

Microestrutura de concretos aplicáveis em torres eólicas *offshore*

Leonária Araújo Silva¹, Wanner Kelly Damasceno da Silva², Antônio Eduardo Bezerra Cabral³,
Gustavo de Medeiros Pinheiro⁴ e Antônio Medeiros de Oliveira⁵

¹Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, Brasil, ²Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, Brasil, ³Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, Brasil, ⁴Dois A Engenharia, Natal, Brasil e ⁵Dois A Engenharia, Natal, Brasil

¹leonaria@alu.ufc.br, ²kellydamasceno@alu.ufc.br, ³eduardo.cabral@ufc.br,
⁴gustavo.pinheiro@doisa.com e ⁵antonio@doisa.com

RESUMO

Nanossílica e sílica ativa figuram como alternativas para aumentar a durabilidade das estruturas de concreto *offshore*. Para isso, é importante conhecer os efeitos dessas adições na microestrutura dos concretos produzidos. Assim, este artigo teve como objetivo avaliar a microestrutura de concretos compostos individualmente com 2% de nanossílica e 10% de sílica ativa aplicáveis em torres eólicas *offshore*. As micrografias mostram que a zona de transição é fortemente alterada com o uso dessas adições, apresentando menor largura e menor porosidade, em relação ao concreto de referência. Além disso, os concretos com materiais suplementares apresentam matrizes mais uniformes. Assim, a utilização de nanossílica e de sílica ativa minimizam a permeabilidade das matrizes e, conseqüentemente, aumentam a resistência à entrada de agentes externos, sendo potencialmente adequada para aumentar a durabilidade das estruturas *offshore*.

Palavras-chaves:

Nanossílica; Sílica ativa; Zona de transição interfacial; Concreto *offshore*.

ABSTRACT

Nanosilica and silica fume are alternatives to increase the durability of offshore concrete structures. Therefore, the effects of these additions on the microstructure of the concretes produced are an important issue to be investigated. Thus, this paper aimed to evaluate the microstructure of concretes composed by 2% of nanosilica and 10% of silica fume applicable in *offshore* wind towers. Micrographs demonstrate that the transition zone is strongly altered with the use of these additions, presenting smaller thickness and lower porosity, compared to the reference concrete. Moreover, the concretes with supplementary materials present more uniform aspect. Thus, the use of nano-silica and silica fume decrease the permeability of the matrices and, consequently, increases the resistance to the external agents ingress, being potentially suitable to increase the durability of offshore structures.

Keywords:

Nanosilica; Silica fume; Interfacial transition zone; Offshore concrete.

1. INTRODUÇÃO

Os parques eólicos *offshore* são eficientes para a geração de energia marinha renovável (MENG et al., 2023). Essas estruturas normalmente ficam na plataforma continental em águas com profundidades entre 10 e 30 m, estando localizadas a, aproximadamente, 10 km da costa, o que faz com que apresentem maior grau de complexidade quanto ao projeto, montagem, construção e manutenção em relação às torres eólicas onshore (ambiente terrestre) (CAMPIONE, 2023). Com isso, o custo associado à utilização de energia *offshore* é maior que o da energia onshore. Entretanto, como a velocidade média do vento é muito superior no ambiente marinho que no terrestre, os parques eólicos *offshore* geram maior quantidade de energia e menor impacto ambiental, tornando-se alternativas viáveis (CHENG et al., 2023).

No ambiente marinho, as estruturas de concreto armado sofrem deterioração por meio de ataques químicos (cloretos, sulfatos, magnésio, carbonatação) e físicos (cristalização de sais, ação das ondas) que reduzem a sua vida útil, sendo a penetração de íons cloro por meio da difusão o principal fator que provoca a corrosão do aço embutido no concreto e, conseqüente, a degradação das estruturas (SOMAIYA; BHOGAYATA, 2023). Os mecanismos de deterioração dessas estruturas são influenciados pelo tipo de exposição do concreto. Na zona atmosférica, normalmente, o concreto sofre somente com o intemperismo salino, já, na zona submersa, o ataque químico é o responsável pela degradação do concreto, enquanto, na zona da maré, existem ataques químicos e físicos (ação das ondas, alternância seco-úmido e ciclos de congelamento e degelo), sendo a área mais crítica para as estruturas (YI et al., 2020). As torres eólicas *offshore* devem resistir a todos esses ataques, já que seus componentes estão localizados nas três zonas apresentadas.

Uma alternativa para aumentar a resistência à penetração de íons cloro dos concretos é a adição de materiais pozolânicos, como a sílica ativa e a nanossílica. O uso dessas adições pode tornar mais densa e tortuosa a microestrutura do concreto por meio das reações pozolânicas e, como a entrada de agentes agressivos no concreto está diretamente relacionada com a estrutura de poros do material, há aumento significativo da resistência à penetração de cloretos e da durabilidade (MADANI et al., 2014). Além disso, a nanossílica e a sílica ativa aumentam a resistência mecânica dos compostos cimentícios, além de proporcionar alta resistência à carbonatação (LI et al., 2021).

Um dos principais fatores que interferem no desempenho dos concretos é a zona de transição interfacial entre o agregado e a pasta de cimento (ZTI). Essa zona apresenta, normalmente, maior quantidade e tamanho de poros que a pasta de cimento, sendo necessário aumentar a sua rigidez e resistência a fim de proporcionar estruturas mais duráveis (NILI; EHSANI, 2015). Dessa forma, torna-se importante avaliar a microestrutura dos concretos com sílica ativa e nanossílica para verificar seu efeito na ZTI. Com base no exposto, este artigo tem como objetivo avaliar a microestrutura de concretos aplicáveis em torres eólicas *offshore*, contendo sílica ativa e nanossílica.

2. MATERIAIS E MÉTODO DO ESTUDO

Utilizou-se Cimento Portland tipo III com classe de resistência à compressão de 40 MPa (CP III-40) de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), tendo massa específica de 3,06 g/cm³. A sílica ativa e a nanossílica utilizadas apresentaram massa específica de 2,17 g/cm³ e 1,10 g/cm³ e áreas específicas entre 30 m²/g e 50 m²/g e entre 500 m²/g e 900 m²/g, respectivamente. Como agregados graúdos, foram utilizadas duas faixas granulométricas de britas: 4,75 mm - 12,50 e 9,50 mm - 25,0 mm e, como agregado miúdo, foi usada uma areia natural, atendendo aos limites impostos pela NBR 7211 (ABNT, 2022). Também foram utilizados água oriunda da rede de distribuição local e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 3100 com massa específica de 1,07 g/cm³ a fim de enquadrar os concretos na classe de consistência S100, tendo abatimento maior ou igual a 100 mm e menor que 160 mm, conforme a NBR 8953 (ABNT, 2015). A Tabela 01 apresenta a distribuição granulométrica dos agregados utilizados neste estudo.

Tabela 01 - Granulometria dos agregados

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem retida acumulada (%)		
	Areia	Brita 4,75 mm - 12,50 mm	Brita 9,50 mm - 25,0 mm
25,00	0,0	0,0	0,0
19,00	0,0	0,0	15,9
12,50	0,0	0,0	59,5
9,50	0,00	2,0	81,0
6,35	1,13	64,8	98,3
4,76	1,85	89,6	98,9
2,30	5,72	99,0	99,2
1,18	19,70	100,0	100,0
0,60	58,84	100,0	100,0
0,30	91,71	100,0	100,0
0,15	99,09	100,0	100,0
0,10	100	100,0	100,0

Fonte: autoria própria (2023)

Nesta pesquisa, foram avaliados três traços: referência (sem adição) (CR) e com substituição de 2% e 10%, em massa, de cimento por nanossílica (CN) e por sílica ativa (CS), respectivamente. Esses teores foram escolhidos com base nos estudos de Wang et al. (2022) e de Farahani, Taghaddos e Shekarchi (2015). O traço padrão adotado foi 1:1,97:1,18:1,77:0,56 (cimento: areia: brita 4,75 mm - 12,50: brita 9,50 mm - 25,0 mm: água) com consumo de cimento igual a 357,1 kg/m³ de concreto. Para enquadrar os concretos na classe S100, foram necessários 1,1%, 2,5% e 4,3% de superplastificante para os traços CR, CS e CN, respectivamente, em relação à massa de aglomerante. O ensaio de abatimento do tronco de cone foi realizado de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020).

A Figura 01 apresenta a sequência de etapas adotada para a produção dos concretos. Inicialmente, houve o umedecimento de uma betoneira de 50 L e, em seguida, foram adicionadas e misturadas as duas britas e 30% da água. Logo após, o cimento, a adição e outros 30% da água foram inseridos na betoneira e homogeneizados. Posteriormente, adicionaram-se e misturaram-se a areia, os 40% de água restantes e o aditivo superplastificante.

Figura 01 - Etapas para produção dos concretos



Fonte: autoria própria (2023)

A microestruturas dos concretos CR, CN e CS foi determinada por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV). Por meio dessa técnica, pode-se obter informações de forma rápida a respeito da morfologia e dos elementos químicos de um corpo de prova e solucionar o problema de resolução que ocorre devido à fonte de luz branca do microscópio óptico convencional, já que o MEV aplica um feixe de elétrons no lugar de fótons (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007). A microscopia ocorre a partir de duas etapas: coleta de dados (preparação do corpo de prova por meio de impregnação, polimento e revestimento) e análise das imagens (segmentação e quantificação de imagens) (BANGARU et al., 2022). Neste estudo, foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura Quanta 450-FEG – FEI (Figura 02) da Central Analítica da Universidade Federal do Ceará. O procedimento consistiu em cortar amostras com dimensões de 1,0 cm x 1,0 cm x 0,5 cm (largura x comprimento x altura) da parte central dos corpos de prova, após 28 dias de cura, sendo, em seguida, preparadas e acopladas ao equipamento.

Figura 02 - Microscópio Eletrônico de Varredura Quanta 450-FEG

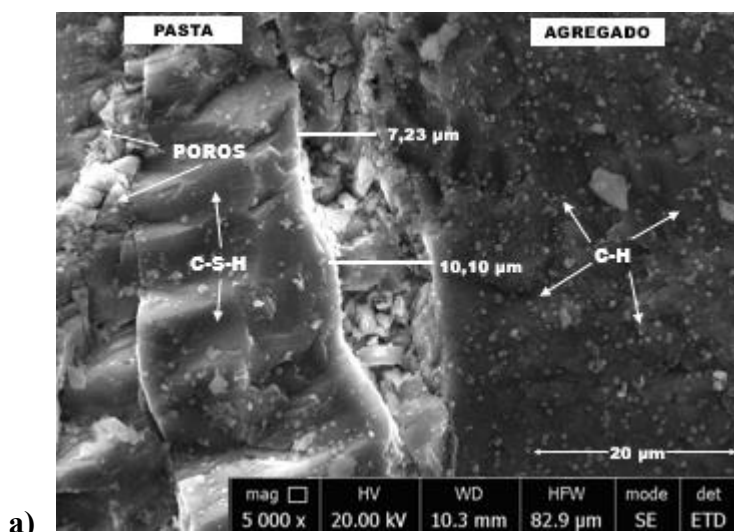


Fonte: autoria própria (2023)

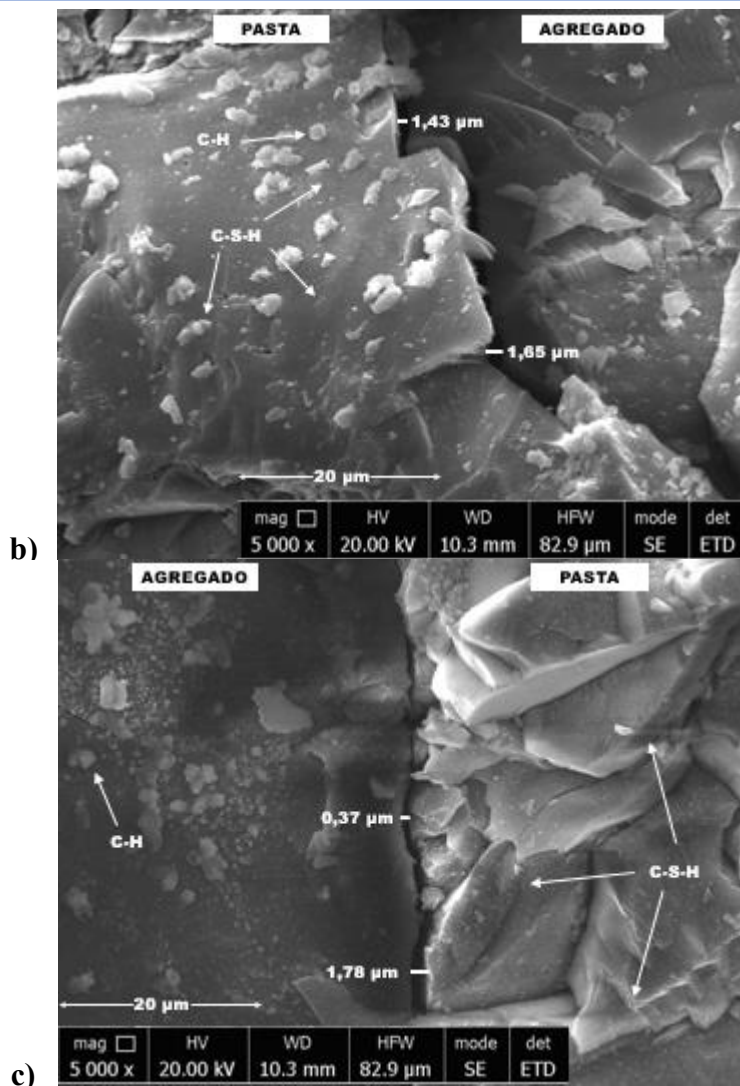
3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Figura 03 apresenta as micrografias por MEV das zonas de transição dos concretos de referência (a), com 2% de nanossílica (b) e com 10% de sílica ativa (c). Pode-se observar que o traço CR apresentou grande quantidade de hidróxido de cálcio (C-H) sobre a superfície do agregado. Além disso, notou-se a presença de aglomerados porosos e a formação do gel silicato de cálcio hidratado (C-S-H) de maneira mais descontínua que os outros traços. O gel C-S-H é formado a partir da hidratação do cimento, sendo o principal responsável por impulsionar a fixação e o endurecimento da pasta (ARETXABALETA et al., 2022) e quanto mais denso for este gel, maior tende a ser a durabilidade dos materiais cimentícios.

Figura 03 – MEV: a) CR, b) CN e c) CS



a)



Em relação à zona de transição, o concreto de referência teve uma zona mais porosa e maior, tendo uma largura de até 10,10 μm , enquanto os traços CN e CS apresentaram larguras máximas da ZTI de 1,65 μm e 1,78 μm , respectivamente. Ademais, os traços com materiais pozolânicos, principalmente com nanossílica, apresentaram matrizes de C-S-H mais densas, sem existência de poros visíveis e com a menor presença de C-H. Isso ocorreu porque o C-H foi consumido durante as reações pozolânicas, aumentando a quantidade de C-S-H, o que resultou em menor porosidade na ZTI e na pasta (NILI; EHSANI, 2015). Esse C-S-H adicional provoca o refinamento da ZTI e uma microestrutura mais densa (LIU et al., 2022). A nanossílica tem uma alta área superficial e tamanho reduzido, o que aumenta as reações pozolânicas e a formação do gel C-S-H (VIJAYAN; DEVARAJAN; SIVASURIYAN, 2023), tornando a superfície do concreto mais lisa. Essas propriedades microestruturais interferem diretamente nas propriedades mecânicas e de durabilidade, já que matrizes mais densas apresentam menos poros e são mais resistentes à entrada de agentes agressivos (JALAL et al., 2012). Com base no exposto, os concretos com 2% de nanossílica e 10% de sílica ativa se mostram promissores para aumentar a durabilidade das estruturas, principalmente aquelas expostas a ambientes agressivos, como os parques eólicos *offshore*. Entretanto, devem ser realizados mais estudos sobre as propriedades dos estados fresco e endurecido dos concretos com materiais suplementares.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo avaliou a microestruturas de concretos contendo 2% de nanossílica e 10% de sílica ativa. Com base nos resultados, pode-se concluir que o concreto sem adição apresenta aglomerados porosos e uma formação de gel C-S-H menos uniforme que os traços com materiais pozolânicos, tendo também uma zona de transição interfacial maior e mais porosa. Além disso, dentre as pozolanas avaliadas, a utilização da nanossílica tornou a matriz mais lisa e uniforme devido a sua maior área superficial. Assim, os concretos com 2% de nanossílica e 10% de sílica ativa se mostram promissores para aumentar a durabilidade dos concretos utilizados nos parques eólicos *offshore*. Porém, deve ser avaliada a interferência dessas adições na trabalhabilidade e nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos.

REFERÊNCIAS

ARETXABALETA, X. M.; LÓPEZ-ZORRILLA, J.; LABBEZ, C.; ETXEARRIA, I.; MANZANO, H. A potential CSH nucleation mechanism: atomistic simulations of the portlandite to CSH transformation. *Cement and Concrete Research*, v. 162, p. 106965, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos, pág. 12. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, pág. 5. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 7211: agregados para concreto - requisitos, pág. 10. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência, pág. 3. Rio de Janeiro, 2015.

BANGARU, S. S.; WANG, C.; ZHOU, X.; HASSAN, M. Scanning electron microscopy (SEM) image segmentation for microstructure analysis of concrete using U-net convolutional neural network. *Automation in Construction*, v. 144, p. 104602, 2022.

CAMPIONE, G. Simplified calculation model for *offshore* wind tower founded on monopile member. *Structures*, p. 962-969, 2023.

CHENG, L.; YANG, F.; SEIDEL, M.; VELJKOVIC, M. FE-assisted investigation for mechanical behaviour of connections in *offshore* wind turbine towers. *Engineering Structures*, v. 285, p. 116039, 2023.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. EdiPUCRS, 2007.

FARAHANI, A.; TAGHADDOS, H.; SHEKARCHI, M. Prediction of long-term chloride diffusion in silica fume concrete in a marine environment. *Cement and Concrete Composites*, v. 59, p. 10-17, 2015.

JALAL, M.; MANSOURI, E.; SHARIFPOUR, M.; POULADKHAN, A. R. Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles. *Materials & Design*, v. 34, p. 389-400, 2012.

LI, L. G.; ZHENG, J. Y.; NG, P. L.; KWAN, A. K. H. Synergistic cementing efficiencies of nano-silica and micro-silica in carbonation resistance and sorptivity of concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 33, p. 101862, 2021.

LIU, C.; ZHANG, W.; LIU, H.; ZHU, C.; WU, Y.; HE, C.; WANG, Z. Recycled aggregate concrete with the incorporation of rice husk ash: Mechanical properties and microstructure. *Construction and Building Materials*, v. 351, p. 128934, 2022.

MADANI, H.; BAGHERI, A.; PARHIZKAR, T.; RAISGHASEMI, A. Chloride penetration and electrical resistivity of concretes containing nanosilica hydrosols with different specific surface areas. *Cement and Concrete Composites*, v. 53, p. 18-24, 2014.

MENG, D.; YANG, S.; DE JESUS, A. M.; ZHU, S. P. A novel Kriging-model-assisted reliability-based multidisciplinary design optimization strategy and its application in the *offshore* wind turbine tower. *Renewable Energy*, v. 203, p. 407-420, 2023.

NILI, M.; EHSANI, A. Investigating the effect of the cement paste and transition zone on strength development of concrete containing nanosilica and silica fume. *Materials & Design*, v. 75, p. 174-183, 2015.

NILI, M.; EHSANI, A. Investigating the effect of the cement paste and transition zone on strength development of concrete containing nanosilica and silica fume. *Materials & Design*, v. 75, p. 174-183, 2015.

SOMAIYA, P.; BHOGAYATA, A. A systematic conditional assessment of strength and durability damage of concrete structures in marine environments. *Materials Today: Proceedings*, 2023.

VIJAYAN, D. S.; DEVARAJAN, P.; SIVASURIYAN, A. A review on eminent application and performance of nano based silica and silica fume in the cement concrete. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 56, p. 103105, 2023.

WANG, C.; ZHANG, M.; WANG, Q.; DAI, J.; LUO, T.; PEI, W.; ZHANG, Z. Research on the influencing mechanism of nano-silica on concrete performances based on multi-scale experiments and micro-scale numerical simulation. *Construction and Building Materials*, v. 318, p. 125873, 2022.

YI, Y.; ZHU, D.; GUO, S.; ZHANG, Z.; SHI, C. A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment. *Cement and Concrete Composites*, v. 113, p. 103695, 2020.