

simposio sobre los efectos de fluidos agresivos sobre el hormigón

*Highway Research Record número 113
Publicado por Highway Research Board. División of Engineering and Industria
Research del National Research Council. Washington. 1966*

Este simposio consta de dos puestas a punto, un trabajo de investigación, un caso concreto de destrucción en obra y cuatro discusiones que tratan del comportamiento del hormigón expuesto a líquidos agresivos.

El hormigón de cemento portland es estable en la mayoría de los ambientes a que se expone en pavimentos y estructuras de carreteras. Sin embargo, hay fluidos a los que puede exponerse accidentalmente o por falta de conocimiento, que lo atacan químicamente y reducen o destruyen su aptitud para soportar la función encomendada.

El trabajo escrito por Hansen presenta un estudio crítico detallado, valorando el trabajo, publicado sobre ataque por suelos y aguas alcalinas, el medio agresivo más importante en el caso de pavimentos y estructuras nacionales. Mather, de modo semejante, presenta el estado actual de los conocimientos sobre el efecto de agua de mar sobre el hormigón. Estos trabajos, que abarcan casi 60 años de investigación, pueden servir como un amplio trabajo de referencia para investigadores y técnicos relacionados con la protección del hormigón del ataque agresivo en circunstancias normales.

Idorn, al discutir el trabajo de Mather, resalta el obligado distinto acercamiento a las especificaciones de la durabilidad, si se compara con los ensayos de resistencia mecánica.

Los medios agresivos discutidos por Hansen y Mather son los que normalmente se encuentran en la naturaleza.

El trabajo de Keunning presenta un informe sobre un estudio de investigación amplio dirigido a determinar la resistencia del mortero de cemento portland al ataque por una variedad de compuestos. Aunque muchas de estas sustancias parecen remotas al hormigón en carreteras, en la compleja sociedad de hoy día, un pavimento o estructura puede exponerse a una amplia gama de materiales que resultan de efluvios industriales u otra variedad de causas.

Lossing presenta un estudio sistemático de los pavimentos de hormigón en servicio estableciendo el ataque por sulfatos como una causa peligrosa. Este trabajo subraya las derivaciones prácticas de los conceptos desarrollados en los artículos precedentes.

Newlon y Sherwood discuten una causa adicional de probable ataque por sulfatos y señalan algunas dificultades para establecer claramente que tal ataque haya tenido lugar.

Erling y Stark dan fe de la presencia del mineral thaumasita en el hormigón de obra deteriorado. Esto representa la primera identificación de este mineral y colabora a un mejor entendimiento del proceso del ataque por sulfatos.

La discusión general, hecha por Nielsen, señala que, a igualdad de circunstancias, la agresividad aumenta del sulfato sódico al sulfato magnésico y al sulfato ferroso.

En su conjunto, los trabajos y discusiones presentadas en este simposio son un resumen del estado actual de los conocimientos sobre la resistencia del hormigón de cemento portland a los medios agresivos.

Los trabajos resumidos de los distintos autores son los siguientes:

1 *Ataque del hormigón de cemento portland por suelos y aguas alcalinos (W. C. Hansen).*

Este resumen sobre la literatura de estudios dedicados a los mecanismos por los que el hormigón de cemento portland puede expansionar por acción de aguas sulfatadas, sugiere que puede estar involucrado por los siguientes mecanismos:

- a) una reacción sólido-líquido, por la que el aluminato tricálcico (AC_3) se transforma en un sulfoaluminato cálcico alto en sulfato tal como la etringita, $AC_3 \cdot 3SO_4Ca \cdot 32H_2O$;
- b) precipitación de hidróxido magnésico, y posiblemente yeso, en los poros de gel, que aumenta la energía de superficie de los sólidos en dichos poros; y
- c) la presión mecánica creada por los cristales de las sales, que crecen en los poros próximos a la superficie del hormigón expuesto parcialmente al aire y parcialmente al agua.

Probablemente, las tres acciones ocurren más o menos simultáneamente en algunas estructuras. Por ejemplo, las vigas almacenadas en el suelo en Sacramento (California) se dejaban secar en la superficie antes de recubrirse con agua. Es probable que el desconchado y redondeamiento de las aristas y ángulos eran el resultado de la cristalización de sales y que las expansiones y grietas de las probetas eran el resultado de la reacción que tiene lugar de acuerdo con los mecanismos a) y b).

Este trabajo presenta 86 citas bibliográficas.

2 *Efectos del agua de mar sobre el hormigón (Bryant Mather).*

El hormigón expuesto al agua de mar se moja por una solución de sales, principalmente cloruro sódico y sulfato magnésico. Si aparece un deterioro en el hormigón, suele ser el resultado del hielo y deshielo o ciclos de humedad sequedad, tanto o más que el resultado de agua de mar como tal; suponemos que el hormigón se ha hecho correctamente. El sulfato magnésico puede atacar la mayor parte, sino todos, de los constituyentes de la pasta de cemento portland endurecida, especialmente los aluminatos; los cloruros pueden promover la corrosión del acero; los álcalis pueden participar en la reacción árido-álcali. Por ello, el hormigón expuesto al agua de mar debe hacerse con cemento de un contenido de aluminato limitado y con áridos no reactivos. El acero de armaduras debe estar bien cubierto con hormigón de baja permeabilidad y debe seguirse el criterio de una buena construcción y puesta en obra.

Este trabajo presenta 23 referencias bibliográficas y tiene una discusión a cargo del señor Idorn.

Resistencia del mortero de cemento portland al ataque químico (William H. Kuenning).

3 La resistencia del hormigón de cemento portland al ataque químico se estudia empleando pequeñas probetas de mortero (microhormigón) sumergidas en líquidos agresivos y en las que se miden los cambios de longitud, el peso y el módulo de elasticidad dinámico. Las probetas son prismas de mortero de $1,5 \times 1,5 \times 10$ cm. El mortero se hace con arena de sílice fina de granulometría continua inerte a las sustancias químicas que se van a estudiar. Los morteros se prepararon con relaciones agua-cemento similares a las que se alcanzan en el hormigón, de forma que la pasta hidratada sea representativa de la fracción de pasta del hormigón en permeabilidad y resistencia.

Al emplear en el método tres medidas —longitud, peso y frecuencia armónica fundamental— se dispone de más información para explicar el mecanismo de ataque que si se empleasen sólo una o dos medidas. Si es necesario deducir conclusiones adicionales sobre el mecanismo de ataque, estas medidas pueden suplementarse con análisis químico, rayos X y estudios petrográficos de los morteros afectados, soluciones, precipitados y residuos.

El estudio confirma las observaciones de otros investigadores acerca de ciertos líquidos que son perjudiciales o pueden dañar al hormigón. Entre éstos se encuentran el agua de mar, soluciones de sales amónicas, magnésicas, ácidos orgánicos e inorgánicos, sulfatos, sulfitos, tiosulfatos y todas las sales que producen un bajo pH. También se ha encontrado que son perjudiciales otros productos químicos y atacan al hormigón a una velocidad que depende de las condiciones de exposición. Entre otras se encuentran las soluciones de nitrato de plomo, nitrato potásico, bromuro sódico, dicromato sódico, clorato sódico y EDTA.

La resistencia del mortero se aumentó con un tiempo de curado más largo y disminuyendo la relación agua-cemento. El mortero con cemento tipo V de las normas ASTM era más resistente al ataque por sulfatos que los otros morteros, pero no al ataque de sulfatos ácidos o aquellos que contienen amonio o magnesio. El mortero de cemento de $AC_3 = 0$ es generalmente más bajo en resistencia al ataque químico que el tipo V.

La velocidad de ataque puede relacionarse directamente con la actividad del ion agresivo. Las soluciones de alta concentración son generalmente más agresivas que las de baja concentración. Con ácido sulfúrico, sin embargo, un mortero de cemento tipo I tenía la misma resistencia en una solución de 9,81 g/l renovada cinco veces por semana que una solución de 960 g/l que no se renovó ninguna vez.

Otra excepción notable al aumento en la velocidad de ataque al aumentar la concentración del producto agresivo se encuentra en los resultados con soluciones de dicromato sódico. Las soluciones con una concentración de 14,90 g/l eran más perjudiciales que las que contenían 1.845 g/l.

La velocidad de ataque puede a veces afectarse por la solubilidad de los productos de reacción en la concentración particular del medio agresivo. Por ejemplo, la pérdida de peso del mortero después de cada cambio de ácido sulfúrico 0,1 N no era lo suficiente para producir bastante sulfato cálcico y saturar la solución. Esto evitaría la aportación de sulfato cálcico del producto depositado sobre las probetas. Sin embargo, la solubilidad del sulfato cálcico en la solución concentrada de ácido es mucho más baja y se excedía de la saturación en pocas horas. Además esta solución no era renovada durante casi todo el período de inmersión en este ácido concentrado, el sulfato cálcico se depositaba sobre la superficie de los prismas, impidiendo las reacciones.

Los morteros con cemento tipo V sumergidos en agua de mar caliente durante 6 meses se comportaron como más resistentes al ataque que los sumergidos en agua de mar a 23° C. Lo mismo puede ocurrir para morteros sumergidos en agua de mar a cinco veces su con-

centración natural. Los cristales de etringita no se forman aparentemente a las temperaturas empleadas (70 a 110° C); por lo tanto, en esta exposición el aumento en la temperatura parece ser beneficioso. El no formarse etringita, y en consecuencia surgir la expansión, puede ser muy importante en el uso futuro del hormigón en este tipo de aplicaciones.

Es ya conocido que al disminuir el pH disminuye la resistencia del mortero al aumentar la velocidad de disolución. Sin embargo, la composición química de un agresivo es por lo menos tan importante como el pH en lo que afecta a la velocidad a que el prisma de mortero pierde su peso. No se encontró ninguna relación entre el pH y la pérdida de peso de las barras de mortero.

Este trabajo presenta 37 referencias bibliográficas y un apéndice con resultados experimentales.

4 Ataque por sulfatos sobre pavimentos de hormigón en Mississippi (Fay A. Lossing).

Para que la reacción por sulfatos tenga lugar, deben estar presentes ciertos factores; principalmente, sulfatos solubles, agua para disolver y transportar los sulfatos, AC_3 en el cemento y evaporación del agua de la superficie de hormigón. Se supone que tiene lugar una reacción si existen estos factores en cualquier grado, pero la velocidad e intensidad de la reacción varía directamente al aumentar cualquiera de dichos factores. Es decir, si cualquiera de ellos se limita, la reacción puede aplazarse o hacerse inocua.

No es práctico cubrir un nuevo pavimento de hormigón para reducir la evaporación de agua; sin embargo, esto parece que elimina la posibilidad de una posterior reacción del hormigón viejo por ataque con sulfatos. Limitar el AC_3 a un bajo porcentaje parece ser el medio más práctico de prevenir o aplazar la reacción.

La norma AASHO M 85-60 limita el contenido en AC_3 para el cemento tipo I a 15 %; antes de 1960 no había tal limitación. En el cemento tipo II se limita a 8 %; en el tipo III a 15 %, salvo que el técnico pueda especificar un máximo de 8 % para resistencia moderada a los sulfatos o un máximo de 5 % cuando se requiere una gran resistencia a los sulfatos; el cemento tipo V limita el contenido de AC_3 a 5 %. De este modo hay una defensa prevista por las normas AASHO, que vierte la responsabilidad en el ingeniero para determinar el tipo de cemento más adecuado a las condiciones de uso.

Una observación interesante de este estudio ha sido que los hormigones preparados con cemento de contenido en AC_3 menor del 12 % no mostraban una reacción seria con los sulfatos, mientras que los preparados con cementos de más del 12 % de AC_3 se han deteriorado, aparentemente como consecuencia de una reacción con sulfatos.

En las zonas de Chickasaw, Lea y Itawamba, se extrajeron muestras de las capas subyacentes a través de agujeros hechos en el pavimento. En todos los casos, el análisis químico mostró que estos suelos sólo contenían trazas (0,01 % o menos) de sulfatos solubles, aunque el subsuelo contenía de 0,33 a 1,88 %. Bajo estos pavimentos se colocó una capa de material algo granular. En la zona de Issaquena, el suelo sobre el que yacía el pavimento consistía en una arcilla con 0,43 % de sulfatos solubles; no se colocó ningún material granular bajo el hormigón.

Como una explicación de la razón del bajo contenido en sulfatos de las sub-bases granulares, se ha sugerido que el agua, que arrastra los sulfatos obtenidos de los suelos colindantes, pierde sólo una pequeña cantidad de sulfato al atravesar los suelos granulares que existen bajo el pavimento debido a la inercia química de dichos suelos, y la mayor parte de los sulfatos se deposita en el hormigón por su naturaleza química reactiva. Se ha hecho tam-

bién la sugerencia de que alguno de los sulfatos son arrastrados por el agua superficial y depositados en las grietas por gravedad, pasando una pequeña parte a los suelos subyacentes. Una u otra sugerencia puede ser la explicación del bajo contenido en sulfatos de los suelos que yacen bajo el pavimento.

Una base tratada con cemento, bien bajo un pavimento asfáltico o bien bajo un pavimento de hormigón, queda efectivamente sellada con dicho pavimento, eliminándose la evaporación de agua de la superficie de la base. Como hoy día se ha reconocido que el drenaje es un factor importante en el proyecto de pavimentos, el problema del agua superficial, que deposita sulfatos en la superficie del pavimento, queda reducido al mínimo.

Este trabajo presenta 9 referencias bibliográficas y se completa con una discusión a cargo de los señores Howard Newlon y Cullen Sherwood.

Después de un breve trabajo sobre *Identificación y presencia de Thaumasia en el hormigón*, a cargo de los señores Bernard Erlin y David C. Stark, el simposio concluye con una sexta ponencia titulada *Investigación de la resistencia de la pasta de cemento al ataque por sulfatos*, de Jorgen Nielsen, el cual llega a las siguientes conclusiones:

a a igualdad de circunstancias, la agresividad de las soluciones aumenta del sulfato sódico, al sulfato magnésico y al sulfato ferroso;

b la resistencia de la pasta de cemento puede mejorarse considerablemente aumentando su «densidad»;

c el estudio de secciones delgadas demuestra que rara vez se forma la etringita en suficiente cantidad como para considerarla razonablemente como causa de la formación de grietas.

Estos resultados parecen garantizar una investigación más detallada de la importancia de la estructura de los poros y los distintos sulfatos en la durabilidad del hormigón. Sería interesante investigar el efecto de la etringita, y en cierta medida el contenido de AC_3 en el cemento, en lo que se refiere a su resistencia al ataque por sulfatos. Los cristales de etringita encontrados en las grietas después de la conservación en sulfato sódico, aparentemente se han formado después de la aparición de las grietas.