

Henry C. Turner del ACI en 1973. Fue designado Miembro Honorario del Instituto Americano del Concreto en 1968.

Es miembro del Sigma XI debido a sus contribuciones a la entomología, fue considerado Miembro Honorario Vitalicio del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York en 1968, y Padrino Honorario en 1973. Desde 1968 ha sido investigador asociado del Depto. de Agricultura de Florida y de Servicios al Consumidor.

El Sr. Mather es miembro de la ASTM y del AAAS. Fue Secretario y posteriormente Presidente del Comité C-9 de la ASTM sobre Concreto y Agregados del Concreto; fue Presidente del Comité C-1 de la ASTM sobre Cemento de 1968 a 1974; actualmente es Presidente del Comité E-39 de la ASTM sobre Normas de Riesgos contra Incendio; además es Vice-Presidente de la ASTM. Es miembro del Comité Especial de la ASTM sobre Prácticas Métricas.

En 1964 fue Presidente del Instituto Americano del Concreto del Comité Estadounidense de la Comisión Indades Técnicas del ACI; y de 1958-1967 figuró en el Comité de Dirección del ACI. Es miembro del Comité del Concreto, del Comité Estadounidense de la Comisión Internacional de Grandes Presas; y es ex-miembro de la Comisión sobre Durabilidad de la Federación Internacional para Concreto Pre-esforzado. Es miembro del Instituto Americano de Ingenieros Mineros, Metalúrgicos y Petroleros. Ha servido como Presidente de la División de Concreto de la Highway Research Board. Fue el orador de la conferencia Henry M. Shaw en la Universidad Estatal de North Carolina en 1967, en la conferencia Stanton Walker en la Universidad de Maryland en 1969, y en la conferencia Edgar Marburg de ASTM en 1970.

MEZCLAS DE MATERIALES CEMENTANTES PARA CONCRETO QUE VA A ESTAR EXPUESTO AL AGUA DE MAR (1)

Bryant Mather (2)

RESUMEN

Con el aumento en el costo de la energía y consecuentemente de los productos que consumen mucha energía para producirse tal como el clinker del cemento Portland, con toda razón está aumentando la atención hacia el uso de mezclas de cemento Portland con otros materiales, solamente por consideraciones económicas. En una exposición marina, se necesita que el concreto sea resistente al humedecimiento y secado, así como al ataque moderado de los sulfatos. Generalmente también debe ser de baja permeabilidad para proteger al refuerzo de la corrosión. Datos de laboratorio y experiencia de campo disponible indican que se tienen beneficios en cuanto a una exposición al agua de mar con las mezclas de cemento Portland y puzolana o cemento Portland y escoria de alto horno pulverizado, además de reducir el costo, lo que las haría atractivas inicialmente. Con estas relaciones presentes, se repasan los factores relevantes al uso de materiales y las propiedades del concreto afectadas por una exposición al agua de mar.

- (1) Preparado para el Quinto Simposio Internacional Sobre Tecnología del Concreto en la Universidad de Nuevo León, Monterrey, México, 23-24 de marzo de 1981.
- (2) Jefe del Laboratorio de Estructuras, V.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, P.O. Box 631, Vicksburg, Miss., E.E.U.U.

INTRODUCCION

Se ha empleado el concreto a base de cemento hidráulico en la construcción de obras expuestas al mar desde hace por lo menos 2,000 años. La primera estructura de concreto reforzado hecha utilizando cemento Portland está aún en servicio. A pesar de este largo historial de uso exitoso aún hay casos de concreto que hubiese servido satisfactoriamente en un ambiente no-marino que sufren deterioro severo y destrucción cuando es expuesto al mar.

La investigación sobre los factores que afectan la durabilidad del concreto bajo una exposición marina ha sido realizada en muchos laboratorios y esto ha arrojado un volumen de información que es satisfactorio para permitir medidas prácticas para minimizar la posibilidad de daño en la mayoría de los casos. Se necesita más trabajo para aclarar completamente las funciones interactivantes de los diferentes constituyentes del cemento con los iones cloruro y sulfato del agua de mar. También se necesita más investigación para apreciar completamente los diferentes mecanismos que pueden acelerar la corrosión del metal ferroso embebido en concreto expuesto al mar. El uso de cementos Portland que contienen menos del 8% de aluminato tricálcico según se calculó del análisis químico, o el uso de mezclas de cemento, o de mezclas de cemento con puzolana o escoria del tipo apropiado, normalmente evitarán el ataque del sulfato. Se necesita más investigación para interrelacionar los parámetros físicos de estructura de poro, ya que estos controlan la permeabilidad y resistencia, con los parámetros químicos que controlan la naturaleza, cantidad y rapidez de generación de productos de volumen aumentado que generan expansión interna.

En el memorandum técnico #96 de la Beach Erosion Board, publicado en 1957, se presentó una discusión acerca de "Los factores que afectan la durabilidad del concreto en estructuras costeras" (14). La publicación SP-8 del ACI de 1964, fueron las memorias de un simposio realizado en Seattle durante la convención de otoño en 1962. En él, el comportamiento del concreto en el mar fue tratado por Ivan Tyler (25). En el Simposio de la Highway Research Board sobre Efectos de Fluidos Agresivos sobre el concreto hubo un trabajo acerca del agua de mar (16). En 1969 se publicaron las memorias del Simposio Internacional RILEM sobre Durabilidad del Concreto (22) abarcando "Cuestiones, principios y métodos básicos de ensaye y determinación de la durabilidad del concreto bajo la acción del congelamiento, sulfatos y ácidos; y la corrosión del refuerzo y su prevención". La Segunda Conferencia de las ASCE sobre Ingeniería Civil en los océanos, realizada en 1969, incluyó una discusión acerca del concreto en el mar (17). Más recientemente ha aparecido la publicación SP-65 del ACI "Comportamiento del Concreto en un Ambiente Marino" (13).

Cuando el concreto no se comporta satisfactoriamente como un resultado del estar expuesto al mar, la causa es que no se obtuvieron los niveles adecuados de calidad. El no obtener estos niveles de calidad resulta ya sea de la negligencia de solicitarlos en las especificaciones o fallas en la ejecución del trabajo para cumplir con los requisitos especificados. Por lo tanto, la obtención de un comportamiento satisfactorio depende de: a) una confirmación de los requisitos de comportamiento, b) una evaluación de las influencias del ambiente,

c) un entendimiento de la interrelación de las influencias del ambiente, niveles de calidad y comportamiento logrado, d) selección y especificación de niveles de calidad relevante y el asegurar que se cumplan los requisitos especificados.

FENOMENOS QUE PRODUCEN EL DETERIORO.

Muchos fenómenos que contribuyen al deterioro del concreto lo hacen mediante mecanismos que inducen una expansión interna. Aquello que se expande puede ser un constituyente del cemento, un constituyente del agregado o el contenido de un poro o hueco en el concreto. Estos fenómenos incluyen: acción del congelamiento, la reacción álcali-agregado, ataque de los sulfatos, corrosión del acero y una variedad de reacciones químicas en las cuales no intervienen álcalis o sulfatos. Similarmente, el deterioro puede ser inducido mediante contracción no uniforme. El fenómeno que induce tal contracción incluye el secado y carbonatización. El deterioro del concreto puede ocurrir debido a la solución y eliminación mediante transminación de los constituyentes solubles de la pasta de cemento en el concreto. El deterioro del concreto también puede ocurrir como una consecuencia secundaria al sobrecargar la estructura, lo cual resulta a partir de la interacción de fuerzas mecánicas externas, tales como las inducidas por movimientos en la cimentación, fuerzas sísmicas y explosiones. Cuando se encuentra que el concreto se ha deteriorado después de la ocurrencia de tales cargas anormales, se supone que el deterioro es una consecuencia secundaria de la falla estructural que precedió o acompañó el deterioro. Tal deterioro puede evitarse solamente mediante un diseño estructural que resista las cargas impuestas. El agrietamiento que ocurre debido a variaciones no controladas en la temperatura no causan deterioro en sí en el sentido dado en esta discusión, pero sí aumenta la vulnerabilidad al deterioro debido al congelamiento o ataque de los sulfatos.

FACTORES PERTINENTES EN UNA EXPOSICION DE AGUA DE MAR.

El concreto expuesto al agua de mar estará sujeto al humedecimiento mediante una solución acuosa que contiene principalmente cloruro de sodio y sulfato de magnesio disueltos. Los océanos contiene alrededor de 3.5% de sales disueltas. Los cationes principales, Ca^{++} , Mg^{++} , Na^{+} y K^{+} , existen en el agua de mar principalmente como elementos no complejos. Los aniones principales incluyen el Cl^{-} , el cual no es muy complejo y el $\text{CO}_3^{=}$, HCO_3^{-} y el $\text{SO}_4^{=}$, que sí lo son. Expresados como miligramos por litro de agua de mar, los elementos principales presentes en la solución son cloruro, 19,000 mg/lto.; sodio, 10,600; magnesio, 1,300 azufre, 900; calcio, 400; y potasio, 380. Hay otros elementos presentes, pero la suma de éstos no pasa de 65 mg/lto. Los seis elementos mencionados constituyen el 99% de las sales disueltas en el agua de mar. Aunque se ha encontrado que la concentración de sólidos disueltos varía de lugar a lugar, la relación entre ellos es aproximadamente constante en todas partes (1).

Por lo tanto, los factores cuyo efecto debe considerarse en el concreto son el congelamiento y deshielo, humedecimiento y secado, y la reacción química de los cloruros, sulfatos, álcalis (sodio y potasio), y en algunos casos, dió-

xido de carbono disuelto.

Los elementos del concreto que pueden verse afectados por el humedecimiento o reacción química con cloruros, sulfatos o álcalis, incluyen el cemento, los agregados, el acero de refuerzo u otro metal, si es que lo hay presente.

EFFECTOS EN EL CONCRETO DEBIDO A INMERSION CONTINUA EN AGUA DE MAR.

El concreto que está totalmente o continuamente sumergido en agua, aun cuando el agua contenga sales disueltas tales como las que se encuentran en el agua de mar, se le puede considerar que está en un ambiente protegido. La inmersión continua proporciona generalmente un ambiente uniforme en lo que respecta a temperatura y contenido de humedad, lo cual evita que el concreto sumergido esté sujeto a deterioro debido al congelamiento, cambios volumétricos debido al humedecimiento y secado, y cambios volumétricos diferenciales debido a diferencias en contenido de humedad entre la superficie y el interior. La inmersión continua también tiende a reducir el potencial de las reacciones químicas eliminando los cambios en el grado de saturación, siendo éstos un mecanismo para el flujo hacia adentro y hacia afuera del concreto de las soluciones que contienen iones capaces de atacar los constituyentes del concreto, y dejar solamente los gradientes de concentración como un medio para el ingreso de tales iones. Locher y Pisters (12) observan que, bajo iguales condiciones de exposición, la agresividad del agua aumenta con aumentos en la concentración de las sustancias relevantes, pero que la agresividad también se aumenta con temperaturas mayores, presiones mayores, humedecimiento y secado, o abrasión mecánica debido a aguas turbulentas o de flujo rápido.

EFFECTOS DE LA INMERSION INTERMITENTE DEL CONCRETO EN EL AGUA DE MAR.

La mayoría de las estructuras de concreto expuestas al agua de mar están a veces sumergidas y a veces expuestas al aire. Si la estructura está localizada donde la temperatura desciende abajo del punto de congelación, el concreto expuesto al aire cuando la marea está baja, está sujeto a una acción de congelamiento tan severo como cualquier concreto expuesto. El darse cuenta de que el concreto expuesto en la zona de mareas y en una región con temperaturas invernales bajas, estaría sujeto a una acción muy severa al congelamiento, resultó en la selección de la elevación media de la marea en Treat Island, Cobscook Bay, Me., como la localización de la estación de intemperismo natural severo, perteneciente al U. S. Army Corps of Engineers. Este lugar ha sido utilizado desde 1936 por el Cuerpo de Ingenieros para desarrollar rápidamente información sobre la resistencia relativa de concretos diferentes a la acción de congelamiento (10).

El segundo efecto importante en el concreto relacionado con el humedecimiento y secado son las relaciones en los cambios volumétricos debido a cambios en la uniformidad del contenido de humedad. Estos fenómenos a menudo se conocen como efectos de contracción por secado.

En lugares tales como Treat Island, la temperatura media en el agua de mar es baja y las reacciones químicas se llevan a cabo más lentamente. Los concretos deficientes en resistencia al congelamiento, raras veces duran lo suficiente como para mostrar efectos de ataque químico fácilmente observables; por lo tanto, se puede argumentar que hay una tendencia general de que la severidad del ataque químico disminuya cuando aumenta el ataque físico y viceversa.

ATAQUE QUIMICO DEL AGUA DE MAR SOBRE EL CONCRETO.

Los constituyentes del agua de mar potencialmente agresivos con respecto al concreto, son los iones de sulfato, cloruro, carbonato, bicarbonato, álcali-metálico y de magnesio. Dado que el sulfato en el agua de mar se obtiene del sulfato de magnesio en vez del sulfato de calcio o de sodio (el cual es el caso de ataque de sulfatos donde no es agua de mar), las reacciones químicas del sulfato de magnesio con varios de los constituyentes del cemento Portland hidratado son algo diferentes. Lea (11) señala que, inicialmente, el sulfato de magnesio tiene una acción similar a la de otros sulfatos al atacar el hidrato de aluminato de calcio, pero que posteriormente puede inducir un efecto notablemente diferente y de mayor alcance debido a su habilidad (que lo distingue de los otros sulfatos) para atacar y descomponer el hidrato de silicato de calcio. Esta reacción continúa hasta su terminación debido a la baja solubilidad del hidróxido de magnesio. Los iones de carbonato y bicarbonato pueden participar en la reacción de la carbonatización del ión calcio o del hidróxido de calcio formado durante la hidratación del cemento. En una discusión sobre el proceso de deterioro del concreto en los canales en Newport News, Va., Ruth Terzaghi (23) concluyó que había dos procesos simultáneos, uno implicaba el ataque de sulfatos que causaban expansión interna y agrietamiento, y el segundo implicaba el dióxido de carbono disuelto en el agua como ácido carbónico que causaba un debilitamiento local y la desintegración. Las muestras de agua tomadas de pozos de alivio en estos canales fueron consideradas, basadas en el contenido de cloro, como contenido desde 30 al 60 por ciento de agua de mar, y tenían contenidos de CO₂ libre de 7 a 99 mg/lto.; en la muestra con el menor contenido de agua de mar se encontró el mayor contenido de CO₂ libre que fue de 57 mg/lto y un pH de 6.9.

Se ha encontrado que la contracción interna debido a la carbonatización ocurre a la rapidez máxima y es más extenso cuando el concreto está sujeto a un ambiente en el cual la humedad relativa es cerca de 50%. La carbonatización, como el secado, es un fenómeno que empieza desde la superficie hacia adentro y consecuentemente el grado al cual un elemento de concreto dado se ve afectado a lo largo de un período disminuye marcadamente con una disminución en la relación superficie-masa. Carlson (4) ha demostrado que un humedecimiento ocasional de la superficie de concreto costará secarse hasta una profundidad considerable porque el concreto seco absorberá tanta humedad en un día como el concreto fresco pierde en dos semanas de secado. Por lo tanto, se concluye que la contracción por secado y la contracción por carbonatización no sean las fuentes principales de deterioro del concreto en el mar. Una confirmación aparente a esta conclusión la sugiere la ausencia de reportes sobre tal deterioro en la literatura disponible. Se sugiere que el deterioro del concreto en el agua de mar es distinto debido a la propia naturaleza del ambiente, la relación superficie-masa típicamente baja de