

# Ataque Físico de Sales sobre el **concreto**

Es importante conocer patologías especiales como el Ataque Físico por Sales (PSA). Revisemos el estado de la materia.

**Harvey Haynes y M. T. Bassuoni**

**E**l Ataque Físico por Sales (PSA, por sus siglas en inglés) está asociado a la cristalización de sales en los poros cercanos a la superficie del concreto o las rocas<sup>[1,2]</sup>. De acuerdo con Mehta y Monteiro<sup>[3]</sup>, PSA (también llamada sal de intemperismo o esfuerzos por hidratación de la sal) tiene la misma apariencia de superficie dilatada causada por los ciclos de congelación y deshielo (Figuras 1 y 2). El objetivo de este artículo es ofrecer una breve revisión del estado actual del conocimiento del PSA en el concreto.

Entre las sales responsables del PSA en el concreto, en orden decreciente de agresividad, están: sulfato, carbonato y cloruro de sodio. Asimismo, se conoce que el sulfato de magnesio y el de calcio, así como el cloruro de calcio y el nitrato de sodio, pueden ser causantes del PSA en rocas. El PSA se asocia a materiales como concreto, rocas, o mamposterías en contacto con la humedad del suelo, que contiene sales disueltas. Debido a que el agua de mar contiene cloruros, sulfatos, sodio y magnesio; suelen ser los suelos marinos la principal fuente de estas sales, pues durante años al ser estas transportadas por las aguas subterráneas y de escorrentía superficial, se acumulan en sitios específicos. Las rocas porosas o el concreto expuesto en estos sitios pueden absorber la disolución salina, que



es posteriormente transportada hacia la superficie.

En el frente de evaporación, una disolución salina puede convertirse en sobresaturada, y cristalizar las sales. Los cristales de sal superficiales que se forman (eflorescencia), Fig.3(a), generalmente no son perjudiciales; también pueden formarse debajo de la superficie, cuando la velocidad de disolución en la superficie es menor que la de evaporación<sup>[4]</sup>. Estos cristales que se forman debajo de la superficie (subflorescencia) pueden producir el desprendimiento de la superficie Fig.3(b).

**Fig. 1**

PSA en la superficie de la cimentación de un muro de concreto por sulfato de sodio. La sal ha provocado la caída de la superficie de concreto protegida por una capa de pintura de látex; que al ser transpirable, permite un frente de evaporación en la superficie.

Fig.3(a): Eflorescencia en la superficie de un espécimen de concreto parcialmente sumergido en una solución de sulfato de sodio al 5%, y Fig.3(b): Subflorescencia debajo de la superficie del espécimen mostrado en (a) bajo las mismas condiciones<sup>[5]</sup>.

## **Mecanismo de esfuerzo**

El sulfato y el carbonato de sodio pueden sufrir transformaciones en la fase de hidratación por cambios de humedad o de la temperatura

ambiente, o por ambos. La conversión de una fase menos hidratada a una más hidratada viene acompañada de un aumento considerable en el volumen. Por ejemplo, la conversión de la fase de sulfato de sodio conocido como tenardita (anhidro  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) a la fase conocida como mirabilita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) viene acompañada por un incremento en el volumen de un 314 %. La Fig.4 muestra el diagrama de fase del sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Se ha observado tenardita disuelta en disolución, antes de la cristalización de la mirabilita, pudiéndose apreciar la presión de cristalización a partir de la precipitación de sales y del crecimiento de cristales, contribuyendo así al PSA<sup>[5]</sup>. Si la presión es mayor que la resistencia a la tensión de la pared del poro en la que se produce el cristal, se desarrollan microgrietas en la matriz circundante.

Los principales factores que influyen en la presión de cristalización son: el grado de sobresaturación de la disolución; la distribución de sal en los poros y del tamaño de poro; y resistencia a tensión del material poroso. El grado de sobresaturación es el factor más influyente, debido a que las disoluciones sobresaturadas cristalizan más rápido que las menos sobresaturadas, y un ritmo acelerado de cristalización causa más daño que uno lento. Además, la teoría muestra que pequeños tamaños de poro desarrollan mayores presiones de cristalización que los más grandes<sup>[6]</sup>.

### Investigación sobre PSA en concreto

La Asociación del Cemento Portland (PCA por sus siglas en inglés) llevó a cabo pruebas de larga duración en campo, en concreto

expuesto a suelos con contenidos de sulfato<sup>[7-11]</sup>. Aunque los estudios se dirigieron al ataque de sulfatos químicos, Stark<sup>[11]</sup> encontró que el PSA fue la principal causa de deterioro. Estos estudios son importantes porque muestran fotografías del concreto experimentando el PSA en las diversas etapas de deterioro.

Folliard y Sandberg<sup>[12]</sup> desarrollaron ensayos a pequeños especímenes de concreto de resistencia normal, sometidos a diversas condiciones de exposición con  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . El entorno de prueba más agresivo se lograba al sumergir completamente las muestras en una disolución al 30% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  con un ciclo de temperatura de entre 30 y 5 °C. Al reducir la temperatura, la disolución se volvió altamente sobresaturada, lo que causó cristalización de sales en los poros del concreto. El estudio de muestras elaboradas con una relación agua-material cementante (a/cm) de 0.50 mostró una total desintegración después de 30 ciclos. Sin embargo, una mezcla similar con 0.30 de relación a/cm y 30% de sustitución del cemento Portland por cemento de escorias, mostró sólo el 3% de pérdida de peso después de 70 ciclos.

Irassar et. al.<sup>[13]</sup> realizaron ensayos durante 5 años, en concretos con relación a/cm de 0.52 expuestos a suelos con  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Al igual que en los estudios de la PCA, los ensayos se diseñaron para investigar el ataque químico por sulfato; el entumecimiento superficial por encima del suelo fue el mecanismo de esfuerzo predominante y la causa se identificó como la cristalización de sales. Concretos con elevados porcentajes de reemplazo del cemento Portland por puzolanas (40%) o cementos de escoria (80%), muestran el mayor entumecimiento.

Fig. 2



PSA en losa de piso por carbonato de sodio.

Haynes et. al.<sup>[14]</sup> investigaron durante 3 años probetas de concreto (mezcla con cemento tipo II y relación a/cm de 0.65) parcialmente sumergidas en una disolución de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  al 5%, expuestas a diversos entornos ambientales. Los resultados mostraron que los mayores entumecimientos se produjeron justo sobre el nivel de la disolución en condiciones ambientales que se mantuvieron constantes; sin embargo, el incremento más significativo tuvo lugar cuando el concreto se expuso a condiciones ambientales cíclicas, resultando en cambios de fase de la sal. Las condiciones ambientales fueron decisivas en la causa del deterioro. Cuando las probetas experimentan un cambio en estas, que favorecen a la tenardita o a la mirabilita, el entumecimiento del concreto se produce durante los siguientes 2 días. Posteriormente, en el ambiente en que se forma la mirabilita, no se producen mayores entumecimientos.

Bassuoni y Nehdi<sup>[15]</sup> estudiaron el concreto autocompactante

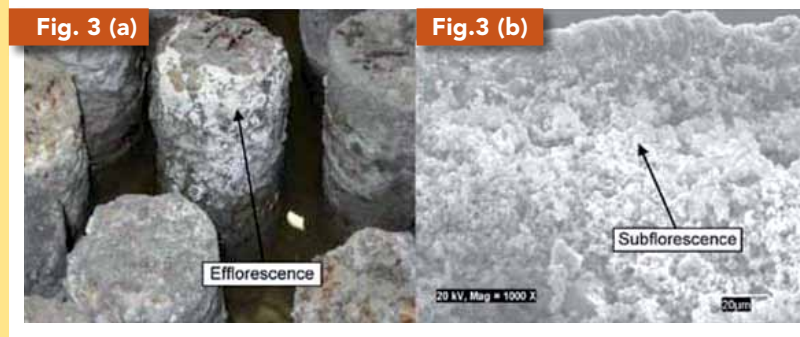


Fig. 3 (a): Eflorescencia en la superficie de un espécimen de concreto parcialmente sumergido en una solución de sulfato de sodio al 5%, y Fig. 3 (b): Subflorescencia debajo de la superficie del espécimen mostrado en (a) bajo las mismas condiciones<sup>[5]</sup>.

expuesto a diferentes entornos de  $\text{NaSO}_4$ . La concentración de la disolución fue del 5% de  $\text{NaSO}_4$  y el PSA se estimuló en dos de tres ambientes. Las mezclas de concreto estudiadas contenían dosis variables de materiales cementicios suplementarios, mientras que la relación a/cm se mantuvo constante en 0.38. Los ambientes fueron ciclos de humedecimiento y secado, o de humectación parcial y secado; durante un período de 2 años. Se produjeron entumecimientos importantes en dos mezclas que contenían combinaciones de mezclas cuaternarias compuestas de cenizas volantes, cemento de escorias y humo de sílice o polvo de piedra caliza, como cementan-

te sustituto del 50% del cemento Portland tipo I. En estas muestras se registraron mayores entumecimientos, llegándose a fracturar con fisuras transversales a lo largo de la porción seca (en el procedimiento de humectación parcial), antes de que finalizara la exposición. A éstas se les determinó la distribución del tamaño de poro, encontrándose claramente que tenían una mayor proporción de poros más pequeños, que en las otras mezclas.

Los resultados del ensayo sobre exposiciones al carbonato y al cloruro de sodio ( $\text{NaCO}_3$  y  $\text{NaCl}$ ) fueron reportados por Haynes *et al.*<sup>[16]</sup>. El tiempo de exposición fue de 3 años y las concentraciones de la solución eran del 5% para

ambas sales. Las condiciones ambientales que causaron el mayor entumecimiento para la exposición  $\text{NaCO}_3$  fueron las mismas que para el  $\text{NaSO}_4$ , sólo que se requirió un mayor período de tiempo para provocar un entumecimiento equivalente. En las condiciones del ensayo, el  $\text{NaCl}$  causó menor entumecimiento que los causados por el  $\text{NaCO}_3$  y  $\text{NaSO}_4$  (Figura 5 a, b, c). Este último fue el causante del mayor deterioro.

La solubilidad del  $\text{NaCl}$  no fue muy afectada por los cambios de temperatura, por lo que no se crea una disolución altamente sobresaturada. Por lo tanto, los deterioros por el  $\text{NaCl}$  se produjeron por delicuescencia y reprecipitación, cuando la humedad ambiental relativa es mayor o menor que la humedad relativa de equilibrio (mecanismo diferente que el del  $\text{NaSO}_4$  y  $\text{NaCO}_3$ ); aunque en todos los casos, el daño es debido a la presión de cristalización.

### Hacia la mitigación

Un subcomité del Comité ACI 201, Durabilidad del Concreto, está redactando un capítulo acerca del PSA para ser incorporado en el ACI 201.2R, "Guía para Concreto Durable". Las recomendaciones para mitigar el PSA aún no están completamente desarrolladas, pero pueden hacerse algunas recomendaciones de carácter general.

Actualmente no existen criterios para establecer los límites de contenido de sales para atenuar el PSA. Si existen cimentaciones de concreto con evidencias de PSA (eflorescencia o descascaramientos de la superficie cerca del suelo), se pueden obtener y analizar muestras de los cristales de sal para su identificación. Los métodos de prueba pueden incluir

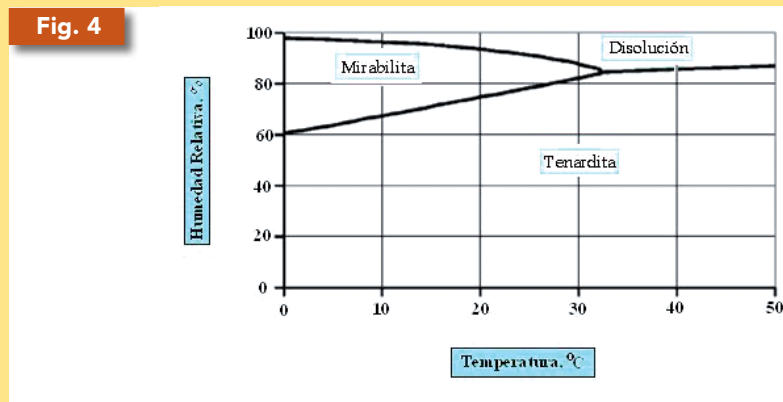


Diagrama de fase del sulfato de sodio.



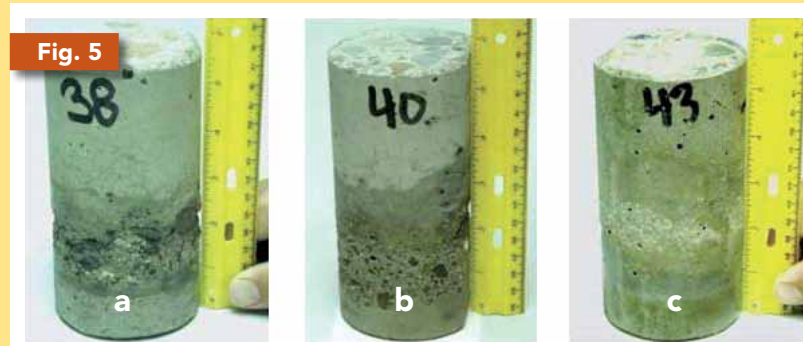
**STONE**®  
**STRONG**  
systems



- ▶ **El ajuste perfecto para cualquier proyecto**
- ▶ **“Satisfacción” está escrito en piedra**
- ▶ **La única cosa más fuerte que nuestras paredes es nuestra reputación**
- ▶ **Disponibilidad a nivel nacional**
- ▶ **Sistema de bloques de fácil y rápida instalación**
- ▶ **Ingeniería aplicada en favor de un producto versátil, resistente y de alta calidad**

[www.stonestrong.com.mx](http://www.stonestrong.com.mx)

[ventasstone@stonestrong.com.mx](mailto:ventasstone@stonestrong.com.mx)



**Fig. 5** Especímenes de concreto después de 104 semanas de inmersión parcial en disoluciones de: (a) NaSO<sub>4</sub> al 5%, (b) NaCO<sub>3</sub> al 5%, y (c) NaCl al 5%. Las condiciones ambientales en las primeras 76 semanas oscilaron entre los 20°C y 54% y 20°C y 82%, de temperatura y humedad relativa, respectivamente; y después de 76 semanas entre los 20°C y 31%, y 20°C y 82% [14,16].

ensayos de índice de refracción en aceite<sup>[17]</sup> o métodos de difracción por rayos X. Si las cimentaciones no muestran ningún rasgo de PSA, las muestras de suelo, o las aguas subterráneas pueden examinarse para así identificar y evaluar la composición de la sal. Si las sales predominantes son el NaSO<sub>4</sub> y/o el NaCO<sub>3</sub>, puede que se presente el PSA.

Está demostrado que una alta resistencia a tensión, mejora la resistencia del concreto al PSA. Tradicionalmente se recomienda que se especifique una baja relación de  $a/cm$  para la obtención de una elevada resistencia; sin embargo, esto puede aumentar la proporción de pequeños poros en la matriz de cemento; lo que puede resultar desventajoso en el caso del PSA. La experiencia demuestra que un concreto débil (resistencia a la compresión menor a 17 MPa) puede ser vulnerable al entumecimiento progresivo por sales y, posiblemente, manifestar un deterioro significativo. Aunque los concretos de resistencia media (de alrededor de 28 MPa) pueden resistir el PSA, no son considerados inmunes; por lo que entonces el entumecimiento será más que un problema estructural, un problema estético. Resistencias mayores a 41 MPa mejoran el desempeño; sin embargo, el potencial de daño lo

definen las condiciones ambientales, por lo que bajo condiciones severas puede no ser posible evitar el deterioro.

Es necesario continuar investigando para fundamentar lo anteriormente comentado; y así poder determinar la influencia de la distribución del tamaño de poro, de la resistencia, de la relación  $a/cm$ , y de las condiciones ambientales en la vulnerabilidad del concreto ante el PSA. Para aquellos proyectos en los que sean inaceptables los PSA, una alternativa podría ser aislar el concreto del suelo. **C**

**Nota:** Este artículo es una traducción del inglés, del documento originalmente publicado como: "Physical salt attack on concrete", publicado en *Concrete International*, noviembre del 2011.

#### Referencias

##### Referencias

- Haynes, H.; O'Neill, R.; and Mehta, P.K., "Concrete Deterioration from Physical Attack by Salts", en *Concrete International*, vol. 18, núm. 1, Jan. pp. 63-68, 1996.
- Hime, W.G.; Martinek, R.A.; Backus, L.A.; and Marusin, S.L., "Salt Hydration Distress", en *Concrete International*, vol. 23, núm. 10, octubre, pp. 43-50, 2001.
- Mehta, P.K., and Monteiro, P.J.M., *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, third edition, McGraw-Hill, New York, 2006, p. 135.
- Binda, L., and Baronio, G., "Mechanisms of masonry decay due to salt crystallization," en *Durability of Building Materials*, vol. 4, pp. 227-240, 1987.
- Flatt, R.J., and Scherer, G.W., "Hydration and crystallization pressure of sodium sulfate: A critical review", en *Material Issues in Art & Archaeology VI, MRS Symposium Proceedings*, vol. 712, P.B. Vandiver, M. Goodway, and J.L. Mass, eds., Materials Research Society, Warrendale, PA, pp. 29-34, 2002.
- Scherer, G.W., "Stress from crystallization of salt", en *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 1613-1624, 2004.
- McMillan, F.R.; Stanton, T.E.; Tyler, I.L.; and Hansen, W.C., "Long-time study of cement performance in concrete, Chapter 5. Concrete exposed to sulfate soils", en *ACI Special Publication*, published in cooperation with the Portland Cement Association, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 64 pp. (Reprinted as Portland Cement Association Research Department Bulletin 30, Portland Cement Association, Skokie, IL), 1949.
- Verbeck, G.J., "Field and Laboratory Studies of the Sulfate Resistance of Concrete," Performance of concrete. Resistance of concrete to sulfate and other environmental conditions, A Symposium in honor of Thorbergr Thorvaldson, Toronto, ON, Canada, National Research Council of Canada and ACI, pp. 113-124. (Reprinted as Portland Cement Association Research Department Bulletin 227, Portland Cement Association, Skokie, IL), 1968.
- Stark, D., "Longtime study of concrete durability in sulfate soils", *Research and Development Bulletin RD086*, Portland Cement Association, Skokie, IL, 13 pp, 1984.
- Stark, D., "Durability of concrete in sulfate rich soils", en *Research and Development Bulletin RD097*, Portland Cement Association, Skokie, IL, 19 pp, 1989.
- Stark, D. C., "Performance of concrete in sulfate environments", en *Research and Development Bulletin RD129*, Portland Cement Association, Skokie, IL, 23 pp, 2002.
- Folliard, K.J., and Sandberg, P., "Mechanisms of concrete deterioration by sodium sulfate crystallization", en *Durability of Concrete*, ACI SP-145, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 933-946, 1994.
- Irassar, E.F.; Di Maio, A.; and Batic, O.R., "Sulfate Attack on Concrete with Mineral Admixtures", en *Cement and Concrete Research*, vol. 26, núm. 1, pp. 113-123, 1996.
- Haynes, H.; O'Neill, R.; Neff, M.; and Mehta, P.K., "Salt Weathering Distress on Concrete Exposed to Sodium Sulfate Environment", en *ACI Materials Journal*, vol. 105, núm. 1, jan-feb, pp. 35-43, 2008.
- Bassuoni, M.T., and Nedhi, M.L., "Durability of Self-Consolidating Concrete to Different Exposure Regimes of Sodium Sulfate Attack," *Materials and Structures*, vol. 42, núm. 8, pp. 1039-1057, 2009.
- Haynes, H.; O'Neill, R.; Neff, M.; and Mehta, P.K., "Salt weathering of concrete by sodium carbonate and sodium chloride", en *ACI Materials Journal*, vol. 107, núm. 3, mayo, pp. 258-266, 2010.
- O'Neill, R.C., "Identification and effects of sulfate materials in hardened concrete", en *Proceedings of the 14th Annual International Conference on Cement Microscopy*, International Cement Microscopy Association, abril, 1992, pp. 198-208.



# CONVOCATORIA

EL CONSEJO TÉCNICO DEL ONNCCE CONVOCA A LA

1° EDICIÓN DE LOS PREMIOS ONNCCE A LA NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN

Se invita a las dependencias públicas, a las organizaciones y empresas privadas,  
al sector académico y a las asociaciones de profesionistas a participar en los

## “PREMIOS ONNCCE 2012”

"La inscripción para la participación será gratuita y sólo podrá realizarse en el sitio web [www.onncce.org.mx/premio](http://www.onncce.org.mx/premio)  
a partir del 04 de junio al 10 de agosto del 2012".

El objetivo es reconocer la utilización de la normalización o la evaluación de la conformidad en la industria de la construcción

**FECHA DE PREMIACIÓN - 11 DE SEPTIEMBRE DE 2012**

INFORMES

ONNCCE, S. C.

Ceres No. 7, Col. Crédito Constructor, C. P. 03940, Del. Benito Juárez, México, D. F.

Tel: 01(55) 56-63-29-50 ext. 110 ó 102

[premioonncce2012@mail.onncce.org.mx](mailto:premioonncce2012@mail.onncce.org.mx)