



Aditivos Reductores de Contracción



El concreto es, y continúa siendo, el material de construcción más ampliamente usado en el mundo, gracias a la facilidad con que puede ser moldeado en una gran variedad de formas y tamaños, su durabilidad potencial y su costo relativamente bajo. También contribuyen a su popularidad como material de construcción la facilidad con que pueden obtenerse sus componentes más básicos - cemento portland, agregados, agua y aditivos.

La necesidad de una trabajabilidad adecuada para facilitar la colocación y la consolidación del concreto, con frecuencia requiere el uso de una cantidad mayor de agua de mezclado que la necesaria para el proceso de hidratación. La pérdida de algo de este exceso de "agua de conveniencia" que sufre una matriz de concreto a medida que se endurece, da como resultado una reducción de volumen conocida como contracción. Si la reducción de volumen ocurre antes de que el concreto se endurezca, se llama contracción plástica. La reducción del volumen que ocurre principalmente debido a la pérdida de humedad, después de que el concreto se ha endurecido, se conoce como contracción por desecación.

La mayor preocupación en relación a la contracción del concreto, consiste en su potencial para agrietarse, ya sea en su estado plástico o endurecido, y cualquier impacto adverso subsecuente sobre la durabilidad o serviciabilidad del concreto. En la mayoría de las situaciones de la construcción, particularmente aplicaciones para pavimento, tableros de puentes, y losas, la probabilidad de contracción plástica y por desecación con frecuencia es mayor que la de otros tipos de contracción, tales como contracción térmica, contracción autógena, y contracción por carbonatación.

Se ha demostrado que las fibras minimizan la contracción plástica, y su uso en el concreto se está incrementando. Para minimizar el agrietamiento debido a contracción por desecación, se recomiendan y se usan prácticas de construcción tales como el uso de cementos expansivos, y la provisión oportuna de juntas. En años recientes se han introducido en la industria del concreto aditivos revolucionarios que reducen la contracción por desecación. Estos aditivos se desarrollaron primero en el Lejano

Oriente, y subsecuentemente en los Estados Unidos y en otras partes.

En este artículo se presenta la información básica sobre los aditivos reductores de contracción (SRA por sus siglas en inglés; shrinkage-reducing admixtures), los primeros en el mundo, actualmente comercializados bajo la marca registrada Tetraguard. También se presenta un panorama general del mecanismo y los factores que afectan la contracción por desecación.

Contracción por desecación del concreto

La pérdida de humedad del concreto después de que se endurece, y por lo tanto la contracción por desecación, es inevitable, a menos que el concreto esté completamente sumergido en agua o en un ambiente con el 100 % de humedad relativa (HR). Así pues, la contracción por desecación es un fenómeno que ocurre rutinariamente y amerita una consideración cuidadosa en el diseño del concreto y la construcción.

Los mecanismos reales por los cuales ocurre contracción por desecación son complejos, pero en general, se está de acuerdo en que involucran la pérdida del agua absorbida de la pasta hidratada de cemento. Cuando el concreto está inicialmente expuesto a condiciones de secado - en el cual hay una diferencia entre la HR del medio ambiente y la del concreto - primero pierde el agua libre. Esto da como resultado poca o ninguna contracción. Sin embargo, el secado continuado conduce a la pérdida del agua absorbida, un cambio en el volumen de la pasta de cemento no restringida, y a un incremento en las fuerzas de atracción entre el producto de hidratación C-S-H que lleva a la contracción. Se ha reportado que el grosor de la capa con agua absorbida se incrementa al incrementarse la humedad. Por lo tanto, es concebible que un alto contenido de agua conduzca a una capa más gruesa del agua absorbida y, por lo tanto, a una contracción incrementada por desecación.

Se puede determinar la contracción por desecación del concreto en el laboratorio usando ASTM C 157, "Método de Prueba Estándar para el Cambio de Longitud del Mortero y el Concreto con Cemento Hidráulico Endurecido," y generalmente se expresa como un porcentaje o en millonésimas ($\times 10^{-}$

6). Físicamente, el concreto que experimenta una contracción por desecación de aproximadamente 0.05 % (500 millonésimas o $500 \times 10 \text{ exp-6}$) se contrae aproximadamente 50 mm cada 100 m (0.6 pulg por 100 pies). En términos más gráficos, esto es aproximadamente 2 pulg (50 mm) para la longitud de un campo de fútbol.

Existen varios factores que afectan la contracción por desecación. Estos incluyen las características de los ingredientes de la mezcla de concreto y sus proporciones, prácticas de diseño y construcción, e influencia ambiental.

Efectos de los ingredientes de la mezcla de concreto

Hay datos conflictivos en la literatura sobre los efectos de los ingredientes de la mezcla de concreto en la contracción por desecación. Sin embargo, sin duda alguna, los componentes de una mezcla de concreto que influyen más en la contracción por desecación, son el agua y el agregado grueso, porque ambos tienen un efecto profundo sobre la minimización del contenido de la pasta.

Los datos gráficos de la Referencia 7 se vuelven a graficar en la Fig. 1 para ilustrar el efecto del agua total sobre la contracción por secado. Los datos muestran que el contenido total de agua de una mezcla de concreto tiene un efecto significativo en la contracción por desecación.

Por ejemplo, suponiendo que una mezcla de concreto tenga un factor de cemento de 420 kg/m^3 (708 libras/ yd^3) y una relación de agua-cemento (a/c) de 0.45, - es decir, un contenido de agua de aproximadamente 190 kg/m^3 (320 lb/yd^3). La Fig. 1 sugiere que, en promedio, este concreto tendrá una contracción por secado de alrededor de 0.06 %, y que este valor de contracción puede reducirse en un 50 %, reduciendo el contenido de agua a 145 kg/m^3 (244 lb/yd^3), lo que se traduce en una relación de a/c de 0.35. Por lo tanto, para minimizar la contracción por desecación del concreto, el contenido total de agua debe mantenerse tan bajo como sea posible.

Al contrario de lo que comúnmente se cree, de que la contracción se incrementa con el contenido de cemento, los datos recopilados en la Referencia 7 para los concretos con contenidos de cemento que varían de 280 a 445 kg/m^3 (472 a 750 lb/yd^3), mostraron que el contenido de cemento tenía poco

efecto sobre la contracción del concreto. El contenido total de agua para estas mezclas variaba de 200 a 210 kg/m³ (337 a 354 lb/yard³) y los revenimientos estaban entre 75 y 100 mm (3 y 4 pulg). Para propósitos prácticos, se ha encontrado que el tipo, la composición, y la finura del cemento tienen también relativamente poco efecto sobre la contracción por desecación.

El efecto del agregado grueso en la contracción por desecación tiene dos aspectos. Primero, el uso de un alto contenido de agregado grueso minimiza los contenidos totales de agua y de pasta de la mezcla de concreto, y, por lo tanto, la contracción por desecación. Los efectos de la relación agregado-cemento y agua-cemento sobre la contracción por secado se ilustran en la Fig. 2-8, la cual muestra claramente que, a una relación dada de a/c , la contracción por secado se reduce a medida que se incrementa la relación agregado-cemento. Por ejemplo, con una reducción de a/c de 0.40, se obtuvo una reducción del 50 % en la contracción por desecación, cuando la relación agregado-cemento se incrementó de 3 a 5 (y también de 5 a 7).

En segundo lugar, la contracción por desecación de la pasta de cemento se reduce por el agregado grueso, debido a su influencia restrictiva. Como se esperaba, la cantidad de restricción proporcionada por el agregado grueso depende del tipo de agregado y su rigidez, el total de la cantidad del agregado usado, y del tamaño en la parte de arriba. Los agregados duros y rígidos tales como la dolomita, feldespatos, granito, piedra caliza, y cuarzo, son difíciles de comprimir, y proporcionarán más restricción a la contracción de la pasta de cemento. Por lo tanto, estos agregados deben ser usados para producir concreto con baja contracción por desecación.

Debe evitarse el uso de arenisca y pizarra, si se desea poca contracción por desecación. Evite además agregados con una capa de arcilla, ya que la arcilla reducirá el efecto restrictivo de los agregados en la contracción, además de su contracción inherente y el efecto sobre la demanda de agua.

Los aditivos forman una parte integral de las mezclas de concreto producidas actualmente. Su adición al concreto típicamente incrementa el volumen de los poros finos en el producto de la hidratación del cemento. Como resultado, los estudios han demostrado mayor contracción por desecación cuando se usan aditivos tales como cloruro de calcio, escoria de alto horno granulada y molida, y algunas puzolanas.

Con respecto a los aditivos reductores de agua, el ACI 212 reporta que la información sobre sus efectos es conflictiva, pero esta contracción a largo plazo puede ser menos dependiente del grado en que se reduce el contenido de agua del concreto. Se ha obtenido reducción en la contracción por desecación en casos en que se realizaron reducciones significativas en el contenido total de agua, a través del uso de aditivos reductores de agua de alto rango (HRWR por sus siglas en inglés: high-range water-reducing). Pueden obtenerse resultados similares con aditivos reductores de agua a mediano plazo (MRWR por sus siglas en inglés: mid-range water-reducing).

Se ha obtenido una reducida contracción por desecación con un aditivo HRWR a base de naftaleno condensado, como se muestra en la Tabla 1, para mezclas de concreto con un factor nominal de cemento de 356 kg/m³ (600 lb/yd³) y un revenimiento de 225 mm (9 pulg). Los datos muestran que a 84 días, se obtuvo una disminución en la contracción por desecación, de aproximadamente 30 % con el aditivo HRWR de 1170 mL/100 kg (18 fl oz/cwt). La reducción de agua en esta dosis fue de aproximadamente 30 %. Por lo tanto, los aditivos MRWR y HRWR pueden ser benéficos si se usan para obtener reducciones significativas en el contenido total de agua. También se ha demostrado que los aditivos inclusores de aire tienen poco o ningún efecto sobre la contracción por desecación.

Efectos del diseño y las prácticas de construcción

Los parámetros de diseño que más influyen en la contracción por desecación son la cantidad de refuerzo proporcionado y el tamaño, la forma y la relación del área de la superficie a volumen del elemento de concreto. El refuerzo de acero reducirá la contracción por desecación del concreto debido a la restricción proporcionada por el acero. En el mismo ambiente, un pequeño miembro de concreto se contrae más que un miembro grande debido a su mayor relación área superficial-a-volumen; mientras mayor sea el área de la superficie expuesta, mayor será la tasa de pérdida de humedad, y por lo tanto, el potencial de contracción por desecación. Por lo tanto, debe hacerse notar que, la contracción por desecación que ocurriría en estructuras reales de concreto, serían sólo una fracción de la obtenida en el laboratorio con el método de prueba ASTM C

157.

Las prácticas inapropiadas de vaciado del concreto, tales como el retemplado en el sitio de la obra, incrementarán la contracción por desecación, debido al incremento en el contenido de agua del concreto. El curado prolongado húmedo retrasará el comienzo de la contracción por desecación, pero, en general, se reporta que la duración del curado tienen poco efecto en la contracción por desecación. Sin embargo, el curado a vapor reducirá la contracción por desecación.

Efectos de los factores ambientales y del tiempo

Como se mencionó previamente, la pérdida de humedad del concreto endurecido y, por lo tanto, la contracción por desecación, es inevitable, a menos que el concreto esté en un ambiente con un 100 de HR. Estas condiciones, por supuesto, se dan rara vez, a menos que el concreto esté completamente sumergido en agua.

La magnitud de la contracción por desecación se ve afectada grandemente por la HR del ambiente que lo rodea. Una baja HR conducirá a una más alta cantidad de contracción por desecación. Sin embargo, la magnitud de la contracción por desecación no está influenciada por la velocidad del secado. La velocidad de secado, a su vez, no es afectada por el viento, o la convección forzada, excepto durante las primeras etapas de la exposición. Esto se debe a la muy pobre conductividad de humedad del concreto que toma en cuenta únicamente una pequeña velocidad de evaporación.

La magnitud de la contracción por desecación es también dependiente del tiempo. Aunque la abrumadora cantidad de la contracción por desecación ocurre en los primeros meses del secado, el proceso continúa por años. Los datos de un amplio estudio que abarca un período de cerca de 30 años mostró que, en promedio, casi el 50 % de la contracción por secado obtenido a 20 años ocurrió en los primeros dos meses del secado, y casi el 80 % en el primer año.

Aditivos reductores de contracción (SRA por sus siglas en inglés: shrinkage-reducing admixtures)

El primero aditivo reductor de contracción en el mundo (SRA) se desarrolló en Japón en 1982, en una sociedad entre Nihon Cement Company y Sanyo Chemichal Industries. El 15 de octubre de 1985, se concedió el Número de Patente U.S. 4,547,223 a Goto et al., por la invención, el principal componente del cual es un eter alquil polioxialkilenos, un derivado alquilenóxido con menos alcohol. Desde entonces, ha crecido el interés en esa tecnología, y el 17 de Septiembre de 1996, se concedió el Número de Patente U.S. 5,556.460 a Berke et al, por un SRA con una composición básica similar.

Nihon Cement y Sanyo Chemichal Industries han desarrollado varios SRAs. Estos aditivos son líquidos de baja viscosidad y solubles en agua, que funcionan reduciendo la tensión capilar que se desarrolla dentro de los poros de concreto a medida que seca. Se usan principalmente como aditivos integrales, pero pueden aplicarse directamente a una superficie de concreto como una aplicación local. Aquí se presentan los datos de rendimiento funcional para los dos métodos de aplicación. Para propósitos de aplicación, el aditivo reductor de contracción de Nihon Cement/Sanyo Chemichals referenciado en este artículo, se va a indicar como un SRA-M.

Aplicación integral del SRA-M

La gama de dosificación para el SRA-M cuando se usa integralmente es de 6.0 a 10.0 kg/m³ (1.2 a 2 gal/yard³) de concreto. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones, la dosificación recomendada es de 7.5 kg/m³ (1.5 gal/yard³). Este aditivo se puede introducir en la mezcla de concreto, ya sea durante la dosificación inicial o como una adición retardada. Para mantener la consistencia, el contenido de agua de mezclado se reduce en la cantidad de SRA-M usado. Con excepción del ajuste en el contenido del agua de mezclado, no se requiere ningún otro cambio cuando se agrega SRA-M a una mezcla de concreto.

Efecto del SRA-M sobre las propiedades plásticas del concreto

El SRA-M tiene poco efecto en el revenimiento y el contenido de aire, como se muestra en los datos de la Tabla 2. Las evaluaciones de laboratorio también indican que el SRA-M tiene

un efecto insignificante sobre el revenimiento y la pérdida de aire. Sin embargo, se pueden retardar los tiempos del fraguado. En pruebas Proctor de penetración para una relación agua/cemento de 0.44 y 20 C (68 F), los concretos con un revenimiento nominal de 75 mm (3 pulg), los tiempos de fraguado inicial y final se retardaron en aproximadamente 1 hr. a temperatura ambiente de 10 C (50 F); un poco más de 2 hr a 20 C y, en aproximadamente 1 hr 20 min. a 30 C (86 F). Las pruebas de sangrado en concreto de revenimiento nominal de 75 y 175 mm (3 y 7 pulg) indican que los concretos tratados con SRA-M pueden sangrar ligeramente por más tiempo y aproximadamente 10 % más que el concreto no tratado acompañante. En todas estas evaluaciones, se usó el SRA-M a 7.5 kg/m³.

Efecto del SRA-M sobre las propiedades del concreto endurecido

Los datos de la Tabla 2 también muestran que el SRA-M tiene un efecto mínimo en la resistencia a compresión. Los datos muestran también características de desarrollo de resistencia similares a las de un concreto no tratado.<

En la Fig. 3 se muestra el efecto del SRA-M sobre la contracción por secado para una mezcla de concreto con un contenido nominal de cemento de 300 kg/m³ (506 lb/yd³) y de una relación a/c de 0.53. El SRA-M se usó a niveles de dosificación de 7.5 y 10.0 kg/m³ (1.5 y 2.0 gal/yd³). Los datos muestran una reducción en la contracción por secado de aproximadamente 50 a 60 % a 28 días, y de 40 a 50 % después de 12 semanas para concretos tratados con el SRA-M. Se han obtenido reducciones similares en la contracción por secado en pruebas de exposición al aire libre a largo plazo, como se muestra por los datos de la Fig. 4 y en estudios llevados a cabo en otros SRAs.

Las evaluaciones comparativas muestran que las características de reducción de contracción de un SRA disponible comercialmente (SRA-G) que se introdujo en Estados Unidos a finales de 1995, es idéntico al de SRA-M (Fig. 5). En la Tabla 3 se da más información pertinente para mezclas de concreto probados a esta evaluación comparativa.

Aplicaciones locales del SRA-M (método de impregnación)

El SRA-M se absorbe en el concreto y se reduce la contracción por desecación. En sí, puede aplicarse también localmente a las superficies de concreto. En tales aplicaciones, que se conocen como método de impregnación, el SRA-M se aplica con brocha a la superficie, o bien en spray a tasas de entre 100 y 300 mL/m³ (0.03 a 0.09 galones/pie²)

Típicamente se obtiene un mejor rendimiento con tasas de aplicación más altas de SRA-M. El rendimiento también se ve afectado por factores tales como el tiempo de aplicación, grosor del miembro, a/c, y la cantidad del SRA-M absorbido, el que a su vez, es influenciado por las condiciones de secado de la superficie del concreto, el acabado de la superficie, y la densidad del concreto.

Las aplicaciones locales del SRA-M pueden comenzarse en cualquier momento después de que se detiene el sangrado, y a edades tempranas del concreto. Sin embargo, si se usa el método de impregnación antes del fraguado final, se puede retardar ligeramente el endurecimiento de la superficie.

Los datos de rendimiento para el método de impregnación se presentan en la Fig. 6 para tasas de aplicación de L SRA-M de 200 y 300 mL/m² (0.06 y 0.09 gal/pie²). Fueron evaluados los concretos con relación w/c de 0.45 y 0.65 y especímenes de 50 y 100 mm (2 y 4 pulg de grueso) a los que se les permitió secarse desde ambos lados. La designación usada en la leyenda en la Fig. 6 denota la a/c y el grosor del espécimen. Por lo tanto, "0.45-50" representa un espécimen de un grosor de 50 mm para concretos con una relación de a/c de 0.45. Los datos, obtenidos después de 4 semanas de exposición, muestran que el método de impregnación reduce efectivamente la contracción por secado, especialmente a la relación más alta a/c de 0.65. Como se esperaba, se obtuvo un rendimiento ligeramente mejor, a la tasa de aplicación más alta del SRA-M de 300 mL/m² (0.09 gal/y²).

Para propósitos de comparación, también se presentan datos de concreto no tratado y concreto con aditivo SRA-M a una dosificación de 7.5 kg/m³. Los datos muestran que mezclado íntegramente, el SRA-M es más efectivo que el método de impregnación. En relación con el concreto no tratado, los datos también muestran que la contracción por secado se redujo en aproximadamente del 50 al 60 % cuando se agregó integralmente una dosificación de 7.5 kg/m³ de SRA-M.

Proyectos de SRA-M

Desde 1983, el SRA-M ha sido usado en una gran variedad de proyectos en el Lejano Oriente, particularmente en Japón. Las aplicaciones incluyen losas, pavimentos, puentes, muros guía, contenedores, presas, y plantas de filtración. En la Tabla 4 se presenta información sobre varios proyectos, incluyendo volúmenes de concreto tratados con SRA-M.

Impacto de la contracción por secado

Como se dijo anteriormente, la mayor preocupación con respecto a la contracción del concreto es el potencial para el agrietamiento. < Otras problemas potenciales son el ondulamiento de las losas, la estabilidad dimensional de miembros de concreto, y la pérdida de presfuerzo en aplicaciones presforzadas. Típicamente se toman en consideración estabilidad dimensional y pérdida de presfuerzo durante el diseño, y a menos que la contracción real exceda en mucho el valor de diseño, no debe existir ningún problema.

< El agrietamiento debido a la contracción ocurre principalmente debido a la restricción. La restricción puede aplicarse externamente como una capa superpuesta adherida, o debido a factores internos tales como refuerzo o contracción no uniforme dentro del grosor del miembro de concreto. El concreto que no está restringido, como por ejemplo, un cilindro de 100 x 200 mm (4 x 11 pulg) no se agrietará debido a la contracción. El módulo de elasticidad y las características de escurrimiento plástico, afectan también la tendencia al agrietamiento.

El mecanismo por el cual ocurre agrietamiento es bastante simple. En un ambiente dado, el concreto que no está restringido tiene el potencial para agrietarse en una cantidad dada. Si toda, o una porción de esa contracción se restringe, se desarrollarán esfuerzos de tensión. Cuando los esfuerzos de tensión inducidos exceden la resistencia a tensión del concreto, ocurre agrietamiento. Las grietas proveen un fácil acceso al oxígeno, humedad, cloruros, y otros químicos agresivos en la matriz, y puede, por lo tanto, impactar la durabilidad a largo plazo del concreto. A este respecto, el ancho y la orientación de la grieta

se vuelven factores importantes.

El ondulamiento es el levantamiento de una losa en sus orillas causado por contracción diferencial entre la superficie superior y la inferior de la losa, debido a cambios de humedad y temperatura. Además de ser desagradable a la vista, se crea el potencial para el agrietamiento debido a cargas de tráfico, y en algunos casos a la masa misma de la losa. El ondulamiento puede reducirse o eliminarse minimizando los cambios diferenciales de humedad y temperatura relacionados con el volumen dentro de una losa. Por lo tanto, entre otras cosas, son deseables técnicas que conduzcan a una reducción de la contracción por secado.

Se han llevado a cabo varias evaluaciones, pruebas de laboratorio y exposiciones, para demostrar la capacidad del SRA-M para reducir el agrietamiento debido a contracción por secado. Ambos métodos de aplicación, la integral y de impregnación, se han investigado en estas evaluaciones. Las observaciones visuales periódicas de las unidades de prueba, muestran que el SRA-M es efectivo para reducir el agrietamiento debido a la contracción por desecación, como se indica en el segmento de revestimiento de un túnel en la Fig. 7.

Resumen y conclusiones

La contracción del concreto, en particular la contracción por secado, es inevitable, y debido a la restricción, puede ocurrir agrietamiento. Sin embargo, con buenas prácticas de vaciado del concreto y de construcción, puede minimizarse la contracción y el subsecuente agrietamiento.

Para minimizar la contracción por secado, el contenido total de agua de la mezcla de concreto debe mantenerse tan bajo como sea posible, para la aplicación pretendida. Esto puede lograrse usando un alto contenido de agregados duros y rígidos que estén libres de recubrimientos de arcilla y usando aditivos HRWR o MRWR. Además, el concreto no debe ser reemplado con agua adicional en el sitio de la obra. La aplicación de un buen sellador de superficie después del curado o el descimbrado de los moldes puede ser también benéfico.

En este artículo, se ha presentado información sobre el novedoso aditivo reductor de contracción que se han usado desde 1983, el SRA-M. Los datos muestran que este aditivo

reductor de contracción usado integralmente, o en aplicación locales, recurirá efectivamente la contracción por secado del concreto y, consecuentemente, el agrietamiento. Debido a su efectividad, se ha usado en una gran variedad de aplicaciones de vaciado de concreto desde 1983 [Ver Tabla 4 para una lista parcial - el volumen total del concreto tratado excede los 37,000 m³ (48,400 yd³)].

;Charles K. Nmai es Miembro del ACI y gerente técnico senior en el Departamento de Comercialización en Master Builders Inc., Cleveland, Ohio. Tiene un doctorado en ingeniería civil de la Universidad de Purdue. Es miembro del Comité E 701 del ACI, Materiales para Construcción con Concreto; 201, Durabilidad; 222, Corrosión; y 363, Concreto de Alta Resistencia.

;Fumiaki Hondo es jefe de la unidad de sistemas de construcción & materiales intracorporation de Sanyo Chemical Industries, Ltd., Japón. Tiene un grado de Maestría en ingeniería de la Universidad de Yamaguchi, y es miembro miembro del Instituto de Concreto del Japón. Sus intereses de investigación incluyen aditivos orgánicos para concreto.

;Rokuro Tomita es gerente general del departamento de desarrollo de negocios de Hihon Cemento Co., Ltd., Japón. Recibió su título de ingeniería del Instituto de Tecnología de Tokio en 1971; en 1994 recibió su doctorado en ingeniería. Es miembro de la Sociedad Japonesa de Ingeniería Civil y del Instituto del Concreto de Japón.

;Julie Buffenbarger es gerente e investigadora de productos de Master Builders. Ella tiene una maestría en síntesis orgánica de la Universidad Estatal de Bowling Green, Ohio, y 5 años de experiencia industrial en química analítica y tecnología de la cerámica. Es miembro de la Sociedad Química Americana



Aditivos y HPC: Un matrimonio feliz



Las tres innovaciones más importantes en la industria del concreto durante este siglo han sido : 1) la regla de la relación a/c, descubierta por Duff Abram, 2) el uso de aire apropiadamente incluido para proveer resistencia a congelación y deshielo, y 3) la invención del aditivo reductor de agua de alto rango (HRWR por sus siglas en inglés : high-range water-reducing) que permite una gran reducción de agua y/o incremento significativo del revenimiento.

El concreto de alto rendimiento (HPC = High Performance Concrete) está basado en la utilización apropiada de todo lo mencionado anteriormente. Los aditivos apropiados son esenciales para el HPC tanto en el estado plástico como en el endurecido. El futuro de la industria del concreto depende de un incremento significativo en el uso del HPC, de modo que el concreto se está convirtiendo cada vez más en el producto de elección en edificios, construcciones de infraestructura, proyectos para el cuidado del medio ambiente, carreteras, y pavimentos de todo tipo. Estructuras especiales tales como la Plataforma Hibernia de Base Gravitacional requirió HPC. Esta plataforma se está ahora en operación a 186 millas (300 km) al este de Newfoundland, Canadá.

El HPC se refiere a su calidad en el estado endurecido con respecto a una o más áreas específicas de excelencia o de alto rendimiento. El HPC se define para los tipos de proyecto enlistados en la Tabla 1.

Las familias de los actuales y futuros aditivos reductores de agua ofrecen al usuario una amplia elección de productos y una combinación de aditivos que pueden seleccionarse sensatamente para obtener un resultado específico en el estado plástico o endurecido, o en ambos. Los buenos aditivos reductores de agua proporcionan los siguientes beneficios.

Aditivo reductor de agua, Tipo A

Reducción de agua de 5 a 7 % con tiempos de fraguado normales o retardados. Dosificaciones de 2 a 5 oz/100 lbs (59 a 148 mL/45 kg) de cemento.

Aditivos reductores de agua de mediano rango

Reducción de agua del 7 al 9 % con tiempos de fraguado normales o retardados. Dosificaciones de 5 a 9 oz/100 lbs (148 a 266 mL/45 kg) de cemento.

Aditivos reductores de agua de alto rango, Tipo F o G

Reducción de agua del 10 al 30 % con tiempos de fraguado normales y retardados. Las dosificaciones son de 6 a 20 oz/100 lbs (177 a 591 mL/45 kg) de cemento.

Estos aditivos ofrecen una amplia gama de opciones con respecto al contenido de agua, relación agua-cemento (w/c) y revenimiento para cada tipo de concreto. Además, las características de fraguado pueden ser "normalizadas" para adecuarse a las condiciones climáticas y de colocación.

La aceleración se obtiene con un acelerador no corrosivo o con cemento de alta resistencia temprana. El retardo del fraguado inicial puede lograrse con el uso de un aditivo retardante, reductor de agua, compatible. Estos aditivos permiten al usuario ajustar con precisión la mezcla o mezclas, para adecuarse a los requisitos del proyecto y preparar mezclas opcionales para satisfacer posibles cambios climáticos o dificultades de colocación. Los aditivos se usan en todos los HPC y en muchos de ellos su potencial está siendo optimizado. Varios proyectos recientes demuestran la necesidad del uso de aditivos apropiados a dosificaciones óptimas.

La Estructura Hibernia con Base Gravitacional, Bahía de St. John, Canadá

Esta estructura masiva de soporte de 230 000 yds³ (175,858 m³) para una plataforma de producción petrolera, es un excelente ejemplo de HPC. Su placa de cimentación y su campana neumática incorporan componentes densamente reforzados - losa base, vigas, muros de hielo internos y externos - todos ellos requiriendo concreto con niveles óptimos de fluidez, control de fraguado, impermeabilidad, durabilidad, y otras propiedades necesarias para soportar el ambiente de Grand Banks (Tabla 2).

Estructura de Estacionamiento del Banco Suizo, Stamford,

Conn.

Las estructuras de estacionamientos en la parte norte de los Estados Unidos exigen HPC, principalmente en el área de durabilidad a largo plazo. Esta estructura de estacionamiento es un ejemplo excelente de planes apropiados y especificaciones que están siendo bien ejecutadas en la fase de construcción.

Este edificio de oficinas de 12 pisos con un pabellón anexo para comercio de 7 pisos, y 5 niveles de estacionamientos, incluye 948,000 pies² (88,069 m²) de espacio utilizable. La estructura del estacionamiento está vaciado en el lugar, y postensionado. Las especificaciones requirieron concreto superplastificado de 5000 psi (35 MPa) a 28 días, con una relación máxima de a/c de 0.40. Además, se especificaron 5 % de humo de sílice y fibras sintéticas. (Tabla 3).

Con el advenimiento de los números F, los perfiles de piso pueden medirse con precisión, y especificarse para satisfacer las necesidades del propietario. Aunque las mediciones se hacen típicamente inmediatamente después de que la losa del piso se ha instalado, la preocupación del propietario es solamente sobre el perfil en el estado endurecido, y específicamente cuando la losa del piso está en uso. Los aditivos reductores de agua o HRWR usados en el diseño apropiado de la mezcla puede ayudar a asegurar que los cambios de perfil a través del tiempo sean mínimos.

Un criterio de diseño para los pisos y las losas consiste en agrietamiento y ondulamiento mínimos. El ondulamiento afecta adversamente el perfil del piso, y específicamente, el tráfico adecuado. Desafortunadamente, muchos pisos han sufrido de ondulamiento significativo después de haber cumplido con los requisitos de especificación en el momento de la instalación.

El ondulamiento - contracción diferencial entre la parte superior y la inferior de la losa - ocurre en cada piso, y muchos factores influyen en el grado de ondulamiento. En todas las situaciones, la contracción reducirá el ondulamiento. En cualquier mezcla, la reducción de agua y su reemplazo con agregado, particularmente agregado grueso, reduce la contracción en la mezcla. Esta sustitución puede no reducir significativamente el ondulamiento en una mezcla que tiene altas características de contracción colocadas en una subbase que permanecerá

húmeda durante toda la vida del proyecto. Sin embargo, es un paso en la dirección correcta. El agrietamiento y ondulamiento mínimos es un requisito de todos los pisos interiores allanados con acero, sometidos a abrasión vehicular.

Los pisos interiores allanados con acero sometidos a tráfico vehicular requieren de HPC para lograr rendimiento funcional exitoso a largo plazo. Hay muchos pisos excelentes de este tipo instalados en los últimos años. En seguida tenemos una lista de algunos de los más interesantes.

Tiffany & Co. - Centro de Servicio a Clientes, Parsippany, NJ

El 40 % de la losa del piso del centro de distribución es superplano (F... 100) y el resto tiene un F...40/F...30. Se usaron aditivos HRWR con fibras de acero para proveer una baja relación a/c - un concreto con bajo contenido de agua con las características necesarias de trabajabilidad y acababilidad para lograr los pisos superplanos y muy planos con un mínimo de agrietamiento y ondulamiento.

La plataforma de carga, una área de máximo tráfico, fue endurecido con 1.0 lb/pie² (4.88 kg/m²) de un endurecedor de agregado mineral "salpicado en seco". Se usó un densificador/sellador líquido en todos los pisos para lograr una superficie con baja brillantez que es fácil de limpiar y es resistente a derrames no corrosivos (Tabla 4).

Bosal Co., Lavonia, Ga.

Este proyecto requirió un piso industrial de alto rendimiento y de trabajo pesado - un piso de 112,000 pies² (10,405 m²) que se tuvo que colocar en un día. La especificación requería un diseño de mezcla de 4000 psi (28 MPa) adecuado en su estado plástico, para la colocación por medio de una enrasadora laser. El diseño de la mezcla también requería el uso de fibras de acero y HRWR

La mayor parte de la superficie recibió un endurecedor "salpicado en seco" de agregado mineral. Los programas de proyectos como éste demandan un concreto fácilmente colocable, de modo que la enrasadora laser pueda utilizarse a plenitud para emparejar y nivelar, rápidamente, grandes cantidades de concreto. Estos proyectos también exigen que las mezclas fácilmente aplicables exhiban agrietamiento y

ondulamiento mínimos en toda la vida del piso (Tabla 5).

La reducción significativa del agua por el uso de aditivos apropiados da como resultado un contenido de agregado incrementado para mantener el rendimiento apropiado. Cuando se quitan 20 libras (9.1 kg) de agua de mezclado por yarda cúbica, se logra un incremento aproximado de 53 libras (24 kg) de agregado. El uso de aditivos HRWR permite esta reducción de agua, y más.

Las Autoridades del Puerto de Nueva York y Nueva Jersey ha estado siguiendo de cerca este método. Ellos han estado tomando los pasos necesarios para reducir el agua de mezclado, principalmente incrementando el contenido de agregado grueso.

Two Liberty Place, Philadelphia Pa.

Esta estructura de 775 pies (236 m) de alto y 58 pisos es el edificio con un núcleo hecho con cimbra deslizante, más alto de los Estados Unidos. El programa de la colocación de cimbras deslizantes requirió una velocidad de 12 pulg (305 mm) por hora. En las etapas iniciales del proyecto, el diseño original de la mezcla permitió sólo una velocidad de 6 pulg (152 mm) por hora. > La mezcla se revisó y se combinó con un HRWR y un acelerador no corrosivo (Tabla 7).

La dosificación del acelerador no corrosivo se adecuó para la construcción en invierno. La mezcla revisada permitió al contratista construir con cimbra deslizante, de 12 a 16 pulg (305 a 405 mm) por hora. A medida que el clima se hacía más caliente, la dosis del acelerador no corrosivo se redujo lentamente. En junio, el acelerador no corrosivo todavía estaba en la mezcla.

Una combinación de superplastificador y acelerador no corrosivo es un procedimiento estándar en el vaciado del concreto en clima frío. Las proporciones, particularmente del acelerador, tiene que ser adecuadas a las características de fraguado del cemento que está siendo usado, así como a las condiciones climáticas. Este "fino ajuste" de las mezclas se requiere en muchos proyectos de HPC.

Los aditivos reductores de agua y los HRWR permiten que se use HPC en toda la industria del concreto usando menos agua

e incrementando el revenimiento y tiempos "normalizados" de fraguado, y combinaciones de ellos. De este modo, el propietario recibe el mejor concreto posible en el estado endurecido, y el contratista de concreto es capaz de optimizar la colocación, consolidación y los procedimientos de acabado, para adecuarlos a sus requisitos personales y del proyecto.

La industria del concreto debe reconocer, entender y usar el HPC en una base regular. El concreto vaciado en la obra puede ser excelente, y su uso ase incrementará cuando el HPC se convierta en la norma. La industria del concreto no puede tener éxito si alguno de los jugadores clave - diseñadores, contratistas, productores de concreto, y fabricantes de aditivos - no proporcionan planes, especificaciones, concreto y procesos de construcción, que aseguren el éxito del usuario.

La pericia técnica y los aditivos de alto rendimiento son conocidos y están disponibles. Todos los jugadores clave en la industria desean el matrimonio del HPC y los aditivos. Todos deben estar de acuerdo y trabajar hacia el uso cotidiano del HPC.

William S. Phelan es miembro del ACI, Vicepresidente Senior de mercadotecnia y servicios técnicos de The Euclid Chemical Co., East Brunswick, NJ. Es miembro de los Comités 117, Tolerancias; 212 Aditivos Químicos; 302, Construcción de Pisos de Concreto; y 308, Curado del Concreto, del AIC.



Usando Aditivos para mejorar la Resistencia Química del Concreto

Si el concreto estará expuesto a químicos agresivos en un ambiente natural o industrial, ¿qué papel pueden jugar los aditivos para mejorar el rendimiento del concreto? Los aditivos mejoran significativamente el rendimiento para algunas, pero no para todas las exposiciones. Las estrategias para incrementar la vida de servicio de las estructuras expuestas a ataques químicos deben estar basadas en las mejoras en el rendimiento que puedan razonablemente esperarse cuando se usan aditivos diferentes.

Aquí! 

Resumen

La Baja Permeabilidad es Clave para la Resistencia Química

El ataque de químicos casi siempre ocurre cuando los químicos están en solución. Puesto que estas soluciones pueden penetrar profundamente en el concreto, la producción de concreto de alta calidad y baja permeabilidad es la primera línea de defensa. El control del agrietamiento es también una importante medida defensiva para limitar la exposición interna del concreto a químicos agresivos.

Los aditivos reducen la permeabilidad del concreto de varias maneras.

Permitir el uso de una menor relación agua/cemento

Hacer que el concreto se consolide más fácilmente

.Convertir productos solubles de hidratación en unos insolubles

Llenar los vacíos dentro de la matriz de la pasta de cemento

Reducir la contracción, reduciendo así el potencial de agrietamiento

El grado en el cual la menor permeabilidad mejora la vida de servicio del concreto en un ambiente de químicos agresivos depende en gran medida del tipo de químicos y su

concentración. En la siguiente discusión, nosotros trataremos de las formas más suaves de ataque químico hasta las más severas.

Lixiviación

La lixiviación es una forma suave de desarreglo que ocurre cuando el agua disuelve componentes en el concreto. El cemento portland hidratado contiene hasta 25 % a 30 % de hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, el cual es soluble en agua. Este componente, con mucha probabilidad, será lixiviado desde el concreto. Debido a que el hidróxido de calcio es más soluble en agua fría, el agua que viene de los riachuelos de las montañas o de presas es más agresiva que el agua más caliente (Ref. 1).

La lixiviación produce una apariencia arenosa en las superficies expuestas de concreto de los revestimientos de canales, canalones, o tuberías. Si el agua pasa a través de grietas o juntas, la lixiviación también puede erosionar el concreto interno. En el concreto poroso, con una alta relación agua-cemento, la lixiviación puede remover suficiente hidróxido de calcio para reducir la resistencia del concreto. Sin embargo, generalmente es sólo un problema cosmético.

Los aditivos pueden ayudar a controlar la lixiviación a través de dos mecanismos: reduciendo la permeabilidad y convirtiendo el hidróxido de calcio soluble en hidróxido de silicato de calcio insoluble (CSH). Las clases de aditivos que reducen la permeabilidad incluyen reductores de agua, superplastificadores, y agentes inclusores de aire. Bajo la mayor parte de las condiciones, el uso de estos aditivos en una proporción apropiada, el concreto bien consolidado controla adecuadamente la lixiviación.

Los aditivos tales como el humo de sílice u otros materiales cementantes complementarios con propiedades puzolánicas reducen la permeabilidad y convierten algo del hidróxido de calcio en CSH insoluble. Cuando se espera lixiviación más severa, el costo adicional de un aditivo de humo de sílice puede estar justificado.

Ataque de sulfatos

El concreto que está expuesto a sulfatos, usualmente en el suelo o en aguas freáticas, puede desintegrarse en solo unos

cuantos años debido a una reacción física o química, o ambos. El concreto sometido a suelos secos conteniendo sulfatos, no será atacado. Pero puede ocurrir desintegración severa si el concreto inapropiadamente proporcionado es expuesto a agua conteniendo sulfatos disueltos, o a alternancia frecuente de mojado y secado por las aguas con sulfatos (Ver foto en la Pág. 541).

< En vez de destruir el concreto disolviendo los componentes, los sulfatos reaccionan químicamente con otros componentes para formar un mineral expansivo que descompone el concreto. Debido a que el hidróxido de calcio es uno de los componentes involucrados en la reacción, la resistencia a sulfatos puede mejorarse convirtiendo este componente en el CSH químicamente más resistente. Cuando existen frecuentes ciclos de mojado y secado en un ambiente con sulfatos, la desintegración también puede ser causada por el crecimiento de cristales de sales de sulfato, que es un fenómeno físico (Ref. 2). Ya sea que el mecanismo de desintegración sea químico o físico, la permeabilidad reducida mejora la resistencia a sulfatos no permitiendo la entrada de soluciones de sulfatos.

El humo de sílice es muy efectivo para mejorar la resistencia a sulfatos, convirtiendo el hidróxido de calcio en CSH. Otras puzolanas, tales como ceniza volante, pueden también mejorar la resistencia a sulfatos, pero es necesario tomar algunas precauciones. Debido a su bajo contenido de calcio, la ceniza volante de Clase F es más efectiva que la Ceniza volante Clase C para mejorar la resistencia a sulfatos. Sin embargo, algunos tipos de ceniza volante Clase F con un alto contenido de alúmina, no son efectivos para mejorar la resistencia a sulfatos. La ceniza volante de Clase C con bajo contenido de calcio, con frecuencia es efectiva, pero la ceniza volante de Clase C con alto contenido de calcio con frecuencia es inefectivo y puede disminuir la resistencia a sulfatos. En general, se logran los mejores resultados si la ceniza volante se agrega al concreto en vez de usarse como un reemplazo del cemento (Ref. 1).

Los aditivos inclusores de aire mejoran la resistencia a sulfatos, principalmente debido a que la inclusión del aire permite una menor relación agua-cemento que disminuye la permeabilidad (Ref. 3). Por la misma razón, los aditivos reductores de agua también mejoran la resistencia a sulfatos,

permitiendo relaciones de agua cemento de 0.45 o más bajos, para exposiciones severas, sin sacrificar la trabajabilidad. Evite el uso de aditivos reductores de agua que contengan cloruro de calcio, ya que las bajas concentraciones de cloruros disminuyen la resistencia a sulfatos (Ref. 1).

Además de usar aditivos para incrementar la resistencia a sulfatos, otras estrategias efectivas incluyen:

El uso de cemento Tipo II o Tipo V

Uso de cementos con bajo contenido de cal (conteniendo menos silicato tricálcico, lo que produce hidróxido de calcio cuando se hidrata, y más silicato dicálcico)

Incrementando el contenido de cemento

.Extendiendo el período de curado para reducir la permeabilidad.

Ataque de ácidos

El concreto de cemento portland no resiste bien los ácidos. Sin embargo, la velocidad con que los ácidos destruyen el concreto depende de:

.La resistencia a ácidos y su concentración

Temperatura de la solución del ácido

Condiciones de exposición - soluciones ácidas estáticas o móviles

.Solubilidad de productos de reacción

Los ácidos sulfúrico, hidrociorídrico y nítrico, son fuertes y altamente agresivos. La agresividad se incrementa al incrementar la concentración y la temperatura del ácido. Las soluciones móviles son más agresivas que las soluciones estáticas, debido a que constantemente nuevo ácido llega a estar en contacto con el concreto. Y los ácidos que forman productos solubles de reacción, generalmente son más agresivos que los ácidos que forman productos insolubles de reacción (Ref. 1).

El ácido ataca al concreto disolviendo los productos de

hidratación del cemento o a través de reacciones químicas ácido-base. El hidróxido de calcio, el producto de reacción que se disuelve más rápidamente, es atacado aún por las concentraciones suaves o bajas de soluciones de ácido. Los ácidos más fuertes y más concentrados atacan a todos los hidratos de silicato de calcio.

Puesto que ningún concreto de cemento portland es totalmente inmune al ataque de ácidos, los aditivos pueden usarse sólo para disminuir la tasa de deterioro. Los aditivos reductores de agua, incluyendo los superplastificadores, reducen la relación agua-cemento, y por lo tanto, la permeabilidad. Sin embargo, a medida que el concreto se deteriora, nuevas superficies están expuestas al ácido, especialmente cuando los productos de la reacción son solubles. Los ácidos oxálico y fosfórico forman productos de reacción insolubles que no se pueden quitar fácilmente. Para los concretos expuestos a estos ácidos, al reducir la permeabilidad con aditivos tales como reductores de agua o puzolanas, se puede incrementar la vida de servicio.

También se ha usado humo de sílice para mejorar la resistencia al ataque de ácidos, convirtiendo el hidróxido de calcio en CSH, y reduciendo la permeabilidad del concreto. En un estudio, dosis de humo de sílice de hasta 30 % en peso del cemento incrementó la resistencia del concreto a algunos ácidos. Se mojaron alternativamente cilindros de concreto de 3 pulg de diámetro y 6 pulg de alto en una solución de ácido por varios días. Después se secaron durante 7 días antes de volver a sumergirse en una solución fresca (Ref. 4). El criterio de falla fue una pérdida de peso del 25%. Los cilindros hechos con 30 % de humo de sílice y empapados en una solución al 5 % de ácido acético no habían fallado todavía después de 60 ciclos. Y una dosis de 15 % de humo de sílice fue suficiente para lograr que los cilindros soportaran 50 ciclos en una solución de ácido fórmico del 5 % sin fallas.

Sin embargo, inclusive las grandes dosis de humo de sílice no mejoraron marcadamente la resistencia a ácidos. Los cilindros conteniendo 25 % de humo de sílice fallaron después de solamente 5 ciclos en una solución de ácido sulfúrico del 5 %, y los cilindros con 30 % de humo de sílice soportaron únicamente 32 ciclos en una solución de ácido sulfúrico del 1 %.

Eligiendo la Mejor Estrategia del aditivo

Al reducir la permeabilidad del concreto con reductores de agua, puzolanas o ambos, se incrementa la resistencia al ataque químico. Los aditivos de humo de sílice son particularmente efectivos debido a que a altas tasas de dosificación, ellos pueden convertir la mayor parte del hidróxido de calcio en el CSH químicamente más resistente. Sin embargo, en algunas exposiciones químicas, inclusive el concreto con una alta dosificación, se deteriora tan rápidamente que la elevada tasa de dosis no proporciona beneficios palpables.

Antes de decidir el uso de una combinación de aditivos para mejorar la resistencia a químicos, se sugiere las pruebas en servicio (Ref. 4). Las pruebas de diferentes combinaciones en instalaciones existentes, pueden proporcionar datos que ayudarán a cuantificar los efectos del aditivo en el rendimiento. Después los datos pueden usarse para determinar si algún incremento en la vida de diseño del concreto es lo suficientemente significativo para justificar el costo agregado del aditivo usado.

FOTOS

1 El concreto expuesto a sulfatos en el suelo o en aguas freáticas puede desintegrarse en sólo unos años. Los aditivos reductores de agua e incluso de aire disminuyen el ataque de sulfatos, reduciendo la permeabilidad. Las puzolanas convierten el hidróxido de calcio en un hidrato de silicato de calcio químicamente más resistente, reduciendo al mismo tiempo la permeabilidad.

Este concreto se deterioró cuando se expuso a soluciones de ácidos en una planta industrial. Los aditivos pueden incrementar la vida de servicio del concreto expuesto a ácidos suaves, pero los ácidos fuertes atacan rápidamente aún el concreto de cemento portland de alta calidad.

Referencias

1. G.W. DePuy, "Chemical Resistance of Concrete"