados gruesos grandes.

dio, cerca de 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ pulg.) es, algunas veces, adicionado para mejorar la granulometría general del agregado.

La pasta se compone de materiales cementantes, agua y aire atrapado o aire incluido (intencionalmente incorporado). La pasta constituye aproximadamente del 25% hasta 40% del volumen total del concreto. La Figura 1-2 muestra que el volumen absoluto del cemento está normalmente entre 7% y 15% y el volumen del agua está entre 14% y 21%. El contenido de aire atrapado varía del 4% hasta 8% del volumen.

Como los agregados constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del concreto, su selección es muy importante. Los agregados deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición y no deben contener materiales que puedan causar deterioro del concreto. La granulometría continua de tamaños de partículas es deseable para el uso eficiente de la pasta. A lo largo de este texto, se asumirá que se usan agregados apropiados, a menos que se señale de otra manera.

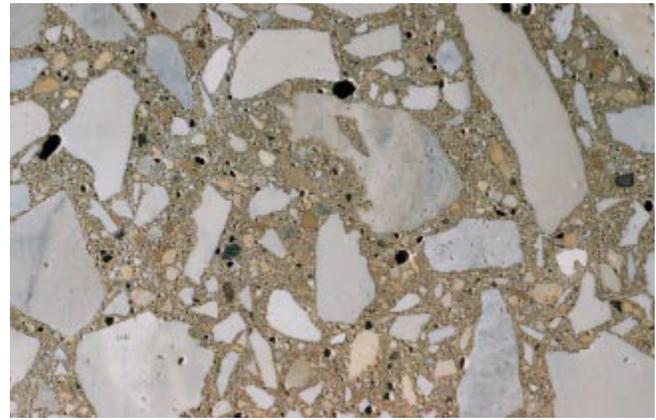
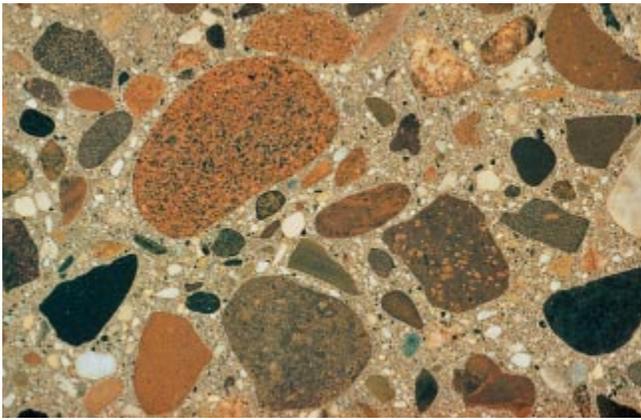


Fig. 1-3. Sección transversal del concreto endurecido, confeccionado con grava redondeada de silicio (izquierda) y calcáreo triturado (derecha). La pasta de cemento y agua cubre completamente cada partícula de agregado y llena todos los espacios entre las partículas. (IMG12297, IMG12298)

La calidad del concreto depende de la calidad de la pasta y del agregado y de la unión entre los dos. En un concreto adecuadamente confeccionado, cada y toda partícula de agregado es completamente cubierta por la pasta y todos los espacios entre las partículas de agregados se llenan totalmente con pasta, como se enseña en la Figura 1-3.

Para cualquier grupo de materiales y condiciones de curado, la calidad del concreto endurecido es fuertemente influenciada por la cantidad de agua usada con relación a la cantidad de cemento (Fig. 1-4). Cuando grandes cantidades de agua son innecesariamente empleadas, ellas diluyen la pasta de cemento (la cola o pegamento del concreto). Las ventajas de la disminución de la cantidad de agua son:

- Aumento de la resistencia a la compresión (resistencia en compresión) y de la resistencia a flexión
- Disminución de la permeabilidad, entonces disminución de la absorción y aumento de la estanquidad (hermeticidad)

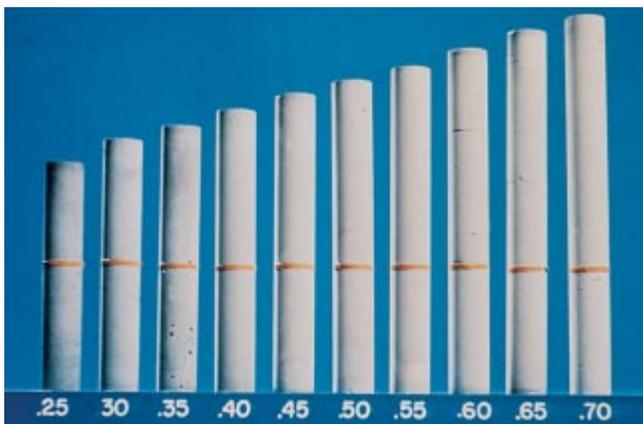


Fig. 1-4. Diez cilindros de pasta de cemento con relaciones agua-cemento de 0.25 a 0.70. La faja indica que cada cilindro contiene la misma cantidad de cemento. El aumento del agua, diluye el efecto de la pasta de cemento, aumentando el volumen, reduciendo la masa volumétrica y disminuyendo la resistencia.

- Aumento de la resistencia a la intemperie
- Mejor unión entre concreto y armadura
- Reducción de la contracción (retracción, encogimiento) y de la fisuración (agrietamiento, fisuramiento)
- Menores cambios de volumen causado por el humedecimiento y el secado

Cuanto menos agua se usa, mejor es la calidad del concreto, si es que la mezcla se puede consolidar adecuadamente. Menores cantidades de agua de mezcla (mezclado) resultan en mezclas más rígidas (secas); pero, con vibración, aún las mezclas más rígidas pueden ser fácilmente colocadas. Por lo tanto, la consolidación por vibración permite una mejoría de la calidad del concreto.

Tanto las propiedades del concreto fresco (plástico) como del concreto endurecido se pueden cambiar con la adición al concreto de aditivos químicos, normalmente en la forma líquida, durante la dosificación. Los aditivos químicos comúnmente se emplean para (1) el ajuste del tiempo de fraguado o de endurecimiento, (2) la reducción de la demanda de agua, (3) el aumento de la trabajabilidad (manejabilidad, docilidad), (4) la inclusión intencional de aire y (5) el ajuste de otras propiedades del concreto fresco o endurecido.

Después de terminar el proporcionamiento, dosificación, colocación (hormigonado, puesta, colado), consolidación, acabado (terminación, acabado) y curado adecuados, el concreto se endurece, se transforma en un material no-combustible, durable, resistente a la abrasión e impermeable lo cual requiere poca o ninguna conservación (mantenimiento). Además, el concreto es un excelente material de construcción porque se lo puede moldear en una gran variedad de formas, colores y texturas para ser utilizado en un número ilimitado de aplicaciones.

CONCRETO RECIÉN MEZCLADO

El concreto recién mezclado (amasado) debe ser plástico o semifluido y generalmente capaz de ser moldeado a mano. Una mezcla de concreto muy húmeda se puede moldear en

el sentido de que puede colarse (colocarse) en el molde o cimbras (encofrado), pero no está dentro de la definición de “plástico” – aquél que es flexible y capaz de ser moldeado de la misma manera que un terrón de arcilla para moldear.

En una mezcla plástica de concreto todos los granos de arena y las partículas de grava o piedra son envueltos y sostenidos en suspensión. Los ingredientes no son propensos a la segregación durante el transporte; y cuando el concreto se endurece, se transforma en una mezcla homogénea de todos los componentes. Durante la colocación, el concreto de consistencia plástica no se desmorona, mas fluye lentamente sin segregarse.

En la práctica de la construcción, las piezas o elementos muy delgados de concreto y fuertemente armados (reforzados) requieren mezclas trabajables para facilitar su colocación, pero no con consistencia muy fluida. Es necesaria una mezcla plástica para la resistencia y el mantenimiento de la homogeneidad durante el manejo y la colocación. Como una mezcla plástica es apropiada para la mayoría de las obras en concreto, se pueden usar los aditivos plastificantes (fluidificantes) para que el concreto fluya más fácilmente en elementos delgados y fuertemente reforzados.

Mezclado

La Figura 1-1 muestra separadamente los componentes básicos del concreto. Son necesarios esfuerzo y cuidado para que se asegure que la combinación de estos elementos sea homogénea. La secuencia de carga de los ingredientes en la mezcladora (hormigonera) puede desempeñar un papel importante en la uniformidad del producto acabado. La secuencia, sin embargo, puede variar y aún producir un concreto de buena calidad. Las diferentes secuencias requieren ajustes en el momento de la adición del agua, el número total de revoluciones del tambor de la mezcladora y la velocidad de la revolución (rotación). El volumen del concreto mezclado en relación con el tamaño del tambor de la mezcladora, el tiempo transcurrido entre el proporcionamiento y el mezclado, y el diseño, configuración y condiciones del tambor y de las paletas de la mezcladora son otros factores importantes en el mezclado. Las mezcladoras aprobadas, correctamente operadas y conservadas garantizan un intercambio de materiales de extremo a extremo a través de la acción del rolado, plegado y mezclado (amasado) del volumen del concreto sobre si mismo mientras que el concreto se mezcla.

Trabajabilidad

La facilidad de colocación, consolidación y acabado del concreto fresco y el grado que resiste a la segregación se llama trabajabilidad. El concreto debe ser trabajable pero los ingredientes no deben separarse durante el transporte y el manejo (Fig. 1-5).

El grado de la trabajabilidad que se requiere para una buena colocación del concreto se controla por los métodos de colocación, tipo de consolidación y tipo de concreto. Los

diferentes tipos de colocación requieren diferentes niveles de trabajabilidad.

Los factores que influyen en la trabajabilidad del concreto son: (1) el método y la duración del transporte; (2) cantidad y características de los materiales cementantes; (3) consistencia del concreto (asentamiento en cono de Abrams o revenimiento); (4) tamaño, forma y textura superficial de los agregados finos y gruesos; (5) aire incluido (aire incorporado); (6) cantidad de agua; (7) temperatura del concreto y del aire y (8) aditivos. La distribución



Fig. 1-5. El concreto de buena trabajabilidad debería fluir lentamente hacia el lugar, sin segregación. (IMG12299)

uniforme de las partículas de agregado y la presencia de aire incorporado ayudan considerablemente en el control de la segregación y en la mejoría de la trabajabilidad. La Figura 1-6 enseña el efecto de la temperatura de colocación sobre la consistencia o revenimiento (asentamiento en cono de abrams) y sobre la trabajabilidad potencial de las mezclas.

Las propiedades relacionadas con la trabajabilidad incluyen consistencia, segregación, movilidad, bombeabilidad, sangrado (exudación) y facilidad de acabado. La consistencia es considerada una buena indicación de trabajabilidad. El revenimiento (asentamiento en cono de abrams) se usa como medida de la consistencia y de la humedad del concreto. Un concreto de bajo revenimiento

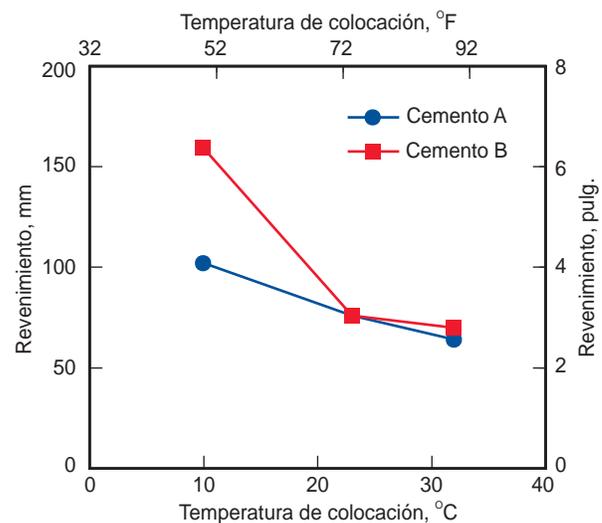


Fig. 1-6. Efecto de la temperatura de colocación (hormigonado o puesta en obra) en el revenimiento (asentamiento en cono de abrams) (y la trabajabilidad relativa) de dos concretos confeccionados con diferentes cementos. (Burg 1996)

tiene una consistencia rígida o seca. Si la consistencia es muy seca y rígida, la colocación y compactación del concreto serán difíciles y las partículas más grandes de agregados pueden separarse de la mezcla. Sin embargo, no debe suponerse que una mezcla más húmeda y fluida es más trabajable. Si la mezcla es muy húmeda, pueden ocurrir segregación y formación de huecos. La consistencia debe ser lo más seca posible para que aún se permita la colocación empleándose los equipos de consolidación disponibles. Véase Powers (1932) y Scanlon (1994).

Sangrado y Asentamiento

Sangrado (exudación) es el desarrollo de una lámina de agua en el tope o en la superficie del concreto recién colocado. Es causada por la sedimentación (asentamiento) de las partículas sólidas (cemento y agregados) y simultáneamente la subida del agua hacia la superficie (Fig. 1-7). El sangrado es normal y no debería disminuir la calidad del concreto adecuadamente colocado, acabado y curado. Un poco de sangrado es útil en el control de la fisuración por contracción (retracción) plástica. Por otro lado, si es excesiva aumenta la relación agua-cemento cerca de la superficie; puede ocurrir una capa superficial débil y con poca durabilidad, particularmente si se hace el acabado cuando el agua de sangrado aún está presente. Los vacíos y bolsas de agua pueden ocurrir, resultantes del acabado prematuro de la superficie.

Después que toda el agua de sangrado (exudación) se evapore, la superficie endurecida va a quedar un poco más baja que la superficie recién colocada. Esta disminución de la altura desde el momento de la colocación (puesta, colado) hasta el inicio del fraguado se llama contracción (retracción) por sedimentación.

La tasa de sangrado (exudación) y la capacidad de sangrado (sedimentación total por unidad de peso del concreto original) aumentan con la cantidad inicial de agua, altura del elemento de concreto y presión. El uso de agregados de granulometría adecuada, ciertos aditivos químicos, aire incluido, materiales cementantes suplementarios y cementos más finos reducen el sangrado. El

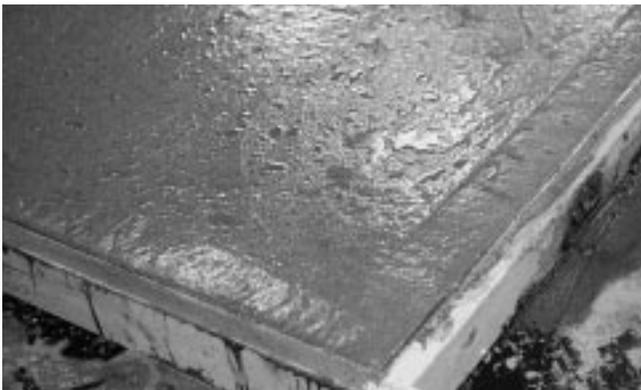


Fig. 1-7. Agua de sangrado (exudación) en la superficie del concreto recién colado en la losa. (IMG12300)

concreto usado para rellenar vacíos, proporcionar soporte o proporcionar impermeabilidad con una buena adhesión debe presentar bajo sangrado para evitar formación de bolsas de agua. Consulte Powers (1939), Steinour (1945) y Kosmatka (1994).

Consolidación

La vibración mueve las partículas del concreto recién mezclado, reduce el rozamiento (fricción) entre ellas y les da la movilidad de un fluido denso. La acción vibratoria permite el uso de mezclas más rígidas con mayores proporciones de agregado grueso y menores proporciones de agregados finos. Si el agregado es bien graduado, cuanto mayor es su tamaño máximo, menor es el volumen para llenarse por la pasta y menor es el área superficial para ser cubierta por la pasta, así menos agua y cemento son necesarios. El concreto con la granulometría óptima del agregado es más fácil de consolidarse y colocarse (Fig. 1-8, izquierda). La consolidación del agregado grueso, bien como de mezclas más rígidas mejoran la calidad y la economía. Por otro lado, la mala consolidación puede resultar en un concreto poroso y débil (Fig. 1-9) con poca durabilidad (Fig. 1-8, derecha).



Fig. 1-8. Una buena consolidación (superior) es necesaria para lograrse un concreto denso y durable. Una consolidación pobre (inferior) puede resultar en corrosión temprana de la armadura (refuerzo) y baja resistencia a compresión. (IMG12491, IMG12490)

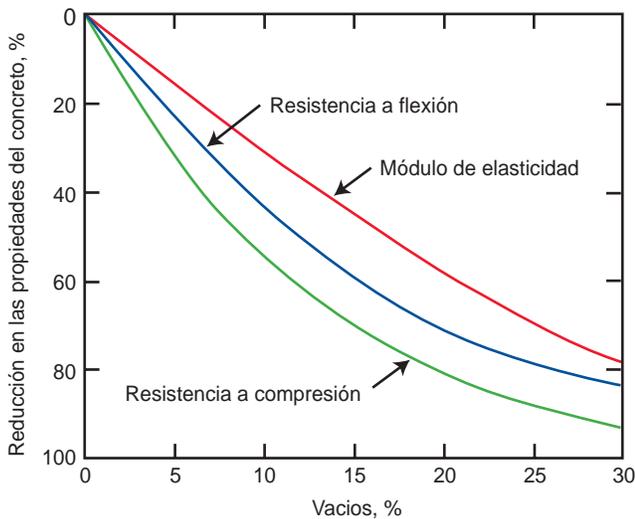


Fig. 1-9. Efecto de los vacíos, resultantes de la carencia de consolidación, sobre el módulo de elasticidad, resistencia a compresión y resistencia a flexión del concreto.



Fig. 1-10. Concreto con consistencia rígida (bajo asentamiento o bajo revenimiento) en cono de Abrams o cono de revenimiento). (IMG12291)

La vibración mecánica tiene muchas ventajas. Los vibradores permiten una colocación económicamente viable de mezclas que no se pueden consolidar manualmente bajo muchas condiciones. Por ejemplo, la Figura 1-10 presenta un concreto con consistencia rígida (bajo revenimiento). Este concreto se vibró mecánicamente en las cimbras, conteniendo armadura (refuerzo) poco espaciada. Para una consolidación con varilla (vara) manual, sería necesaria una consistencia bastante más húmeda.

Hidratación, Tiempo de Fraguado y Endurecimiento

La calidad de unión (adhesión, adherencia) de la pasta de cemento portland se debe a las reacciones químicas entre el cemento y el agua, conocidas como hidratación.

El cemento portland no es un compuesto químico sencillo, es una mezcla de muchos compuestos. Cuatro de ellos totalizan 90% o más del peso del cemento portland: silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico y ferroatluminato tetracálcico (aluminio ferrito tetracálcico). Además de estos compuestos principales, muchos otros desempeñan un papel importante en el proceso de hidra-

tación. Cada tipo de cemento portland contiene los mismos cuatro compuestos principales, pero en proporciones diferentes.

Cuando se examina el clínker (clinker) (el producto del horno que se muele para fabricar el cemento portland) al microscopio, la mayoría de sus compuestos individuales se puede identificar y sus cantidades se pueden determinar. Sin embargo, los granos más pequeños no se pueden detectar visualmente. El promedio del diámetro de las partículas de un cemento típico es aproximadamente 15 micrómetros. Si todas las partículas tuviesen este diámetro promedio, el cemento portland contendría aproximadamente 300 billones de partículas por kilogramo, pero en realidad, existen unos 16,000 billones de partículas por kilogramo, debido a la amplia variación del tamaño de las partículas. Las partículas en un kilogramo de cemento portland tienen un área superficial de aproximadamente 400 metros cuadrados.

Los dos silicatos de calcio, los cuales constituyen 75% del peso del cemento portland, reaccionan con el agua para formar dos compuestos: hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado (hidrato de silicato de calcio). Este último es, sin duda, el más importante compuesto del concreto. Las propiedades de ingeniería del concreto – fraguado y endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional – dependen principalmente del silicato de calcio hidratado. Éste es el corazón del concreto.

La composición química del silicato de calcio hidratado es un tanto variable, pero contiene cal (CaO) y dióxido de silicio (SiO_2) en una proporción de 3 a 2. El área superficial del silicato de calcio hidratado es unos 300 metros cuadrados por gramo. En pastas endurecidas de cemento, el silicato de calcio hidratado forma un vínculo denso entre las otras fases cristalinas y los granos de cemento aún no hidratados; también se adhiere a los granos de arena y a los agregados gruesos, cementándolo todo junto (Copeland y Schulz, 1962).

Mientras el concreto se endurece, su volumen bruto permanece casi inalterado, pero el concreto endurecido contiene poros llenos de agua y aire, los cuales no tienen resistencia. La resistencia está en las partes sólidas de la pasta, sobre todo en el silicato de calcio hidratado y en los compuestos cristalinos.

Cuanto menos porosa es la pasta de cemento, más resistente es el concreto. Por lo tanto, al mezclarse el concreto, no se debe usar más agua que aquella estrictamente necesaria para obtenerse un concreto plástico y trabajable. Incluso, la cantidad de agua usada es normalmente mayor que la necesaria para la hidratación completa del cemento. Aproximadamente se necesitan 0.4 gramos de agua por gramo de cemento para la hidratación completa del cemento (Powers 1948 y 1949). Sin embargo, la hidratación completa es rara en los concretos de las obras, debido a una falta de humedad y al largo periodo de tiempo (décadas) que se requiere para obtener la hidratación total.

El conocimiento de la cantidad de calor liberado por la hidratación del cemento puede ser útil para el planeamiento de la construcción. En invierno, el calor de hidratación va a ayudar a proteger el concreto contra los daños causados por las temperaturas muy bajas. Sin embargo, el calor puede ser perjudicial, como por ejemplo en estructuras masivas, tales como las presas, pues puede producir temperaturas diferenciales indeseables.

El conocimiento de la velocidad de reacción entre el cemento y el agua es importante porque determina el tiempo de fraguado y endurecimiento. La reacción inicial debe ser suficientemente lenta para que haya tiempo para transportar y colocar el concreto. Una vez que el concreto ha sido colocado y acabado, es deseable un endurecimiento rápido. El yeso, que se añade en el molino de cemento cuando al molerse el clínker, actúa como un regulador del fraguado inicial del cemento portland. La finura del cemento, aditivos, cantidad de agua adicionada y temperatura de los materiales en el momento de la mezcla son otros factores que influyen la tasa (velocidad) de hidratación. La Figura 1-11 muestra las propiedades de fraguado de mezclas de concreto en diferentes temperaturas.

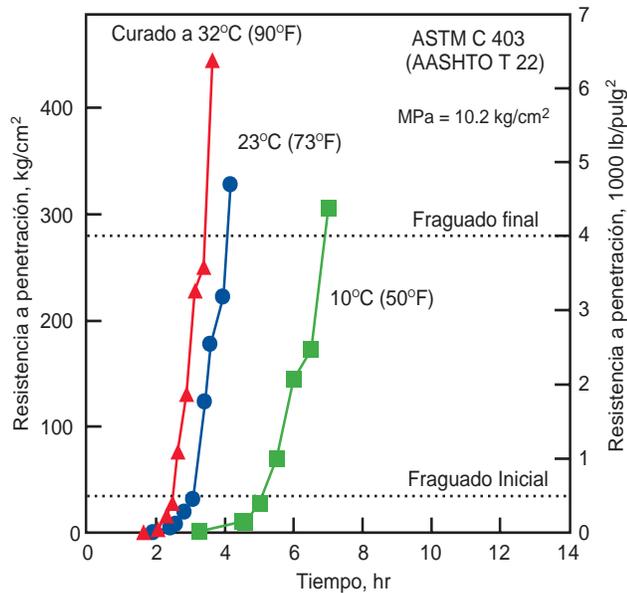


Fig. 1-11. Tiempo de inicio y fin de fraguado para una mezcla de concreto en diferentes temperaturas (Burg 1996).

CONCRETO ENDURECIDO

Curado

El aumento de la resistencia con la edad continúa desde que (1) el cemento no hidratado aún esté presente, (2) el concreto permanezca húmedo o la humedad relativa del aire esté arriba de aproximadamente 80% (Powers 1948), (3) la temperatura del concreto permanezca favorable y (4) haya suficiente espacio para la formación de los productos

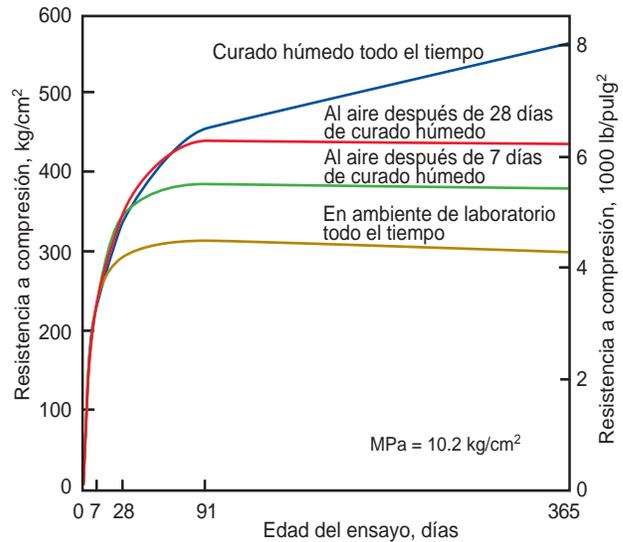


Fig. 1-12. La resistencia del concreto aumenta con la edad, desde que haya adecuada humedad y temperatura favorable para la hidratación del cemento (Gonnerman y Shuman 1928).

de hidratación. Cuando la humedad relativa dentro del concreto baja hasta cerca de 80% o la temperatura del concreto baja para menos del cero, la hidratación y la ganancia de resistencia se interrumpen. La Figura 1-12 enseña la relación entre incremento de resistencia y curado húmedo, mientras que la Figura 1-13 muestra la relación entre el aumento de resistencia y la temperatura del curado.

Si se vuelve a saturar el concreto después del periodo de secado (deseccación), la hidratación empieza nueva-

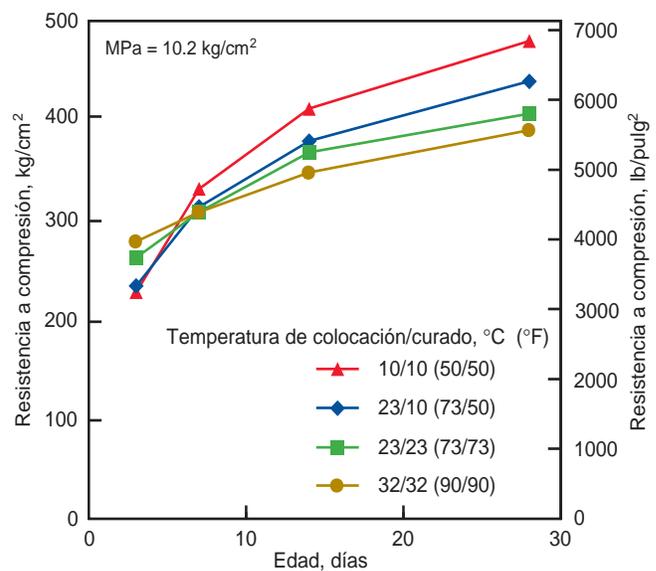


Fig. 1-13. Efecto de la temperatura de colocación y de curado sobre el desarrollo de la resistencia. Observe que las temperaturas más frías resultan en resistencias tempranas menores y resistencias mayores a altas edades.

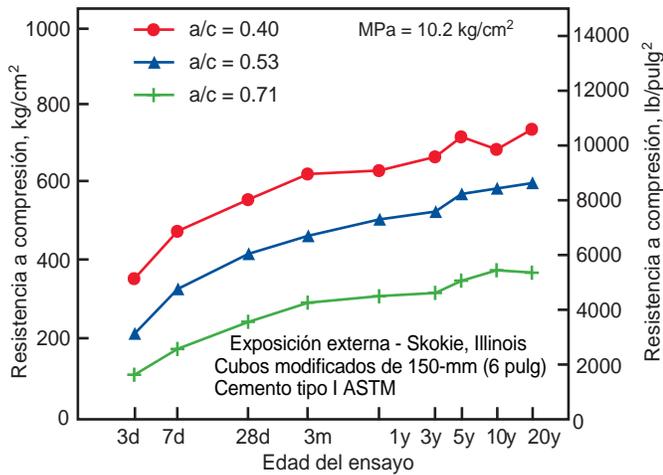


Fig. 1-14. Desarrollo de la resistencia del concreto a lo largo del tiempo de exposición al aire libre. El concreto continúa a desarrollar resistencia por muchos años siempre que la humedad sea aportada por la lluvia u otras fuentes medioambientales (Wood 1992).

mente y la resistencia vuelve a aumentar. Sin embargo, es mucho mejor que el curado húmedo sea aplicado continuamente desde el momento de la colocación hasta que el concreto haya alcanzado la calidad deseada; una vez que el concreto se haya secado completamente, es muy difícil volver a saturarlo. La Figura 1-14 ilustra el aumento de resistencia de un concreto expuesto al aire libre por un periodo largo de tiempo. La exposición al aire libre normalmente proporciona humedad a través del contacto con el suelo y la lluvia. Los concretos en ambientes internos normalmente secan completamente después del curado y no continúan desarrollando resistencia (Fig. 1-12).

Velocidad de Secado del Concreto

El concreto no se endurece o se cura con el secado. El concreto (o más precisamente el cemento en él) necesita de humedad para hidratarse y endurecerse. Cuando el concreto se seca, la resistencia para de crecer; el hecho es que el secado no indica que haya ocurrido suficiente hidratación para que se obtengan las propiedades físicas deseables.

El conocimiento de la velocidad de desecación (tasa de secado) es útil para el entendimiento de las propiedades o condiciones físicas del concreto. Por ejemplo, como se mencionó, el concreto necesita tener suficiente humedad durante el periodo de curado para que el concreto se hidrate hasta que se puedan lograr las propiedades deseables. Los concretos recién colocados normalmente tienen abundancia de agua, pero a medida que el secado progresa de la superficie hacia el interior del concreto, el aumento de resistencia continúa solo hasta cada profundidad, desde que la humedad relativa en aquella profundidad permanezca arriba de los 80%.

Un buen ejemplo de esto es la superficie de los pisos en concreto que no tuvo suficiente curado húmedo. Como se ha secado rápidamente, el concreto en la superficie es débil y el tráfico sobre él crea polvo. Así también, al secarse, el concreto se retrae por la pérdida de agua (Fig. 1-15), de la misma manera que ocurre con la madera y la arcilla (pero no tanto). La contracción (retracción) por secado es la principal causa de fisuración y el ancho de las fisuras (grietas, rajaduras) es función del grado de desecación, espaciamiento y frecuencia de las fisuras y edad de la aparición de las fisuras.

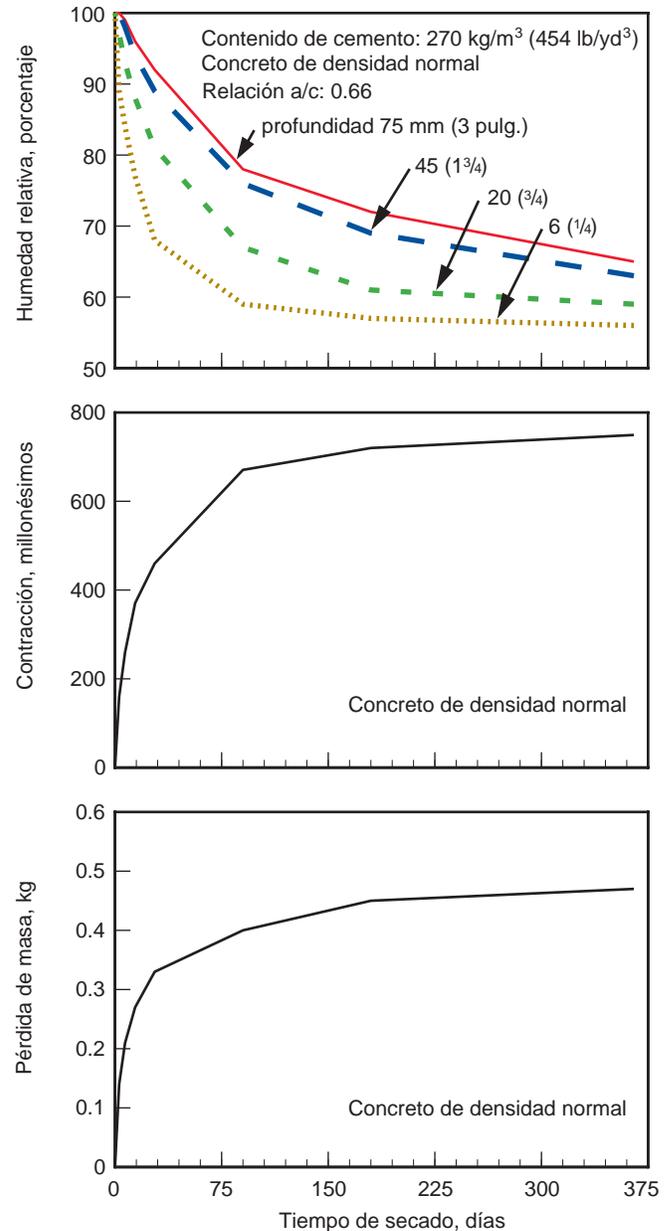


Fig. 1-15. Distribución de la humedad relativa, retracción (contracción, encogimiento) por secado (desecación) y pérdida de masa de cilindros de 150 x 300-mm (6 x 12-pulg.) sometidos a curado húmedo por 7 días y posteriormente al secado al aire del laboratorio a 23°C (73°F) (Hanson 1968).

Mientras que la superficie del elemento de concreto se seca rápidamente, mucho más tiempo es necesario para el secado de su interior. La Figura 1-15 (superior) muestra la tasa de secado en varias profundidades en cilindros de concreto expuestos al ambiente de laboratorio. Los miembros de concreto en el campo tendrían perfiles de secado distintos debido a las condiciones ambientales, los efectos del tamaño y las propiedades del concreto.

La cantidad de humedad en el concreto depende de sus componentes, cantidad original de agua, condiciones de secado y el tamaño del miembro de concreto (Hedenblad 1997 y 1998). Después de varios meses de secado al aire con humedad relativa del 50% al 90%, la cantidad de humedad es cerca del 1% al 2% del peso del concreto. La Figura 1-15 enseña la pérdida de humedad y la contracción resultante.

El tamaño y la forma de los miembros de concreto desempeñan un papel importante en la velocidad de secado. Los elementos con área superficial grande con relación a su volumen (como en los pisos) se secan mucho más rápidamente que los miembros con gran volumen de concreto y relativamente pequeñas áreas superficiales (como en los estribos de los puentes).

Muchas otras propiedades del concreto endurecido también son afectadas por la cantidad de humedad, tales como elasticidad, fluencia (flujo plástico, deformación diferida), valor de aislamiento, resistencia al fuego, resistencia a abrasión, conductividad eléctrica, resistencia al congelamiento (congelación), resistencia al descascaramiento (descascarillado, astilladura, desonchadura, despostilladura, engalletamiento y desmoronamiento) y resistencia a reactividad álcali-agregado.

Resistencia

La resistencia a compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto. Normalmente, se expresa en kilogramos por centímetros cuadrados (kg/cm^2), megapascuales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas (lb/pulg^2 o psi) a una edad de 28 días. Un megapascal equivale a la fuerza de un newton por milímetro cuadrado (N/mm^2) o 10.2 kilogramos-fuerza por centímetro cuadrado. Se pueden usar otras edades para las pruebas, pero es importante saber la relación entre la resistencia a los 28 días y la resistencia en otras edades. La resistencia a los 7 días normalmente se estima como 75% de la resistencia a los 28 días y las resistencias a los 56 y 90 días son aproximadamente 10% y 15% mayores que la resistencia a los 28 días, como se puede observar en la Figura 1-16. La resistencia a compresión especificada se designa con el símbolo f'_c y la resistencia a compresión real del concreto f_c debe excederla.

La resistencia a compresión que el concreto logra, f_c , es función de la relación agua-cemento (o relación agua-materiales cementantes), de cuanto la hidratación ha progresado, del curado, de las condiciones ambientales y de la

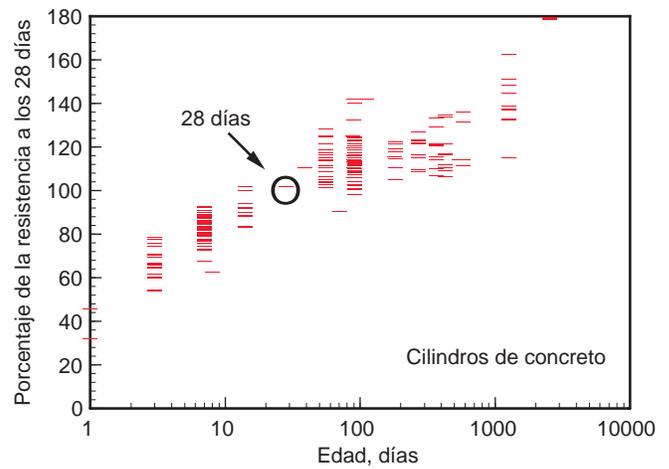


Fig. 1-16. Desarrollo de la resistencia a compresión de varios concretos, expresado como porcentaje de la resistencia a los 28 días (Lange 1994).

edad del concreto. La correspondencia entre resistencia y la relación agua-cemento ha sido estudiada desde el final del siglo XIX y principio del siglo XX (Ferret 1897 y Abrams 1918). La Figura 1-17 presenta las resistencias a compresión para una gran variedad de mezclas de concreto y relaciones agua-cemento a los 28 días de edad. Observe que las resistencias aumentan con la disminución de la relación agua-cemento. Estos factores también afectan la resistencia a flexión y la tracción y la adherencia entre concreto y acero.

La correspondencia entre relación agua-cemento y resistencia a compresión en la Figura 1-17 son valores típicos para concretos sin aire incluido. Cuando valores más precisos son necesarios, se deben desarrollar gráficos para

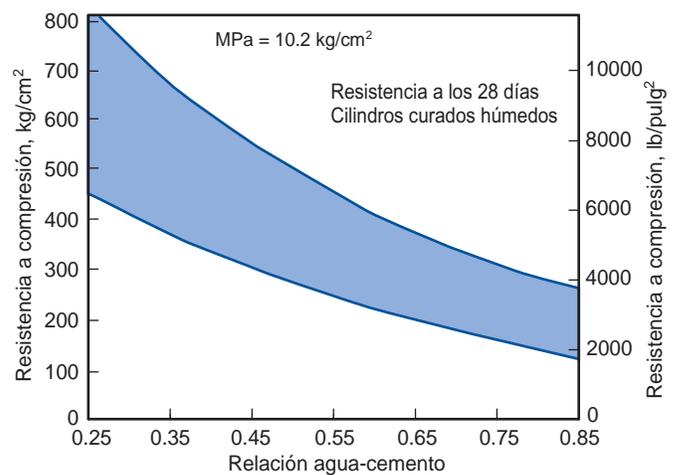


Fig. 1-17. Variación de resistencias típicas para relaciones agua-cemento de concreto de cemento portland basadas en más de 100 diferentes mezclas de concreto moldeadas entre 1985 y 1999.

materiales y proporciones de mezcla específicos para que sean usados en la obra.

Para una cierta trabajabilidad y un contenido de cemento, el concreto con aire incluido (incorporado) requiere menos agua de mezclado (amasado) que un concreto sin aire incluido. La posibilidad de empleo de relaciones agua-cemento menores en el concreto con aire incluido compensa las resistencias menores en estos concretos, especialmente en mezclas pobres o con medio contenido de cemento.

La determinación de la resistencia a compresión se obtiene a través de ensayos (experimentación, prueba) en probetas (muestras de prueba, muestras de ensayo, especímenes) de concreto o mortero. En los EE.UU., a menos que sea especificado de manera diferente, los ensayos en mortero se hacen en cubos de 50 mm (2 pulg.), mientras que los ensayos en concreto se realizan en cilindros de 150 mm (6 pulg.) de diámetro y 300 mm (12 pulg.) de altura (Fig. 1-18). Cilindros menores 100 x 200 mm (4 x 8 pulg.) también se pueden usar para el concreto.

La resistencia a compresión es una propiedad principalmente física y frecuentemente usada en los cálculos para diseño de puentes, edificios y otras estructuras. Los concretos para uso general tienen una resistencia a compresión entre 200 y 400 kg/cm² o 20 y 40 MPa (3000 y 6000 lb/pulg²). Concretos con resistencias a compresión de 700 y 1400 kg/cm² o 70 a 140 MPa (10,000 a 20,000 lb/pulg²) han sido empleados en puentes especiales y edificios altos.

La resistencia a flexión o el módulo de ruptura (rotura) se usa en el diseño de pavimentos u otras losas (pisos, placas) sobre el terreno. La resistencia a compresión, la cual es más fácil de medir que la resistencia a flexión, se puede usar como un índice de resistencia a flexión, una vez que la relación empírica entre ambas ha sido establecida para los materiales y los tamaños de los elementos involucrados. La resistencia a flexión de concretos de peso normal

es normalmente de 0.7 a 0.8 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en megapascales o de 1.99 a 2.65 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en kilogramos por centímetros cuadrados (7.5 a 10 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en libras por pulgadas cuadradas). Wood (1992) presenta la relación entre resistencia a flexión y resistencia a compresión para concretos expuestos a curado húmedo, curado al aire y exposición al aire libre.

La resistencia a la tensión (resistencia a tracción, resistencia en tracción) directa del concreto es aproximadamente de 8% a 12% de la resistencia a compresión y se estima normalmente como siendo de 0.4 a 0.7 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en megapascales o de 1.3 a 2.2 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en kilogramos por centímetro cúbico (5 a 7.5 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en libras por pulgada cuadrada). La resistencia a esfuerzos por cortante (cisallamiento, corte o cizalladura) es del 8% al 14% de la resistencia a compresión (Hanson 1968). La resistencia a tensión por cisallamiento en función del tiempo es presentada por Lange (1994).

La resistencia a torsión en el concreto está relacionada con el módulo de ruptura y las dimensiones de los miembros de concreto. Hsu (1968) presenta correlaciones para la resistencia a torsión.

Las correlaciones entre resistencia al cortante (corte) y resistencia a compresión se discuten en el ACI 318 código de construcción. La correlación entre resistencia a compresión y resistencia a flexión, tensión, torsión y cortante varía con los componentes del concreto y el medio ambiente.

El módulo de elasticidad, denotado por el símbolo E, se puede definir como la razón entre el esfuerzo normal a una deformación correspondiente para el esfuerzo de tensión o compresión abajo del límite de proporcionalidad del material. En concretos de peso normal, el E varía de 140,000 a 420,000 kg/cm² o de 14,000 a 41,000 MPa (2 a 6 millones de lb/pulg²) y puede ser aproximado a 15,500 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en kilogramos por centímetros cuadrados o 5,000 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en megapascales (57,000 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en libras por pulgada cuadrada). Como en otras relaciones de resistencia, la relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión es específica para una mezcla de ingredientes y se la debe verificar en el laboratorio (Word 1992).

Masa Volumétrica (Masa Unitaria, Densidad)

El concreto convencional, normalmente usado en pavimentos, edificios y otras estructuras, tiene masa volumétrica (masa unitaria, densidad) que varía de 2200 hasta 2400 kg/m³ (137 hasta 150 libras/piés³). La masa volumétrica del concreto varía dependiendo de la cantidad



Fig. 1-18. Ensayo a compresión de cilindro de concreto de 150 x 300-mm (6 x 12-pulg.). La carga en el ensayo es registrada en la carátula. (IMG12500)

Tabla 1-1. Promedio de las Masas Volumétricas Observadas para el Concreto Fresco (unidades del SI)*

Tamaño máximo del agregado, mm	Contenido de aire, porcentaje	Agua, kg/m ³	Cemento, kg/m ³	Masa específica, kg/m ^{3**}				
				Masa específica relativa del agregado †				
				2.55	2.60	2.65	2.70	2.75
19	6.0	168	336	2194	2227	2259	2291	2323
37.5	4.5	145	291	2259	2291	2339	2371	2403
75	3.5	121	242	2307	2355	2387	2435	2467

* Fuente: Bureau of Reclamation, 1981, Tabla 4.

** Concreto con aire incluido, con la cantidad de aire indicada.

† En condición saturada, con superficie seca. Multiplique la masa específica relativa del agregado por 1000 para obtenerse la masa específica de las partículas de agregado en kg/m³.

Tabla 1-1. Promedio de las Masas Volumétricas Observadas para el Concreto Fresco (unidades en pulgadas-libras)*

Tamaño máximo del agregado, pulgadas	Contenido de aire, porcentaje	Agua, lb/yd ³	Cemento, lb/yd ³	Masa específica relativa, lb/pies ^{3**}				
				Masa específica relativa del agregado †				
				2.55	2.60	2.65	2.70	2.75
¾	6.0	283	566	137	139	141	143	145
1½	4.5	245	490	141	143	146	148	150
3	3.5	204	408	144	147	149	152	154

* Fuente: Bureau of Reclamation, 1981, Tabla 4.

** Concreto con aire incluido, con la cantidad de aire indicada.

† En condición saturada, con superficie seca. Multiplique la masa específica relativa del agregado por 62.4 para obtenerse la masa específica de las partículas de agregado en libras por yardas cúbicas.

y la densidad del agregado, la cantidad de aire atrapado (ocluido) o intencionalmente incluido y las cantidades de agua y cemento. Por otro lado, el tamaño máximo del agregado influye en las cantidades de agua y cemento. Al reducirse la cantidad de pasta (aumentándose la cantidad de agregado), se aumenta la masa volumétrica. Algunos valores de masa volumétrica para el concreto fresco se presentan en la Tabla 1-1. En el diseño del concreto armado (reforzado), la masa volumétrica de la combinación del concreto con la armadura (refuerzo) normalmente se considera 2400 kg/m³ (150 libras/pie³).

El peso del concreto seco es igual al peso de los ingredientes del concreto fresco menos el peso del agua de mezclado evaporable. Parte del agua de la mezcla combina químicamente con el cemento durante el proceso de hidratación, transformando el cemento en un gel de cemento. Además, parte del agua permanece fuertemente retenida en los poros y en los capilares y no se evapora bajo las condiciones normales. La cantidad del agua de mezclado que se evaporará del concreto expuesto en un medio ambiente con humedad relativa del 50% es cerca del ½% al 3% del peso del concreto; la cantidad real depende del contenido inicial de agua, de las características de absorción de los agregados y del tamaño y forma de los miembros del concreto.

Aparte del concreto convencional, hay una gran cantidad de concretos especiales para atender a las más va-

riadas necesidades, los cuales varían de concretos aislantes ligeros (livianos) con masa volumétrica de 240 kg/m³ (15 libras por yarda cúbica) hasta los concretos pesados con masas volumétricas de 6000 kg/m³ (375 libras por yardas cúbicas), usados como contrapesos o blindajes contra radiación.

Permeabilidad y Estanquidad

El concreto usado en estructuras de retención de agua u expuestas a condiciones del tiempo u otras condiciones severas de exposición deben ser casi impermeables o estancas. La estanquidad (hermeticidad) es normalmente conocida como la habilidad del concreto en retener el agua sin escurrimiento o escape visible. La permeabilidad es la cantidad de agua que migra a través del concreto, mientras que el agua está bajo presión o la habilidad del concreto en resistir a la penetración del agua u otra sustancia (líquidos, gases o iones). Generalmente, la misma propiedad que hace el concreto menos permeable también lo hace más estanco.

La permeabilidad total del concreto al agua es función de: (1) la permeabilidad de la pasta; (2) la permeabilidad y la granulometría del agregado; (3) la calidad de la pasta y de la zona de transición del agregado y (4) la proporción relativa de pasta y agregado. La disminución de la permeabilidad aumenta la resistencia al congelamiento y deshielo del

concreto, la resaturación, la penetración de sulfatos y de iones cloruro y otros ataques químicos.

La permeabilidad de la pasta es particularmente importante pues la pasta cubre todos los componentes en el concreto. La permeabilidad es afectada por la relación agua-cemento, el grado de hidratación del cemento y el periodo del curado húmedo. Un concreto de baja permeabilidad requiere una relación agua-cemento baja y un periodo de curado adecuado. El aire incluido ayuda la estanquidad, pero tiene poco efecto sobre la permeabilidad. La permeabilidad aumenta con el secado.

La permeabilidad de una pasta de cemento endurecida, mantenida continuamente húmeda, varía de 0.1×10^{-12} hasta 120×10^{-12} cm por segundo, con relaciones agua-cemento que varían de 0.3 hasta 0.7 (Powers y otros 1954). La permeabilidad de la roca comúnmente usada como agregado para concreto varía de aproximadamente 1.7×10^{-9} hasta 3.5×10^{-13} cm por segundo. La permeabilidad de un concreto maduro, de buena calidad es aproximadamente 1×10^{-10} cm por segundo.

En la Figura 1-19 se enseña la dependencia entre permeabilidad, relación agua-cemento y curado inicial de cilindros de concreto con 100×200 (4 x 8 pulgadas), ensayados después de 90 días de secado al aire y sujetos a 200 kg/cm^2 o 20 MPa (3000 lb/pulg^2) de presión. A pesar de que los valores de permeabilidad serían diferentes para otros líquidos y gases, la dependencia entre relación agua-cemento, periodo de curado y permeabilidad sería similar.

La Figura 1-20 presenta los resultados obtenidos de las pruebas sometiendo discos de mortero sin aire incluido con 25 mm (1 pulg.) de espesor a 1.4 kg/cm^2 o 140 kPa

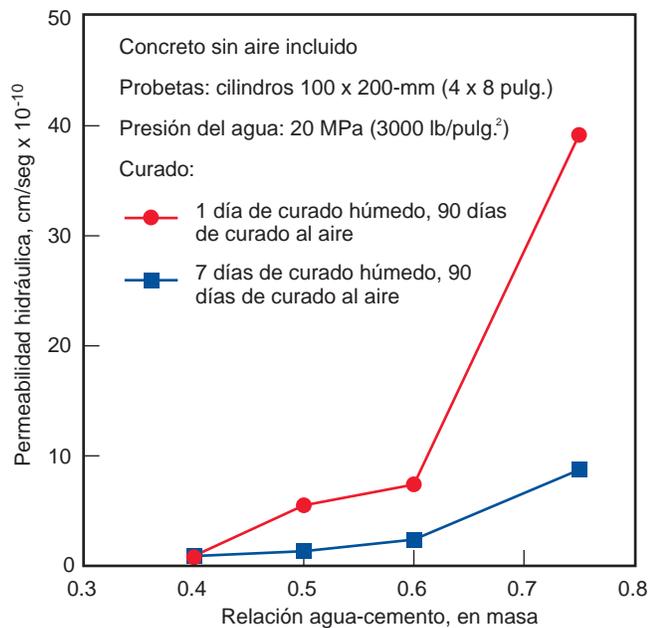


Fig. 1-19. Relación entre permeabilidad al agua, relación agua-cemento y curado inicial de la probeta de concreto (Whiting 1989).

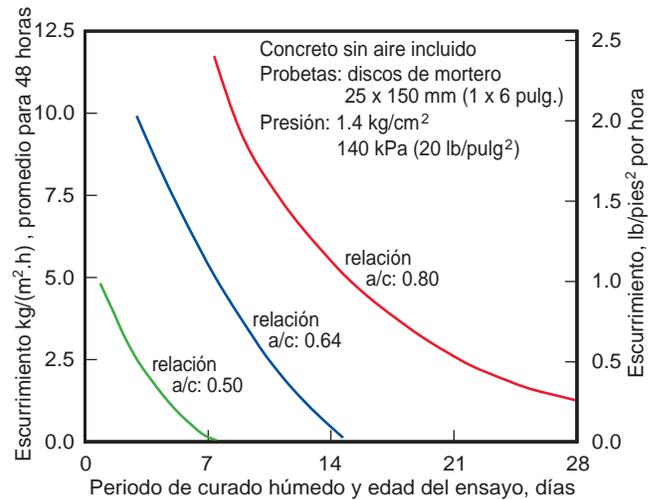


Fig. 1-20. Efecto de la relación agua-cemento y duración del curado sobre la permeabilidad del mortero. Observe que hay una disminución del escurrimiento con la reducción de la relación agua-cemento y con el aumento del periodo de curado (McMillian y Lyse 1929 y PCA Major Series 227).

(20 lb/pulg^2) de presión de agua. En estos ensayos (pruebas), no hubo escurrimiento a través de los discos de mortero con relación agua-cemento de 0.50 o menor, los cuales fueron curados con humedad por siete días. Cuando el escurrimiento ocurrió, fue mayor en los discos de mortero con relaciones agua-cemento mayores. También, para cada relación agua-cemento, el escurrimiento fue menor para periodos de curado mayores. En los discos con relación agua-cemento de 0.80, el mortero permitía escurrimiento incluso cuando el concreto había sido curado con humedad por un mes. Los resultados muestran claramente que baja relación agua-cemento y periodo de curado húmedo adecuado reducen grandemente la permeabilidad.

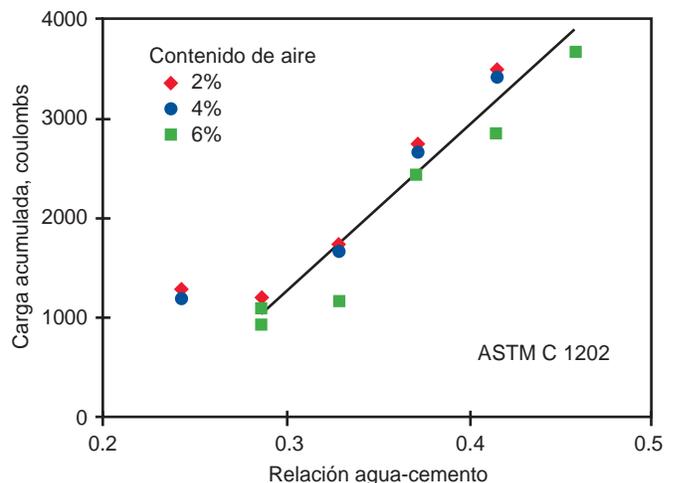


Fig. 1-21. Carga total en el final del ensayo acelerado de permeabilidad a los cloruros en función de la relación agua-cemento (Pinto y Hover 2001).

La Figura 1-21 ilustra el efecto de diferentes relaciones agua-cemento sobre la resistencia del concreto a la penetración de los iones de cloruro, como indicado por conductancia eléctrica. La carga total en coulombs ha sido considerablemente reducida con una baja relación agua-cemento. Los resultados también muestran que una carga más baja pasó cuando el concreto contenía mayor cantidad de aire incluido.

Una baja relación agua-cemento también reduce la segregación y el sangrado (exudación), además de contribuir para la estanquidad. Evidentemente, el concreto estanco no debe tener fisuras, huecos y vacíos visibles grandes.

Ocasionalmente, el concreto poroso—concreto sin finos que permite el pasaje del agua—se diseña para aplicaciones especiales. En estos concretos, la cantidad de agregado fino es muy reducida o eliminada completamente, produciendo un gran volumen de vacíos de aire. El concreto poroso ha sido usado en pistas (canchas) de tenis, pavimentos, aparcamientos, invernaderos y estructuras de drenaje. El concreto poroso también ha sido empleado en edificios debido a sus propiedades de aislamiento térmico.

Resistencia a Abrasión

Los pisos, pavimentos y estructuras hidráulicas son expuestos a abrasión o al desgaste, por lo que en estas aplicaciones el concreto necesita tener alta resistencia a abrasión. Los resultados de los ensayos (pruebas) indican

que la resistencia a abrasión está fuertemente relacionada con la resistencia a compresión del concreto. Un concreto con mayor resistencia a compresión tiene más resistencia a abrasión que el concreto con menor resistencia a compresión. Como la resistencia a compresión depende de la relación agua-cemento y curado, una relación agua-cemento baja y el curado adecuado se hacen necesarios para la resistencia a abrasión. El tipo de agregado y el acabado de la superficie o el tratamiento usado también tienen gran

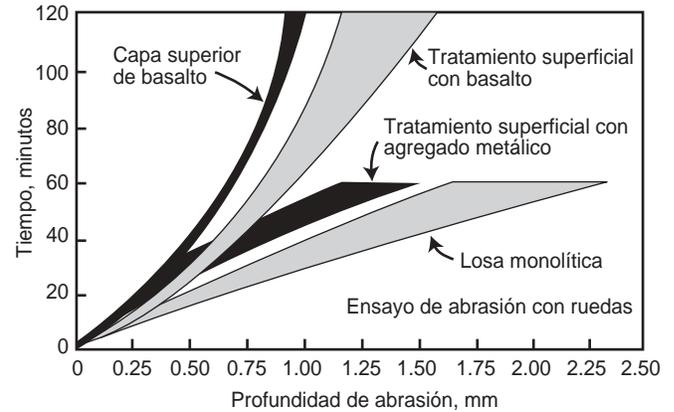


Fig. 1-23. Efecto del alisamiento y del tratamiento de la superficie sobre la resistencia a abrasión del concreto (ASTM C 779). La resistencia a compresión de la losa de la base era de 40 MPa (6000 lb/pulg²) a los 28 días. Todas las losas fueron alisadas con llanas de acero (Brinkerhoff 1970).

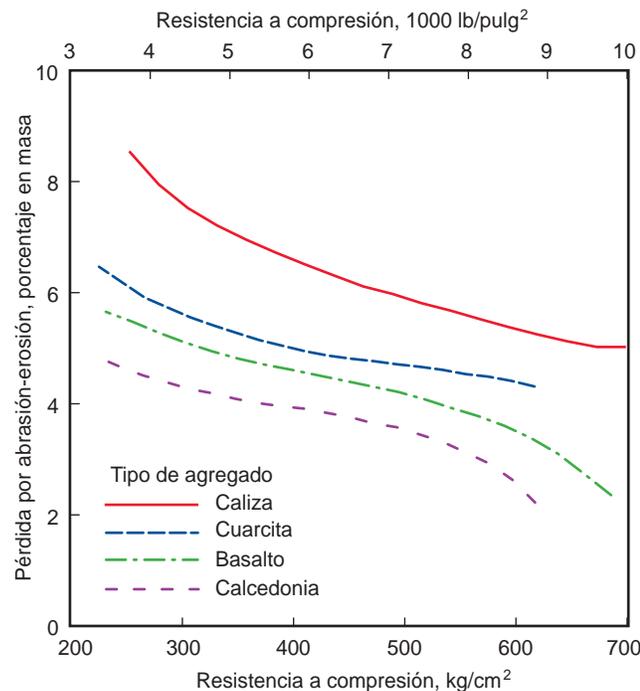


Fig. 1-22. Efecto de la resistencia a compresión y del tipo de agregado sobre la resistencia a abrasión del concreto (ASTM C 1138). El concreto de alta resistencia confeccionado con agregado duro es bastante resistente a abrasión (Liu 1981).

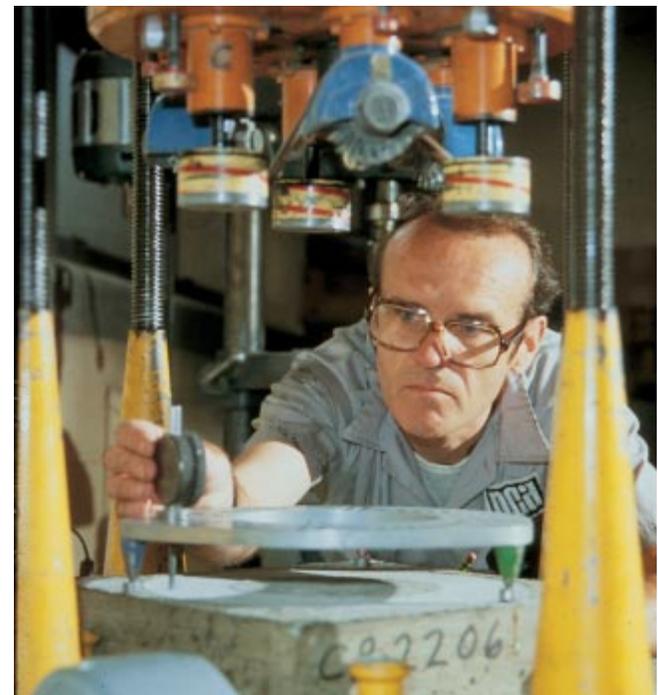


Fig. 1-24. Aparato de prueba para medir la resistencia a abrasión del concreto. La máquina se puede ajustar para el uso de ambos discos o ruedas de afilar. En una máquina diferente, las pelotas de acero bajo presión se ruedan encima de la superficie de la probeta. Los ensayos se describen en la ASTM C 779. (IMG12293)

influencia sobre la resistencia a abrasión. Un agregado duro es más resistente a abrasión que un agregado más blando y una superficie acabada con llana de metal resiste mejor al desgaste que una superficie que no ha sido alisada.

La Figura 1-22 muestra los resultados de ensayos de resistencia a abrasión en concretos con diferentes resistencias a compresión y diferentes tipos de agregados. La Figura 1-23 ilustra el efecto en la resistencia a abrasión del alisamiento con llana de metal y de los tratamientos de la superficie, tales como los endurecedores de superficie de agregado metálicos o minerales. Los ensayos de abrasión se pueden realizar por la rotación de pelotas de acero, ruedas de afilar o discos bajo presión sobre la superficie (ASTM C 779). Uno de los aparatos de ensayo se presenta en la Figura 1-24. Otros tipos de ensayos de abrasión también están disponibles (ASTM C 418 y C 944 y NMX-C-196, NTP 400.019, UNIT-NM 51).

Estabilidad de Volumen y Control de Fisuración (agrietamiento)

El concreto endurecido cambia de volumen con los cambios de temperatura, humedad y tensiones. Este cambio de volumen o de longitud puede variar del 0.01% al 0.08%. Los cambios de volumen por temperatura en el concreto endurecido son similares a los de acero.

El concreto bajo tensión se deforma elásticamente. Si se mantiene la tensión (esfuerzo), va a ocurrir una deformación adicional llamada fluencia (deformación diferida, flujo plástico). La tasa de la fluencia (deformación por unidad de tiempo) disminuye con el tiempo.

El concreto mantenido continuamente húmedo se expande (dilata) ligeramente. Pero cuando se permite su secado, el concreto se retrae. El factor que más influye en la magnitud de la contracción (retracción) por secado es el contenido de agua en el concreto recién mezclado. La contracción por secado aumenta directamente con el aumento del contenido de agua. La magnitud de la contracción también depende de muchos otros factores, tales como: (1) la cantidad de agregado usado; (2) propiedades del agregado; (3) el tamaño y la forma del miembro de concreto; (4) la humedad relativa y la temperatura del medio ambiente; (5) el método de curado; (6) el grado de hidratación y (7) el tiempo.

Las dos causas básicas de la fisuración en el concreto son: (1) las tensiones por la aplicación de carga y (2) las tensiones resultantes de la contracción por secado o cambios de la temperatura cuando el concreto tiene alguna restricción (coacción, sujeción, fijeza).

La contracción por secado es una propiedad inherente del concreto y que no se puede evitar, pero se usa la armadura (refuerzo) adecuadamente posicionada para reducirse el largo de las grietas o entonces se usan juntas para predeterminar y controlar la localización de las fisuras. Las tensiones térmicas debidas a fluctuaciones de la

temperatura del medio ambiente también causan agrietamiento, particularmente a edades tempranas.

Las grietas (fisuras) por contracción en el concreto pueden ocurrir por la restricción. Cuando la contracción por secado ocurre y no hay sujeción, el concreto no se fisura. La restricción se puede causar por varios factores. La contracción por secado es normalmente mayor cerca de la superficie del concreto; la humedad de las partes más internas restringe el concreto más cerca de la superficie, lo que causa agrietamiento. Otras fuentes de restricción son la armadura embebida en el concreto, las partes de la estructura interconectadas entre sí y la fricción de la subrasante en la cual el concreto es colocado.

Juntas. Las juntas son el método más eficiente para el control de las fisuras. Si no se permite el movimiento del concreto (muros, losas, pavimentos) a través de juntas adecuadamente espaciadas para que la contracción por secado y la retracción por temperatura sean acomodadas, la formación de fisuras aleatorias va a ocurrir.

Juntas de contracción (juntas de control de contracción) son ranuradas, formadas o serradas en los paseos (vías, calzadas, caminos, andenes, veredas), pavimentos, pisos y muros para que el agrietamiento ocurra en estas juntas y no de manera aleatoria. Las juntas de contracción permiten el movimiento en el plano de la losa o del muro. Estas juntas se extienden hasta una profundidad aproximada de $\frac{1}{4}$ del espesor del concreto.

Juntas de aislamiento separan una parte del concreto de otras partes de la estructura y permiten movimientos horizontales y verticales. Estas juntas deben ser usadas en la unión de pisos con muros, columnas, bases y otros puntos donde pueda ocurrir restricción. Estas juntas se extienden por todo el espesor de la losa y deben incluir relleno premoldeado de junta.

Las juntas de construcción ocurren donde se ha concluido la jornada de trabajo; estas juntas separan áreas en el concreto coladas en diferentes días. En las losas sobre el terreno, las juntas de construcción normalmente se alinean con las juntas de aislamiento y tienen también esta función. Las juntas pueden necesitar de armadura (pasadores) para la transferencia de carga.

DURABILIDAD

La durabilidad del concreto se puede definir como la habilidad del concreto en resistir a la acción del ambiente, al ataque químico y a la abrasión, manteniendo sus propiedades de ingeniería. Los diferentes tipos de concreto necesitan de diferentes durabilidades, dependiendo de la exposición del ambiente y de las propiedades deseables. Los componentes del concreto, la proporción de éstos, la interacción entre los mismos y los métodos de colocación y curado determinan la durabilidad final y la vida útil del concreto.



Fig. 1-25. El concreto con aire incluido (barra de abajo) es muy resistente a ciclos repetidos de congelamiento y deshielo. (IMG12294)

Resistencia al Congelamiento y Deshielo

Se espera que el concreto empleado en estructuras y pavimentos tenga una vida larga y poco mantenimiento. El concreto debe tener una buena durabilidad para resistir a condiciones de exposición anticipadas. El factor de intemperismo potencialmente más destructivo es la congelación y deshielo (hielo-deshielo) mientras el concreto está húmedo, principalmente en la presencia de anticongelantes (descongelantes). El deterioro es causado por la congelación del agua y su posterior expansión en la pasta, agregado o ambos.

Con el empleo de aire incluido, el concreto es altamente resistente a este tipo de deterioro, como se puede observar en la Figura 1-25. Durante la congelación, el agua desplazada por la formación de hielo en la pasta se acomoda, no siendo perjudicial; las burbujas microscópicas de aire en la pasta ofrecen cámaras para que el agua entre y entonces alivíese la presión hidráulica generada.

Cuando la congelación ocurre en el concreto que contiene agregado saturado, presiones hidráulicas perjudiciales se pueden crear también en el agregado. El agua, desplazada de las partículas de agregado durante la formación del hielo, no se puede escapar hacia la pasta circundante suficientemente rápido para el alivio de presión. Sin embargo, para la mayoría de las condiciones de exposición, una pasta de buena calidad (baja relación agua-cemento) va a prevenir la saturación de la mayoría de los agregados. Si la pasta contiene aire incluido, ella va a acomodar la pequeña cantidad de agua en exceso que se pueda expeler de los agregados, protegiendo así el concreto contra el daño del congelamiento y deshielo.

La Figura 1-26 enseña, para una serie de relaciones agua-cemento, que (1) el concreto con aire incluido es más resistente a los ciclos de congelamiento y deshielo que un concreto sin aire incluido, (2) el concreto con baja relación

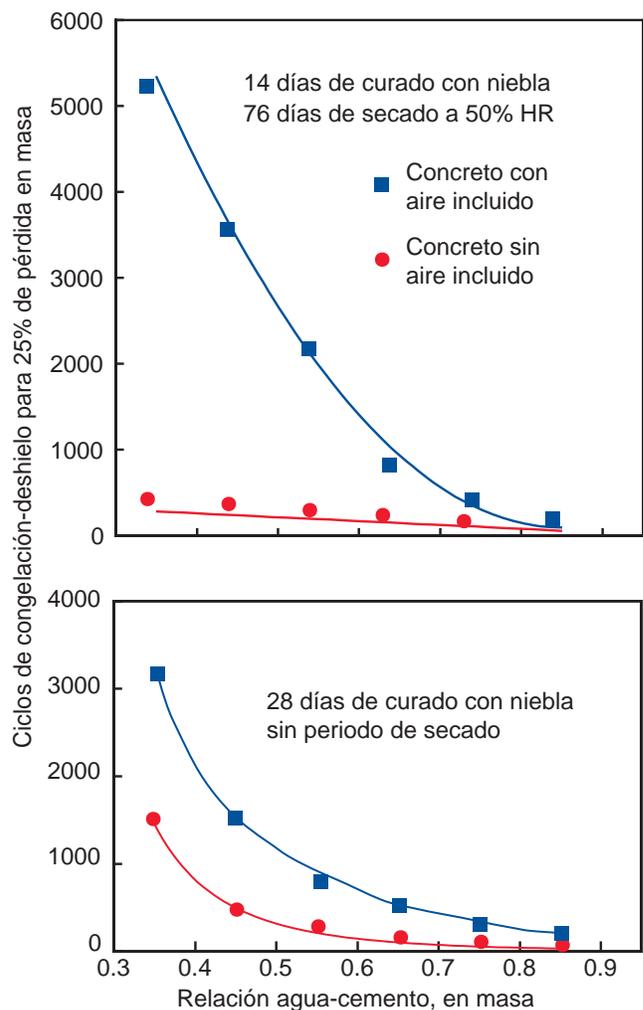


Fig. 1-26. Relación entre la resistencia al congelamiento y deshielo, relación agua-cemento y desecación de concretos con aire incluido y concretos sin aire incluido, confeccionados con cemento tipo 1 (ASTM). La alta resistencia a congelamiento y deshielo es asociado al aire incluido, baja relación agua-cemento y desecación antes de la exposición al congelamiento y deshielo (Backstrom y otros 1955).

agua-cemento es más durable que un concreto con alta relación agua-cemento y (3) un periodo de secado antes de la exposición a la congelación y deshielo beneficia grandemente la resistencia al congelamiento y deshielo del concreto con aire incluido. El concreto con aire incluido y baja relación agua-cemento, con un contenido de aire del 5% al 8% va a resistir a un gran número de ciclos de congelación y deshielo sin presentar fallas.

La durabilidad al congelamiento y deshielo se puede determinar a través de ensayos (pruebas) de laboratorio como la ASTM C 666, *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing* (AASHTO 161) (Norma de método de ensayo acelerado para la resistencia a congelamiento y deshielo), IRAM 1661 (Hormigones. Método de ensayo de resistencia a la congelación en aire y deshielo en agua), NCh2185 of 1992 (Hormigón y mortero - Método de ensayo - Determinación de la resistencia a la

congelación y el deshielo) y NMX-C-205-79 (Determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados). A través del ensayo de la ASTM se calcula un factor de durabilidad que refleja el número de ciclos de congelación y deshielo necesario para producir una cierta cantidad de deterioro. La resistencia al descascaramiento por anticongelantes puede ser determinada por la ASTM C 672, Norma de método de ensayo para resistencia al descascaramiento de superficies de concreto expuestas a anticongelantes (*Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals*).

Reactividad Álcali-Agregado

La reactividad álcali-agregado es un tipo de deterioro que ocurre cuando los constituyentes minerales activos de algunos agregados reaccionan con los hidróxidos de los álcalis en el concreto. La reactividad es potencialmente peligrosa sólo cuando produce expansión considerable. La reactividad álcali-agregado ocurre de dos formas – reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC). La reacción álcali-sílice es más preocupante que la reacción álcali-carbonato pues es más común la ocurrencia de agregados conteniendo minerales de sílice.

Las manifestaciones de la presencia de reactividad álcali-agregado son red de agrietamiento, juntas cerradas o lascadas o dislocación de diferentes partes de la estructura (Fig.1-27). Como el deterioro por reactividad álcali-agregado es un proceso lento, el riesgo de rotura catastrófica es bajo. La reacción álcali-agregado puede causar problemas de utilización (servicio, funcionalidad) y empeorar otros mecanismos de deterioro, como aquellos de la exposición a congelamiento, anticongelantes o sulfatos.

Las prácticas corrientes para el control de la reacción álcali-sílice incluyen el uso de materiales cementantes suplementarios o cementos adicionados. Estos materiales



Fig. 1-27. La fisuración, el cerramiento de las juntas y la dislocación lateral fueron causados por la severa reactividad álcali-agregado en este muro de parapeto. (IMG12295)

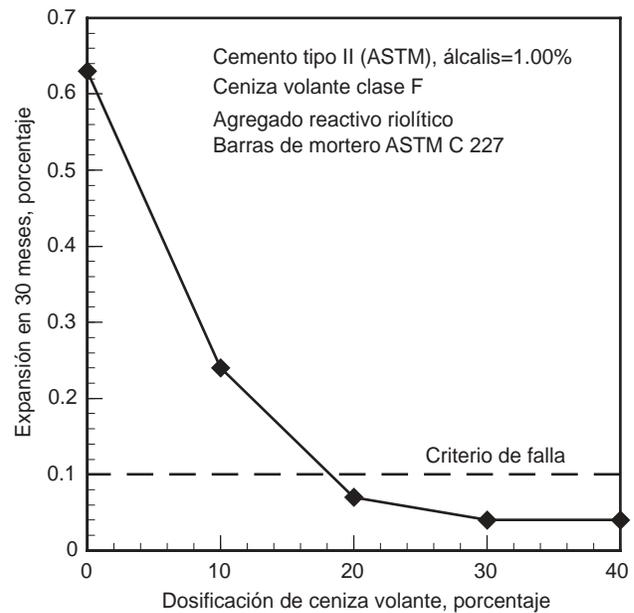


Fig. 1-28. Algunas cenizas volantes cuando usadas en la proporción adecuada pueden controlar la reactividad álcali-agregado.

han sido verificados y comprobadamente pueden controlar la reacción álcali-sílice. Los materiales cementantes suplementarios incluyen cenizas volantes, escoria granulada de alto horno, sílice activa (humo de sílice, microsílice) y puzolanas naturales (Fig. 1-28). Los cementos adicionados también contienen estos materiales para el control de la reactividad álcali-sílice. Esta práctica permite el uso de agregados y materiales cementantes disponibles en la región. La reducción del contenido de álcalis en el concreto también puede controlar la reacción.

El uso de materiales cementantes suplementarios o de cementos adicionados no controla la reacción álcali-carbonato. Felizmente, esta reacción es rara. Si los ensayos (pruebas) de los agregados indican que un agregado es susceptible a la reacción álcali-carbonato, la reacción se puede controlar a través del uso de mezcla de agregados, reducción del tamaño máximo del agregado o uso de agentes inhibidores de la reacción.

Para más informaciones sobre las reacciones álcali-sílice y álcali-carbonato, consulte Farny y Kosmatka (1997).

Carbonatación

La carbonatación del concreto es un proceso por el cual el dióxido (bióxido) de carbono del aire penetra en el concreto y reacciona con los hidróxidos, tales como los hidróxidos de calcio para formar carbonatos (Verbeck, 1958). En la reacción con el hidróxido de calcio hay formación de carbonato de calcio. La carbonatación y el secado rápido del concreto fresco pueden afectar la durabilidad de la superficie, pero esto se puede evitar con el curado adecuado. La carbonatación del concreto endurecido no

hace daño a la matriz del concreto. Sin embargo, la carbonatación reduce considerablemente la alcalinidad (pH) del concreto. La alta alcalinidad es necesaria para la protección de la armadura (refuerzo) contra la corrosión y, por consiguiente, el concreto debe ser resistente a la carbonatación para prevenirse la corrosión del acero de refuerzo.

Se aumenta considerablemente el grado de la carbonatación en el concreto que tiene alta relación agua-cemento, bajo contenido de cemento, corto periodo de curado, baja resistencia y pasta altamente permeable (porosa). La profundidad de la carbonatación en el concreto de buena calidad y bien curado tiene generalmente poca importancia desde que la armadura (refuerzo) en el concreto tenga suficiente recubrimiento (Fig. 1-29). Las superficies



Fig. 1-29. La carbonatación destruye la habilidad del concreto de proteger el acero embebido contra la corrosión. Todo concreto carbonata hasta una pequeña profundidad, pero la armadura debe tener un recubrimiento adecuado para prevenir que la carbonatación alcance el acero. Esta barra de armadura en un muro tenía menos de 10 mm (0.4 pulg.) de recubrimiento de concreto; El código de construcción del ACI requiere un recubrimiento mínimo de 38 mm (1½ pulg.). Después de años de exposición al aire, el concreto carbonató hasta la profundidad de la barra, permitiendo que el acero se oxidara y que la superficie del concreto se desprendiera. (IMG12499)

acabadas tienden a tener menos carbonatación. La carbonatación de las superficies acabadas normalmente se observa a una profundidad de 1 hasta 10 mm (0.04 hasta 0.4 pulg.) y de las superficies no acabadas de 2 hasta 20 mm (0.1 hasta 0.9 pulg.), después de muchos años de exposición, dependiendo de las propiedades del concreto, sus componentes, edad y condiciones de exposición (Campbell, Sturm y Kosmatka, 1991). El ACI 201 2R, Guía del concreto durable (*Guide to Durable Concrete*), tiene más informaciones sobre la carbonatación atmosférica y en agua y el ACI 318 código de construcción presenta los

requisitos del recubrimiento de la armadura (refuerzo) para diferentes exposiciones.

Resistencia a los Cloruros y Corrosión de la Armadura

El concreto protege a la armadura (refuerzo) embebida de la corrosión, debido a su alta alcalinidad. El ambiente de pH alto en el concreto (normalmente mayor que 12.5) promueve la pasivación y la formación sobre el acero de una película de protección de óxido no corrosivo. Sin embargo, la presencia de iones de cloruros de los anticongelantes y del agua del mar puede destruir o penetrar en la película. Cuando se alcanza el límite de corrosión por cloruros (aproximadamente 0.15% cloruro solubles en agua por peso de cemento), una célula eléctrica se forma a lo largo del acero y entre las barras de acero y el proceso electroquímico de la corrosión empieza. Algunas regiones del acero a lo largo de las barras se vuelven en ánodos, descargando corriente en la célula eléctrica; y de allá el hierro entra en solución. Las áreas del acero que reciben corriente son los cátodos donde los iones de hidróxido se forman. Los iones de hierro e hidróxido forman el hidróxido de hierro, FeOH, el cual más tarde se oxida, formando polvo (óxido de hierro). La formación de polvo es un proceso expansivo – el polvo se expande hasta cuatro veces su volumen original – el cual induce a la formación de tensiones internas y descascamientos o descascarillados del concreto sobre el acero de refuerzo. El área de la sección transversal del acero también se puede reducir considerablemente.

Una vez que empieza, la tasa (velocidad) de corrosión del acero es influenciada por la resistividad eléctrica del concreto, la humedad y la tasa de migración del oxígeno del concreto hacia el acero. Los iones de cloruro pueden también penetrar en la capa pasivadora del refuerzo; éstos se combinan con los iones de hierro, formando un compuesto de cloruro de hierro soluble, el cual lleva el hierro para dentro del concreto para más tarde oxidarse



Fig. 1-30. Armadura revestida con epoxis usada en el tablero de un puente. (IMG12498)

(polvo) (Whiting 1997, Taylor, Whiting y Nagi 2000, Whiting, Taylor y Nagi 2002).

La resistencia del concreto a los cloruros es buena, pero se la puede mejorar con una baja relación agua-cemento (0.40), por lo menos siete días de curado y el uso de materiales cementantes suplementarios, tales como cenizas volantes, para reducirse la permeabilidad. El aumento del recubrimiento encima del acero también reduce la migración de cloruros.

Otros métodos de reducción de corrosión de acero incluyen el uso de aditivos inhibidores de corrosión, acero revestido con epoxi, tratamientos de superficie, revestimiento del concreto y protección catódica.

El revestimiento del acero con epoxi previene que los iones de cloruro alcancen el acero (Fig. 1-30). Los tratamientos de superficie y los revestimientos de concreto intentan parar o reducir la penetración de los iones de cloruros en la superficie del concreto. Silanos, siloxanos, metacrilato, epoxies y otros materiales se usan como tratamiento de la superficie.

Materiales impermeables, tales como epoxies, no se deben usar en losas sobre el terreno o en otro concreto donde la humedad se pueda congelar bajo el revestimiento. El agua congelada puede causar descascamiento de la superficie bajo la capa impermeable del revestimiento. Los concretos de cemento portland modificado por látex, concreto con bajo revenimiento y concreto con sílice activa se usan en revestimientos para reducirse el ingreso de los iones cloruro.

Los métodos de protección catódica invierten el flujo de corriente a través del concreto y del refuerzo. Se hace ésto con la inserción en el concreto de un ánodo no estructural, forzando el acero a volverse en cátodo por la carga eléctrica del sistema. El ánodo se conecta al polo positivo del rectificador. Como la corrosión ocurre donde la corriente deja el acero, éste no puede corroerse si está recibiendo la corriente inducida.

La presencia del cloruro en el concreto sin armadura (refuerzo) normalmente no trae problemas de durabilidad.

Kerkhoff (2001) discute la corrosión de metales no ferrosos en el concreto.

Resistencia Química

El concreto de cemento portland es resistente a la mayoría de los medio ambientes; sin embargo, el concreto a veces es expuesto a sustancias que pueden atacar y causar deterioro. El concreto en la industria química y en las instalaciones de almacenamiento es especialmente propenso al ataque químico. El efecto del sulfato y de los cloruros se discute en este capítulo. En el ataque ácido del concreto hay disolución de la pasta de cemento y de los agregados calcáreos. Además del uso de concreto con baja permeabilidad, los tratamientos de superficie pueden ayudar a evitar que las sustancias agresivas entren en contacto con el concreto. Kerkhoff 2001 analiza los efectos de centenas de productos químicos en el

concreto y trae una lista de tratamientos que pueden ayudar en el control del ataque químico.

Sulfatos y Cristalización de Sales

Muchos sulfatos presentes en el suelo y en el agua pueden atacar y destruir un concreto que no fue adecuadamente diseñado. Los sulfatos (por ejemplo sulfato de calcio, sulfato de sodio y sulfato de magnesio) pueden atacar un concreto pues reaccionan con los compuestos hidratados en la pasta de cemento hidratada. Estas reacciones pueden crear presiones suficientes para romper la pasta de cemento, resultando en desintegración del concreto (pérdida de cohesión de la pasta y de resistencia). El sulfato de calcio ataca el aluminato de calcio hidratado y forma etringita. El sulfato de sodio reacciona con el hidróxido de calcio y aluminato de calcio hidratado, formando etringita e yeso. El sulfato de magnesio ataca, de manera similar, al sulfato de sodio y forma etringita, yeso y también brucita (hidróxido de magnesio). La brucita se forma primeramente en la superficie del concreto, consume el hidróxido de calcio, baja el pH en la solución de los poros y entonces descompone el silicato de calcio hidratado (Santhanam y otros 2001).

La taumasita se puede formar durante el ataque de sulfato en condiciones de humedad con temperatura entre 0°C y 10°C (32°F y 50°F) y ocurre como resultado de la reacción entre silicato de calcio hidratado, sulfato, carbonato de calcio y agua (Report of the Thaumasite Expert Group 1999). En los concretos, donde el deterioro está asociado al exceso de taumasita, las fisuras se pueden llenar de taumasita y un halo de taumasita blanca puede encontrarse alrededor de los agregados. En la superficie entre el concreto y el suelo, la superficie del concreto puede ser "mole" con total sustitución de la pasta de cemento por taumasita (Hobbs 2001).

Como en las rocas naturales, tales como en las piedras calizas, el concreto poroso está susceptible al ataque de las intemperies causado por cristalización de sales. Estas sales pueden o no contener sulfatos y pueden o no reaccionar con los compuestos hidratados en el concreto. Algunas sales conocidas por causar deterioro en concreto son el carbonato de sodio y sulfato de sodio (los estudios de laboratorio también relataron soluciones saturadas de cloruro de calcio y otras sales como responsables por el deterioro de concreto). El mayor daño ocurre con el secado de las soluciones saturadas de estas sales, normalmente en ambientes con ciclos de cambios de humedad relativa y de temperatura que alteran las fases mineralógicas. En concretos permeables, expuestos a condiciones de secado, las soluciones de sales pueden ascender hacia la superficie por la acción de los capilares y, posteriormente, – como resultado de la evaporación en la superficie – la fase de solución se vuelve supersaturada y la cristalización de la sal ocurre, algunas veces generando presiones suficientes para causar



Fig. 1-31. El ataque de sulfatos es frecuentemente más severo en la región sometida a mojado y secado, la cual es, normalmente, cerca del nivel del suelo. Aquí los postes han sido atacados por sulfatos cerca del nivel del suelo. Véase también la foto menor a la derecha de la Fig. 1.32. El concreto está en mejor condición a mayores profundidades donde hay humedad. (IMG12497)

la fisuración. Si la tasa de migración de la solución de sal a través de los poros es menor que la tasa de evaporación, se forma una zona de secado debajo de la superficie, ocurriendo cristalización en los poros y causando expansión y descascaramiento (Mehta 2000). Ambas, las partículas de agregado y la pasta de cemento pueden ser atacadas por sales.

El ataque de sulfatos y la cristalización de sales son más severos donde el concreto está expuesto a ciclos de mojado y secado, que

donde el concreto está constantemente mojado. Ésto normalmente puede ser visto en postes de concreto donde el concreto se ha deteriorado sólo pocos centímetros encima y abajo del nivel del suelo. La porción del concreto en la parte más profunda del suelo (donde está continua-

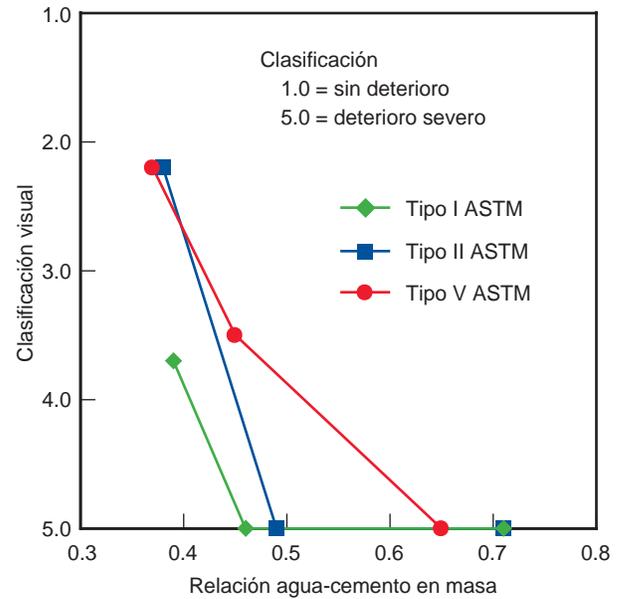


Fig. 1-33. Promedio (media) de vigas de concreto con tres cementos portland y varias relaciones agua-cemento, expuestas durante 16 años a suelos con sulfatos.



Fig. 1-32. Vigas de concreto después de muchos años de exposición a un suelo con alta concentración de sulfatos en Sacramento, California, terreno de ensayo. Las vigas en mejores condiciones tienen bajas relaciones agua-materiales cementantes y muchas de ellas tienen cemento resistente a sulfatos. La foto menor, a la derecha en la parte superior, enseña dos vigas inclinadas sobre sus laterales para mostrar niveles decrecientes de deterioro con la profundidad y el nivel de humedad. (IMG12296, IMG12496)

mente mojado) está en buenas condiciones (Fig. 1-31 y 1-32). Sin embargo, si la exposición al sulfato es muy severa, las secciones continuamente mojadas pueden incluso, con el tiempo, ser atacadas por los sulfatos si el concreto no ha sido adecuadamente diseñado.

Para que se obtenga la mejor protección contra el ataque externo por los sulfatos: (1) diseñe el concreto con baja relación aguamateriales cementantes (aproximadamente 0.4) y (2) use cementos especialmente formulados para ambientes con sulfatos, tales como ASTM C 150 (AASHTO M 85) cementos tipo II y tipo V, C 595 (AASHTO M 240) cementos con moderada resistencia a los sulfatos o C 1157 tipos MS o HS. La resistencia superior a los sulfatos de los cementos tipo II y tipo V ASTM C 150 se presentan en la Figura 1-33.

Exposición al Agua del Mar

El concreto se ha usado en ambientes marinos por décadas con buen desempeño. Sin embargo, son necesarios cuidados especiales en el diseño de las mezclas y en la selección de los materiales para estos ambientes severos. Una estructura expuesta al agua del mar o la salpicadura del agua del mar es más vulnerable en la zona de marea o salpicadura, donde hay ciclos repetidos de mojado y secado y/o conge-



Fig. 1-34. Los concretos de puentes expuestos al agua del mar se deben diseñar y proporcionar especialmente para la durabilidad. (IMG12495)

lamiento y deshielo. Los sulfatos y los cloruros presentes en el agua del mar requieren el uso de concretos de baja permeabilidad para minimizar la corrosión de la armadura (refuerzo) y el ataque de sulfatos (Fig. 1-34).

Un cemento resistente a exposición moderada a sulfatos es útil. Los cementos con contenido de aluminato tricálcico (C_3A) del 4% al 10% ofrecen protección satisfactoria contra el ataque de sulfatos del agua del mar, bien como protección contra la corrosión de la armadura por cloruros. Se debe garantizar un cubrimiento adecuado

sobre el refuerzo (consulte ACI 318). La relación agua-material cementante no debe exceder 0.40. En climas más fríos, el concreto debe contener un mínimo del 6% de aire incluido. El concreto de alta resistencia se puede utilizar donde las grandes formaciones de hielo desgastan la estructura. Consulte Stara (1995 y 2001), Farny (1996) y Kerkhoff (2001).

Etringita y Expansión Retardadas por Calor Inducido

La etringita, una forma de sulfoaluminato de calcio, se encuentra en cualquier parte de cemento. Las fuentes de sulfato de calcio, tal como yeso, se adicionan al cemento portland durante la molienda final en el molino de cemento para prevenir el fraguado rápido y para mejorar el desarrollo de resistencia. El sulfato está presente, también, en los materiales cementantes suplementarios y en los



Fig. 1-35. Depósitos blancos de etringita secundaria en un vacío. Ancho del campo 64 µm (IMG12494)

aditivos. El yeso y otros compuestos de sulfatos reaccionan con el aluminato de calcio en el cemento y forman etringita durante un periodo de pocas horas después del mezclado con el agua. La mayoría de los sulfatos en el cemento normalmente se consume para formar etringita o monosulfoaluminato en un periodo de 24 horas (Klemm y Miller 1997). En esta etapa, la etringita se dispersa uniforme y discretamente por la pasta de cemento en un nivel submicroscópico (menos de un micrómetro en sección transversal). Esta etringita se llama frecuentemente de etringita primaria.

Si el concreto se expone a la humedad por un periodo largo de tiempo (muchos años), la etringita puede disolverse lentamente y volver a formarse en áreas menos limitadas. En el examen de microscopio, se pueden observar los cristales de etringita blancos y en forma de aguja

forrando los vacíos de aire. Esta etringita que ha vuelto a formarse se llama normalmente de etringita secundaria (Fig. 1-35).

El deterioro del concreto acelera la velocidad en la cual la etringita deja su posición original en la pasta para entrar en solución y recrystalizarse en espacios grandes, tales como los vacíos de aire o los agrietamientos. Hay que tener suficiente agua y espacio para la formación de los cristales. Los agrietamientos pueden formarse debido al daño causado por la acción del congelamiento, reactividad álcali-agregado, contracción (retracción) por secado, efectos térmicos, deformación resultante de esfuerzos excesivos u otros mecanismos.

Los cristales de etringita en los vacíos de aire y en las fisuras son típicamente de dos hasta cuatro micrómetros en sección transversal y de veinte hasta treinta micrómetros de largo. Bajo condiciones de deterioro extremo o décadas en ambiente húmedo, los cristales de etringita blanca pueden rellenar completamente los vacíos y las fisuras. Sin embargo, la etringita secundaria, como cristales grandes en forma de agujas, no se debe considerar peligrosa para el concreto (Detwiler y Power-Couche 1997).

Expansión Retardada por Calor Inducido. La expansión retardada por calor inducido (ERCI), también llamada de formación retardada de etringita (FRE), se refiere a una condición rara de ataque de sulfatos internos* a través de la cual el concreto maduro se expande y se fisura. Sólo los concretos con composiciones químicas particulares son afectados cuando alcanzan temperaturas altas, después de algunas horas de su colocación (entre 70°C y 100°C [158°F y 212°F], dependiendo de los componentes del concreto y del tiempo transcurrido desde la colocación hasta que la temperatura se alcance). Esto puede ocurrir pues las altas temperaturas decomponen cualquier etringita que inicialmente se forme y retiene fuertemente el sulfato y el alumina en el gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) de la pasta de cemento. Se impide, entonces, la formación normal de etringita.

En presencia de humedad, el sulfato se libera del confinamiento del C-S-H y reacciona con el monosulfoaluminato de calcio, formando etringita en el concreto frío y endurecido. Después de meses o años de liberación, la etringita se forma en lugares confinados a lo largo de la pasta. Tal etringita puede ejercer presión de cristalización pues se forma en un espacio limitado bajo supersaturación. Una teoría: como el concreto es rígido y si no hay suficientes vacíos para acomodar la etringita, puede ocurrir aumento de volumen, expansión y agrietamiento. Además, parte de la etringita inicial (primaria) puede convertirse en monosulfoaluminato bajo altas tempera-

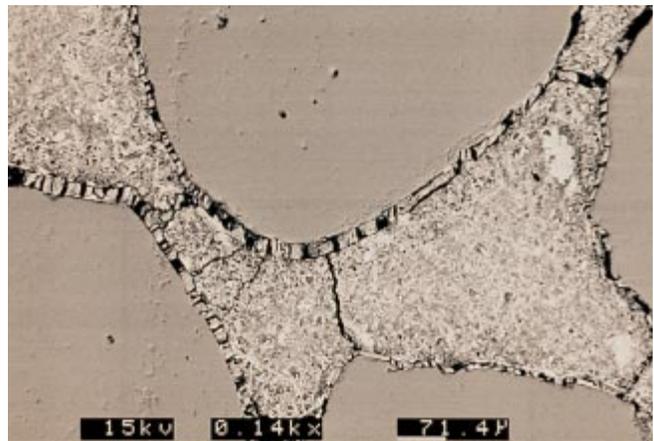


Fig. 1-36. La expansión retardada inducida por calor se caracteriza por la expansión de la pasta que se suelta de los componentes no-expansivos, tales como los agregados, creando espacios en la interfaz pasta-agregado. El espacio se puede llenar posteriormente por cristales oportunistas de etringita más grandes, como mostrado aquí. Esta foto es cortesía de Z. Zhang y J. Olek (Purdue University) (IMG12493)

turas y bajo enfriamiento revertirse nuevamente en etringita. Como la etringita ocupa más espacio que el monosulfoaluminato del cual se forma, esta transformación es una reacción expansiva. El mecanismo que causa la expansión en la pasta aún no es totalmente entendido y la real influencia de la formación de etringita en la expansión todavía está siendo investigada. Algunas investigaciones indican que hay poca relación entre la formación de la etringita y la expansión.

En la expansión retardada por calor inducido, se observa una separación de la pasta hacia los agregados, como resultado del aumento de volumen de la pasta. Esta separación se caracteriza por el desarrollo de bordes de etringita alrededor de los agregados (Fig. 1-36). En las etapas iniciales de la expansión retardada por calor inducido, los vacíos entre pasta y agregados no están llenos (no hay etringita presente). Se debe observar que el concreto sostiene una pequeña cantidad de expansión sin daño. Sólo casos extremos resultan en fisuración y normalmente la expansión retardada por calor inducido está asociada con otros mecanismos de deterioro, especialmente reactividad álcali-sílice.

Sólo los concretos en elementos masivos que retienen el calor de hidratación o elementos expuestos a muy altas temperaturas en edades tempranas corren el riesgo de FRE y de ellos sólo pocos tienen una composición química o un perfil de temperatura para causar expansión perjudicial. Elementos de concreto de tamaño normal colados y mantenidos en temperaturas próximas a las temperaturas ambientes no pueden sufrir ERCI, si los materiales usados son sanos.

Las cenizas volantes y las escorias pueden ayudar a controlar la expansión retardada por calor inducido, juntamente con el control del desarrollo de la temperatura en edades tempranas. Para más informaciones, consulte Lerch

*El ataque de sulfatos internos se refiere al mecanismo de deterioro que ocurre en conexión con sulfatos que están presentes en el concreto en el momento de su colocación.

(1945), Day (1992), Klemm y Millar (1997), Thomas (1998) y Famy (1999).

REFERENCIAS

Abrams, D. A., *Design of Concrete Mixtures (Diseño de Mezclas de Concreto)*, Lewis Institute, Structural Materials Research Laboratory, Bulletin No. 1, PCA LS001, http://www.portcement.org/pdf_files/LS001.pdf, 1918, 20 páginas.

Abrams, M. S. y Orals, D. L., *Concrete Drying Methods and Their Effect on Fire Resistance (Métodos de Secado del Concreto y sus Efectos sobre la Resistencia al Fuego)*, Research Department Bulletin RX181, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX181.pdf, 1965.

ACI Committee 201, *Guide to Durable Concrete (Guía del Concreto Durable)*, ACI 201.2R-92, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1992.

ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Requisitos del Código de Edificios para el Concreto estructural y Comentarios)*, ACI 318-99, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1999.

ACI *Manual of Concrete Practice (Manual de las Prácticas del Concreto)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2001.

Backstrom, J. E.; Burrow, R. W. y Witte, L. P., *Investigation into the Effect of Water-Cement Ratio on the Freezing-Thawing Resistance of Non-Air- and Air-Entrained Concrete (Investigación del Efecto de la Relación Agua-Cemento sobre la Resistencia a Congelación-deshielo de Concretos Con y Sin Aire Incluido)*, Concrete Laboratory Report No. C-810, Engineering Laboratories Division, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Noviembre 1955.

Brinkerhoff, C. H., "Report to ASTM C-9 Subcommittee III-M (Testing Concrete for Abrasion) Cooperative Abrasion Test Program (Informe sobre la ASTM C-9 subcomité III-M – Ensayos de Abrasión del Concreto – Programa Cooperativo de Ensayos de Abrasión)," University of California and Portland Cement Association, 1970.

Bureau of Reclamation, *Concrete Manual (Manual del Concreto)*, 8th Edition, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, 1981, página 33.

Burg, Ronald G., *The Influence of Casting and Curing Temperature on the Properties of Fresh and Hardened Concrete (La Influencia de la Temperatura de Colocación y del Curado sobre las Propiedades del Concreto Fresco y Endurecido)*, Research and Development Bulletin RD113, Portland Cement Association, 1996, 20 páginas.

Campbell, Donald H.; Sturm, Ronald D. y Kosmatka, Steven H., "Detecting Carbonation (Detección de la Carbonatación)," *Concrete Technology Today*, PL911, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/PL911.pdf, Marzo 1991, 5 páginas.

Copeland, L. E. y Schulz, Edith G., *Electron Optical Investigation of the Hydration Products of Calcium Silicates and Portland Cement (Investigación Electrónica Óptica de los Productos de Hidratación de los Silicatos de Calcio y del Cemento Portland)*, Research Department Bulletin RX135, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX135.pdf, 1962, 12 páginas.

Day, Robert L., *The Effect of Secondary Ettringite Formation on the Durability of Concrete: A Literature Analysis (El efecto de la Formación de la Etringita Secundaria sobre la Durabilidad del Concreto: Un Análisis de la Literatura)*, Research and Development Bulletin RD108, Portland Cement Association, 1992, 126 páginas.

Detwiler, Rachel J. y Powers-Couche, Laura, "Effect of Ettringite on Frost Resistance (Efecto de la Etringita sobre la Resistencia a la Congelación)," *Concrete Technology Today*, PL973, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/PL973.pdf, 1997, páginas 1 a 4.

Famy, Charlotte, *Expansion of Heat-Cured Mortars (Expansión de Morteros Curados con Calor)*, thesis, University of London, 1999, 310 páginas.

Farny, Jamie, "Treat Island, Maine—The Army Corps' Outdoor Durability Test Facility (Facilidades de Ensayos de Durabilidad de Exposición Externa del Ejército en la Isla Treat, Maine)," *Concrete Technology Today*, PL963, http://www.portcement.org/pdf_files/PL963.pdf, Diciembre 1996, páginas 1 a 3.

Farny, James A. y Kosmatka, Steven H., *Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete (Diagnóstico y Control de las Reacciones Alkali-Agregado en el Concreto)*, IS413, Portland Cement Association, 1997, 24 páginas.

Feret, R., "Etudes Sur la Constitution Intime Des Mortiers Hydrauliques" (Estudios sobre la Constitución Íntima de los Morteros Hidráulicos)," *Bulletin de la Societe d'Encouragement Pour Industrie Nationale*, 5th Series, Vol. 2, Paris, 1897, páginas 1591 a 1625.

Gonnerman, H. F. y Shuman, E. C., "Flexure and Tension Tests of Plain Concrete (Ensayos de Flexión y Tensión del Concreto Simple)," Major Series 171, 209, and 210, *Report of the Director of Research*, Portland Cement Association, Noviembre 1928, páginas 149 y 163.

- Hanson, J. A., *Effects of Curing and Drying Environments on Splitting Tensile Strength of Concrete (Efecto de los Ambientes de Curado y Secado sobre la Resistencia a la Tensión Indirecta del Concreto)*, Development Department Bulletin DX141, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/DX141.pdf, 1968, página 11.
- Hedenblad, Göran, *Drying of Construction Water in Concrete (Secado del Agua de Construcción en el Concreto)*, T9, Swedish Council for Building Research, Stockholm, 1997.
- Hedenblad, Göran, "Concrete Drying Time (Tiempo de Secado del Concreto)," *Concrete Technology Today*, PL982, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/PL982.pdf, 1998, páginas 4 a 5.
- Hobbs, D. W., "Concrete deterioration: causes, diagnosis, and minimizing risk (Deterioro del Concreto: causas, diagnóstico y disminución del riesgo)," *International Materials Review*, 2001, páginas 117 a 144.
- Hsu, Thomas T. C., *Torsion of Structural Concrete—Plain Concrete Rectangular Sections (Torsión del Concreto Estructural – Secciones Rectangulares de Concreto Simple)*, Development Department Bulletin DX134, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/DX134.pdf, 1968.
- Kerkhoff, Beatrix, *Effects of Substances on Concrete and Guide to Protective Treatments (Efecto de las Sustancias sobre el Concreto y Guía de los Tratamientos de Protección)*, IS001, Portland Cement Association, 2001, 36 páginas.
- Kirk, Raymond E. y Othmer, Donald F., eds., "Cement (Cemento)," *Encyclopedia of Chemical Technology*, 3rd ed., Vol. 5, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1979, páginas 163 a 193.
- Klemm, Waldemar A. y Miller, F. MacGregor, "Plausibility of Delayed Ettringite Formation as a Distress Mechanism—Considerations at Ambient and Elevated Temperaturas (Admisibilidad de la Formación de la Etringita Retardada como un Mecanismos de Deterioro – Consideraciones a Temperaturas Ambiente y Elevada)," Paper 4iv059, *Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement*, Gothenburg, Sweden, Junio 1997, 10 páginas.
- Kosmatka, Steven H., "Bleeding (Sangrado)," *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, STP 169C, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, 1994, páginas 88 a 111. [También disponible a través de la PCA como RP328].
- Kosmatka, Steven H., *Portland, Blended, and Other Hydraulic Cements (Cementos Mezclados y Otros Tipos de Cementos Hidráulicos)*, IS004, Portland Cement Association, 2001, 31 páginas.
- Lange, David A., *Long-Term Strength Development of Concrete (Desarrollo de la Resistencia del Concreto a Largo Plazo)*, RP326, Portland Cement Association, 1994.
- Lerch, William, *Effect of SO₃ Content of Cement on Durability of Concrete (Efecto del Contenido de SO₃ sobre la Durabilidad del Concreto)*, R&D Serial No. 0285, Portland Cement Association, 1945.
- Liu, Tony C., "Abrasion Resistance of Concrete (Resistencia a la Abrasión del Concreto)," *Journal of the American Concrete Institute*, Farmington Hills, Michigan, Septiembre-Octubre 1981, páginas 341 a 350.
- McMillan, F. R. y Lyse, Inge, "Some Permeability Studies of Concrete (Algunos Estudios de Permeabilidad del Concreto)," *Journal of the American Concrete Institute*, Proceedings, vol. 26, Farmington Hills, Michigan, Diciembre 1929, páginas 101 a 142.
- McMillan, F. R. y Tuthill, Lewis H., *Concrete Primer (Manual del Concreto)*, SP-1, 3rd ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1973.
- Mehta, P. Kumar, "Sulfate Attack on Concrete: Separating Myth from Reality (Ataque de Sulfatos en el Concreto – Separando el Mito de la Realidad)," *Concrete International*, Farmington Hills, Michigan, Agosto 2000, páginas 57 a 61.
- Pinto, Roberto C. A. y Hover, Kenneth C., *Frost and Scaling Resistance of High-Strength Concrete (Resistencia a la Congelación y al Descascaramiento del Concreto de Alta Resistencia)*, Research and Development Bulletin RD122, Portland Cement Association, 2001, 70 páginas.
- Powers, T. C., "Studies of Workability of Concrete (Estudios sobre la Trabajabilidad del Concreto)," *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 28, Farmington Hills, Michigan, Febrero 1932, página 419.
- Powers, T. C., *The Bleeding of Portland Cement Paste, Mortar, and Concrete (El Sangrado de las Pastas, Morteros y Concretos de Cemento Portland)*, Research Department Bulletin RX002, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX002.pdf, 1939.
- Powers, T. C., *A Discussion of Cement Hydration in Relation to the Curing of Concrete (Una Discusión sobre la Hidratación del Cemento en Relación al Curado del Concreto)*, Research Department Bulletin RX025, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX025.pdf, 1948, 14 páginas.
- Powers, T. C., *The Nonevaporable Water Content of Hardened Portland Cement Paste—Its Significance for Concrete Research and Its Method of Determination (El Contenido de Agua No-Evaporable de las Pastas Endurecidas de Cemento Portland – Su Importancia y su Método de Determinación)*, Research Department Bulletin RX029, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX029.pdf, 1949, 20 páginas.

- Powers, T. C., *Topics in Concrete Technology (Temas en la Tecnología del Concreto)*, Research Department Bulletin RX174, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX174.pdf, 1964.
- Powers, T. C., *The Nature of Concrete (La Naturaleza del Concreto)*, Research Department Bulletin RX196, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX196.pdf, 1966.
- Powers, T. C. y Brownyard, T. L., *Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste (Estudios sobre las Propiedades Físicas de las Pastas Endurecidas de Cemento Portland)*, Research Department Bulletin RX022, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX022.pdf, 1947.
- Powers, T. C.; Copeland, L. E.; Hayes, J. C. y Mann, H. M., *Permeability of Portland Cement Pastes (Permeabilidad de las Pastas de Cemento Portland)*, Research Department Bulletin RX053, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX053.pdf, 1954.
- Report of the Thaumassite Expert Group, *The thaumasite form of sulfate attack: Risks, diagnosis, remedial works and guidance on new construction (El ataque de sulfatos bajo la forma de thaumasita: riesgos, diagnóstico, trabajos de reparación y orientación sobre construcciones nuevas)*, Department of the Environment, Transport and the Regions, DETR, London, 1999.
- Santhanam, Manu; Cohen, Menahi D. y Olek, Jan, "Sulfate attack research—whither now? (Investigación sobre el Ataque de Sulfatos – ¿Para dónde ahora?)," *Cement and Concrete Research*, 2001, páginas 845 a 851.
- Scanlon, John M., "Factors Influencing Concrete Workability (Factores que Influyen la Trabajabilidad del Concreto)," *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, STP 169C, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, 1994, páginas 49 a 64.
- Stark, David, *Durability of Concrete in Sulfate-Rich Soils (Durabilidad del Concreto en Suelos con Alto Contenido de Sulfatos)*, Research and Development Bulletin RD097, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD097.pdf, 1989, 16 páginas.
- Stark, David, *Long-Time Performance of Concrete in a Seawater Exposure (Desempeño a Largo Plazo de Concretos Expuestos al Agua del Mar)*, RP337, Portland Cement Association, 1995, 58 páginas.
- Stark, David, *Long-Term Performance of Plain and Reinforced Concrete in Seawater Environments (Desempeño a Largo Plazo de Concretos Simples y Reforzados en Ambientes Marítimos)*, Research and Development Bulletin RD119, Portland Cement Association, 2001, 14 páginas.
- Stark, David, *Performance of Concrete in Sulfate Environments (Desempeño de los Concretos en Ambientes con Sulfatos)*, PCA Serial No. 2248, Portland Cement Association, 2002.
- Steinour, H. H., *Further Studies of the Bleeding of Portland Cement Paste (Estudios Adicionales sobre el Sangrado de Pastas de Cemento Portland)*, Research Department Bulletin RX004, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX004.pdf, 1945.
- Taylor, Peter C.; Whiting, David A. y Nagi, Mohamad A., *Threshold Chloride Content for Corrosion of Steel in Concrete: A Literature Review (Contenido Límite de Cloruros para la Corrosión del Acero en el Concreto: Revisión Bibliográfica)*, PCA Serial No. 2169, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/SN2169.pdf, 2000.
- Thomas, M. D. A., *Delayed Ettringite Formation in Concrete—Recent Developments and Future Directions (Formación de la Etringita Retardada en el Concreto – Desarrollos recientes y Direcciones Futuras)*, University of Toronto, 1998, 45 páginas.
- Verbeck, G. J., *Carbonation of Hydrated Portland Cement (Carbonatación del Cemento Portland Hidratado)*, Research Department Bulletin RX087, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX087.pdf, 1958, 20 páginas.
- Whiting, D., *Origins of Chloride Limits for Reinforced Concrete (Origen de los Límites de Cloruro para el Concreto Reforzado)*, PCA Serial No. 2153, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/SN2153.pdf, 1997.
- Whiting, D., "Permeability of Selected Concretos (Permeabilidad de Concretos Seleccionados)," *Permeability of Concrete*, SP108, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1989, páginas 195 a 222.
- Whiting, David A.; Taylor, Peter C.; y Nagi, Mohamad, A., *Chloride Limits in Reinforced Concrete (Límites de Cloruro en el Concreto Reforzado)*, PCA Serial No. 2438, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/SN2438.pdf, 2002.
- Wood, Sharon L., *Evaluation of the Long-Term Properties of Concrete (Evaluación de las Propiedades del Concreto a Largo Plazo)*, Research and Development Bulletin RD102, Portland Cement Association, 1992, 99 páginas.
- Woods, Hubert, *Observations on the Resistance of Concrete to Freezing and Thawing (Observaciones sobre la Resistencia a Congelación y Deshielo del Concreto)*, Research Department Bulletin RX067, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX067.pdf, 1956.

