USO DE NANO-SIO₂ COMO TRATAMIENTO SUPERFICIAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO ENVEJECIDO

L. VACA-ARCIGA¹, G. FAJARDO-SAN MIGUEL¹, D. CRUZ-MORENO¹,
R. OROZCO-CRUZ², F. TIENDA¹

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

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

RESUMEN

Los tratamientos superficiales son métodos utilizados para proteger a las estructuras de concreto reforzado (ECR) en exposición ante los agentes agresivos que están presentes en el medio. El efecto de la carbonatación puede ayudar a acelerar el proceso de deterioro de las estructuras. A pesar de los avances en los procedimientos o métodos de prevención ante estos efectos, aún existen lagunas en la comprensión del uso y eficiencia de tratamientos superficiales de estructuras con cierto grado de envejecimiento. Este estudio, tiene como objetivo evaluar el uso de nanopartículas base silicio (NS) y funcionalizadas (NF) como tratamiento superficial emergente de mantenimiento preventivo. Para ello se fabricaron especímenes prismáticos de concreto con acero embebido con una relación a/c de 0.65. Posterior al tratamiento, los especímenes fueron sometidos nuevamente a sus respectivos medios de envejecimiento. Se valoró la eficiencia de los tratamientos con respecto al tiempo, mediante la medición del avance de carbonatación por fenolftaleína y ángulo de contacto. Los resultados indican que existe una influencia entre el grado de envejecimiento de las ECR y la eficiencia de cada tratamiento.

Palabras clave: Tratamiento superficial; Mantenimiento; Nano SiO₂; Concreto, Vida de servicio.

ABSTRACT

Surface treatments are methods used to protect the reinforced concrete structures (ECR) in exposure to aggressive agents that are present in the environment. The effect of carbonation can help accelerate the process of deteriorating structures. Despite the advances that exist to these effects, there are still gaps in the understanding of the use and efficiency of surface treatments of structures with a certain degree of aging. In this study, it aims to evaluate the use of silica-based nanoparticles (NS) and functionalized (NF) as surface treatment as emergent methods of preventive maintenance. After the treatment, the specimens were resubmitted to their respective means of ageing. It was valued the efficiency of the treatments with respect to the time, by the measurement of the progress of carbonation by Phenolphthalein and contact angle. The results indicate that there is an influence between the degree of aging of the ECR and the efficiency of each treatment.

Keywords: Surface treatment; Maintenance; Nano SiO₂; Concrete, Service life.

RESUMO

Os tratamentos superficiais são métodos utilizados para proteger as estruturas de concreto armado (ECR) em exposição ante a agentes agressivos que estão presentes no meio ambiente. O efeito da carbonatação pode ajudar a acelerar o processo de deterioração das estruturas. Apesar dos avanços nos procedimentos ou métodos de prevenção ante estes efeitos, ainda existem algumas lacunas na compreensão do uso e eficiência de tratamentos superficiais de estruturas com certo grau de envelhecimento. Este estudo tem como objetivo avaliar o uso de nanopartículas a base de silício simples (NS) e funcionalizadas (NF) como tratamento superficial emergente de manutenção preventiva. Para isso, foi fabricado corpos de prova prismáticos de concreto com aço embebido, com uma relação a/c de 0.65. Posterior ao tratamento, os corpos de prova foram submetidos novamente a seus respectivos meios de envelhecimento. A eficiência dos tratamentos foi medida em relação ao tempo, mediante o acompanhamento do avanço da carbonatação com fenoltaleína e ângulo de contato. Os resultados indicam que existe uma influência entre o grau de envelhecimento das ECR e a eficiência de cada tratamento.

Palavras-chave: Tratamento superficial; Manutenção; NanoSiO₂; Concreto; Vida de serviço.

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 and 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 ya que es, quizá, el mayor desafío que enfrenta la ciencia y 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. Tal y como es la exposición a los cloruros, ya sea provenientes de los ingredientes 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.

Más del 50% de estas estructuras en servicio presentan problemas de deterioro a causa de la alta permeabilidad o baja calidad del concreto. Las pérdidas directas debido a los costosos trabajos de mantenimiento y fundamentalmente de reparación en las estructuras a nivel mundial han sido económicamente muy elevadas, sobre todo en países del primer mundo (Alhozaimy, et al. 2012). Actualmente, se generan gastos anuales entre 18 a 21 mil millones de USD en rehabilitaciones o reparaciones en las estructuras de concreto reforzado (ECR) debido a la corrosión del acero de refuerzo. La aplicación de tratamientos superficiales en concreto ha sido ampliamente investigada en las últimas décadas. Son métodos económicos y eficaces para mejorar la calidad de la zona superficial y para proteger la ECR comparada con otros métodos, como la disminución de la relación agua/cemento y el uso de adiciones puzolánicas, el incremento del espesor del recubrimiento, etc.

La mayoría de los tratamientos pueden reducir la permeabilidad al agua en el concreto, específicamente la impregnación hidrofóbica, mediante el uso de silanos y siloxanos, que pueden prevenir el ingreso de agua sin presión hidrostática. Para retardar el avance de la carbonatación, el tratamiento a base de silicatos tiene una protección más efectiva que el silano y siloxano que apenas impiden el ingreso de CO₂ (Li, 2017).

Hoy en día el uso de nanomateriales como productos para una protección indirecta (sobre el concreto) del acero en las estructuras ha sido ampliamente estudiado, debido a que el uso de los nanomateriales ha demostrado ser capaces de mejorar el desempeño de los materiales de construcción. Particularmente, en el concreto, han contribuido el desarrollo de propiedades llamadas “inteligentes” en la superficie como la capacidad de autolimpieza, propiedades antimicrobianas, hidrofóbicas, superhidrofóbicas, así como el incremento en propiedades mecánicas (Jalal, et al. 2012; Fajardo, et al. 2015; Sobolev, et al. 2006; Kupwade-Patil and Cardenas, 2013).

El uso de nanopartículas base silicio ha demostrado un aumento de la resistividad eléctrica de la matriz cementante, una disminución en el grado de penetración de CO₂ y una disminución de la permeabilidad (Cruz Moreno, et al. 2018). Mientras que el uso de nanopartículas funcionalizadas, como las nanopartículas de sílice funcionalizadas, han permitido desarrollar superficies con propiedades superhidrofóbicas, autolimpiables y bactericidas (Cruz-Moreno, 2019; Zhi, 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, donde la NF brindará un efecto hidrofóbico y 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, usando una suspensión de 0.1% de nanopartículas vs. el volumen de agua, las cuales fueron obtenidas por el método sol-gel. 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 EXPERIMENTAL

Se realizó una caracterización física, mecánica y microestructural a cada uno de los materiales empleados como materia prima, antes y después de ser tratados, así también una caracterización antes y después de ser expuestos a ambientes ricos en CO₂, con el objetivo de poder 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 las nanopartículas base silicio (NS y NF).

Las nanopartículas de NS y NF se obtuvieron por la ruta de sol-gel a 70°C. Se utilizó tetraetilortosilicato TEOS, como precursor del 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 especímenes.

Se elaboraron especímenes con Cemento Portland Ordinario (CPO), el proporcionamiento fue diseñado de acuerdo con la norma ASTM C 192/192 M, utilizando una relación agua/cemento de 0.65, la cual es usual en la industria de la construcción, véase Tabla 1.

Tabla 1. Proporcionamiento de la mezcla de concreto propuesto (kg/m³, ACI 211, PCA).

Rel. a/c	Cemento kg	Grueso kg	Fino kg	Agua kg	Resistencia 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 a 28 días se elaboraron especímenes cilíndricos de longitudes de 10 cm de diámetro por 20 cm de longitud. Los especímenes de concreto se elaboraron de acuerdo con la norma ASTM C39/C39M y con un curado estándar bajo la norma ASTM C-231.

De acuerdo con la PCA, uno de los requisitos mínimos de resistencia a la compresión recomendada 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.

Los especímenes que se elaboraron para la medición de penetración de la carbonatación fueron 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 diferentes periodos de carbonatación, previo a la aplicación del tratamiento con NS y NF, con el objetivo de simular un envejecimiento de estructuras urbanas en estado de servicio.

Para estudiar el efecto que ejerce el envejecimiento de las ECR en la aplicación de los tratamientos de mantenimiento se seleccionaron dos 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% y 25% de carbonatación sobre los especímenes. Es decir, la primera serie es aquella que presenta una profundidad de 0 mm, la segunda serie 5 mm de profundidad de carbonatación. Las condiciones de exposición fueron: atmósfera de 15% de CO₂ en aire, 60% ±10% HR, a 30°C.

2.4 Aplicación de los tratamientos con NS y NF.

Se decidió una dosis de 0.1% de nanopartículas por peso de la solución, se planteó el uso de una agitación magnética y a 60 °C durante un período de 1 h, con la finalidad de facilitar la dispersión de las NS en la solución, evitando la precipitación y la aglomeración. Para el uso de la NF solo fue necesario la agitación magnética sin el uso de temperatura. Se seleccionaron 2 diferentes modos de aplicación del tratamiento donde las nanopartículas serán suspendidas en una solución acuosa para facilitar su aplicación. A cada tipo de envejecimiento se aplicaron 2 tratamientos a evaluar: a) suspensión con NS (T1) y b) suspensión con NF (T2). Todos los tratamientos están referenciados con una serie control sin tratamiento. Para la aplicación, todos los especímenes tuvieron una preparación previa, la cual consistió en tener una superficie libre de polvo, grasa o manchas. Se prepararon las suspensiones para cada tratamiento y por medio de un atomizador se roció homogéneamente sobre toda la superficie del espécimen, dejando como 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. Una vez cumplido este tiempo, todos los especímenes fueron re-expuestos a una carbonatación acelerada.

3. MÉTODOS

3.1 Resistencia a la compresión.

El ensayo de resistencia a la compresión fue realizado en las probetas cilíndricas de 100 x 200 mm. Los procedimientos de ensayo fueron realizados según lo descrito en la norma ASTM C 39. En ese contexto, las muestras fueron colocadas en la prensa hidráulica, donde fueron cargadas por compresión hasta la ruptura. 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.

La medición del ángulo de contacto fue realizada de acuerdo con la norma ASTM D 5725, se utilizó el equipo Drop Shape Analyser de la marca KRÜSS modelo DSA25 a 23 °C. Seguidamente, se tomaron mediciones de cinco gotas de agua inyectable (2µl) por espécimen e inmediatamente se tomó una imagen. Después, se analizó con la ayuda del software ADVANCE versión 1.9.2.3 y se determinó el ángulo de contacto entre el líquido y la superficie. Se utilizaron los mismos especímenes usados para la determinación del avance de carbonatación luego de hacer las mediciones con fenolftaleína. La parte evaluada fue en la superficie donde había sido aplicado el tratamiento y se midió a las mismas edades de re-exposición.

Esto con el objetivo de evaluar el efecto hidrofóbico que confiere las NF ante las exposiciones de envejecimiento acelerado. En la Tabla 2 se muestra la clasificación de las superficies según θ .

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

Hidrófilo	Hidrofóbico	Superhidrofóbico
$\theta_{\min}^{\max} < 90^\circ$	$\theta_{\min}^{\max} < 150^\circ$ $> 90^\circ$	$\theta_{\min}^{\max} < 150^\circ$

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 1 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.

Fig. 1 Avance de la carbonatación en muestras de 0 mm de carbonatación inicial a 19 días de exposición, medidos con Fenolftaleína.

4. RESULTADOS

4.1 Ángulo de contacto

En esta parte, se presentan los resultados parciales de la evaluación de las propiedades hidrofóbicas en la superficie de los especímenes con y sin tratamiento. En la **Fig. 3** se muestran los resultados de los especímenes REF y T2, los cuales fueron analizados horas después de la aplicación de los tratamientos, comenzando con 1 h de hasta 1104 h después. Se puede observar que la muestra REF tuvo un comportamiento constante en el tiempo, donde su medición promedio fue de un ángulo de 26.9° . Por su parte las muestras con tratamiento T2 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, la superficie se vuelve hidrofóbica a partir de las 24 horas de aplicación, y llega a un máximo a partir de las 96 horas.

Fig. 2 Determinación del ángulo de contacto en muestras con tratamientos hidrofóbico horas posteriores a la aplicación.

En la Fig. 4, se presentan los resultados obtenidos del ángulo de contacto de los diferentes tratamientos, incluyendo la muestra de referencia, a diferentes edades de exposición a CO_2 . Los especímenes T1 tuvieron un comportamiento parecido al de la referencia, lo cual era esperado ya que este tratamiento de únicamente nanopartículas base silicio no proporcionan un comportamiento hidrofóbico.

Por su parte, el tratamiento T2 tuvieron un comportamiento hidrofóbico hasta el último día de exposición, pero teniendo una disminución del ángulo de contacto del 29.5%. Esta disminución que se presenta se puede deber a la modificación superficial que se puede generar debido a la carbonatación, así como a la generación de agua acumulada bajo la superficie hidrofoba por efecto de la misma carbonatación, y al no estar en condiciones donde el agua pueda evaporarse libremente, puede ocasionar que el efecto hidrofóbico se vea afectado con el tiempo de exposición.

Fig. 3 Variación del ángulo de contacto en el tiempo con una exposición a CO₂. Sin previo envejecimiento.

En la Figura 5, se presentan los resultados obtenidos de especímenes con un envejecimiento de 5 mm de carbonatación previo a la aplicación de los tratamientos. El comportamiento del tratamiento T1 y REF fue similar al encontrado en los especímenes con 0 mm de envejecimiento. A pesar del grado de envejecimiento, a los primeros días de exposición se tenían ángulos de contacto cercanos a 120°. A una exposición de 26 días tuvo una caída de un 22.7%. La disminución del ángulo de contacto puede estar ocasionada deber a la modificación de la superficie, como puede ser el pH, o una afectación por la temperatura, humedad provocando una degradación de los tratamientos.

Fig. 4 Determinación del ángulo de contacto de especímenes con un envejecimiento inicial de 5mm de carbonatación, después de re-exposición a carbonatación

4.2 Profundidad de carbonatación.

En la Figura 5, se presentan los resultados del avance de carbonatación como comparativa de los tratamientos superficiales T1, T2, incluyendo la referencia (REF) sin tratamiento.

Se puede apreciar que a los 12 días de exposición a 15% de CO_2 el avance de la carbonatación en los especímenes con tratamiento alcanzó una profundidad entre 6 y 7 mm. Hacia el final del periodo de prueba (40 días) se observó que prácticamente no existe un efecto favorable de ninguno de los tratamientos. Al respecto, se esperaría que el tratamiento T1 que es solo con nanopartículas base sílice (NS) tuviera un mejor comportamiento en los especímenes de 0 mm, ya que se ha demostrado en trabajos anteriores, que existen reducciones del avance en la carbonatación en morteros, tanto como tratamientos superficiales con NS y NF (Cruz Moreno, et al. 2018; Cruz-Moreno, 2019), donde el porcentaje de reducción máximo alcanzado lo obtuvo el tratamiento de NS con un 90%, mientras que los tratamientos con NF solo llegó a obtener una reducción inferior al 30%, tomando en cuenta que, las nanopartículas NS ejerce reacciones con los materiales cementantes, generando silicatos de calcio hidratados secundarios, generando un bloqueo entre los poros interconectados y reduciendo la permeabilidad, y por resultado mejora la resistencia del ingreso de agentes agresivos (Jalal, et al. 2012; Sobolev, et al. 2006).

Fig. 5 Avance de la carbonatación en especímenes con 0 mm de carbonatación previa a la aplicación del tratamiento.

Una de las causas por las que no se obtuvieron resultados similares podría atribuirse al tiempo de reacción inicial (15 días) que se dio en los especímenes tratados con T1. En efecto, este tiempo pudo haber resultado insuficiente para que las NS desarrollen las reacciones comentadas y generen el efecto barrera en el concreto. En el caso del T2, el comportamiento observado podría ser debido a que el agua generada en la matriz por el proceso de carbonatación permanece en el interior debido al efecto hidrofóbico generado por las NF. Por lo que se puede inferir que las NF no tienen la función de reducir la penetración de gases (CO_2) a la matriz por lo que a su paso al encontrar agua dentro el proceso de carbonatación continúa. Para verificar esto, se han establecido una serie de protocolos para sustentar o refutar estas aseveraciones.

En la **Fig. 6**, se presentan las profundidades de carbonatación de los especímenes que tuvieron un envejecimiento acelerado hasta que alcanzaron un avance de carbonatación 5 mm previo a la aplicación de los tratamientos. Hasta la edad de 26 días, ambos tratamientos se encuentran por debajo de la muestra de referencia.

El avance de la carbonatación en todos los especímenes muestra un comportamiento creciente conforme al tiempo de exposición. A pesar de que el tratamiento T2 está por debajo de la REF, es notorio el incremento del avance entre las edades 19 a 26 días, esto se puede deber a la pérdida del ángulo de contacto.

Fig. 6 Avance de la carbonatación en especímenes con 5 mm de carbonatación previa a la aplicación del tratamiento.

5. CONCLUSIONES

1. Se obtuvo la resistencia mecánica deseada, la cual se tomó como calidad del concreto, así como punto de partida de esta experimentación.
2. Los tratamientos con NF demostraron estar en el rango de materiales hidrofóbicos y a edades tardías de 19 y 33 días de exposición no demostraron una pérdida de dicha hidrofobicidad.
3. El efecto del envejecimiento inicial de 5 mm no fue factor para el desarrollo de la hidrofobicidad en la superficie mediante el uso del tratamiento con NF, como lo confirma la medición del ángulo de contacto. Estos nanomateriales (NF) interaccionan de manera física con la superficie y no generan ningún tipo de reacción en ella.
4. En cuanto al envejecimiento acelerado por CO_2 , se observa que el tratamiento T1 no muestra resultados esperados, posiblemente debidos al tiempo de reacción entre la NS y el material cementante.
5. Se analizará el efecto hidrofóbico que se genera en los especímenes para comprobar la hipótesis de retención de agua que promueve el proceso de carbonatación, así como la evaluación del tiempo de reactividad de la NS.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al proyecto CB-285453 y a la beca de posgrado con CVU 889469. Así como al Laboratorio de Investigación e Innovación en Materiales de Construcción, al Departamento de Ecomateriales y energía y al Departamento de Tecnología del Concreto por todo el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo.

7. REFERENCIAS

- Aguirre, A. M., Mejía de Gutiérrez, R. (2013), “*Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas*”, Mater. Construcción, vol. 63, no. 309, pp. 7–38.
- 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*”, Constr. Build. Mater., vol. 37, pp. 67–81.
- Cruz Moreno, D., Fajardo San Miguel, G., Flores Vivián, I., Cruz López, A., Valdez Tamez, 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), 274 - 285. doi:<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.239>.
- Cruz-Moreno, D. (2019), “*Superficies multifuncionales en materiales de construcción base cemento portland obtenidas durante el curado con nanopartículas funcionalizadas,*”.
- Li, N. (2017), “*A review on concrete surface treatment Part I : Types and mechanisms*”, Constr. Build. Mater., vol. 132, no. February, pp. 578–590.
- 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 cement-based materials*”, Constr. Build. Mater., vol. 76, pp. 158–167.
- Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M., Pouladkhan, A. R. (2012), “*Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles*”, Mater. Des., vol. 34, pp. 389–400.
- Kupwade-Patil, K., Cardenas, H. E. (2013), “*Electrokinetic nanoparticle treatment for corrosion remediation on simulated reinforced bridge deck*” Journal of Nanoparticle Research, September 2013, 15:1952. <https://doi.org/10.1007/s11051-013-1952-3>
- Sobolev, K., Flores, I., Hermosillo, R., Torres-Martínez, L. M. (2006), “*Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites*”, Nanotechnol. Concr. Recent Dev. Futur. Perspect., pp. 91–118.
- Zhi, J. H., Zhang, L. Z., Yan, Y., Zhu, J. (2017) “*Mechanical durability of superhydrophobic surfaces: The role of surface modification technologies*”, Appl. Surf. Sci., vol. 392, pp. 286–296.