Revista ALCONPAT
www.revistaalconpat.org
eISSN 2007-6835
Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

Uso de nano-SiO_2 como tratamento de superfície como manutenção preventiva em concreto envelhecido por carbonatação

L. Vaca-Arciga[1], D. Cruz-Moreno [1], G. Fajardo-San Miguel [1]*, R. Orozco-Cruz[2], F. Tienda[1]
* Autor de Contato: gerardo.fajardosn@uanl.edu.mx
DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v10i3.487

Recepção: 11/05/2020 | Aceitação: 05/08/2020 | Publicação: 01/09/2020

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 CO_2. 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 da superfície; prevenção; Nano SiO2; concreto, carbonatação.

Citar como: Vaca-Arciga, L., Cruz-Moreno, D., Fajardo-San Miguel, G., Orozco-Cruz, R., Tienda, F. (2020), *"Uso de nano-SiO_2 como tratamento de superfície como manutenção preventiva em concreto envelhecido por carbonatação"*, 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), San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.
[2] Universidad Veracruzana, Instituto de Ingeniería, Unidad Anticorrosión, Boca del Río, Veracruz, México.

Contribuição de cada autor
Neste trabalho, o autor L. Vaca-Arciga contribuiu com a conceituação, investigação, metodologia, coleta de dados e redação da atividade - esboço original. O autor D. Cruz-Moreno contribuiu com a discussão da atividade dos resultados, validação, redação - revisão e edição. O autor G. Fajardo-San Miguel contribuiu com a ideia original, supervisão de atividades, recursos, aquisição de financiamento, redação - revisão e edição. O autor R. Orozco-Cruz contribuiu com investigação da atividade e análise formal. O autor F. Tienda contribuiu com a investigação da atividade, metodologia e coleta de dados..

Licença Creative Commons
Copyright (2020) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 (CC BY 4.0).

Discussões e correções pós-publicação
Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2021.

Use of nano-SiO_2 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 CO_2. 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 SiO_2; concrete; carbonation.

Uso de nano-SiO_2 como tratamiento superficial de mantenimiento preventivo en concreto envejecido por carbonatación

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 CO_2. 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 SiO_2; concreto, carbonatación.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos para o uso exclusivo do título da revista No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Na construção civil, o concreto armado tornou-se o material mais utilizado mundialmente, devido ao seu baixo custo, facilidade e rapidez de fabricação, sem falar na combinação das altas resistências à compressão proporcionadas pelo concreto e as propriedades mecânicas do aço que o tornam o material compósito ideal para aplicações estruturais. (Aguirre e Mejía de Gutiérrez, 2013).

A deterioração em estruturas de concreto armado (RCS reinforced concrete structures) causada pela corrosão das armaduras de aço tem sido objeto de estudo nas últimas décadas. Alguns especialistas (Hernández-Castañeda e Mendoza-Escobedo, 2006; Polder, Peelen e Courage, 2012; Angst, 2018) consideram este o maior desafio para a ciência e tecnologia mundial na indústria da construção. A importância recai sobre as preocupações técnicas, econômicas e sociais que ocasionam a durabilidade do RCS, principalmente quando a armadura é exposta a ambientes agressivos. É o caso da exposição aos cloretos, quer da matéria-prima do concreto, quer por penetração do meio envolvente ou devido à carbonatação do concreto, que é mais uma causa de corrosão das armaduras dessas estruturas.

Mais de 50% dos RCS em serviço apresentam problemas de deterioração devido à alta permeabilidade ou baixa qualidade do concreto. As perdas diretas devido a trabalhos de manutenção onerosos e principalmente trabalhos de reparo em estruturas em todo o mundo têm sido economicamente mais elevados, especialmente em países do primeiro mundo (Alhozaimy et al., 2012). Atualmente, as despesas anuais são geradas entre 18 a 21 bilhões de dólares em reabilitações ou reparos no RCS devido à corrosão do aço da armadura (Beushausen e Bester, 2016). O aço da armadura é protegido contra o processo de corrosão pela alcalinidade do concreto, resultante do processo de hidratação do cimento. O pH diminui quando ocorre o processo de carbonatação físico-química. A carbonatação ocorre pela reação entre CO_2 e $Ca(OH)_2$ produzindo $CaCO_3$ (1). Como resultado, o $CaCO_3$ precipita reduzindo o pH do concreto, diminuindo significativamente a durabilidade do concreto armado e sua vida útil.

$$Ca\,(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (1)$$

A aplicação de tratamentos de superfície (TS), em particular, tem sido extensivamente investigada nas últimas décadas (Pigino et al., 2012; Pan et al., 2017; Vivar et al., 2017; Hou et al., 2018). Eles são métodos econômicos e eficazes para melhorar a qualidade do concreto da área de superfície e para proteger o RCS em comparação com outros métodos (ou seja, diminuir a razão a / c e usar adições de pozolana, aumentar a espessura do revestimento, etc.)

A maioria dos ST pode reduzir a permeabilidade à água no concreto, especificamente a impregnação hidrofóbica, que foi alcançada com o uso de silanos e siloxanos, que evitam a entrada de água sem pressão hidrostática. Para retardar o avanço da carbonatação, o tratamento à base de silicato tem uma proteção mais eficaz do que o silano e o siloxano; dificilmente impedem a entrada de CO_2 (Li, 2017).

Atualmente, o uso de nanomateriais como produtos de proteção indireta (sobre o concreto) do aço tem sido amplamente estudado, demonstrando em alguns casos que são capazes de melhorar o desempenho dos materiais de construção. Particularmente no concreto, o desenvolvimento de propriedades inteligentes que possuem a capacidade de autolimpeza, antimicrobiana, hidrofóbica, superhidrofóbica, bem como o aumento das propriedades mecânicas. (Sobolev et al., 2008; Jalal et al., 2012; Kupwade-patil e Cardenas, 2013; Fajardo et al., 2015)

O uso de nanopartículas à base de silício em idades precoces tem promovido um aumento na resistividade elétrica da matriz cimentícia, uma diminuição no grau de penetração do CO_2 e uma diminuição na permeabilidade. (Cruz-Moreno et al., 2017). Enquanto o uso de nanopartículas

funcionalizadas, como nanopartículas de sílica funcionalizadas, tem permitido o desenvolvimento de superfícies com propriedades superhidrofóbicas, autolimpantes e bactericidas (Zhi et al., 2017; Cruz-Moreno, 2019)

A influência do uso de TS para proteger a degradação de concretos envelhecidos tem sido estudada, proporcionando propriedades hidrofóbicas e de consolidação (Shen et al., 2019). Para resultados de longo prazo, ensaios de envelhecimento acelerado foram realizados. Uma diminuição na progressão da carbonatação e hidrofobicidade estável foi encontrada e, apesar de uma diminuição progressiva em seu desempenho ao longo do tempo, o efeito residual geralmente fornece uma melhor vida útil para o concreto (Christodoulou et al., 2013; Creasey et al., 2017).

O objetivo desta pesquisa é analisar o efeito e desempenho que ocasiona a aplicação de nanopartículas de sílica funcionalizadas (NF) e não funcionalizadas (NS) em superfícies de concreto com certo grau de envelhecimento. Por um lado, o NF fornecerá um efeito hidrofóbico e, por outro, o NS fornecerá um efeito de bloqueio dos poros. A aplicação de NS e NF é feita superficialmente por meio de pulverizações de baixa pressão. Este trabalho teve como objetivo avaliar a utilização de nanopartículas à base de sílica (NS) e nanopartículas funcionalizadas à base de sílica (NF) como tratamento de superfície para métodos de manutenção preventiva na deterioração de RCS em ambientes ricos em CO_2.

2. PROCEDIMENTO

Os parágrafos seguintes explicarão o desenvolvimento experimental do projeto, fabricação dos corpos de prova, obtenção das nanopartículas e finalização com o envelhecimento por CO_2, a fim de estudar o efeito gerado pelas nanopartículas NS e NF como agentes externos em um tratamento de manutenção preventiva superficial em concreto. Este estudo foi dividido em diferentes etapas, a fim de se obter um melhor entendimento do comportamento e dos efeitos das nanopartículas no concreto envelhecido.

2.1 Produção de nanopartículas à base de silício (NS e NF)

Nanopartículas de silício (NS e NF) foram obtidas através da síntese em gel, seguindo o procedimento detalhado em (Cruz-Moreno, 2015, 2019), um resumo de seu processo de síntese é descrito a seguir.

TEOS tetraetilortossilicato foi utilizado como precursor de sílica, álcool etílico como solvente, água desionizada, hidróxido de amônio como catalisador e para a funcionalização do NS, 1,1,3,3-tetrametildisiloxano foi utilizado como modificador de superfície e nítrico ácido como agente desidratante.

O procedimento para a síntese consistiu em colocar o álcool etílico com agitação vigorosa a 70 ° C. Uma vez atingida essa temperatura, o TEOS foi incorporado e a agitação e a temperatura foram mantidas por 30 min. Em seguida, o hidróxido de amônio foi adicionado, permitindo-lhe reagir por mais 30 min. Posteriormente, a água foi adicionada lentamente e deixada reagir por mais 60 min. Depois, gota a gota, foi adicionado hidróxido de amónio em excesso até se formar um gel límpido. Após 24 horas, foi colocado em uma estufa a 110 ° C por mais 24 horas, a fim de evaporar o maior excesso de solvente e água.

A obtenção do NF foi realizada durante o processo de síntese sol-gel NS, onde a funcionalização foi acompanhada desde a adição da água destilada até o final do tempo de reação de 60 min. Posteriormente, 1,1,3,3-tetrametildisiloxano foi lentamente incorporado e deixado reagir por 120 min para sua desidratação subsequente e modificação de superfície quando o ácido nítrico foi incorporado na reação. Em seguida, o hidróxido de amônio foi adicionado cuidadosamente gota a gota, deixando reagir por 24 h, ao final do tempo foi colocado na estufa a 110 ° C por 24 h.

2.2 Elaboração das amostras

Os corpos de prova foram confeccionados com cimento Portland comum (conhecido como CPO 40, de acordo com NMX-C-414-ONNCCE), o traço foi dimensionado de acordo com a norma ACI 211, utilizando uma relação água / cimento de 0,65, que é usual na indústria da construção, ver Tabela 1.

Tabela 1. Traço proposto (ACI 211, PCA).

w/c	Cimento kg/m^3	Brita kg/m^3	Areia kg/m^3	Água kg/m^3	Resistência à compressão MPa	Porosidade acessível à água (%)
0.65	330	756	918	215	32	11.25

Para os ensaios de resistência à compressão e porosidade acessível à água, foram produzidos corpos de prova cilíndricos com comprimentos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de comprimento. As amostras de concreto foram feitas de acordo com a ASTM C39 / C39M. Posteriormente, elas seguiram um período de cura padrão (conforme indicado na ASTM C-231) para serem ensaiadas posteriormente.

De acordo com a Portland Cement Association (conhecida como PCA), um dos requisitos mínimos de resistência à compressão recomendados para fornecer proteção ao elemento de concreto em diferentes ambientes de exposição é de 25 MPa, isto indica que a mistura atende à recomendação de proteção, enquanto a porosidade acessível à água é de 11,25%, indicando que o ingresso de Cl será alto.

O monitoramento da carbonatação foi realizado em prismas de concreto com dimensões de 10 cm x 10 cm x 30 cm. A cura foi realizada com jato d'água contínuo a 20 °C e 100% de umidade relativa, onde permaneceram por 28 dias.

2.3 Envelhecimento por exposição a CO_2

Ao final da cura dos corpos de prova, os mesmos foram expostos a um ambiente rico em CO_2 até a obtenção de profundidades de carbonatação que representam diferentes condições de envelhecimento, antes da aplicação do tratamento NS e NF. Para isso, três diferentes profundidades de carbonatação foram selecionadas como envelhecimento inicial. Levando em consideração que o cobrimento médio do RCS é de 20 mm, foram considerados 0%, 25% e 50% de carbonatação nas amostras. Em outras palavras, a primeira série é aquela que possui uma profundidade de carbonatação de 0 mm, a segunda série de 5 mm e a terceira série de 10 mm. As condições de exposição foram: uma atmosfera de 8% CO_2 no ar, 60% ± 10% UR, a 30 °C.

2.4 Aplicação de tratamentos com NS e NF

Foi preparada uma dispersão com uma dose de 0,1% de nanopartículas em relação ao volume de água. Foi utilizada agitação magnética a 60 °C por um período de 1 h, para facilitar a dispersão do NS, evitando a precipitação e o esmagamento. Para o uso do NF, apenas a agitação magnética foi necessária sem o uso da temperatura. Dois tratamentos de superfície foram aplicados a cada estágio de envelhecimento: a) dispersão com NS e b) dispersão com NF. Todos os tratamentos são referenciados com uma série de controle sem tratamento (como denominado aqui, REF). Antes da aplicação, todos os corpos de prova passaram por um preparo, que consistia na limpeza da superfície para retirada de poeira, graxa ou manchas. As dispersões foram preparadas para cada tratamento e, por meio de um atomizador, a solução foi pulverizada homogeneamente sobre toda a superfície do corpo de prova, deixando um descanso de 30 min para a aplicação de uma segunda camada. Ao final da aplicação, os corpos de prova foram mantidos por 14 dias em condições de

laboratório para promover a reação entre o NS e a matriz cimentícia (Fajardo et al., 2015; Cruz-Moreno, 2019). Após este tempo, todas as amostras foram reexpostas ao CO_2 - usando as condições descritas na seção 2.3 - para promover o avanço da carbonatação.

3. MÉTODOS

3.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em amostras cilíndricas de 100 x 200 mm, conforme indicado pela ASTM C 39, usando uma prensa hidráulica. O traço foi projetado de acordo com o padrão ACI 211 para uma resistência de 30 MPa.

3.2 Ângulo de contato (AC)

Com o objetivo de avaliar o efeito hidrofóbico que o NF confere às exposições de envelhecimento acelerado, foi determinada a hidrofobicidade gerada na superfície do concreto. Isso foi feito medindo o ângulo de contato em diferentes idades de envelhecimento seguindo a norma ASTM D 5725 em um analisador de forma de gota KRÜSS modelo DSA25 a 23 °C. A Tabela 2 mostra a classificação das superfícies de acordo com o ângulo θ obtido.

Tabela 2. Classificação das superfícies de acordo com os ângulos observáveis θ máximo e mínimo.

Hidrofílico	Hidrofóbico	Super hidrofóbico
$\boldsymbol{\theta_{min}^{max}} < 90\,°$	$\theta_{\min}^{\max} \frac{< 150°}{> 90°}$	$\theta_{min}^{max} < 150\,°$

As medições de cinco gotas de água para injeção (2µl) foram feitas por amostra e uma imagem foi imediatamente obtida. Em seguida, foi analisado com o auxílio do software ADVANCE V 1.9.2.3 e determinado o ângulo de contato entre o líquido e a superfície. Os mesmas amostras foram usadas para determinar o avanço da carbonatação após fazer as medições de fenolftaleína. A parte avaliada estava na superfície onde foram aplicados os tratamentos, e foi medida nas mesmas idades de reexposição, conforme pode ser visto na Figura 1.

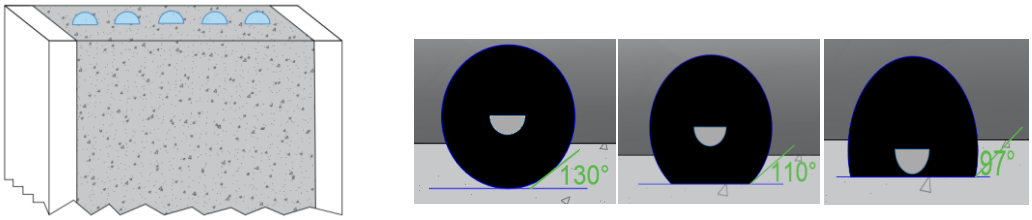

Figura 1. Interpretação da forma como as medições de CA foram realizadas nas amostras reexpostas

3.3 Medida da profundidade de carbonatação

Para a medição da profundidade de carbonatação, a fenolftaleína foi usada como um indicador convencional. A cor rosa que apresenta é um indicador de um concreto em bom estado, ou seja, ainda não apresenta problemas de carbonatação. A Figura 2 ilustra o avanço da carbonatação para a amostra de concreto com e sem tratamentos. Para as medidas, foi utilizado o programa Image J e uma régua graduada como escala de referência, sendo feitas 10 medidas por lado carbonático do corpo de prova, sendo 3 corpos de prova por tratamento.

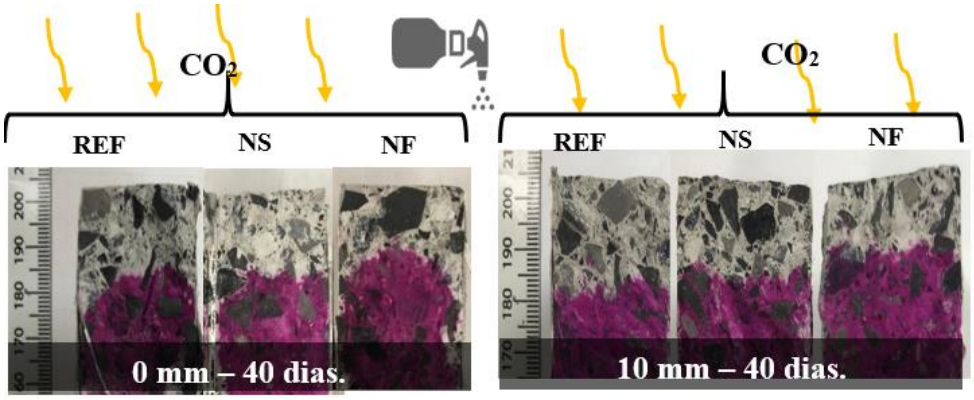

Figura 2. Avanço da carbonatação em amostras de 0 e 10 mm de carbonatação inicial aos 40 dias de reexposição, medida com fenolftaleína.

4. RESULTADOS

4.1 Ângulo de contato

Na Figura 3 são apresentados os resultados dos corpos de prova REF e NF, nos quais o ângulo de contato foi monitorado para conhecer o comportamento do desenvolvimento da hidrofobicidade na superfície do concreto. As medições foram feitas em corpos de prova sem envelhecimento prévio por mais de 1000 h após a aplicação do tratamento. Pode-se observar que a amostra REF teve um comportamento praticamente constante, com ângulo de contato médio de 26,9°. Por outro lado, as amostras com tratamento NF tiveram um comportamento uniforme a partir de 96 h após a aplicação, atingindo um ângulo máximo de 123,7°. De acordo com esses resultados, após 24 h a superfície mudou de hidrofílica para hidrofóbica; e por volta de 96 h, o NF tem uma CA estável no concreto.

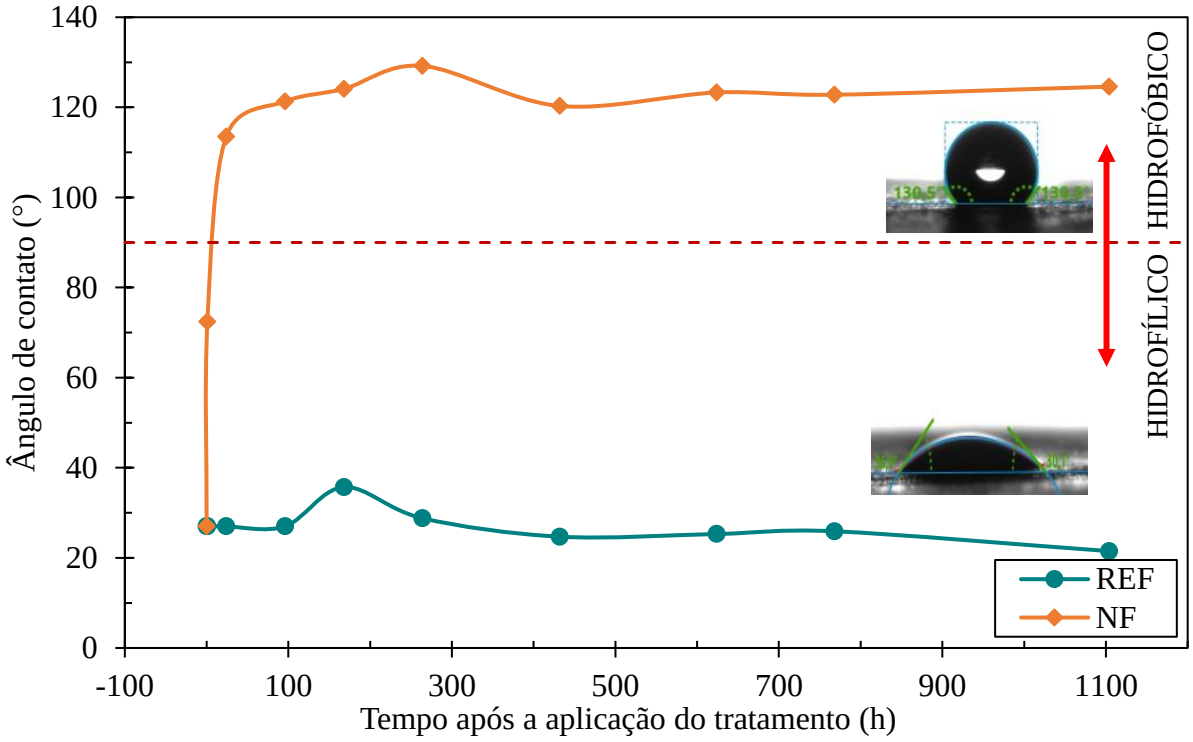

Figura 3. Comportamento do ângulo de contato em amostras com tratamentos NF horas após a aplicação.

Na Figura 4, é apresentado o acompanhamento da AC, nos corpos de prova tratados e com as idades iniciais pré-selecionadas, em diferentes idades de reexposição ao CO_2. As amostras NS tiveram comportamento semelhante ao de referência, o que era esperado, uma vez que este tratamento de nanopartículas à base de silício não proporcionou efeito hidrofóbico.

A AC nas amostras tratadas com NF é praticamente constante, indicando que a hidrofobicidade é mantida durante o tempo de exposição, independentemente do grau de envelhecimento inicial. Na Figura 4.A, a NF apresenta a maior CA em comparação com as outras séries, estando nas faixas entre 120-130°. Essa preservação do ângulo pode ser atribuída ao fato de que a modificação da superfície do concreto devido ao processo de carbonatação não afetou o comportamento dos radicais CH_3, principais responsáveis pela hidrofobicidade da superfície.

Nas Figuras 4.B e 4.C, são apresentados os resultados obtidos em corpos de prova com envelhecimento de 5 mm e carbonatação de 10 mm. Em ambos os casos, pode-se verificar que a CA permaneceu na faixa entre 115 e 120°, mas sem mostrar uma tendência nítida. Com base no exposto, pode-se concluir que o envelhecimento causado pela exposição a um ambiente de CO_2 não afeta o comportamento do ângulo de contato e, portanto, o desenvolvimento da hidrofobicidade.

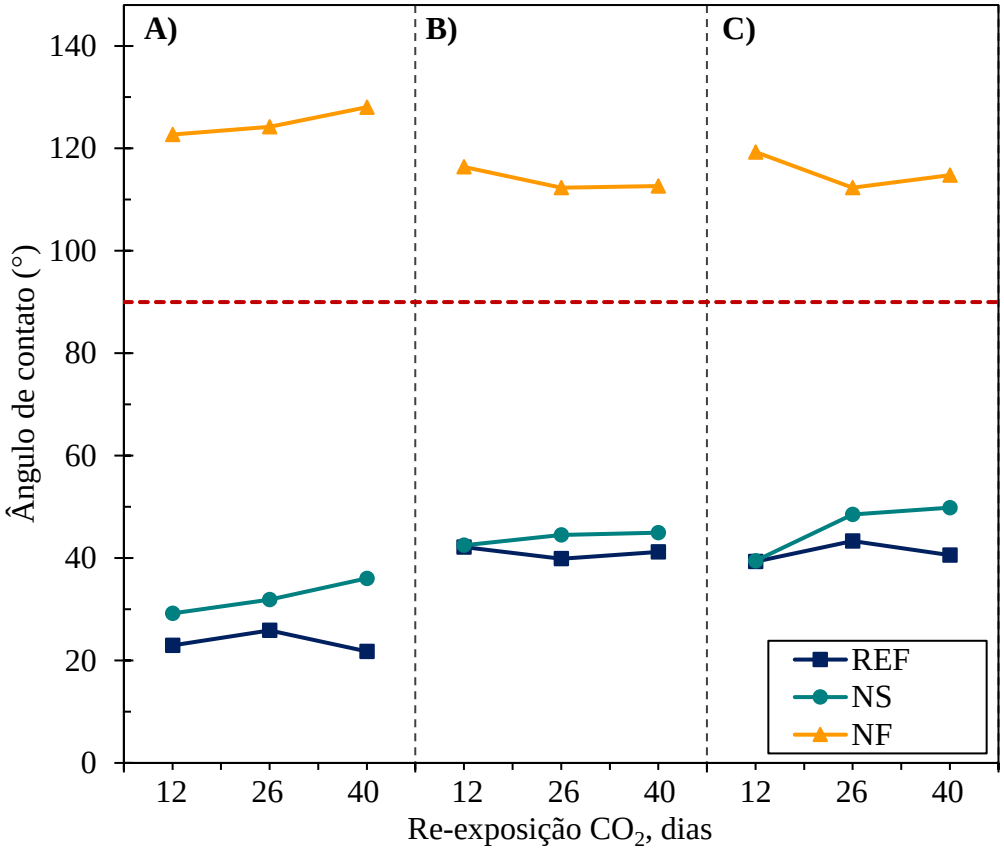

Figura 4. Variação do ângulo de contato dos corpos de prova com um envelhecimento inicial de A) 0 mm, B) 5 mm e C) 10 mm de carbonatação, após a reexposição à carbonatação

4.2 Produndidade de carbonatação

Na Figura 5, são apresentados os resultados do progresso da carbonatação dos tratamentos de superfície NS e NF, incluindo a série sem tratamento (REF). Pode-se apreciar como a série não tratada tende a ter uma maior profundidade de carbonatação em relação às amostras tratadas, independente do grau de envelhecimento.

Especificamente, na Figura 5.A, no final do período de ensaio, uma diminuição de 36% na profundidade de carbonatação é observada nas amostras tratadas com NS, em comparação com as amostras REF. Já o tratamento com NF obteve redução de 22%. Isso é atribuído à formação de compostos hidratados como resultado da reação das nanopartículas com $Ca(OH)_2$, obtendo-se uma quantidade maior de géis que leva à redução da permeabilidade. Esses resultados estão de acordo com a literatura, onde o uso de SN gera um efeito de barreira que melhora a resistência dos agentes agressores [4] [6]. O tratamento com NF produz um efeito hidrofóbico na superfície do concreto, o que lhe confere a capacidade de ceder a passagem de gases como o CO_2 interior, mas impedindo a entrada de água através da repulsão de moléculas de OH, por exemplo, que são necessário para gerar as reações do processo de carbonatação.

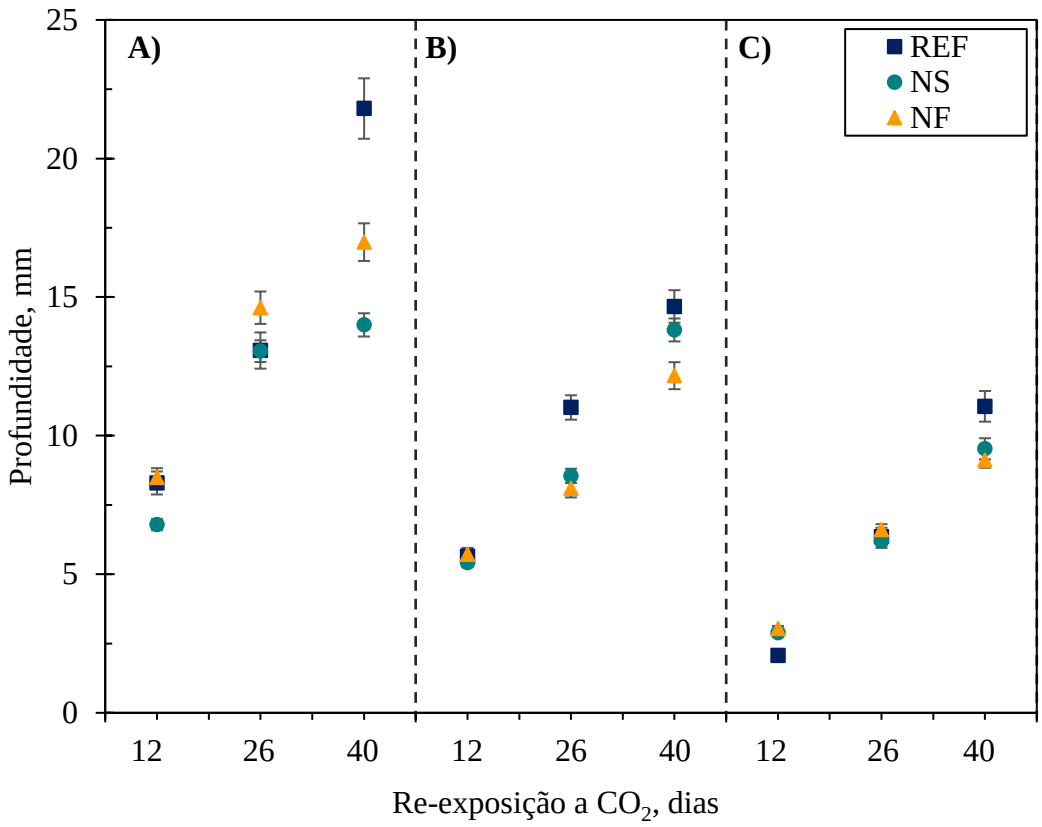

Figura 5. Profundidade de carbonatação em amostras com A) 0 mm B) 5 mm e C) carbonatação de 10 mm antes da aplicação do tratamento.

Na Tabela 1, são apresentados os valores da redução do avanço da carbonatação dos corpos de prova com os diferentes tratamentos, obtidos ao final do período de reexposição. O percentual de redução (% Vermelho) foi obtido através da equação (2) estabelecida por Fajardo et al. (Fajardo et al., 2015).

$$\%\mathrm{Red} = (1 - (X_{TRAT}/X_{REF})) * 100\ldots \qquad (2)$$

Onde:
%Red= redução na profundidade de carbonatação (vs. REF)
X_{TRAT}= profundidade de carbonatação das amostras tratadas (mm)
X_{REF}= profundidade de carbonatação das amostras não tratadas (mm)

Tabela 3. Porcentagem de redução da carbonatação vs REF de espécimes tratados com NS e NF; exposto a um ambiente agressivo com 8% de CO_2 em 40 dias.

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

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 3, todos os tratamentos utilizados apresentaram maior percentual de redução no concreto com envelhecimento inicial de 0 mm, em comparação com as séries de envelhecimento de 5 e 10 mm. Pode-se observar claramente que o grau de envelhecimento afetou o desempenho dos tratamentos. Esses resultados são semelhantes aos encontrados na literatura, com a diferença de que a aplicação dos tratamentos de superfície foi realizada em idades precoces, mesmo nos primeiros dias após a fabricação. Por exemplo, Franzoni (Franzoni, Pigino e Pistolesi, 2013) descobriu que o uso de nano sílica tem um efeito de redução da penetração da carbonatação de cerca de 14-47%. Por sua vez, Ibrahim (Ibrahim et al., 1999) constataram que os tratamentos de superfície à base de silanos / siloxanos apresentaram uma redução de cerca de 20% na penetração da carbonatação.
Os resultados aqui obtidos permitem concluir que o grau de envelhecimento do concreto reduz o desempenho dos tratamentos frente à reexposição ao CO_2. Desse modo, percebe-se a importância de se realizar uma avaliação e diagnóstico da estrutura para poder fazer a seleção do tratamento. Para estruturas submetidas a ambientes urbanos industriais ou industriais, o tratamento com nanopartículas de NS e NF pode ser uma opção viável quando aplicado em idades precoces.

5. CONCLUSÕES

- O tratamento com NF alcançou maior hidrofobicidade e estabilidade após 96 horas de aplicação.
- Em corpos de prova sem envelhecimento (ou seja, 0 mm de carbonatação), a perda de CA pode ser atribuída a uma possível modificação que gera carbonatação entre os radicais CH_3, conseguindo perder a hidrofobicidade. O efeito do envelhecimento inicial de 5 e 10 mm não afetou a hidrofobicidade na superfície pelo uso do tratamento NF.
- Quanto ao envelhecimento acelerado com CO_2, observa-se que o tratamento com NS não apresentou os resultados esperados, uma vez que os NS possuem o limite de $Ca(OH)_2$ que é consumido no processo de carbonatação.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CONACYT pelo apoio financeiro aos projetos CB-2016/285453 e F0003-301307. L. Vaca-Arciga gostaria de agradecer ao CONACYT pela bolsa de Pós-Graduação concedida (889469) para a realização de seus estudos. Agradecimento especial ao Laboratório de Pesquisa e Inovação em Materiais de Construção, Departamento de Ecomateriais e Energia e ao Departamento de Tecnologia do Concreto pelo apoio prestado no desenvolvimento do presente estudo.

7. REFERÊNCIAS

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-Lópeza, 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/fi.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)

Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M. and Pouladkhan, A. R. (2012), "*Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO_2 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.