

Tratamento superficial com nanopartículas à base de silício induzidas durante a cura: efeito sobre a durabilidade dos materiais de base cimento Portland

D. Cruz-Moreno¹, G. Fajardo^{1*}, I. Flores-Vivián¹, A. Cruz-López¹, P. Valdez¹

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

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.239>

Recepción: 02/08/2017 | Aceptación: 18/09/2017 | Publicación: 29/09/2017

RESUMO

O efeito da introdução de nanopartículas à base de silício (NBS) preparado por sol-gel sobre a permeabilidade dos materiais de base de cimento Portland foi estudado. A introdução de NBS em argamassas feitas com uma relação a / c de 0,65 foi induzida durante a cura por 72 h, usando [NBS] = 0,1% vs. o volume de água. Posteriormente, as amostras seguiram um período de imersão na água potável para promover a reação do NBS com a matriz de cimento e a resistividade foi medida com frequência. Posteriormente, foram expostos em ambientes com Cl ou CO₂. Os resultados indicaram uma diminuição na penetração destes agressivos e um aumento da resistividade nos espécimes tratados; aumentando assim a vida útil.

Palavras-chave: durabilidade; tratamento de superfície; nanopartículas; curado; permeabilidade.

Citar como: D. Cruz-Moreno, G. Fajardo, I. Flores-Vivián, A. Cruz-López, P. Valdez (Año de Publicación), “Tratamento superficial com nanopartículas à base de silício induzidas durante a cura: efeito sobre a durabilidade dos materiais de base cimento Portland”, Revista ALCONPAT, 7 (3), pp. 274-284, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.239>

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, México.

Informações legais

ALCONPAT Magazine 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

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização desta questão, ALCONPAT IT Unit, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada na segunda edição do ano de 2018, desde que a informação seja recebida antes do encerramento do primeiro ano de 2018.

Surface treatment with silicon-based nanoparticles induced during curing: Effect on durability of portland cement based materials.

ABSTRACT

The effect of the introduction of silicon-based nanoparticles (NBS) prepared by the sol-gel method was studied. The introduction of NBS was induced for 72 hours during curing by using mortar specimens with a w/c ratio of 0.65 and a suspension prepared at [NBS] = 0.1% with respect to the volume of the curing water. Subsequently, the samples followed a period of immersion in potable water to promote the reaction of NBS inside mortar. Frequent measurements of electrical resistivity were made. Subsequently, a series of specimens were exposed in environments rich in Cl⁻ or CO₂. The results indicated a decrease in the penetration of aggressive agents into the mortar specimens. This coincides with increasing resistivity specimens treated with respect to the reference.

Keywords: durability; surface treatment; nanoparticles; curing; permeability.

Tratamento superficial com nanopartículas à base de silício induzidas durante a cura: efeito sobre a durabilidade dos materiais de base cimento Portland

RESUMEN

El efecto de la introducción de nanopartículas base silicio (NBS) preparadas por sol-gel en la permeabilidad de materiales base cemento portland fue estudiado. La introducción de NBS en morteros fabricados con una relación a/c de 0.65 fue inducida durante el curado por 72h, utilizando suspensión de [NBS]=0.1% vs. el volumen del agua. Posteriormente, las muestras siguieron un periodo de inmersión en agua potable con el fin de promover la reacción de la NBS con la matriz cementante y la resistividad fue medida frecuentemente. Después, fueron expuestos en ambientes con Cl⁻ o CO₂. Los resultados indicaron una disminución en la penetración de estos agresivos y un incremento de la resistividad en los especímenes tratados; por ende un incremento de la vida útil.

Palabras clave: durabilidad; tratamiento superficial; nanopartículas; curado; permeabilidad.

1. INTRODUÇÃO

Os problemas de durabilidade nas estruturas de concreto armado (ECR) começam com a interação do meio com a superfície de materiais à base de cimento Portland (Cai et al., 2016; Hou et al., 2015; Hou et al., 2016). A curto ou médio prazo, esta interação causa a deterioração da ECR, gerando, além disso, despesas anuais entre 18 e 21 bilhões de USD em reabilitações ou reparos devido à corrosão da armadura (Barnat-Hunek et al., 2016; Khaloo et al., 2016). Mais de 50% dessas ECRs apresentam problemas de deterioração devido à alta permeabilidade ou baixa qualidade do concreto (Fajardo, et al., 2015; Rtimi et al., 2016), o que favorece o mecanismo de transporte de agentes agressivos, como dióxido de carbono (CO₂), ion cloreto (Cl⁻) e sulfatos (SO₄⁻²), sendo a principal causa de deterioração na ECR (Achal et al., 2015, Trapote-Barreira et al., 2014).

No entanto, ressalta-se de que propriedades importantes, tais como resistência, permeabilidade e durabilidade, estão diretamente ligadas à porosidade em concreto (Fajardo et al., 2015; Hou et al., 2015; Hou et al., 2016; Kupwade-patil et al., 2016). Ainda, a porosidade é condicionada pelo tipo e quantidade de cimento utilizado, o nível de compactação, transporte, tempo e tipo de cura,

sendo este último um dos principais estágios do sistema de construção da ECR, porque é de grande ajuda e contribui para a obtenção de muitas de suas propriedades (Fajardo et al., 2015; Zahedi et al., 2015).

A cura é o mecanismo utilizado para promover a hidratação do cimento; controlando a temperatura e o movimento da umidade da superfície ao interior do concreto. A cura ocorre num período em que as ECR geralmente perdem umidade devido à evaporação, exsudação ou hidratação. Durante este período, há uma demanda por água para continuar com a hidratação. O gradiente de umidade gerado promove o movimento da água para o interior, juntamente com a absorção que origina a porosidade da matriz de concreto. Esta técnica não é nova, mas permite a hidratação de tal forma que maximiza as propriedades potenciais que podem ser desenvolvidas em uma matriz de cimento portland (Kong et al., 2016; Kupwade-Patil et al., 2016; Wyrzykowski et al., 2016).

No entanto, um processo de cura inadequado (ou sua ausência) do concreto pode resultar em alta porosidade, especialmente na superfície externa do concreto. Hoje em dia, existe uma grande variedade de produtos que garantem oferecer uma série de benefícios à superfície do concreto; do aumento das propriedades mecânicas à redução da permeabilidade. Ainda, esses produtos adicionados durante ou após o processo de cura, não estão alcançando os benefícios oferecidos ou as necessidades do setor de construção. De fato, foram encontrados problemas associados a uma aplicação inadequada, degradação causada por exposição constante a raios UV, incompatibilidade química e, portanto, perda de adesão entre ele e o substrato (Lakshmi et al., 2012; Zhu et al., 2016, Zhu et al., 2013).

Consequentemente, uma grande variedade de pesquisas foi realizada nas últimas décadas, principalmente devido ao impacto econômico causado pelo problema da durabilidade, onde uma variedade de métodos foi proposta para melhorar a ECR e que estes são mais duráveis. No entanto, a estratégia mais comum adotada é atrasar o processo de degradação de concreto armado, diminuindo a porosidade, reduzindo a relação água/cimento ou a adição de nanopartículas (Efome et al., 2015; Franzoni et al., 2014 Jia et al., 2016; Pacheco-Torgal et al., 2009; Pigino et al., 2012; Pour-Ali et al., 2015). Em estudos anteriores, as nanopartículas foram introduzidas por migração em argamassas endurecidas e o bloqueio dos poros foi verificado, causando uma diminuição da permeabilidade (Fajardo et al., 2015, Sánchez et al., 2014).

Outros métodos foram desenvolvidos a partir da introdução de nanopartículas para o interior de materiais à base de cimento Portland aplicados em idade precoce (Hou et al 2015, Jalal et al., 2012). Essas técnicas provaram os efeitos benéficos da interação das nanopartículas com certas fases da matriz dos materiais de cimentação. No entanto, eles apresentam desvantagens principalmente associadas à complexidade da aplicação em obras ou elementos reais. Portanto, no presente trabalho é estudada a influência dos movimentos de umidade a partir da cura com água em materiais baseados em cimento Portland, convertendo-o em um meio adequado para a indução de nanopartículas com o objetivo de melhorar as propriedades que aumentam a durabilidade.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Para este estudo, utilizou-se o Cimento Portland comum (CPO 40), com uma composição química semelhante ao Cimento Tipo I e que cumprem os requisitos da NMX-C-414-ONNCCE e ASTM C150, respectivamente. A areia padrão (sílica de Ottawa) que obedece a ASTM C 778 foi utilizada como agregado. No caso da água para mistura, utilizou-se água deionizada para a preparação das amostras de argamassa, em conformidade com a norma NMX-C. 122-ONNCCE e, assim, evitar a intrusão de íons Cl^- na mistura.

2.2 Fabricação das amostras

Foram projetadas amostras cilíndricas de argamassa com um diâmetro de 50 mm e 150 mm de comprimento. As amostras foram fabricados com uma relação água/cimento de 0,65 como indicado na Tabela 1, para manter uma porosidade característica de um concreto convencional. A mistura das argamassas foi realizada de acordo com o procedimento descrito na ASTM C 305 e ASTM C 109. Depois de serem moldadas, as amostras foram mantidas a 20°C por 24h, conforme estabelecido na norma ASTM C171.

Tabela 1. Traço para uma relação a/c=0.65 (método PCA).

Material	kg/m ³
Cimento	300
Areia	1850
Água	195

2.3 Produção das nanopartículas base silício (NBS)

Para a obtenção de NBS amorfas e de tamanhos variando de 8 a 50 nm, seguiu-se a via sol-gel a 70°C utilizando o procedimento descrito num trabalho anterior (Fajardo et al., 2015).

2.4 Preparação das amostras e aplicação da cura.

As amostras foram desmoldadas uma vez que foram completadas 24 horas após sua moldagem. Posteriormente, foram feitos cortes transversais nas extremidades (25 mm) de cada amostra, para evitar os efeitos de borda produzidos durante a preparação e colagem. Em seguida, as seções transversais foram feitas para obter amostras de 50 mm de comprimento, conforme indicado na Figura 1.

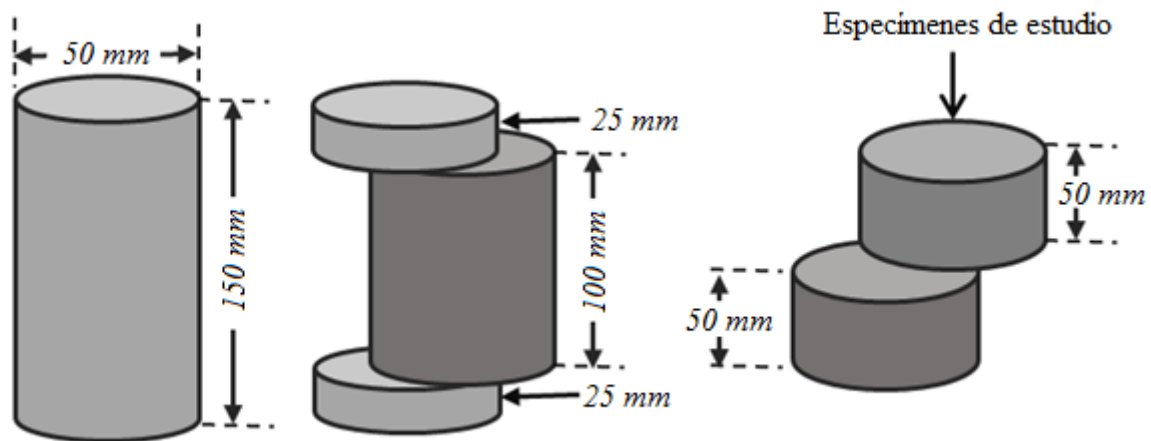


Figura 1. Obtenção das seções transversais da amostra de argamassa para a aplicação do tratamento com NBS.

A aplicação da solução com NBS foi realizada durante o processo de cura. Para isso, preparou-se uma solução utilizando 0,1% de NBS em relação ao volume de água utilizado na cura. A aplicação da solução foi realizada gerando superficialmente uma película de água com uma profundidade de 20 mm (ver figura 2), que foi mantida por 3 dias. Também se utilizaram amostras de referência (CNT), onde apenas a água potável foi utilizada para curar.

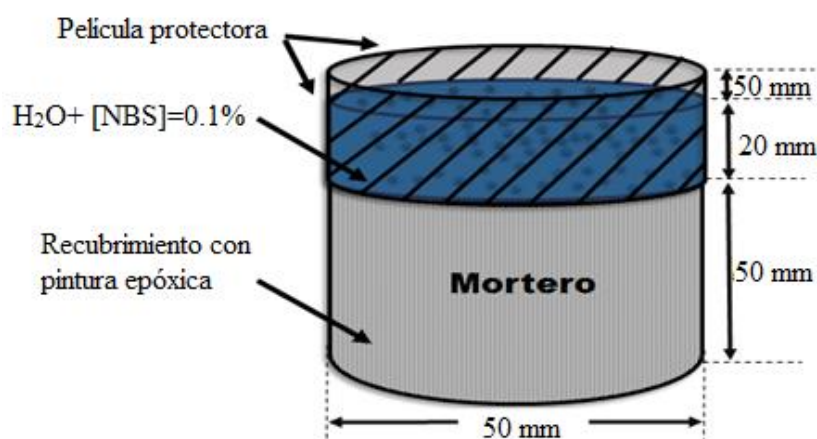


Figura 2. Aplicação do tratamento com solução aquosa de NBS durante o processo de cura externo.

2.5 Caracterização das amostras CNT e tratadas com NBS

Após a aplicação do tratamento com NBS, as amostras utilizadas para determinar a resistividade elétrica foram divididas em 3 zonas de 16 mm cada (ver Figura 3). A Zona 1 (Z1) é a mais próxima da superfície onde a cura de NBS foi aplicada, Zona 2 (Z2) intermediária ao tratamento, enquanto a zona 3 (Z3) é a área mais distante da superfície do tratamento. As seções obtidas foram colocadas em imersão em água para gerar um estado de saturação. Posteriormente, as amostras foram monitoradas constantemente por 112 dias para determinar o efeito gerado pelo NBS.

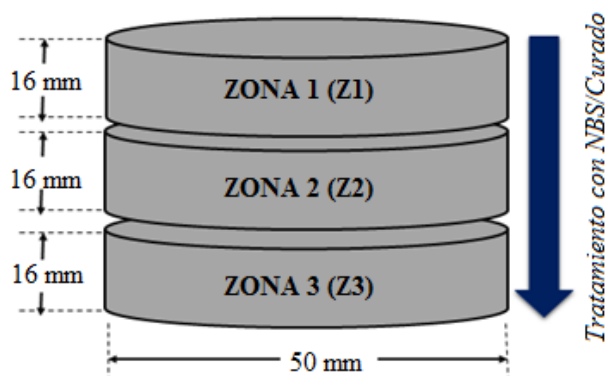


Fig. 3. Obtenção das seções das amostras de argamassa para avaliação de resistividade.

Os testes de fisiorção de N_2 e resistividade elétrica foram determinados nas amostras CNT e tratadas com NBS como indicado em procedimentos já relatados em trabalhos anteriores (Fajardo et al., 2015).

2.6 Exposição a meios agressivos

Uma vez que as medidas de resistividade elétrica mostraram uma mudança na microestrutura das amostras de argamassa (um aumento na resistividade elétrica), estas foram removidas da imersão para seguir uma exposição a um ambiente rico em CO_2 ou Cl^- para determinar o efeito do NBS em dois meios agressivos diferentes.

Para o caso de exposição ao CO_2 , foram colhidas 3 amostras das argamassas CNT e tratadas com NBS, revestidas na periferia com tinta epóxi (Epoxaclyl E-6000) e selante Alkafin (selante

acrílico da marca Comex®) com o objetivo de promover um avanço transversal da carbonatação. Posteriormente, as amostras foram colocadas em uma câmara ambiental a 30°C com uma umidade relativa de $60 \pm 5\%$ e uma concentração de 10% de CO₂ durante 14 dias. No final, a profundidade de carbonatação foi determinada utilizando o procedimento descrito em um trabalho anterior usando fenolftaleína como indicador (Fajardo et al., 2015).

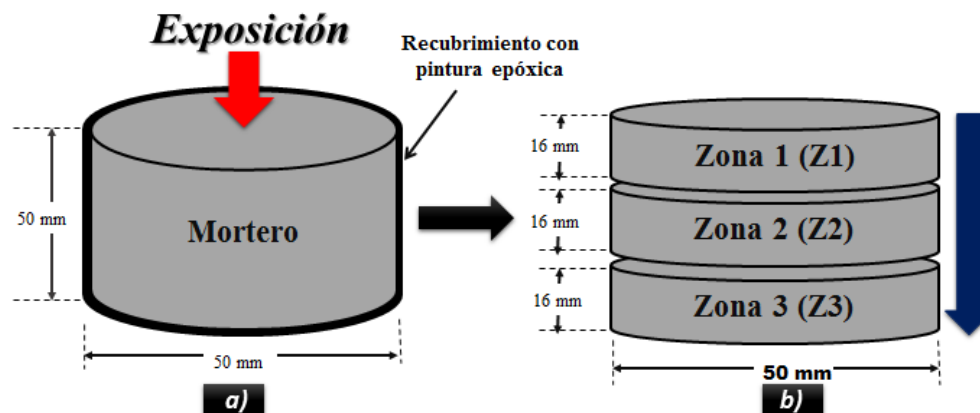


Figura 4. a) Amostra exposta em ambientes agressivos e b) Seções obtidas para determinar cloretos.

Outra série de amostras foi colocada em imersão durante um período de 56 dias numa solução de 165 ± 1 g / L de NaCl como indicado pela ASTM C 1556. Para determinar a concentração de cloretos, obteve-se 10 g de pó de cada seção para fabricação de pastilhas e determinar o teor de cloretos (total versus % em peso de cimento) em um equipamento de fluorescência de raios X - Epsilon 3X. Vale ressaltar que, para este ensaio, as seções de 50 mm foram divididas em 3 zonas chamadas Z1, Z2 e Z3 com aproximadamente 16 mm de espessura (ver figura 4b).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 5 são apresentados os resultados obtidos da resistividade elétrica nas amostras de argamassa correspondentes às diferentes zonas da amostra CNT e tratados com NBS. Também está incluído o limite de resistividade elétrica (ERU) estabelecido com uma linha pontilhada horizontal a 10 kΩ.cm. Esse valor é frequentemente usado como um parâmetro efetivo para avaliar o risco de corrosão do aço incorporado em concreto, particularmente quando a corrosão é induzida por agentes agressivos no meio de exposição (Polder, 2001, Koleva et al., 2008). Uma matriz de concreto que consegue superar esse limite passa de um alto risco a um risco baixo ou moderado de corrosão da armadura. Vale ressaltar que o tempo expresso na figura representa o tempo de imersão que vai de 1 a 112 dias após ter sido submetido à cura com NBS por 72 h. Em geral, observou-se um comportamento ascendente durante os primeiros 56 dias, atingindo um aumento de resistividade que varia entre 34 - 36 kΩ.cm nas amostras tratadas com NBS, enquanto a amostra CNT permaneceu em torno de 5,0 kΩ.cm. Da mesma forma, podemos observar que, após 28 dias, a resistividade das amostras tratadas com NBS aumentou até 7 vezes em relação à amostra CNT para o caso das zonas 1 e 2. Esse aumento foi maior do que o obtido em um trabalho anterior em que apenas 3,5 vezes foi alcançado utilizando um sistema de introdução mais complexo (Fajardo et al., 2015).

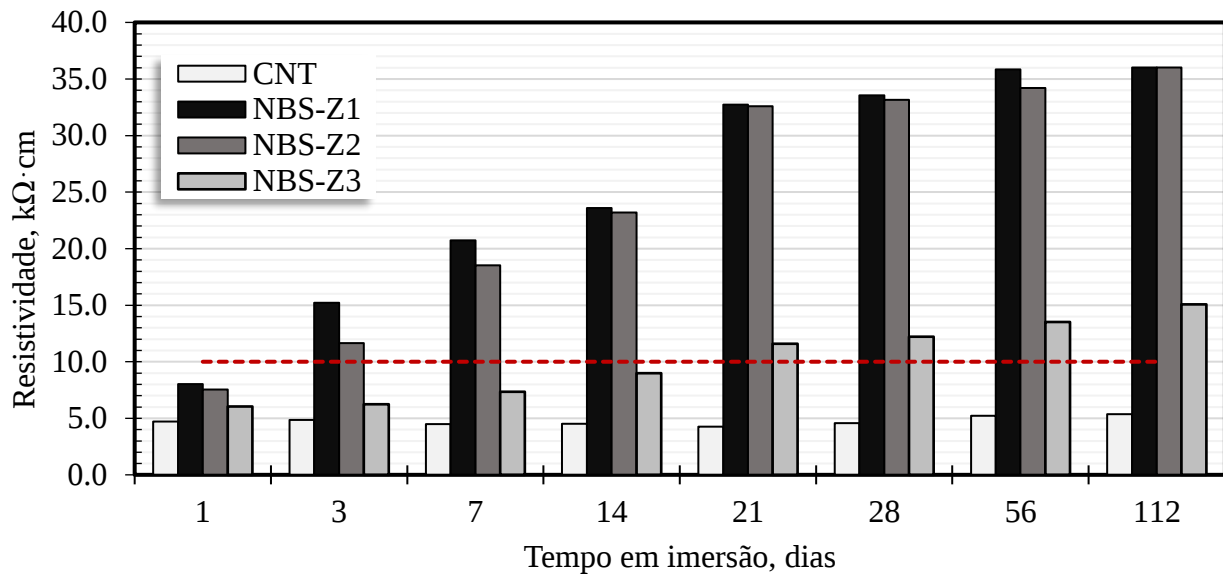


Figura 5. Evolução da resistividade elétrica das amostras CNT e tratadas com NBS durante o tempo de imersão.

Da mesma forma, observa-se um aumento na resistividade elétrica em amostras tratadas com NBS a partir do dia 3 colocando-as acima do URE, sendo mais visível para as amostras Z1 e Z2 com uma resistividade que varia entre 12-15 kΩ.cm, o que infere um aumento na durabilidade a partir da diminuição da permeabilidade. É importante mencionar que, durante esta etapa, o material cimentício ainda apresenta reações de hidratação, pelo que se inferiu que a indução de NBS durante a cura poderia ser mais eficaz do que outras técnicas relativamente mais complexas com base em aplicações de campos elétricos ou sistemas de vácuo em concretos endurecidos (Fajardo et al., 2015; Kawashima et al., 2013; Kupwade-patil et al., 2016; Sánchez et al., 2014; Zhu et al., 2016).

Embora os mecanismos não estejam completamente definidos, alguns autores deduzem mecanismos gerados pela rápida interação do NBS com a matriz cimentícia, gerando precipitação e subsequente floculação do NBS após contato com a solução de poro. Portanto, a NBS aglomera e obstrui as interconexões dos poros ao interagir com Ca(OH)_2 , gerando reações de hidratação secundárias e reduzindo a permeabilidade do ECR (Cárdenas et al., 2008; Fajardo et al., 2015).

Na figura 6 estão apresentados os resultados do diâmetro e área de poros obtidos pela técnica Fysisorption de N_2 nas amostras CNT e tratados com NBS correspondentes à zona 1, a partir dos 14 dias após a cura ou o tratamento com NBS.

É observada uma porosidade na faixa de 25-450 Å (2,5 a 45 nm), com comportamento bimodal; destacando a zona mesoporosa (<10 nm). As amostras tratadas com NBS conseguiram diminuir a permeabilidade, bloqueando o maior número de pequenos poros capilares, expondo a porosidade > 90 Å (9 nm). Fechando a entrada principalmente para os poros interconectados e poros de gel. Isto, devido à interação do NBS durante as reações de hidratação, diminuindo consequentemente a adsorção de N_2 em até 90% na amostra tratada com NBS em relação à amostra do CNT (Cai et al., 2016; Zhang et al., 2011).

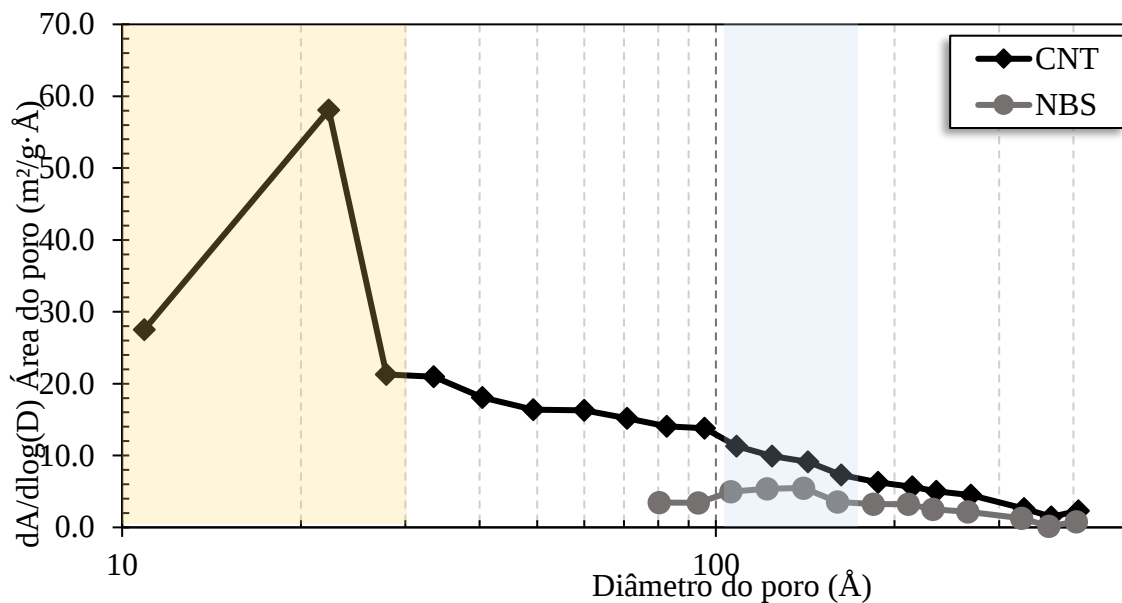


Figura 6. Distribuição do tamanho do poro nas amostras CNT e Tratadas com NBS obtidas a 14 dias de imersão.

A Figura 7 mostra as isotermas de adsorção de nitrogênio nas amostras de CNT e tratadas com NBS, onde é observada a presença de isotermas do tipo IV (de acordo com a IUPAC), referente às características dos materiais mesoporosos e macroporosos do tipo de gargalo de garrafa ou irregular.

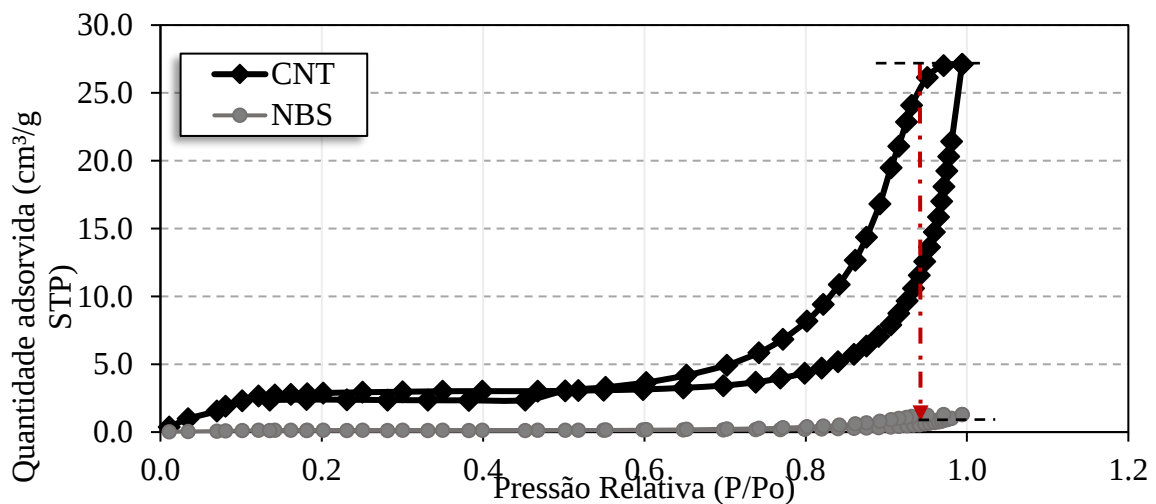


Figura 7. Isotermas de adsorção em amostras CNT e Tratadas com NBS obtidas a 14 dias de imersão.

Em geral, uma redução no volume de adsorção de nitrogênio é observada em torno de 90% nas amostras tratadas com NBS durante os primeiros 14 dias de imersão em relação à amostra CNT, indicando uma redução nos diâmetros dos poros e, portanto, a redução de permeabilidade. Portanto, é confirmado que, nas condições experimentais usadas aqui, o uso de NBS em solução aquosa durante a cura promove a entrada de NBS, conseguindo reduzir os poros capilares pequenos, concordante com os resultados obtidos por Hou, sendo responsável pela permeabilidade em materiais à base de cimento Portland (Cai et al., 2016; Hou et al., 2013; Hou et al., 2015).

A Figura 8 mostra os resultados obtidos nas amostras de argamassa que foram expostas a um ambiente rico em CO_2 para avaliar seu efeito.

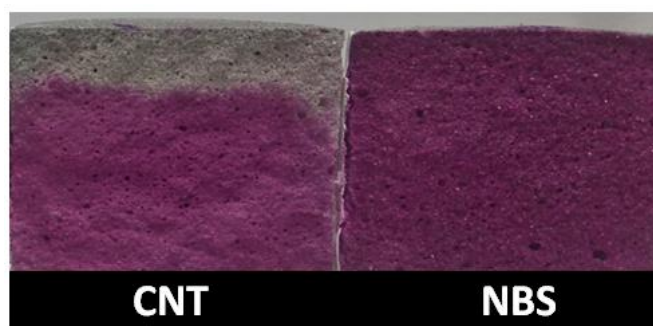


Figura 8. Observa-se o avanço da frente de carbonatação nas amostras CNT e tratada com NBS.

Observa-se uma clara diminuição da profundidade de carbonatação nas amostras de argamassa tratadas com NBS em relação à amostra da CNT. Portanto, é possível concluir que o efeito gerado nas argamassas é devido a uma diminuição da permeabilidade devido ao bloqueio dos poros do estrangulamento. O bloqueio provoca uma diminuição da intercondutividade e, portanto, um aumento na resistividade elétrica da matriz de cimento.

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos nas amostras de argamassa expostas a um ambiente rico em Cl^- .

Tabela 2. Concentração de cloretos nas amostras CNT e tratada com NBS.

Zonas	Total Cl^- (% por peso de cimento)	
	CNT	NBS
1	17.23	0.09
2	12.85	0.06
3	10.72	0.07

Os resultados confirmam uma diminuição na concentração de cloretos, o que evidencia uma diminuição na difusão de íons Cl^- através da matriz cimentícia nas amostras tratadas com NBS e consequente redução do transporte de agentes agressivos através das argamassas. Portanto, a diminuição da concentração de cloreto mostra uma diminuição da permeabilidade, o que concorda com os resultados apresentados anteriormente. Definitivamente, o aumento da vida útil da ECR recentemente concretada poderia ser obtido aplicando um tratamento como o descrito aqui. O processo de cura usando NBS pode ser considerado uma nova opção para aumentar a durabilidade durante o processo de construção, sendo este um dos principais problemas de perda de durabilidade.

4. CONCLUSÕES

A aplicação de NBS induzida durante a cura externa através de uma solução, de acordo com as condições experimentais usadas aqui, nos permite concluir que:

- O transporte de umidade durante o processo de cura favorece a entrada do NBS na matriz cimentícia.
- A resistividade da argamassa tratada com NBS aumentou até 7 vezes em relação à amostra CNT dos seus primeiros 21 dias de imersão em água.

▪ A diminuição da adsorção de N_2 foi atribuída à redução da interconexão da porosidade e consequentemente à redução da permeabilidade, evitando a introdução de íons Cl e CO_2 . Verifica-se que a aplicação do NBS durante o processo de cura pode ser promissor no aumento da durabilidade na ECR.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão ao PAICYT-UANL IT435-15. Dulce Cruz-Moreno agradece ao CONACYT pela bolsa de estudos nº 414932 concedida para a sua formação de doutorado.

6. REFERÊNCIAS

- Achal, V., Mukherjee, A. (2015), *A review of microbial precipitation for sustainable construction*. Construction and Building Materials, 93, 1224–1235.
- Barnat-Hunek, D., Smarzewski, P., Suchorab, Z. (2016), *Effect of hydrophobisation on durability related properties of ceramic brick*. Construction and Building Materials, 111, 275–285.
- Cai, Y., Hou, P., Duan, C., Zhang, R., Zhou, Z., Cheng, X., Shah, S. (2016), *The use of tetraethyl orthosilicate silane (TEOS) for surface-treatment of hardened cement-based materials: A comparison study with normal treatment agents*. Construction and Building Materials, 117, 144–151.
- Cárdenas H., Struble, L. (2008), “*Modeling electrokinetic nanoparticle penetration for permeability reduction of hardened cement paste*”. ASCE J Mater Civ Eng ; 20(11):683–691.
- Du, H., Du, S., Liu, X. (2015), *Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete*. Construction and Building Materials, 82, 114–122.
- Efome, J. E., Baghbanzadeh, M., Rana, D., Matsuura, T., Lan, C. Q. (2015), *Effects of superhydrophobic SiO_2 nanoparticles on the performance of PVDF flat sheet membranes for vacuum membrane distillation*. Desalination, 373, 47–57.
- 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*. Construction and Building Materials, 76, 158–167.
- Franzoni, E., Varum, H., Natali, M. E., Bignozzi, M. C., Melo, J., Rocha, L., Pereira, E. (2014), *Improvement of historic reinforced concrete/mortars by impregnation and electrochemical methods*. Cement and Concrete Composites, 49, 50–58.
- Hou, P., Cheng, X., Qian, J., Zhang, R., Cao, W., Shah, S. P. (2015), *Characteristics of surface-treatment of nano- SiO_2 on the transport properties of hardened cement pastes with different water-to-cement ratios*. Cement and Concrete Composites, 55, 26–33.
- Hou, P., Kawashima, S., Kong, D., Corr, D. J., Qian, J., Shah, S. P. (2013), *Modification effects of colloidal nano- SiO_2 on cement hydration and its gel property*. Composites Part B: Engineering, 45(1), 440–448.
- Hou, P., Zhang, R., Cai, Y., Cheng, X., Shah, S. P. (2016), *In situ $Ca(OH)_2$ consumption of TEOS on the surface of hardened cement-based materials and its improving effects on the Ca-leaching and sulfate-attack resistivity*. Construction and Building Materials, 113, 890–896.
- Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M., 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, 34, 389–400.
- Ji, T. (2005), *Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano- SiO_2* . Cement and Concrete Research, 35(10), 1943–1947.
- Jia, L., Shi, C., Pan, X., Zhang, J., Wu, L. (2016), *Effects of inorganic surface treatment on water permeability of cement-based materials*. Cement and Concrete Composites, 67, 85–92.

- Kawashima, S., Hou, P., Corr, D. J., Shah, S. P. (2013), *Modification of cement-based materials with nanoparticles*. Cement and Concrete Composites, 36(1), 8–15.
- Khaloo, A., Mobini, M. H., Hosseini, P. (2016), *Influence of different types of nano-SiO₂ particles on properties of high-performance concrete*. Construction and Building Materials, 113, 188–201.
- Koleva, D. A., Copuroglu O., Breugel K., van Ye G., de Wit J. H. W. (2008), *Electrical resistivity and microstructural properties of concrete materials in conditions of current flow*. Cement Concr Compos 30:731–44.
- Kong, Y., Wang, P., Liu, S., Gao, Z. (2016), *Hydration and microstructure of cement-based materials under microwave curing*. Construction and Building Materials, 114, 831–838.
- Kupwade-patil, K., Al-aibani, A. F., Abdulsalam, M. F., Mao, C., Bumajdad, A., Palkovic, S. D., & Büyükoztürk, O. (2016), *Microstructure of cement paste with natural pozzolanic volcanic ash and Portland cement at different stages of curing*. Construction & Building Materials, 113, 423–441.
- Lakshmi, R. V., Bharathidasan, T., Bera, P., Basu, B. J. (2012), *Fabrication of superhydrophobic and oleophobic sol-gel nanocomposite coating*. Surface and Coatings Technology, 206(19–20), 3888–3894.
- Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. (2009), *Sulphuric acid resistance of plain, polymer modified, and fly ash cement concretes*. Construction and Building Materials, 23(12), 3485–3491.
- Pigino, B., Leemann, A., Franzoni, E., Lura, P. (2012), *Ethyl silicate for surface treatment of concrete - Part II: Characteristics and performance*. Cement and Concrete Composites, 34(3), 313–321.
- Polder, R. B. (2001). *Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation*. Construction and Building Materials, 15(2–3), 125–131.
- Pour-Ali, S., Dehghanian, C., Kosari, A. (2015), *Corrosion protection of the reinforcing steels in chloride-laden concrete environment through epoxy/polyaniline-camphorsulfonate nanocomposite coating*. Corrosion Science, 90, 239–247.
- Rtimi, S., Pulgarin, C., Sanjines, R., Kiwi, J. (2016), *Accelerated self-cleaning by Cu promoted semiconductor binary-oxides under low intensity sunlight irradiation*. Applied Catalysis B: Environmental, 180, 648–655.
- Sánchez, M., Alonso, M. C., González, R. (2014), *Preliminary attempt of hardened mortar sealing by colloidal nanosilica migration*. Construction and Building Materials, 66, 306–312.
- Trapote-Barreira, A., Cama, J., Soler, J. M. (2014), *Dissolution kinetics of C-S-H gel: Flow-through experiments*. Physics and Chemistry of the Earth, 70–71, 17–31.
- Wyrzykowski, M., Ghourchian, S., Sinthupinyo, S., Chitvoranund, N., Chintana, T., Lura, P. (2016), *Internal curing of high performance mortars with bottom ash*. Cement and Concrete Composites, 71, 1–9.
- Zahedi, M., Ramezaniapour, A. A., Ramezaniapour, A. M. (2015), *Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration*. Construction and Building Materials, 78, 354–361.
- Zhang, M. H., Li, H. (2011), *Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement*. Construction and Building Materials.
- Zhu, L. J., Zhu, L. P., Zhang, P.-B., Zhu, B. K., Xu, Y.-Y. (2016), *Surface zwitterionization of poly(vinylidene fluoride) membranes from the entrapped reactive core-shell silica nanoparticles*. Journal of Colloid and Interface Science, 468, 110–119.
- Zhu, Y. G., Kou, S. C., Poon, C. S., Dai, J. G., Li, Q. Y. (2013), *Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete*. Cement and Concrete Composites, 35(1), 32–38.