MITIGACIÓN DE LOS EFECTOS DEL ATAQUE POR SULFATOS EN MORTEROS POR TRATAMIENTO SUPERFICIAL CON NANOPARTÍCULAS BASE SILICIO

D. L. SILVA¹, V. ROMERO¹, G. FAJARDO-SAN MIGUEL¹,
G. ESCADEILLAS², D. CRUZ-MORENO¹

¹Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Civil, San Nicolás de los Garza, México.

²LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS Génie Civil, Toulouse, France.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es estudiar la influencia del tratamiento superficial en edades tempranas con nanopartículas base silicio simple (NS) y funcionalizada (NF) en la reducción del ataque por sulfatos en morteros. Este trabajo aún se encuentra en desarrollo, por lo que se están llevando a cabo pruebas preliminares. Inicialmente se realizó una búsqueda en la plataforma SCOPUS de las investigaciones desarrolladas en México (últimos 5 años) que abarcan el tema de la durabilidad. Se produjeron las NS por el método sol-gel y fueron añadidas a pastas de cemento Portland Ordinario – CPO como adición o aplicadas mediante un tratamiento superficial, usando una concentración de 0.1%. Posteriormente, se realizaron pruebas de caracterización fisicoquímica en las NS y de resistividad eléctrica en las pastas. Los resultados mostraron que las pastas producidas con adición de 0.1% de NS presentaron un incremento de resistividad hasta un 197%. Por su parte las pastas tratadas superficialmente presentaron un incremento alrededor de 240%. Además, se observó que el tema de los sulfatos aún es poco estudiado en México, dado que presentó un porcentaje de 13.33% de los casos, contra 57.33% de iones cloruros y 29.33% de carbonatación.

Palabras clave: Nanopartículas de silicio. Tratamiento superficial. Ataque por sulfatos.

ABSTRACT

The purpose of this work is to study the influence of surface treatment in early ages with silica based nanoparticles on its simple (NS) and functionalized (NF) form for the reduction of sulfates attacks in mortars. This work is still under development, so preliminary tests are being carried out. Initially, a search was made on the SCOPUS platform about previous investigations developed in Mexico (the last 5 years) covering the subject of durability. The NS were produced by the sol-gel method which were added to ordinary portland cement paste - CPO as an addition or applied as a surface treatment, using a concentration of 0.1%. Subsequently, physical-chemical characterization tests were followed for the NS and electric resistivity in pastes. The results revealed that the pastes produced with an addition of 0.1% NS showed an increase in resistivity up to 197%. On the other hand, the superficially treated pastes showed an increase of around 240%. In addition, it was observed that the topic of sulfates attack in Mexico needs to be more studied, given that it presented a percentage of 13.33% of the cases found, against 57.33% of chloride ions and 29.33% of carbonation.

Keywords: Silicon nanoparticles. Surface treatment. Sulfate attack.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é estudar a influência do tratamento superficial em idades precoces com nanopartículas a base de silício simples (NS) e funcionalizadas (NF) na redução do ataque por sulfatos em argamassas. Este trabalho ainda está em desenvolvimento, portanto estão sendo realizados testes preliminares. Inicialmente, foi realizada uma pesquisa na plataforma SCOPUS das pesquisas realizadas no México (últimos 5 anos) abordando o tema da durabilidade. As NS foram produzidas pelo método sol-gel e adicionadas à pasta de cimento Portland comum – CPO como adição ou aplicados por meio de um tratamento de superficial, utilizando uma concentração de 0,1%. Posteriormente, foram realizados testes de caracterização físico-química nas NS e de resistividade elétrica nas pastas. Os resultados mostraram que as pastas produzidas com a adição de 0,1% de NS apresentaram um aumento na resistividade de aproximadamente 197%. Por outro lado, as pastas tratadas superficialmente apresentaram um aumento de cerca de 240%. Além disso, observou-se que o tema dos sulfatos ainda é pouco estudado no México, uma vez que apresentou um percentual de 13,33% dos casos, contra 57,33% de íons cloreto e 29,33% de carbonatação.

Palavras-chave: Nanopartículas de silício. Tratamento superficial. Ataque por sulfatos

1. INTRODUCCIÓN

El ataque por sulfatos es un término usado para describir una serie de reacciones químicas entre los iones sulfato y los compuestos hidratados de la pasta de cemento endurecido. En comparación con otras reacciones químicas agresivas, los sulfatos son los más dañinos al concreto cuando están presentes en forma de gases o líquidos (Biczók, 1972; Skalny et al., 2002; Al-Akhras, 2006; Neville, 2016). Estos iones están presentes en el agua del mar, en el nivel freático, agua de pantanos (por descomposición de materia orgánica), alcantarillas, efluentes industriales, lluvia ácida, etc. (Souza, 2006). Además de las fuentes externas, es posible que la contaminación sea causada por fuentes internas, cuando los sulfatos están presentes en los componentes de la matriz cementante, como el cemento y/o agregados contaminados, por citar algunos ejemplos (Escadeillas y Hornain, 2014). El efecto generado por el ataque por sulfatos consiste en la formación de cristales expansivos de gipsita, etringita y/o taumasita que causan tensiones de tracción interna resultando en expansión, agrietamiento y comprometiendo la capacidad portante de la matriz.

Este problema ha ocurrido en estructuras de concreto reforzado (ECR) de varias partes del mundo, por citar algunos ejemplos: el puente de Magdeburg (Alemania), la presa de ft. Peck y el Candlestick Park Stadium (EUA), la presa El Grado (España) y el puente Bourgone (Portugal) (Mehta y Monteiro, 2014; Godart, 2008). Sin embargo, el fenómeno del ataque por sulfatos aún no está completamente comprendido, dado que los mecanismos que lo involucran pueden ocurrir de varias formas, dificultando su entendimiento (Neville, 2016).

La prevención representa la práctica más eficiente para la reducción del ataque por sulfatos a las ECR, tanto en términos de durabilidad como en términos económicos y sostenibles. Se conoce que los principales métodos utilizados para la mitigación del ataque por sulfatos consisten en el empleo de adiciones minerales, aditivos reductores de permeabilidad, uso de cementos especiales resistentes a los sulfatos, recubrimientos impermeabilizantes, entre otros. Sin embargo, estos métodos presentan algunas desventajas, como el alto costo de producción, falta de compatibilidad entre los materiales, la dificultad de mantenimiento y limitada resistencia a los sulfatos en ambientes que presentan altas concentraciones de estos agentes (por ende riesgos severos de deterioro) (Neville, 2016). Estas desventajas conllevan a cuestionarse sobre la aplicación de esos métodos para solucionar el problema, o bien, proponer métodos utilizando materiales innovadores que además de brindar la resistencia al ataque de los sulfatos, contribuyan con la sustentabilidad en la industria de la construcción, por el incremento de la durabilidad

y por la reducción de los costos de manutención y/o rehabilitación que hoy en día alcanzan cifras muy altas.

Se están desarrollando varias investigaciones con nanomateriales que tienen el objetivo de mejorar la microestructura del concreto y consecuentemente reducir el deterioro debido la acción de agentes agresivos. Los nanomateriales más estudiados son las nanopartículas base silicio (NS), la nanosílica, los nanocompositos fotocatalíticos (TiO_2 , CaCO_3 , etc.), nanoarcillas, nanofibras de carbono y nanofibras de celulosa. Las NS en adición y/o sustitución mejoran la resistencia a compresión, la resistencia a flexión, la resistencia a agentes agresivos como los sulfatos cloruros y el dióxido de carbono incrementando sustancialmente la durabilidad de las ECR. Cabe mencionar que, en estas investigaciones, el contenido de NS se mantuvo en un rango de 0.25% a 15% con respecto al peso del cemento (Nazari y Riahi, 2010; Atahan y Dikme, 2011; Jalal et al., 2012; Li et al., 2013; Moslemi et al., 2014; Tobón et al., 2015; Gómez-Zamorano y Castillo-Linton, 2016; Arel y Thomas, 2018; Diab et al., 2019). Asimismo, otros investigadores aplicaron las NS en matrices cementicias mediante tratamiento superficial durante el curado y/o por migración eléctrica, los resultados mostraron un incremento de resistividad eléctrica que resultó en un incremento de la resistencia de los morteros a la carbonatación y al ingreso de iones cloruros. En este caso el contenido de NS ha sido de 0.1%, es decir, una disminución importante comparado a los contenidos usados en adición y/o sustitución (Fajardo et al. 2015; Cruz-Moreno et al., 2017; Cruz-Moreno et al., 2019). Por otro lado, Ardalan et al. (2017) estudiaron el efecto de las NF aplicadas mediante tratamiento superficial, y verificaron que estas nanopartículas contribuyen en la reducción de la permeabilidad debido a la formación de C-S-H secundario y al incremento de la resistencia a la abrasión. Asimismo, Izarra et al. (2019) obtuvieron un tratamiento superficial desmoldante con propiedades hidrofóbicas presentando ángulos de contacto superficiales de 145° .

Por lo anterior, se pudo observar que las NS pueden actuar reaccionando con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) presente en los poros de las matrices cementantes, produciendo silicato de calcio hidratado (C-S-H, por sus siglas en inglés) secundario, y consecuentemente bloquea los poros de la matriz. Estos mecanismos resultan en la densificación del material y por supuesto en la reducción de la permeabilidad (Said et al., 2012). Por otro lado, las nanopartículas funcionalizadas (NF) actúan creando superficies hidrofóbicas cuando interaccionan con los compuestos hidratados del cemento. Sin embargo, las investigaciones anteriormente mencionadas no muestran un efecto claro del uso de NS y NF por medio de tratamientos superficiales a edades tempranas con respecto a la resistencia al ataque por sulfatos, sobre todo en el comportamiento de las matrices cementantes al ataque químico desencadenado por los sulfatos de sodio, calcio y magnesio, y por el ataque físico que suele ocurrir principalmente por medio del sulfato de sodio, generando problemas de agrietamiento, expansión y delaminación en las ECR.

Además no contemplan el comportamiento de la hidrofobicidad de la superficie en el tiempo, es decir, no existe información acerca de la permanencia o estabilidad de esta característica a mediano plazo. En este sentido, esta investigación se evaluará el efecto de los tratamientos superficiales en edades tempranas con nanopartículas base silicio, simple y funcionalizada, en la mitigación del ataque químico y físico de sulfatos de sodio, calcio y magnesio, que provienen de fuentes externas.

Se espera establecer un método preventivo confiable, aplicable y funcional que resulte en el incremento de la durabilidad de las ECR, mediante el seguimiento de las propiedades relacionadas a los mecanismos de transporte, como la absorción, porosidad y permeabilidad. Adicionalmente, se analizarán los fenómenos microestructurales que ocurren mediante la interacción de las nanopartículas con las fases hidratadas del cemento portland y con los sulfatos. Hasta el momento, la búsqueda bibliográfica ha permitido identificar algunos trabajos en los cuales se utilizaron nanopartículas base silicio para mitigar este problema, y se ha constatado la importancia del tema frente al deterioro de las ECR, sobre todo en regiones litorales.

2. PROCEDIMIENTO

2.1 Revisión bibliográfica

Con el fin de identificar la cantidad de investigaciones desarrolladas en el tema de ataques por sulfatos con respecto a otros agentes agresivos (iones coluros y dióxido de carbono) y en el tema del uso de NS como adición, sustitución y/o tratamiento superficial relacionadas con el fenómeno, se realizó una búsqueda utilizando la plataforma Scopus - mayor base de datos de bibliografía revisada por pares - en lo cual consistió en filtrar los artículos de investigación publicados en las revistas afines con el área de materiales de construcción y/o ingeniería en los últimos 5 años. En esa búsqueda se optó por filtrar las investigaciones desarrolladas en México, por lo tanto se usó el filtro “País” en la plataforma mencionada, con el fin de conocer la importancia que ha sido dada en dicho país al tema del ataque por los sulfatos, sea en pastas, morteros o concreto de cemento Portland. Este análisis consistió en verificar las investigaciones de carácter científico, es decir, no fueron considerados otros documentos tales cuales capítulos de libros, artículos técnicos, revisiones (reviews), entre otros. El objetivo de esta búsqueda, además de conocer las investigaciones dirigidas a durabilidad de las construcciones, fue justificar la necesidad del desarrollo de la presente investigación, frente su relevancia para la durabilidad de las ECR.

2.2 Obtención y caracterización de las NS

Las NS fueron producidas en laboratorio por medio del método sol-gel a 70 °C reportado por otros autores (Jo et al., 2007; Qing et al., 2007; Flores, 2011; Cruz-Moreno et al., 2017), con el cual se pueden obtener nanopartículas amorfas con tamaños que oscilan entre 10 a 50 nm. Las NS fueron caracterizadas por las técnicas presentadas en la Tabla 1.

2.3 Materiales empleados

Cemento: para la fabricación de los especímenes se utilizó el cemento portland ordinario – CPO 40 (que cumple con NMX-C-414-ONNCCE) y similar al tipo I, de acuerdo a la norma ASTM C150. La composición química del cemento fue obtenida por la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos X por dispersión de energía bajo la atmósfera de Helio PANalytical-Epsilon 3 (véase Tabla 2). Además de la composición química del cemento, se determinó la densidad por medio del picnómetro modelo BOYNTON BEACH FL 33426. Se obtuvo una densidad de 3.04 g/cm³.

Agua: con el propósito de eliminar la incorporación de iones en los especímenes, se ocupó el agua desionizada que cumple con la norma NMX-C-122-ONNCCE.

Tabla 1. Técnicas de caracterización fisicoquímica de las NS

Técnica	Parámetros	Objetivo
Espectroscopía de fluorescencia de rayos X (FRX)	Polvo	Identificar el grado de pureza de las NS.
Difracción de rayos X (DRX)	Polvo - Intervalo de $2\theta = 10$ a 60	Identificar la composición y las fases de las NS.
Microscopía electrónica de transmisión (TEM)	Magnitud: 200k	Identificar el tamaño de las NS

Tabla 2. Composición fisicoquímica de los cementos.

Cemento	Composición (%)								
	CaO	SiO ₂	SO ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂
CPO 40	48.82	34.01	8.08	3.05	2.54	1.25	1.15	0.713	0.15

2.4 Evaluación del índice de actividad de las NS

Con el fin de verificar la reactividad de las NS, se produjeron 2 series de especímenes cilíndricos (2.5x3.5 cm) de pastas de CPO 40, con relación a/mc=0.65. Para la primera serie se produjeron 3 tipos de pastas (P1, P2 y P3) conteniendo NS de tres producciones distintas. Antes de preparar las mezclas las NS fueron dispersas durante 1h a 60°C en ultrasonido, para evitar su aglomeración. Posterior al colado los especímenes quedaron en el laboratorio a 25°C por un período de 24h, enseguida fueron desmoldados. Para la segunda serie de especímenes fueron producidas pastas de CPO con los mismos parámetros de la serie anterior, pero sin adición de NS. Estas, posterior al desmolde, fueron sometidas al tratamiento superficial por inmersión con 0.1% de NS durante las primeras 72h. Finalmente, las dos series fueron inmersas en solución de hidróxido de calcio para evaluación semanal de la resistividad eléctrica. El monitoreo de la resistividad de las pastas se llevó a cabo por medio de la aplicación de la Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), como reportaron otros autores (Cruz-Moreno, 2019; Cruz-Moreno, 2017; Polder, 2001; Kolev et al., 2008).

3. RESULTADOS PRELIMINARES

3.1 Análisis de la bibliografía

La búsqueda bibliográfica ha mostrado hay pocas investigaciones desarrolladas en México con respecto al ataque por sulfatos. Como es posible observar en la Figura 1, el porcentaje de investigaciones dirigidas a este tema en los últimos 5 años es de 13.5%, teniendo más investigaciones relacionadas al tema de cloruros, con 57.5% y a la carbonatación, con 29.5%. El mecanismo del ataque por sulfato es poco comprendido (Neville, 2016), por lo que se supone que resulta en pocas investigaciones en el tema. Por otra parte, las investigaciones desarrolladas con el uso de NS dirigidas a durabilidad de las ECR, se comprobó que no existen investigaciones con tratamiento superficial para la mitigación del efecto del ataque por los sulfatos (véase Figura 2).

Por lo que, debido a las ventajas de este método y su aportación a la mitigación del ingreso de otros agentes agresivos, como se observó en los antecedentes, podría constituirse en una opción viable para mitigar el efecto de los sulfatos.

Figura 1. Investigaciones de los últimos 5 años en México.

Figura 2. Investigaciones con NS en el tema de la durabilidad

El estudio de los sulfatos es de gran importancia porque además de los problemas desarrollados por ellos en las ECR, también pueden contribuir para el desarrollo de otros tipos de problemas patológicos de primordial importancia, como la corrosión del acero. Asimismo, se sabe que México tiene una gran corteza litoral (> 9000 km), lo que conlleva a susceptibilidad del desarrollo de ataques por sulfatos a las ECR insertadas en las costas.

3.1 Caracterización por DRX, FRX y TEM

El difractograma de las NS analizado en el intervalo de $2\theta = 10$ a 60 se presenta en la Figura 3. Como se observa hay una reflexión muy ancha localizada entre el intervalo de $2\theta = 22$ a 23° característica de materiales amorfos. Este resultado concuerda con los espectros encontrados por otros autores (Jo et al., 2007; Qing et al., 2007; Flores, 2011; Cruz-Moreno et al., 2017; Cruz-Moreno, D. 2019). También cabe mencionar que el análisis de DRX ha mostrado que las NS tienen naturaleza cristobalita la cual es un polimorfo del SiO₂. Además el análisis de FRX demostró que las NS presentan una alta pureza con 99.9% de SiO₂. Por otro lado los análisis TEM mostraron que las NS presentaron tamaños inferiores a 50 nm.

Figura 3. Difractograma de rayos X de las NS.

3.2 Resistividad eléctrica de las pastas

La resistividad eléctrica de la matriz cementante es una propiedad fundamental del concreto endurecido, que puede asociarse a la permeabilidad y, consecuentemente, al ingreso de agentes deterioradores. Por lo tanto, el seguimiento de la resistividad permitirá evaluar la contribución de las NS en la reducción de la permeabilidad de pastas de CPO.

La Figura 4 muestra la resistividad eléctrica de pastas de CPO (P1, P2 y P3) producidas con 3 tipos de NS, que fueron adicionadas a las pastas, dispersas en el agua de mezclado, en una concentración de 0.1% de NS con respecto al peso de cemento.

Figura 4. Resistividad de pastas de CPO con adición de 0.1% de NS.

Como se puede observar, a los 28 días de exposición todas las pastas presentaron un incremento de la resistividad con respecto a la pasta de control. Estos incrementos fueron de 114%, 151% y 197% para las pastas P1, P2 y P3, respectivamente. Puesto que se trata de adición de NS en la matriz cementante, estos resultados pueden ser atribuidos a la reactividad de las NS con la portlandita, que resulta en la producción del C-S-H secundario conllevando a una mayor densificación de la matriz, conforme reportan algunos autores (Nazari y Riahi, 2010; Atahan y Dikme, 2011; Jalal et al., 2012; Li et al., 2013; Moslemi et al., 2014; Tobón et al., 2015; Gómez-Zamorano y Castillo-Linton, 2016; Arel y Thomas, 2018; Diab et al., 2019). Asimismo, se puede notar que la resistividad eléctrica de la pasta control se mantiene prácticamente constante, mientras que en las pastas producidas con 0.1% de NS, hubo un incremento generalizado promovido por el desarrollo de la hidratación. Por otra parte, la Figura 5 presenta la resistividad de pastas de CPO que fueron sometidas al tratamiento superficial por 72h mediante la aplicación de una solución con 0.1% de NS.

Figura 5. Resistividad de pastas de CPO (T.S con 0.1% de NS).

Se ha observado que a los 28 días de edad todas las pastas tratadas con 0.1% de NS presentaron un incremento de la resistividad eléctrica respecto a pasta de control, siendo alrededor de 141%, 132% e 240%, para las pastas P1, P2 y P3, respectivamente. Estos resultados indican que hubo un incremento del bloqueo de poros en la matriz cementante, conforme mencionan algunos autores (Fajardo et al. 2015; Cruz-Moreno et al., 2017; Cruz-Moreno et al., 2019).

4. INVESTIGACIÓN EN CURSO

El desarrollo de este proyecto estará delimitado en la evaluación de los tratamientos superficiales con soluciones de 0.1% de NS y NF para incrementar la resistencia al ataque químico y físico por sulfatos externos en morteros de CPO. La aplicación de los tratamientos se llevará a cabo a edades tempranas evitando el uso de técnicas más complejas de aplicación. Por lo que se han establecido los 3 tipos de tratamientos, el primero con la aplicación de las NS en una cara del espécimen, el segundo por inmersión de los especímenes en la solución de NS y el último con la aplicación de soluciones combinadas de NS y NF. Posterior al tratamiento, se acompañará la resistividad de los morteros semanalmente por medio de la aplicación de la Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), como reportaron otros autores (Cruz-Moreno, 2019; Cruz-Moreno, 2017; Polder, 2001; Kolev et al., 2008), así que cuando haya un cambio significativo de esta propiedad (superar un umbral preestablecido de 10 kΩ.cm), se evaluará la resistencia de los morteros al ataque químico y físico de sulfatos. Para el ataque químico se someterán los morteros en soluciones de sulfato de sodio, calcio y magnesio de acuerdo con la ASTM 1012. Para el ataque físico se someterán los morteros parcialmente en soluciones de sulfato de sodio de acuerdo con el método establecido por Nehdi et al., (2014). La elección de las soluciones sulfáticas se basaron en el grado de agresividad que éstas brindan a las ECR, según autores (Mehta y Monteiro, 2014; Bauer, 1994; Neville, 2016; Ribeiro et al., 2014). Los morteros serán sometidos a ensayos de caracterización físico-químicos, tales cuales: fisisorción de N₂, microscopía electrónica de barrido (MEB), espectroscopía de infrarrojo con transformada de fourier (FTIR), análisis térmico (TGA/DTA), ángulo de contacto, pérdida de masa, difracción de rayos X (DRX) y porosimetría de intrusión de mercurio, antes, durante y después del tratamiento superficial. Por lo tanto, esta investigación visa establecer un método preventivo aplicable, funcional y confiable de manera que incremente la durabilidad y vida útil de las ECR mediante la reducción de la porosidad, permeabilidad y consecuentemente el aumento de la resistencia al ataque por los sulfatos. Asimismo, el conocimiento generado en esta investigación aportará para el fomento de la sustentabilidad en la

construcción civil, corroborando con lo que establece la Agenda 21 y la industria 4.0, como se mencionó anteriormente.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, el soporte técnico del personal del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

El cemento empleado en esta investigación fue proporcionado por Holcim, APASCO, por medio del Ing. Víctor Manuel Chávez del Valle.

6. CONSIDERACIONES FINALES

Se puede concluir que las nanopartículas que se obtuvieron mediante la síntesis sol-gel presentan características amorfas, alto grado de pureza y son reactivas, por brindar mayor resistividad eléctrica a las pastas producidas con la adición de 0.1% a los 28 días de edad. Asimismo, las NS incrementaron la resistividad de las pastas tratadas superficialmente. Por fin se concluye que es relevante estudiar el tema del ataque por sulfatos en matrices cementicias para aclarar los mecanismos involucrados en el ingreso de estos agentes y también la influencia de la interacción de las nanopartículas con las fases hidratadas del cemento portland en la mitigación del ataque por sulfatos.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al fondo SEP-CONACyT por el financiamiento otorgado al proyecto CB-2016/285453. D. L. Silva agradece a CONACyT por la beca (nº 932159) otorgada para la realización de sus estudios doctorales.

8. REFERENCIAS

- Al-Akhras, N. M. (2006). *Durability of metakaolin concrete to sulfate attack*. Cement and Concrete Research, Vol. 36, p. 1727 – 1734.
- American Society for Testing and Materials - ASTM (2007); Standard specification of portland cement; ASTM C 150-07; 2007; 4.01: 144-150.
- Ardalan R. B.; Jamshidi, N. Arabameri, H. Joshaghani A.; Mehrinejad, M. Sharafi, P. (2017). *Enhancing the permeability and abrasion resistance of concrete using colloidal nanoSiO₂ oxide and spraying nanosilicon practices*. Constr. Build. Mater. 146. 128-135.
- Arel, H.S.; Thomas, B.S. (2017). *The effects of nano-and micro-particle additives on the durability and mechanical properties of mortars exposed to internal and external sulfate attacks*, Results in Physics 7, 843–851.
- Atahan H. N; Dikme, D. (2011). *Use of mineral admixtures for enhanced resistance against sulfate attack*, Constr. Build. Mater. 25 (8). 3450–3457.
- Bastos, G.; Patiño, F.; Cambeiro, F. P.; Armesto, J. (2016), *Nano-inclusions applied in cement-matrix composites: a review*. Materials, v. 9, n. 12, p. 1015.
- Bauer, L. A. F. (1994) *Materiais de construção*. 5. Ed. vol 1. Rio de Janeiro: LTC.
- Biczók, I. (1972), *La corrosión del hormigón y su protección*. ed. Bilbao, España: URMO, 1972.
- Cruz-moreno, D. (2019). *Superficies Multifuncionales em Materiales de Construcción base Cemento Portland obtenidas durante el curado con Nanopartículas Funcionalizadas*. Tesis de Doctorado – UANL, 2019.

- Cruz-Moreno, D.; Fajardo, G.; Flores-Vivián, I.; Cruz-López, A.; Valdez, P. (2017), *Tratamiento superficial con nanopartículas base silicio inducido durante el curado: Efecto en la durabilidad de materiales base cemento portland*, Revista ALCONPAT, 7 (3), pp. 274-285, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.239>.
- Diab, M.; Elyamany, E.; Elmoaty, M.; Muftah, M. (2019). *Effect of nanomaterials additives on performance of concrete resistance against magnesium sulfate and acids*. Constr. Build. Mater. 210, 210– 231.
- Escadeillas, G.; Hornain, H. (2014). *A durabilidade do concreto frente à ambientes quimicamente agressivos*. Durabilidade do Concreto. Cap. 11, p. 433-507. São Paulo: IBRACON.
- Fajardo, G.; Cruz-López, A.; Cruz-Moreno, D.; Valdez, P.; Torres, G.; Zanella, R. (2015), *Innovative application of silicon nanoparticles (SN): Improvement of the barrier effect in hardened Portland cementbased materials*". Constr. Build. Mater., 76, 158–167.
- Godart B. (2008). *Loc Divet. Recommendations for preventing disorders due Delayed Etringite Formation. Guide technique*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France. Pp 1-63.
- Gómez-Zamorano; C. E. Castillo-Linton. (2016). *Modificación de las propiedades de matrices cementantes mediante la adición de partículas de nanosílice*. Revista ALCONPAT. Volumen 6, Número 2. pp 101-115.
- Izarra, I; Cubillo, J. Serano. A.; Rodriguez J. F., Carmona, M. A. (2019). *A hydrophobic release agent containing SiO₂-CH₃ submicron-sized particles for waterproofing mortar structures*, Constr. Build. Mater. 199 30-39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.018>
- Jalal, M.; Pouladkhan, R. A.; Norouzi, H. Choubdar, G. (2012), *Effects of silica nano powder and silica fume on rheology and strength of high strength self compacting concrete*, J. Am. Science 8 (4). 270– 277.
- Jo B. W.; Kim C. H.; Tae G. H.; Park J. B. (2007). *Characteristics of cement mortar with nanoSiO₂ particles*. Constr. Build. Mater., 21:1352–5.
- Kolev D.A., Copuroglu O., Breugel K. van, Ye G., de Wit J.H.W. (2008). *Electrical resistivity and microstructural properties of concrete materials in conditions of current flow*. Cement & Concrete Composites 2008; 30:731–744.
- Li, L. G.; Zhu, J.; Huang, Z. H.; Kwan, A. K. H.; Li, L. J. (2017). *Combined effects of micro-silica and nano-silica on durability of mortar*, Constr. Build. Mater. 157, 337–347.
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. (2014). *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*. 2º ed. São Paulo.
- Moslemi, A. M.; Khosrav, A.; Izadinia, M.; Heydari, M. (2014). *Application of nano silica in concrete for enhanced resistance against sulfate attack*, Advanced Materials Research, Trans Tech Publ.
- Nazari, S. Riahi. (2010). *Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self compacting concrete containing SiO₂ nanoparticles*, Mater. Sci. Eng.: A 527 (29–30). 7663–7672.
- Nehdi, M.L.; Suleiman, A.R. (2014) *Soliman. Investigation of concrete exposed to dual sulfate attack*. Cem. and Conc. Res. 64, 42–53.
- Neville, A. M. (2016), *Propriedades do concreto*. Bookman Editora.
- Comité Técnico de Normalización Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales (COTEMARNAT) (2006), *NMX-AA-122-SCFI-2006 Potabilización del agua para uso y consumo humano-Sulfato de aluminio-Especificaciones y métodos de prueba*. Normas Mexicanas
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2014), *NMX-C-155-ONNCCE-2014: Industria de la Construcción – Concreto Hidráulico – Dosificado en Masa – Especificaciones y Métodos de Ensayo*.
- Polder Rob B. (2001). *Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation*. Constr. Build. Mater. 2001; 15: 125-131.
- Qing Y., Zenan Z., Deyu K., Rongshen C. (2007); *Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume*. Constr. Build. Mater. 2007; 21: 539–545.

- Ribeiro, D. V.; Sales, A.; Sousa, C. A. C.; Cunha, M. P. T.; Lourenço, M. Z.; Helene, P. (2014). *Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise*. Ed. Elsevier, Rio de Janeiro.
- Said, A. M.; Zeidan, M. S.; Bassuoni, M. T., Tian, Y. (2012), *Properties of concrete incorporating nanosilica*, Constr. Build. Mater. 36. 838–844.
- Sánchez, M.; Alonso, M. C.; González, R. (2014), *Preliminary attempt of hardened mortar sealing by colloidal nanosilica migration*. Constr. Build. Mater. v. 66, p. 306-312.
- Singh L. P.; Karade S. R.; Bhattacharyya S. K.; Yousuf M. M.; Ahalawat S. (2013), *Beneficial role of nanosilica in cement based materials – a review*. Constr. Build. Mater. 47:1069–77.
- Skalny, J.; Marchand, J.; Odler, I. (2002). *Sulfate attack on concrete*. 1. ed. Londres.
- Souza, R. B. (2006). *Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – método de ensaio acelerado*. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Tobon, J. Payá, O. J. (2015). *Restrepo, Study of durability of Portland cement mortars blended with silica nanoparticles*, Constr. Build. Mater. 80, 92– 97.