

de los elementos estructurales utilizados, y el evitar materiales, proporcionamientos y prácticas constructivas que conducirían al desarrollo de este tipo de deterioro.

#### ALCALIS

Los iones de álcalis metálicos pueden participar en cualquiera de varias reacciones con sílica reactiva o con los carbonatos reactivos constituyentes del agregado. Stenton (29) enumeró entre las estructuras afectadas adversamente por la reacción álcali-sílice, algunas secciones en los rompeolas en los condados de Venturas y Santa Bárbara en California. Hasta el momento aún no hay casos documentados de reacciones álcali-carbonato que hayan causado el deterioro de estructuras de concreto expuestas al agua de mar. Kennedy y Mather (10) encontraron que un concreto conteniendo: agregado triturado de caliza que había estado expuesto al agua de mar en Treat Island, había evidencia de formación de anillos de reacción sobre ciertas partículas de agregado grueso de caliza. La caliza estudiada contenía cerca de 4% de una arcilla montmorillonítica la cual exhibe grandes expansiones cuando se humedece con una solución conteniendo iones de sodio. Ellos demostraron que esta roca exhibía un incremento en volumen de dos a tres veces cuando se sumergía en agua de mar que cuando se sumergía en agua dulce o en una solución saturada con hidróxido de calcio. Buck y Mather (3) describieron un caso, se cree que sea el primer registro, de deterioro de concreto debido a una reacción álcali-sílice en el cual el agregado reactivo era cuarzo. Dado que la estructura afectada era un muelle seco en Charleston, Carolina del Sur, en un principio se supuso que lo raro de la reacción pudo haberse debido al agua de mar. Sin embargo, el producto de la reacción era principalmente un silicato de potasio en lugar de un silicato de sodio, lo cual indicaba que los álcalis del mar no participaron significativamente. Se concluyó que lo raro del caso estaba relacionado con los aspectos físicos del ambiente en lugar de los químicos.

La expansión del concreto causada por el hinchamiento del gel álcali-sílice formaban el concreto por la reacción de álcali y sílice soluble pueden evitarse en cualquiera de tres formas: a) evitar el uso de agregados conteniendo sílice soluble; b) mediante la restricción en la composición del cemento Portland con respecto al contenido de álcali de tal manera que la cantidad total de óxido de sodio y óxido de potasio, calculado como óxido de sodio no se excede 0.6%; o c) mediante el uso de cantidades adecuadas de sílice activa finamente pulverizada introducida en la forma de puzolana. Por lo que se sabe, no ha habido ningún deterioro del concreto debido a reacciones álcali-sílice en concreto en el cual se han empleado cualquiera de las tres medidas preventivas.

En todos estos casos que han sido examinados adecuadamente, se ha encontrado que el cemento que se tuvo la intención de que fuese bajo en álcali, de hecho no lo era, o de que surgió alguna condición de exposición anormal en la cual el álcali de un cemento técnicamente bajo en álcali fuese presumiblemente concentrado durante la exposición tal que proporcionara el ambiente químico del agregado, similar a aquél que se hubiese producido en un ambiente más normal si se hubiera utilizado un cemento con un contenido alto en álcali. A partir de es

tas consideraciones se concluye que si por razones de economía, trabajabilidad y reducción en el consumo de calor, hay beneficios que se puedan obtener mediante el uso de cantidades sustanciales de puzolanas o escorias químicamente activas, esta práctica será favorable para evitar el deterioro debido a la reacción álcali-sílice.

#### CLORUROS

El ión cloruro puede participar, ya sea en reacciones químicas similares a aquellas en donde participa el ión sulfato, o en reacciones implicando la corrosión del refuerzo o cualquier metal embebido. Con respecto a esta última, Halstead y Woodworth (8) reportaron que estructuras de concreto reforzado expuestas a condiciones costeras (dentro de los 16 km de la costa) en Sud-Africa, han, en algunos casos, mostrado deterioro que se cree causado por la corrosión electroquímica del acero. En la discusión de su trabajo, se notó que la Administración Ferroviaria de Sud-Africa ha adoptado la política de utilizar estructuras de concreto reforzado en lugar de acero debido a dificultades en el mantenimiento de estructuras metálicas. Esta Administración también ha intentado diseñar estructuras con el mínimo acero de refuerzo. El comportamiento de tales estructuras ha sido buena, y tal deterioro se cree que está relacionado con un recubrimiento insuficiente sobre el acero de refuerzo, lo cual permitió que ocurriera la corrosión.

Es doble el papel de los cloruros en agua de mar en la interacción química con concreto. Los cloruros actúan independientemente, y tiende a retardar o inhibir la acción de los sulfatos. La presencia de cloruros, como en el agua de mar, retarda o inhibe la expansión del concreto debido a soluciones de sulfato, pero no al grado de reacción. Lea (11) citó el trabajo de Batta, quien atribuía el efecto a la mayor solubilidad del yeso y de los sulfatos de calcio o aluminio en soluciones de cloruro, y ésta es la razón de por qué las fallas que surgen del ataque químico de agua de mar no es precedida por el hinchamiento al mismo grado que en las soluciones de sulfato de sodio o magnesio.

Griffin y Henry (7) estudiaron, separadamente, los efectos en el concreto de cloruro de sodio y sales de agua de mar. Su propósito era determinar el efecto del rocío de agua de mar sobre concreto, y las cantidades permisibles de sal en el concreto cuando éste es mezclado. Ellos encontraron que la salinidad óptima del agua de mezclado, en lo que concierne máxima resistencia a la compresión, fue de 18 a 36 gr/kg cuando se usaba cloruro de sodio, y hasta 88 gr/kg cuando se usaba agua de mar. También encontraron que cuando se usaba cloruro de sodio, la rapidez de movimiento de la humedad a través del concreto desde una región de mayor a una de menor humedad relativa disminuyó al aumentar la salinidad del agua de mezclado hasta una salinidad de cerca de 70 gr/kg, y luego permanece relativamente constante al excederse la salinidad. Cuando se utilizó agua de mar, la rapidez de movimiento de la humedad disminuyó con aumento en salinidad, pero se volvió constante alrededor de los 25 gr/kg.

Ellos concluyeron que en algunos aspectos algo de sal puede ser beneficioso al concreto. Con una salinidad del agua de mezclado de alrededor 25 gr/kg, se

mejoró la resistencia, se disminuyó la rapidez de movimiento de humedad y era — despreciable la corrosión del acero dulce en el concreto de baja resistencia utilizado en su investigación. Cuando se usó cloruro de sodio, la corrosión máxima del acero dulce pareció tomar lugar con una salinidad de cerca de 70 gr/kg. Tal vez deba enfatizarse que Griffin y Henry estaban estudiando las "cantidades permisibles de sal" que podrían tolerarse; yo creo que no es su intento sugerir que uno deba añadir deliberadamente sal al concreto reforzado si esto puede evitarse.

#### ACCION DE CONGELAMIENTO.

En regiones donde el concreto en servicio está sujeto a la acción de — congelamiento y deshielo, quizás el factor principal que ha producido el deterioro es el congelamiento. Dado que la mayoría que atiende este simposio proviene de regiones donde el concreto en servicio no está sometido al congelamiento, sólo diré qué soluciones para este problema están disponibles en las referencias — al final de este escrito.

#### LIXIVIACION

El concreto puede deteriorarse al lograr que sus constituyentes solubles sean disueltos y eliminados mediante solventes que se filtran a través de — él. El grado al que puede ocurrir la disolución y eliminación depende de la rapidez a la cual los solventes se mueven a través del concreto, de la solubilidad de los constituyentes solubles y de la fuerza disolvente del solvente. Una — vez que el solvente ha disuelto todo el material soluble que puede mantener en solución, su movimiento posterior a través del concreto, ya no disolverá ni eliminará más material. Si el solvente está saturado o casi saturado antes de entrar al — concreto, no disolverá ningún material, o sólo una cantidad muy pequeña al atravesar el concreto. El medio más efectivo para prevenir el deterioro por lixiviación es asegurarse de que el concreto tenga baja permeabilidad. Powers, Copeland y Mann (21) demostraron que puede prevenirse la continuidad capilar de pastas de — cemento y consecuentemente reducir grandemente la permeabilidad utilizando relaciones agua-cemento bajas y un curado adecuado. Sus datos muestran que las pastas de cemento curadas con humedad pierden continuidad en la capilaridad después de períodos de curado tan cortos como tres días para un concreto con relación — agua-cemento de 0.4, hasta tan largos como un año cuando la relación agua-cemento era de 0.70. Por lo tanto, se echa abajo la creencia de que se requiere un contenido alto de cemento para un concreto de baja permeabilidad, esto si no es una baja permeabilidad temprana, y que se deje que el concreto permanezca húmedo. Mather (15) demostró que un concreto con una relación agua-cemento equivalente de 0.8, curado con humedad durante 90 días, tenía permeabilidades tan bajas o más — bajas aún que los concretos elaborados con cemento Portland Tipo II en el cual se sustituía un 30% en volumen sólido del cemento con escoria de alto horno, 35% ó 50% por un cemento natural, 35% por una puzolana natural (pumicita), 20 ó 30% por una puzolana de pizarra calcinada, u 8% por suelo diatomáceo no calcinado.

#### CORROSION DEL ACERO.

El Comité 222 del ACI patrocinó un simposio en 1973 en Atlantic City — sobre "Corrosión de Metales en Concreto". Los trabajos presentados, además de — otros, fueron publicados en el ACI SP49 (20). Un simposio del ASTM sobre "Corrosión con Cloruro" se llevó a cabo en 1976 y se publicaron sus memorias (24). — Gjorv y Vennesland (6) han contribuido al entendimiento de las sales marinas y — de la alcalinidad.

#### EJEMPLOS DE COMPORTAMIENTO DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDO A EXPOSICION MARINA.

Wentworth-Shields (28) describió la primera estructura marina de con— creto reforzado en Inglaterra, que fue construida en Southampton en 1899, y ob— servó que habían ocurrido muy pocas fallas. La estructura era un muelle pequeño consistente en una losa de 30 x 12 mts sobre pilotes. En 1902 se construyó en — Southampton una estructura de concreto reforzado de 48 x 6 x 10 mts, que se cono— ció como Town Quay. Unos cuantos años más tarde aparecieron grietas longitudina— les a lo largo del refuerzo causados por la oxidación del acero. Estas grietas aparecieron arriba del nivel medio de las mareas. Se hicieron reparaciones con — mortero aplicado a presión. La oxidación del acero ha sido atribuible a la permeabilidad del concreto, pero en el caso de Town Quay fue la acción electrolíti— ca, sino la única causa, sí una contribución importante. La estructura de 1899, que aún está en condiciones excelentes, fue hecha con concreto con una relación — agua/cemento baja; la estructura de 1902 fue hecha con una mezcla "más mojada".

No solamente está en condiciones excelentes la primera estructura mari— na de concreto reforzado construida en Inglaterra, sino la mayoría de las estruc— turas de concreto expuestas al agua de mar están en buenas condiciones cuando se — usa una buena práctica y se tomó cuidado en su diseño y construcción. Por ejem— plo, el barco de concreto "Atlantus", el primero construido por el Gobierno de — los Estados Unidos fue botado en 1918. Se trajo al Cabo Maj, Nueva Jersey, para servir como terminal para una línea de transbordadores y en 1927 se dejó varado sobre una barra de arena. Fue inspeccionado en varias ocasiones entre 1918 y — 1930. Un reporte sobre su primer recorrido de prueba en 1919 desde Brunswick, — Ga. hasta Charleston, S. C., declara que el concreto estaba "en un estado prácti— camente perfecto de preservación, sin manchas de óxido importantes, aunque se pu— dieron dibujar en ciertos lugares del casco las tenues marcas de pequeñas grietas que iban paralelas al sistema de refuerzo más próximo a la superficie exte— rior". Walter (26) publicó una fotografía de un espécimen de concreto tomado — del barco en 1928 mostrando la impresión de una varilla cuadrada de 5 mm y una — varilla redonda de 8 mm de la superficie externa expuesta del concreto, y declara— ró que el acero no se había corroído. Después de una examinación del barco en — 1928, se reportó que se había desarrollado una mancha de óxido muy notoria en el muro divisorio que delimita los cuartos posteriores, y en un lugar se pudieron — delinear claramente las varillas paralelas a la cubierta con separaciones de 0.6 — ó 0.9 mts en cada sentido. Una inspección a fondo de esta arca mostró que casi — no había recubrimiento de concreto. En algunos lugares el recubrimiento requeri— do era de 6 mm (1/4 pulg); en algunos casos el recubrimiento real era de menos —