

Uso de nano-SiO₂ como tratamiento superficial de mantenimiento preventivo en concreto envejecido por carbonatación

L. Vaca-Arciga¹ , D. Cruz-Moreno¹ , G. Fajardo-San Miguel^{1*} ,
R. Orozco-Cruz² , F. Tienda¹

*Autor de Contacto: gerardo.fajardosn@uanl.edu.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.487>

Recepción: 11/05/2020 | Aceptación: 05/08/2020 | Publicación: 01/09/2020

RESUMEN

Este estudio, tiene como objetivo evaluar el uso de nanopartículas base silicio (NS) y funcionalizadas (NF) como tratamiento superficial (ST) preventivo emergente en especímenes de concreto reforzado. Los especímenes fueron fabricados con una relación agua/cemento (a/c) de 0.65 y sometidos a un periodo de envejecimiento previo mediante la exposición a CO₂. Posteriormente, dos diferentes variantes del tratamiento fueron aplicadas mediante aspersión (usando una dispersión de 0.1% de nanopartículas en agua) y después fueron sometidas nuevamente a carbonatación. Los resultados de profundidad de carbonatación y ángulo de contacto indican que existe una influencia entre el grado de envejecimiento y la eficiencia de cada tratamiento.

Palabras clave: tratamiento superficial; prevención; Nano SiO₂; concreto, carbonatación.

Citar como: Vaca-Arciga, L., Cruz-Moreno, D., Fajardo-San Miguel, G., Orozco-Cruz, R., Tienda, F. (2020), "Uso de nano-SiO₂ como tratamiento superficial de mantenimiento preventivo en concreto envejecido por carbonatación", Revista ALCONPAT, 10 (3), pp. 274 – 285, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.487>

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, FIC-UANL, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

² Universidad Veracruzana, Instituto de Ingeniería, Unidad Anticorrosión, Boca del Río, Veracruz, México.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor L. Vaca-Arciga contribuyó con la conceptualización de la actividad, la investigación, la metodología, la recopilación de datos y la redacción: borrador original. El autor D. Cruz-Moreno contribuyó a la discusión de la actividad de resultados, validación, redacción, revisión y edición. El autor G. Fajardo-San Miguel contribuyó con la idea original, supervisión de actividades, recursos, adquisición de fondos, redacción, revisión y edición. El autor R. Orozco-Cruz contribuyó con la investigación de la actividad y el análisis formal. El autor F. Tienda contribuyó con la investigación de la actividad, la metodología y la recopilación de datos.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2020) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2021.

Use of nano-SiO₂ as a preventive maintenance surface treatment in concrete aged by carbonation

ABSTRACT

This study aims to evaluate the use of silicon base (NS) and functionalized (NF) nanoparticles as emerging preventive surface treatment (ST) in reinforced concrete specimens. The specimens were fabricated with a water/cement (w/c) of 0.65 and subjected to a previous aging period through exposure to CO₂. Subsequently, two different variants of the treatment were applied by spraying (using a 0.1% dispersion of nanoparticles in water) and then re-applied to carbonation. The carbonation depth and contact angle results indicate that there is an influence between the degree of aging and the efficiency of each treatment.

Keywords: surface treatment; prevention; Nano SiO₂; concrete; carbonation.

Uso de nano-SiO₂ como tratamiento superficial para mantención preventiva em concreto envelhecido por carbonatação

RESUMO

Este estudo tem como objetivo avaliar a utilização de nanopartículas à base de silício (NS) e funcionalizadas (NF) como tratamento preventivo de superfície (ST) emergente em corpos de prova de concreto armado. As amostras foram fabricadas com uma relação água/cimento (a/c) de 0,65 e submetidas a um período de envelhecimento prévio por exposição ao CO₂. Posteriormente, duas variantes diferentes do tratamento foram aplicadas por pulverização (utilizando uma dispersão de 0,1% de nanopartículas em água) e, em seguida, submetidas à carbonatação novamente. Os resultados de profundidade de carbonatação e ângulo de contato indicam que existe uma influência entre o grau de envelhecimento e a eficiência de cada tratamento.

Palavras-chave: tratamento superficial; prevenção; Nano SiO₂; concreto; carbonatação.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo del título de la revista: No. 04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

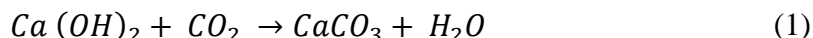
La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

En el sector de la construcción, el concreto reforzado se ha convertido en el material más utilizado a nivel mundial, debido a su bajo costo, facilidad y rapidez de fabricación, sin olvidar la combinación de las altas resistencias a compresión que brinda el concreto y las propiedades mecánicas del acero que lo hacen el material compuesto ideal para aplicaciones estructurales (Aguirre y Mejía de Gutiérrez, 2013).

El deterioro en las estructuras de concreto reforzado (ECR) provocado por la corrosión del acero de refuerzo ha sido tema de estudio en las últimas décadas. Algunos especialistas (Hernández-Castañeda y Mendoza-Escobedo, 2006; Polder, Peelen y Courage, 2012; Angst, 2018) lo consideran el mayor desafío al que se enfrenta la ciencia y la tecnología a nivel mundial en la industria de la construcción. La importancia recae desde la parte técnica, económica y social que causa la durabilidad de las ECR, principalmente cuando el acero de refuerzo se expone ante ambientes agresivos. Es el caso de la exposición a los cloruros, ya sea provenientes de la materia prima del concreto o por la penetración desde el entorno que lo rodea. O bien, por la carbonatación del concreto que es otra de las causas de la corrosión del refuerzo de dichas estructuras.

Más del 50% de los ECR en servicio presentan problemas de deterioro a causa de la alta permeabilidad o baja calidad del concreto. Las pérdidas directas debidas a los costosos trabajos de mantenimiento, y principalmente a los trabajos de reparación de estructuras en todo el mundo, han sido económicamente mayores, especialmente en los países del primer mundo (Alhozaimy et al., 2012). Actualmente, se generan gastos anuales entre 18 y 21 mil millones de dólares en rehabilitaciones o reparaciones de ECR debido a la corrosión del acero de refuerzo. (Beushausen y Bester, 2016). El acero de refuerzo está protegido ante el proceso de corrosión por la alcalinidad del concreto, que es el resultado del proceso de hidratación del cemento. El pH decrece cuando el proceso físico-químico de carbonatación ocurre. La carbonatación sucede por la reacción entre CO_2 y el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produciendo CaCO_3 (1). Como resultado, el CaCO_3 precipita reduciendo el pH en el concreto disminuyendo significativamente la durabilidad del concreto armado y su vida útil.



La aplicación de tratamientos superficiales (TS) en concreto ha sido ampliamente investigada en las últimas décadas. (Pigino *et al.*, 2012; Pan, *et al.*, 2017b; Vivar *et al.*, 2017; Hou *et al.*, 2018). Son métodos económicos y efectivos para mejorar la calidad del concreto de la zona superficial y para proteger las ECR comparada con otros métodos (i.e.: la disminución de la relación agua/cemento y el uso de adiciones puzolánicas, el incremento del espesor del recubrimiento, etc.). La mayoría de los TS pueden reducir la permeabilidad al agua en el concreto, específicamente la impregnación hidrofóbica, que se ha logrado con el uso de silanos y siloxanos, que evita la entrada de agua sin presión hidrostática. Para retrasar el avance de la carbonatación, el tratamiento a base de silicato tiene una protección más efectiva que el silano y el siloxano; estos apenas impiden la entrada de CO_2 (Pan, *et al.*, 2017a).

Hoy en día, el uso de nanomateriales como productos para la protección indirecta (sobre concreto) del acero ha sido ampliamente estudiado, demostrando en algunos casos que pueden mejorar el rendimiento de los materiales de construcción. Particularmente en concreto, el desarrollo de propiedades inteligentes que tienen la capacidad de autolimpiarse, antimicrobianas, hidrofóbicas, súper hidrofóbicas, así como el aumento de las propiedades mecánicas. (Sobolev et al., 2008; Jalal et al., 2012; Kupwade-patil y Cardenas, 2013; Fajardo et al., 2015)

El uso de nanopartículas a base de silicio a edades tempranas ha promovido un aumento en la resistividad eléctrica de la matriz cementante, una disminución en el grado de penetración de CO_2 y una disminución en la permeabilidad. (Cruz-Moreno et al., 2017). Mientras que el uso de

nanopartículas funcionalizadas, como las nanopartículas de sílice funcionalizadas, ha permitido el desarrollo de superficies con propiedades super hidrofóbicas, autolimpiables y bactericidas. (Zhi et al., 2017; Cruz-Moreno, 2019).

Se ha estudiado la influencia del uso de TS para proteger la degradación de concretos envejecidos, aportando propiedades hidrofóbicas y consolidantes. (Shen et al., 2019). Para obtener resultados a largo plazo, se realizaron pruebas de envejecimiento acelerado. Donde se ha encontrado una disminución en el avance de la carbonatación, una hidrofobicidad estable y a pesar de una disminución progresiva de su rendimiento con el paso del tiempo, el efecto residual suele otorgar una mejor vida útil para el concreto (Christodoulou et al., 2013; Creasey et al., 2017).

El presente trabajo tiene como objetivo, el analizar el efecto y desempeño que causa la aplicación de nanopartículas de sílice funcionalizadas (NF) y sin funcionalizar (NS) en superficies de concreto con cierto grado de envejecimiento. Por un lado, la NF brindará un efecto hidrofóbico y, por otro, la NS un efecto bloqueador de poro. La aplicación de las NS y NF es de forma superficial por medio de aspersión de baja presión. Este trabajo se enfocó en evaluar el uso de nanopartículas base sílice (NS) y nanopartículas base sílice funcionalizadas (NF) como tratamiento superficial para métodos de mantenimiento preventivo en el deterioro de ECR ante ambientes ricos en CO₂.

2. PROCEDIMIENTO

A continuación, se describe el desarrollo experimental del diseño, fabricación de los especímenes, obtención de las nanopartículas y finalizando con el medio de envejecimiento a CO₂, con el objetivo de estudiar el efecto generado de las nanopartículas NS y NF como agentes externos en un tratamiento superficial de mantenimiento preventivo en concretos. Este estudio se dividió en etapas, para tener un mejor conocimiento acerca del comportamiento y los efectos de las nanopartículas en un concreto envejecido.

2.1 Producción de nanopartículas base silicio (NS y NF)

Las nanopartículas de silicio (NS y NF) se obtuvieron mediante síntesis sol-gel, siguiendo el procedimiento detallado en (Cruz-Moreno, 2015, 2019). A continuación se describe un resumen de su proceso de síntesis.

Se utilizó tetraetilortosilicato TEOS, como precursor de la sílice, alcohol etílico como solvente, agua desionizada, hidróxido de amonio como catalizador y para la funcionalización de las NS, se utilizó un 1,1,3,3 - tetrametildisiloxano como modificador superficial y ácido nítrico como agente deshidratante.

El procedimiento para la síntesis consistió en colocar el alcohol etílico con una agitación vigorosa a 70°C. Una vez alcanzada esta temperatura, se incorporó el TEOS y se mantuvo la agitación y temperatura por 30 min. Enseguida se adicionó el hidróxido de amonio dejándolo reaccionar por 30 min más. Posteriormente, se adicionó lentamente el agua y se dejó reaccionar por 60 min más. Después, gota a gota, se añadió un exceso de hidróxido de amonio hasta lograr la formación de un gel transparente. Una vez cumplido 24 h, se procedió a colocarlo en un horno a 110 °C por 24 h más, con el fin de evaporar la mayor de cantidad de solvente y agua sobrantes.

Para la obtención de las NF se llevó a cabo durante el proceso de síntesis sol-gel de las NS, donde la funcionalización se realizó a partir de la adición del agua destilada y hasta el término del tiempo de reacción de 60 min. A partir de este momento, se incorporó el 1,1,3,3 - tetrametildisiloxano lentamente y se dejó reaccionar por 120 min para su posterior deshidratación y modificación superficial al incorporar el ácido nítrico a la reacción. Después, se adicionó cuidadosamente gota a gota el hidróxido de amonio, dejando reaccionar por 24 h, al término del tiempo se procedió a colocarlo al horno a 110 °C por 24 h.

2.2 Fabricación de las muestras

Se elaboraron especímenes con Cemento Portland Ordinario (conocido como CPO 40, de acuerdo con NMX-C-414-ONNCCE), la proporción se diseñó de acuerdo con la norma ACI 211, utilizando una relación agua/cemento de 0.65, lo cual es habitual en la industria de la construcción, véase Tabla 1.

Tabla 1. Proporcionamiento de la mezcla de concreto propuesto (ACI 211, PCA).

Rel. a/c	Cemento kg /m ³	Grava kg /m ³	Arena kg /m ³	Agua kg /m ³	Resistencia a la compresión MPa	Porosidad accesible al agua (%)
0.65	330	756	918	215	32	11.25

Para las pruebas de resistencia a la compresión y porosidad accesible al agua se elaboraron especímenes cilíndricos de dimensiones de 10 cm de diámetro por 20 cm de longitud. Los especímenes de concreto se elaboraron de acuerdo con la norma ASTM C39/C39M. Posteriormente siguieron un periodo de curado estándar (como indicado en ASTM C-231) para después ser ensayados.

De acuerdo con la Asociación de Cemento de Portland (conocida como PCA), uno de los requisitos mínimos de resistencia a la compresión recomendados para brindar protección al elemento de concreto en diferentes ambientes de exposición es de 25 MPa, con esto se indica que la mezcla cumple con la recomendación de protección, mientras que la porosidad accesible al agua es de 11.25% indicando que el ingreso de Cl⁻ será alto.

El seguimiento de la carbonatación se llevó a cabo en prismas de concreto con dimensiones de 10 cm x 10 cm x 30 cm. El curado fue con rocío continuo de agua a 20°C y 100% de humedad relativa, donde permanecieron por 28 días.

2.3 Envejecimiento por exposición a CO₂

Al finalizar el curado de los especímenes, estos fueron sometidos a un ambiente rico en CO₂ hasta obtener profundidades de carbonatación que representen diferentes condiciones de envejecimiento previo a la aplicación del tratamiento con NS y NF. Para ello, se seleccionaron tres diferentes profundidades de carbonatación como envejecimiento inicial. Tomando en cuenta que el recubrimiento promedio de las ECR es de 20 mm, se consideraron un 0%, 25% y 50% de carbonatación sobre los especímenes. Es decir, la primera serie es aquella que presenta una profundidad de carbonatación de 0 mm, la segunda serie 5 mm y la tercera serie 10 mm. Las condiciones de exposición fueron: una atmósfera de 8% de CO₂ en aire, 60% ±10% HR, a 30°C.

2.4 Aplicación de tratamientos con NS y NF

Se preparó una dispersión con una dosis de 0.1% de nanopartículas con respecto al volumen de agua, se utilizó una agitación magnética y a 60 °C durante un período de 1 h, con la finalidad de facilitar la dispersión de las NS, evitando la precipitación y la aglomeración. Para el uso de la NF solo fue necesario la agitación magnética sin el uso de temperatura. A cada etapa de envejecimiento se aplicaron 2 tratamientos superficiales: a) dispersión con NS y b) dispersión con NF. Todos los tratamientos están referenciados con una serie control sin tratamiento (llamada aquí, REF). Antes de la aplicación, todos los especímenes tuvieron una preparación, la cual consistió en llevar a cabo una limpieza de la superficie para retirar el polvo, grasa o manchas. Se prepararon las dispersiones para cada tratamiento, y por medio de un atomizador se roció homogéneamente sobre toda la superficie del espécimen, dejando un reposo de 30 min para la aplicación de una segunda capa. Al término de la aplicación, los especímenes se mantuvieron durante 14 días en condiciones de

laboratorio para promover la reacción entre las NS y la matriz cementante.(Fajardo et al., 2015; Cruz-Moreno, 2019). Una vez cumplido este tiempo, todos los especímenes fueron reexpuestos a CO₂ utilizando las condiciones descritas en 2.3 para promover el avance de la carbonatación.

3. MÉTODOS

3.1 Resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión fue realizado en probetas cilíndricas de 100 x 200 mm como indicado en ASTM C 39 usando prensa hidráulica. La mezcla fue diseñada de acuerdo con la norma ASTM C 192/192 M para una resistencia de 30 MPa.

3.2 Ángulo de contacto (AC)

Con el objetivo de evaluar el efecto hidrofóbico que confiere el NF ante las exposiciones de envejecimiento acelerado, se determinó la hidrofobicidad generada en la superficie del concreto. Esta, fue determinada mediante la medición del ángulo de contacto a diferentes edades de envejecimiento siguiendo la norma ASTM D 5725 en un analizador de forma de gota KRÜSS modelo DSA25 a 23 ° C. La Tabla 2 muestra la clasificación de las superficies según el ángulo θ obtenido.

Tabla 2. Clasificación de las superficies en función de los ángulos observables θ máximo y mínimo.

Hidrofílico	Hidrofóbico	Super hidrofóbico
$\theta_{min}^{max} < 90^\circ$	$\theta_{min}^{max} \begin{matrix} < 150^\circ \\ > 90^\circ \end{matrix}$	$\theta_{min}^{max} < 150^\circ$

Se tomaron mediciones de cinco gotas de agua para inyección (2 μ l) por muestra y se tomó una imagen de inmediato. Luego, se analizó con la ayuda del software ADVANCE V 1.9.2.3 y se determinó el ángulo de contacto entre el líquido y la superficie. Se utilizaron las mismas muestras para determinar el avance de carbonatación después de realizar las mediciones de fenolftaleína. La parte evaluada fue en la superficie donde se aplicaron los tratamientos, y se midió a las mismas edades de reexposición, como se puede observar en la Figura 1.

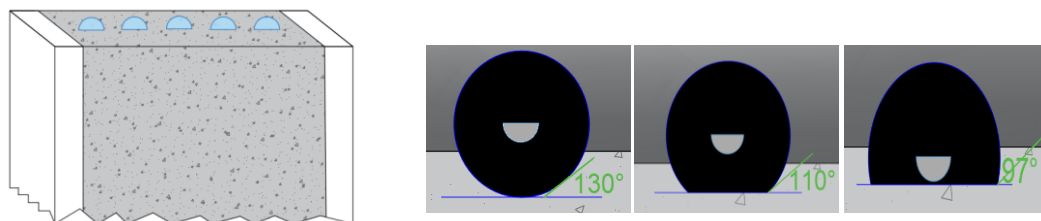


Figura 1. Esquema de la forma en que se realizaron las mediciones de AC en las muestras reexpuestas.

3.3 Medición del avance de la carbonatación

Para la medición del avance de la carbonatación se utilizó la fenolftaleína como indicador convencional. Donde el color rosa que otorga es un indicador de un concreto en buenas condiciones, es decir que aún no presenta problemas de carbonatación. La Figura 2 ilustra el avance de carbonatación para la muestra de concreto con y sin tratamientos. Para las mediciones se utilizó el programa Image J y una regla graduada como referencia de la escala, se realizaron 10 mediciones por lado carbonatado del espécimen, teniendo 3 especímenes por tratamiento.

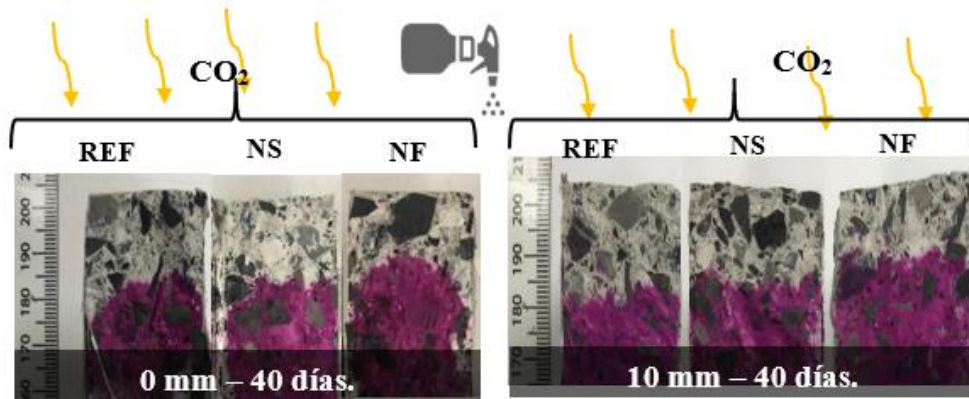


Figura 2. Avance de la carbonatación en muestras de 0 y 10 mm de carbonatación inicial a los 40 días de reexposición, medida con fenolftaleína.

4. RESULTADOS

4.1 Ángulo de contacto

En la Figura 3 se muestran los resultados de los especímenes REF y NF, en los cuales se realizó un seguimiento del ángulo de contacto con el objetivo de conocer el comportamiento del desarrollo de la hidrofobicidad en la superficie del concreto. Las mediciones se realizaron en especímenes sin envejecimiento previo durante más de 1000 h posterior a la aplicación del tratamiento. Se puede observar que la muestra REF tuvo un comportamiento prácticamente constante, con un ángulo de contacto promedio de 26.9°. Por su parte las muestras con tratamiento NF tuvieron un comportamiento uniforme a partir de las 96 h después de la aplicación, alcanzando un ángulo máximo de 123.7°. De acuerdo con estos resultados, a partir de las 24 h la superficie paso de ser hidrofílica a hidrofóbica; y alrededor de las 96 h, la NF tiene un AC estable en el concreto.

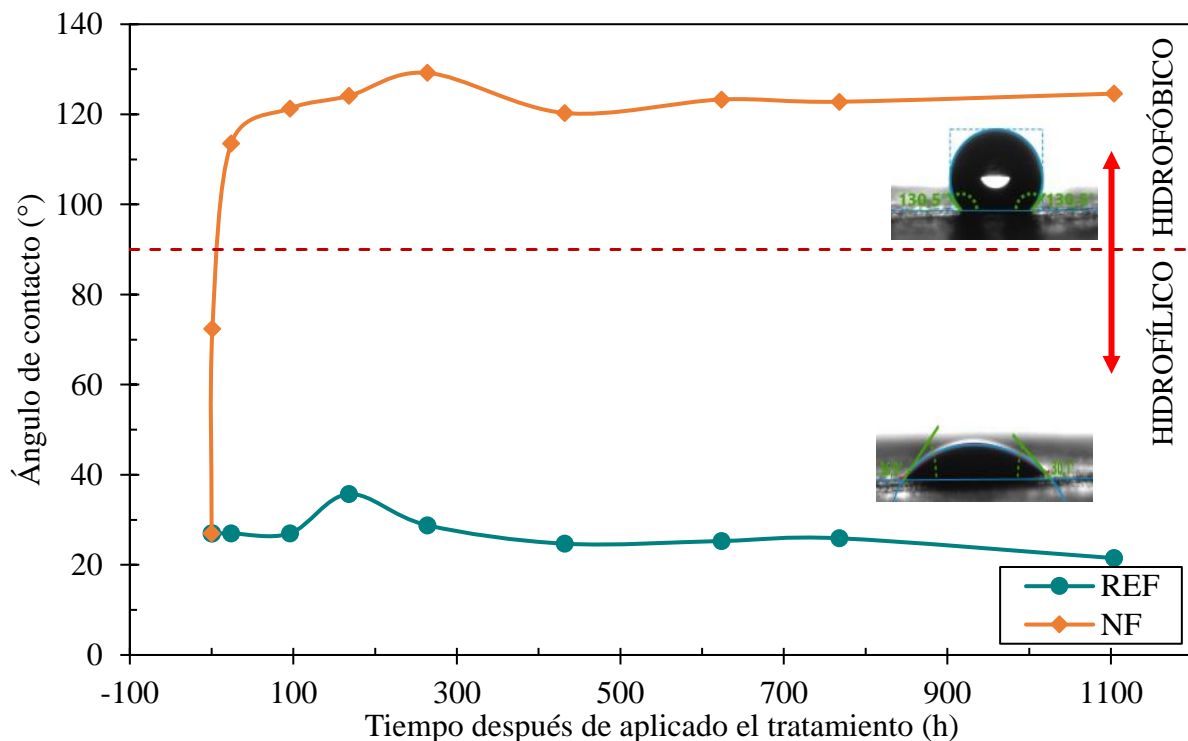


Figura 3. Comportamiento del ángulo de contacto en muestras con tratamientos NF horas después de la aplicación.

En la Figura 4 se presenta el seguimiento del AC, en los especímenes tratados y con los envejecimientos iniciales preseleccionados, a diferentes edades de reexposición al CO₂. Los especímenes NS tuvieron un comportamiento similar al de la referencia, lo cual era esperado ya que este tratamiento de nanopartículas base silicio no proporcionan un efecto hidrofóbico.

Por su parte, el AC en los especímenes tratados con NF es prácticamente constante indicando que la hidrofobicidad se mantiene durante el tiempo de exposición, independientemente del grado de envejecimiento inicial. En la Figura 4.A, la NF presenta el mayor AC en comparación de las demás series, encontrándose en rangos entre 120-130°. Esta preservación del ángulo puede ser atribuida a que, la modificación superficial del concreto debida al proceso de carbonatación, no afectó el comportamiento de los radicales CH₃, principales responsables de la hidrofobicidad de la superficie.

En la Figura 4.B y 4.C, se presentan los resultados obtenidos de especímenes con un envejecimiento de 5 mm y 10 mm de carbonatación. En ambos casos, se puede constatar que el AC se mantuvo en un rango entre 115 y 120°, pero sin mostrar una tendencia clara. Basado en lo anterior, se puede concluir que el envejecimiento producido por exposición a un ambiente de CO₂ no afecta el comportamiento de ángulo de contacto, y por ende el desarrollo de la hidrofobicidad.

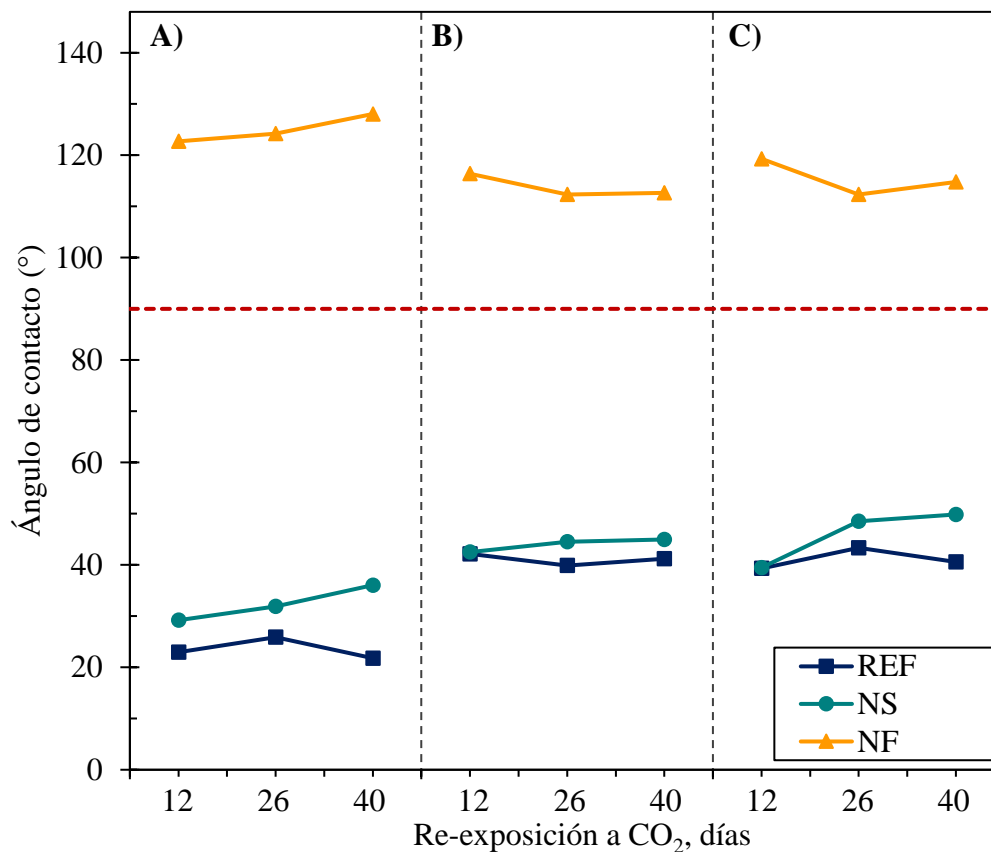


Figura 4. Variación del ángulo de contacto de especímenes con un envejecimiento inicial de A) 0 mm, B) 5 mm y C) 10 mm de carbonatación, después de la reexposición a carbonatación.

4.2 Profundidad de carbonatación

En la Figura 5, se presentan los resultados del avance de carbonatación de los tratamientos superficiales NS y NF, incluyendo la serie sin tratamiento (REF). Se puede observar como la serie sin tratamiento tiende a una mayor profundidad de carbonatación en comparación con las muestras tratadas, independiente del grado de envejecimiento.

De manera específica, en la Figura 5.A, se constata hacia el final del periodo de prueba, hasta un 36% de disminución en la profundidad de carbonatación en los especímenes tratados con NS, en comparación con las muestras REF. Mientras que el tratamiento con NF obtuvo un 22% de reducción. Esto se atribuye a la formación de compuestos hidratados producto de la reacción de las nanopartículas con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, obteniendo una mayor cantidad de geles que conlleva a la reducción de permeabilidad. Estos resultados concuerdan con la literatura, en donde el uso de la NS generan un efecto barrera que mejora la resistencia del ingreso de agentes agresivos (Pigino *et al.*, 2012; Pan, *et al.*, 2017b). Por su parte, el tratamiento con NF, produce un efecto hidrofóbico en la superficie del concreto, lo cual le otorga la capacidad de ceder el paso de gases como el CO_2 a su interior, pero deteniendo el ingreso del agua mediante la repulsión de las moléculas de O-H, por ejemplo, las cuales son necesarias para generar las reacciones del proceso de carbonatación.

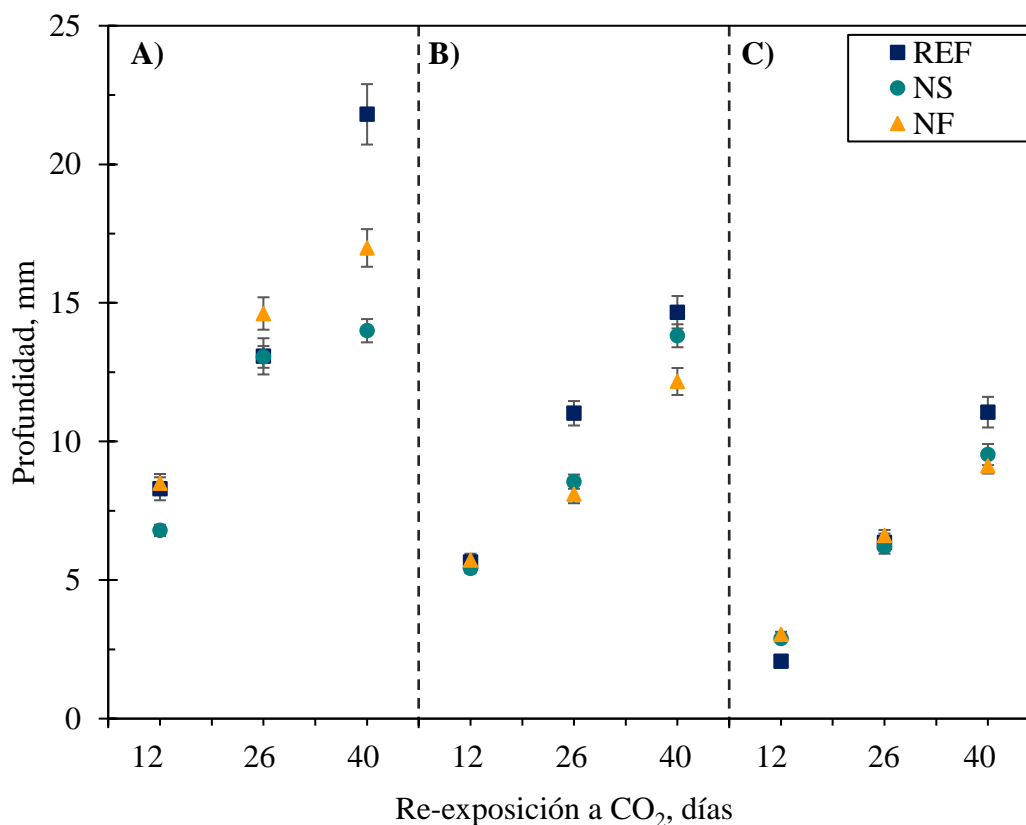


Figura 5. Profundidad de carbonatación en probetas con A) 0 mm B) 5 mm y C) 10 mm de carbonatación antes de la aplicación del tratamiento.

En la Tabla 1 se presentan los valores de la reducción del avance de carbonatación de los especímenes con los diferentes tratamientos, obtenidos al final del período de reexposición. El porcentaje de reducción (%Red) se obtuvo mediante la ecuación (2) establecida por Fajardo et al. (Fajardo et al., 2015).

$$\%Red = (1 - (X_{TRAT}/X_{REF})) * 100... \quad (2)$$

Dónde:

%Red= la reducción de la profundidad de carbonatación (vs REF)

X_{TRAT} = la profundidad de carbonatación de las muestras con tratamiento (mm)

X_{REF} = la profundidad de carbonatación de las muestras sin tratamiento (mm)

Tabla 3. Porcentaje de reducción de carbonatación vs REF de muestras tratadas con NS y NF; expuesto a un ambiente agresivo con un 8% de CO₂ a los 40 días.

Carbonatación inicial	%RED	
	NS	NF
0 mm	36	22
5 mm	4	13
10 mm	7	7

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 3, todos los tratamientos utilizados presentan un porcentaje de reducción mayor en los concretos con un envejecimiento inicial de 0 mm, en comparación con las series de 5 y 10 mm de envejecimiento. Se puede observar claramente que el grado de envejecimiento tiene un efecto sobre el desempeño de los tratamientos. Estos resultados son similares a los encontrados en la literatura, con la diferencia que la aplicación de tratamientos superficiales se realizó en edades tempranas, incluso durante los primeros días después de la fabricación. Por un lado, Franzoni.(Franzoni, Pigino y Pistolesi, 2013) encontró que el uso de la nano sílice tiene un efecto de reducción de la penetración de la carbonatación alrededor de 14-47%. Por su parte, Ibrahim (Ibrahim et al., 1999) encontró que los tratamientos superficiales de base silanos/siloxanos presentaron una reducción de alrededor de 20% en la penetración de la carbonatación.

Los resultados obtenidos aquí, permiten concluir que el grado de envejecimiento del concreto ejerce una disminución en el desempeño de los tratamientos ante la re-exposición al CO₂. De esta manera, se recalca la importancia de llevar a cabo una evaluación y diagnóstico de la estructura para estar en condiciones de realizar una selección del tratamiento. En el caso de estructuras sometidas a ambientes industriales o bien urbano industriales, el tratamiento con nanopartículas NS y NF podría ser una opción factible cuando se aplica a edades tempranas.

5. CONCLUSIONES

- El tratamiento con NF logró una mayor hidrofobicidad y estabilidad a partir de las 96 horas.
- En los especímenes de 0 mm, se puede atribuir la pérdida de AC a una posible modificación que genera la carbonatación entre los radicales CH₃, logrando perder la hidrofobicidad. El efecto del envejecimiento inicial de 5 y 10 mm no afectó a la hidrofobicidad en la superficie mediante el uso del tratamiento con NF. El tratamiento con NF, obtuvo los mejores resultados, tanto en carbonatación como en AC.
- En cuanto al envejecimiento acelerado por CO₂, se observa que el tratamiento NS no muestra resultados esperados, ya que las NS tienen la limitante de Ca(OH)₂ que se consume en el proceso de carbonatación.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud a CONACYT por el apoyo financiero de los proyectos CB-2016/285453 y F0003-301307. L. Vaca-Arciga agradece a CONACYT por la beca otorgada (889469) para la realización de sus estudios de Posgrado. Especial agradecimiento al Laboratorio de Investigación e Innovación en Materiales de Construcción, Departamento de Ecomateriales y Energía y al Departamento de Tecnología del Concreto por el apoyo brindado en el desarrollo del presente estudio.

7. REFERENCIAS

- Aguirre, A. M. and Mejía de Gutiérrez, R. (2013) “*Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas*”, *Materiales de Construcción*, 63(309), pp. 7–38. doi: <https://doi.org/10.3989/mc.2013.00313>.
- Alhozaimy, A., Hussain, R. R., Al-Zaid, R., Al-Negheimish, A. (2012) “*Investigation of severe corrosion observed at intersection points of steel rebar mesh in reinforced concrete construction*”, *Construction and Building Materials*. 37, pp. 67–81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.011>.
- Angst, U. M. (2018) “*Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete*”, *Materials and Structures*. Springer Netherlands, 51(4). doi: <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1131-6>.
- Beushausen, H. and Bester, N. (2016) “*The influence of curing on restrained shrinkage cracking of bonded concrete overlays*”, *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 87, pp. 87–96. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.007>.
- Christodoulou, C., Goodier, C. I., Austin, S. A., Webb, J., Glass, G. K. (2013) “*Long-term performance of surface impregnation of reinforced concrete structures with silane*”, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 48, pp. 708–716. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.038>.
- Creasey, R., Andrews, J. P., Ekolu, S. O., Kruger, D. (2017) “*Long-term 20-year performance of surface coating repairs applied to façades of reinforced concrete buildings*”, *Case Studies in Construction Materials*, 7, pp. 348–360. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.11.001>.
- Cruz Moreno, D. M., Fajardo San Miguel, G. D. J., Flores Vivián, I., Cruz López, A., & Valdez Tamez, P. L. (2017). *Tratamiento superficial con nanopartículas base silicio inducido durante el curado: Efecto en la durabilidad de materiales base cemento portland*. Revista ALCONPAT, 7(3), 274 - 285. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.239>
- Cruz-Moreno, D. M. A. (2015) *Mejoramiento del efecto barrera en materiales endurecidos de cemento portland mediante una aplicación innovadora de nano-partículas de silicio*. Tesis de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, Universidad Autónoma de Nuevo León. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/4554>.
- Cruz-Moreno, D. M. A. (2019) *Superficies multifuncionales en materiales de construcción base cemento portland obtenidas durante el curado con nanopartículas funcionalizadas*, Tesis de Doctorado en Ingeniería con Orientación en Materiales de Construcción. Universidad Autónoma de Nuevo León. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/18517>.
- Fajardo, G., Cruz-López, A., Cruz-Moreno, D., Valdeza, P., Torres, G., Zanella, R. (2015), “*Innovative application of silicon nanoparticles (SN): Improvement of the barrier effect in hardened Portland cement-based materials*”, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 76, pp. 158–167. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.054>.
- Franzoni, E., Pigino, B. and Pistolesi, C. (2013) “*Ethyl silicate for surface protection of concrete: Performance in comparison with other inorganic surface treatments*”, *Cement and Concrete Composites*, 44, pp. 69–76. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.008>.
- Hernández-Castañeda, O. and Mendoza-Escobedo, C. J. (2006) ‘*Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico*’, *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 7(1), pp. 57–70. doi: <http://dx.doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2006.07n1.005>.
- Hou, P., Li, R., Li, Q., Lu, N., Wang, K., Liu, M., Cheng, X. and Shah, S. (2018) ‘*Novel superhydrophobic cement-based materials achieved by construction of hierarchical surface structure with FAS/SiO₂ hybrid nanocomposites*’, *Engineered Science Materials & Manufacturing*. doi: <https://doi.org/10.30919/esmm5f125>.

- Ibrahim, M., Al-Gahtani, A. S., Maslehuddin, M. and Dakhil, F. H. (1999), “*Use of surface treatment materials to improve concrete durability*”, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 11, Issue 1. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:1\(36\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:1(36))
- Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M. and Pouladkhan, A. R. (2012), “*Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles*”, Materials and Design. Elsevier Ltd, 34, pp. 389–400. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.037>.
- Kupwade-patil, K. and Cardenas, H. E. (2013), “*Electrokinetic nanoparticle treatment for corrosion remediation on simulated reinforced bridge deck*”, Journal of Nanoparticle Research, 15 (1952). doi: <https://doi.org/10.1007/s11051-013-1952-3>.
- Pan, X., Shi, Z., Shi, C., Ling, T.-C. and Li, N. (2017a) ‘*A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms*’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 132, pp. 578–590. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.025>.
- Pan, X., Shi, Z., Shi, C., Ling, T.-C. and Li, N. (2017b) ‘*A review on surface treatment for concrete – Part 2: Performance*’, Construction and Building Materials. Elsevier Ltd, 133, pp. 81–90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.128>.
- Pigino, B., Leemann, A., Franzonia, E. and Lura, P. (2012) ‘*Ethyl silicate for surface treatment of concrete – Part II: Characteristics and performance*’, Cement and Concrete Composites. Elsevier Ltd, 34(3), pp. 313–321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.021>.
- Polder, R. B., Peelen, W. H. A. and Courage, W. M. G. (2012) ‘*Non-traditional assessment and maintenance methods for aging concrete structures - Technical and non-technical issues*’, Materials and Corrosion, 63(12), pp. 1147–1153. doi: <https://doi.org/10.1002/maco.201206725>.
- Shen, L., Jiang, H., Wang, T., Chen, K. and Zhang, H. (2019) ‘*Progress in Organic Coatings Performance of silane -based surface treatments for protecting degraded historic concrete*’, Progress in Organic Coatings. Elsevier, 129, pp. 209–216. doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.01.016>.
- Sobolev, K., Flores, I., Hermosillo, R. and Torres-Martínez, L. M (2008), *Nanomaterials and Nanotechnology for High-Performance Cement Composites*, Symposium Paper, International Concrete Abstracts Portal, American Concrete Institute: ACI Special Publication, 254, pp. 93–120. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.452.2354&rep=rep1&type=pdf>.
- Vivar Mora, L., Naik, S., Paul, S., Dawson, R., Neville, A. and Barker, R. (2017) *Influence of silica nanoparticles on corrosion resistance of sol-gel based coatings on mild steel*, Surface and Coatings Technology. Elsevier B.V., 324, pp. 368–375. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.05.063>
- Zhi, J.-H. Zhang, L.-Z., Yan, Y. and Zhu, J. (2017), *Mechanical durability of superhydrophobic surfaces: The role of surface modification technologies*, Applied Surface Science. Elsevier B.V., 392, pp. 286–296. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.09.049>.