

A influência da aplicação de aditivo contendo nanopartículas de sílica na durabilidade do concreto

DIOGO AUGUSTO DA SILVA DE ASSIS - DR., RESP. TÉC. - (diogo.augusto@nextchemical.com.br) ;

RAYSSA PEREIRA DE JESUS - ANALISTA DE P&D ;

ANNE ELIZE PUPPI STANISLAWCZUK - DIR. GERAL ;

CAMILA MATIOSKI DE SOUZA - QUIM. - Next Química

RESUMO

A CORROSÃO DAS ARMADURAS DE AÇO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO É FAVORECIDA PELA PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO, RELACIONADA À POROSIDADE DO MATERIAL. A INCORPORAÇÃO DE NANOMATERIAIS AO CONCRETO MODIFICA SUA MICROESTRUTURA, REDUZINDO A INTERCONECTIVIDADE DOS POROS E AUMENTANDO A DURABILIDADE. ENTRE ELES, DESTACAM-SE AS NANOSSÍLICAS (nSiO_2). ESTE ESTUDO AVALIOU A INFLUÊNCIA DE UM ADITIVO À BASE DE nSiO_2 COMBINADO COM POLÍMEROS HIDROFÍLICOS NA DURABILIDADE DO CONCRETO. FORAM INVESTIGADOS EFEITOS DE DIFERENTES TEORES SOBRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, MIGRAÇÃO E PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO E ABSORÇÃO DE ÁGUA. ENSAIOS EXPERIMENTAIS MOSTRARAM QUE A nSiO_2 REFINOU A MICROESTRUTURA, REDUZINDO A POROSIDADE E AUMENTANDO A DENSIDADE DO COMPOSITO. OBSERVOU-SE REDUÇÃO DE ATÉ 10% NA ABSORÇÃO DE ÁGUA E MITIGAÇÃO DE ATÉ 18% NA MIGRAÇÃO DE CLORETOS EM COMPARAÇÃO AO CONCRETO CONTROLE. OS RESULTADOS INDICAM QUE O ADITIVO É UMA SOLUÇÃO PROMISSORA PARA MELHORAR A DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EXPOSTAS A AMBIENTES AGRESSIVOS.

PALAVRAS-CHAVE: NANOPARTÍCULAS DE SÍLICA, ADITIVO, CONCRETO, DURABILIDADE.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é considerado o material de construção mais empregado no mundo, combinando características desejáveis como resistência mecânica, bom custo-benefício e longo período de vida útil. O mercado global de concreto e cimento deve atingir US\$ 991,98 bilhões até 2032, com uma taxa de crescimento anual composta de 28,65%. Esses mercados podem ser analisados de

forma conjunta, uma vez que o concreto está diretamente relacionado ao elevado consumo de cimento (SANTOS *et al.*, 2025). Esse insucesso é responsável por uma das maiores pegadas de carbono da indústria brasileira, sobretudo devido à emissão de grandes volumes de dióxido de carbono (CO_2), contribuindo significativamente para o efeito estufa global. Em 2024, o mercado global de cimento foi estimado em 4,39 bilhões de toneladas, com previsão de crescimento para 5,96 bilhões de toneladas até 2030 (FORTUNE BUSINESS INSIGHTS, 2024).

Diante desse cenário, a redução do consumo de cimento no concreto torna-se uma necessidade premente para a sustentabilidade ambiental, especialmente no Brasil, país que tem demonstrado interesse e potencial para se destacar como uma potência ecológica mundial. A busca por alternativas que promovam a diminuição do uso de cimento, sem comprometer as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto, é, portanto, de grande interesse científico e tecnológico (TANIMOLA; EFE, 2024).

Diversas alternativas vêm sendo investigadas, como o uso de materiais reciclados da construção civil, materiais oriundos de coprocessamento na produção de cimento e a substituição de agregados convencionais. Entretanto, de maneira geral, essas estratégias podem impactar negativamente a resistência mecânica e a durabilidade do concreto. Nesse contexto, a incorporação de nanopartículas ao concreto apresenta-se como uma estratégia promissora para mitigar possíveis prejuízos à qualidade do material. Essas nanoestruturas podem aprimorar propriedades mecânicas, prevenir ou retardar o desenvol-

vimento de manifestações patológicas e, em alguns casos, reduzir o consumo de cimento, resultando em um material mais durável e com menor impacto ambiental. Todavia, a adição de nanoestruturas em composições cimentícias impõe variáveis adicionais que influenciam o sucesso da aplicação, como dispersão, compatibilidade e método de incorporação (PEREIRA; OLIVEIRA; CASCUDO, 2023). Assim, torna-se essencial compreender detalhadamente os mecanismos de atuação das diferentes nanopartículas no concreto, bem como suas contribuições específicas para a performance do material, considerando as tecnologias já aplicadas em larga escala (MORDOR INTELLIGENCE, 2024; OBSERVATÓRIO CIENTÍFICO, 2025).

Atualmente, diversos tipos de partículas de sílica são aplicados ao concreto, como sílica ativa, e sílica coloidal, caracterizadas por diferentes tamanhos de partículas e propriedades físico-químicas. Essas características específicas resultam em impactos distintos nas propriedades do concreto. A nSiO_2 , devido às suas dimensões nanométricas e elevada área superficial, atua no processo de hidratação do cimento por dois mecanismos principais: reação pozolânica concomitante à hidratação do cimento; e atuação como ponto de nucleação para a formação e o crescimento do gel C-S-H (SANTOS *et al.*, 2025). Esses mecanismos promovem o refinamento dos poros e a densificação da microestrutura, refletindo-se no aumento da resistência mecânica e da durabilidade do concreto.

A literatura científica recente demonstra que os benefícios associados ao uso de nSiO_2 dependem de fatores como dosagem, dispersão, método de mistura e compatibilidade

TABELA 1

COMPOSIÇÃO PROBABILÍSTICA DA CAL HIDRATADA

Cimento (kg)	Água (L)	Areia fina (kg)	Areia média (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)
350	175	244	526	203	811

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

com os demais componentes do concreto. Em muitos casos, observa-se a existência de uma dosagem ótima de nanomaterial para cada traço, sendo que teores superiores tendem a reduzir a trabalhabilidade, prejudicar a homogeneidade da mistura e, consequentemente, impactar negativamente o ganho de resistência do concreto (RUIZ *et al.*, 2025).

Nesse contexto, o presente trabalho propõe-se a realizar uma análise detalhada de uma curva de dosagem do aditivo nanotecnológico para concreto com nSiO₂. Foram reunidos resultados de ensaios de qualidade do concreto, com o objetivo de elucidar os efeitos do aditivo no aprimoramento da resistência mecânica e da durabilidade, bem como suas repercussões relacionadas à mistura, dispersão, trabalhabilidade e demais efeitos associados.

2. MATERIAIS E MÉTODO

O traço padrão de concreto convencional escolhido para aplicação dos testes foi experimentado anteriormente com diversos aditivos e aplicações. A Tabela 1 mostra um traço de 1m³, com os componentes em kg para cimento e agregados e em litros para água. Para todos os traços, os parâmetros fator água/cimento (a/c) e teor de argamassa foram fixados em 0,5 e 52% respectivamente. As areias usadas eram de origens naturais, tanto a de granulometria fina quanto a de tamanho médio, sendo complementares entre si no traço. Ambas as britas 1 e 0 usados foram do tipo basáltica. Optou-se por empregar o cimento de alta resistência inicial - CP V ARI.

Ao todo foram feitos 4 traços de concreto convencional de 30 l em uma betoneira de 150 l, seguindo a Tabela 1. O primeiro foi o concreto referência ou controle e os outros se dividiram em 3 dosagens do aditivo NEXT ACnano, contendo nSiO₂. O volume foi suficiente para moldar 15 corpos de prova de 10x20 por traço. Dos quais: 7 corpos de prova se executaram os ensaios de absorção de água juntamente a índice de vazios (ABNT NBR 9778 - 2:2009), 6 CP foram rompidos para obtenção da resistência à compressão (ABNT NBR 5739) e o restante, após seleção, seguiu para testes de permeabilidade forçada de íons cloreto (ASTM C1202- 12).

O aditivo empregado para o estudo é de uma base de nSiO₂ amorfa, previamente sintetizado como uma dispersão estável. As especificações do produto são descritas na

Tabela 2. O aditivo foi adicionado nas dosagens de 0,25%, 0,5% e 0,75% de nSiO₂ com relação a massa de cimento, juntamente com parte da água de amassamento como último componente. A água da dispersão foi contabilizada no cálculo do fator água/cimento, parâmetro que foi constante em todos os traços executados, incluindo o traço sem nSiO₂. Manteve-se um valor de abatimento conforme teste descrito na ABNT NBR 16889:2020 padronizado de 120 mm ± 20 mm, a fim de normalizar a plasticidade do concreto fresco empregando conjuntamente superplastificante à base de policarboxilato (PCE) nos traços de concreto. Ambos os produtos foram adicionados conforme cálculo de porcentagem sobre a massa de cimento empregado no traço.

Os primeiros testes realizados com concreto em estado endurecido foram resistências à compressão axial nas idades iniciais. As idades convencionadas foram para 1, 7 e 28 dias.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro teste executado foi o de abatimento do tronco de cone, sendo padronizado para todos os traços, a fim de que a comparação fosse justa entre os impactos da aplicação de diferentes dosagens de aditivo contendo nSiO₂ utilizadas no traço. Para essa padronização, foi preciso diferentes dosagens de PCE adicional. A Tabela 3 mostra os traços rodados contendo os principais parâmetros para comparação.

Muitos efeitos puderam ser observados nos traços desde o momento da adição, estando o concreto ainda fresco. O primeiro foi a redução do abatimento inicial, levando a

necessidade do uso de mais PCE. Esta quantidade aumentou conforme maior dosagem de aditivo nanotecnológico adicionado. Isso indica um leve aumento de viscosidade com o aumento do teor de nSiO₂ (GONÇALVES, LEONI & FERREIRA, 2023). O principal motivo se deve à elevada área superficial destas partículas, resultando na interação com a água de amassamento, aumentando a coesão do concreto e modificando sua reologia (ISFAHANI *et al.*, 2016).

As resistências para 24h após moldagem apresentaram incrementos de 21%, 46% e 58% respectivamente às dosagens de 0,25%, 0,50% e 0,75% de aditivo nanotecnológico. Os maiores aumentos de resistência mecânica em relação ao concreto de controle foram observados nas primeiras 24h. A reação de hidratação do cimento ocorre normalmente no concreto controle e é aprimorado ao se adicionar a nanopartícula de sílica. Esse comportamento foi esperado e pode ser atribuído principalmente à atividade pozolânica, em que a nSiO₂ deve reagir com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) excedente ou gerado durante a hidratação do cimento, promovendo a formação adicional do gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (SINGH *et al.*, 2013). Essa reação promove o refinamento dos poros, responsável pelo aumento da densidade e implementação da coesão da matriz cimentícia, reforçando a zona de transição interfacial (ITZ do inglês). Isso permite um reforço adicional na resistência à ruptura, a qual ocorre geralmente nesta zona de interface do concreto/agregado (RUNC, PROVIS & SERDAR, 2022). Além disso, segundo Hakeem *et al.* (2023) e Neto & Geyer (2019), o aumento de resistência obtido também é resultado da

TABELA 2

ESPECIFICAÇÕES DO PRODUTO NEXT ACnano

Produto	NEXT ACnano
Meio de aplicação:	Aditivo contendo policarboxilato e nSiO ₂
Tamanho da nSiO ₂ :	Entre 1 e 100 nm
Área superficial:	> 500 m ² /g

FONTE: FICHA TÉCNICA NEXT ACnano, NEXT QUÍMICA (2022)

TABELA 3

PARÂMETROS DOS TRAÇOS TESTADOS

Traço	Dosagem de NEXT ACnano	Dosagem de PCE
S0	0	0,25%
S025	0,25%	0,25%
S05	0,50%	0,35%
S75	0,75%	0,4%

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

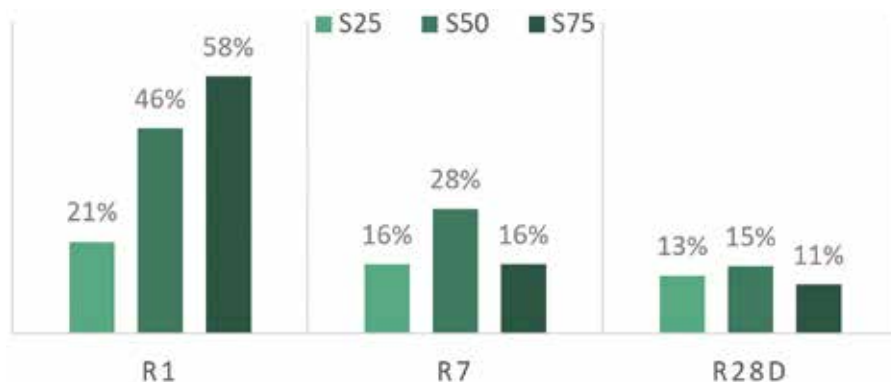


FIGURA 1

GRÁFICO DE DADOS DE ACRÉSCIMOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA AXIAL POR IDADE

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

capacidade da $nSiO_2$ de servir como ponto de nucleação para crescimento do C-S-H do cimento. Esse efeito, juntamente com a progressão da reação pozolânica, pode ser atrelado ao fato de que a adição de $nSiO_2$ tende a antecipar o início de pega. Pois essas atuações são responsáveis por acelerar a reação de hidratação de cimento (HLOBIL, KUMPOVÁ & HLOBILOVÁ, 2022).

Aos 7 dias, os ganhos de resistência em relação ao controle foram de 16% para as dosagens de 0,25% e 0,75%, e 28% para 0,5%. Nesta idade, ainda se considera uma resistência inicial, reunindo ganhos expressivos para todas as dosagens empregadas. Aos 28 dias, os ganhos somaram-se em 13%, 15% e 11% para as dosagens de 0,25%, 0,50% e 0,75% de aditivo químico nanotecnológico, respectivamente.

A tendência geral seria o aumento da resistência inicial proporcional à quantidade de $nSiO_2$ contida no aditivo adicionado. Os dados de resistência podem ser vistos compactados para comparação na Figura 1.

Nota-se um acréscimo de resistência à compressão maior para a dosagem média do que para a maior dosagem aplicada. Esse desempenho demonstra que, para o alcance de maior resistência aos 28 dias, a dosagem ideal seria de 0,5%, que se demonstra como o ponto ótimo para o traço aplicado. Conforme estudos de Isfahani *et al.* (2016) e Suárez *et al.* (2022), esta performance dispar é corriqueira na aplicação de nanopartículas ao concreto. Nesses casos, a elevada quantidade relativa de $nSiO_2$ levaria a má dispersão do material na matriz cimentícia, gerando, em decorrência, a formação de aglomerados ao longo do processo de hidratação do cimento que se espalham no concreto. Quando se atinge o estado endurecido, esses pontos podem se comportar

como pontos de fraqueza, onde a ruptura tende a ocorrer (TANIMOLA & EFE, 2024).

Diferentes estudos relevantes da área de construção civil demonstram resultados promissores na durabilidade do concreto ao se adicionar $nSiO_2$. Essa performance pode ser medida a partir de diferentes ensaios padronizados. As principais estão relacionadas à porosidade e permeabilidade do concreto (RIUZ *et al.*, 2025). Quanto menos poroso o material final, mais dificultada ficaria a entrada de agentes deletérios na estrutura do concreto ao longo do tempo, permitindo que o material fique livre de manifestações patológicas, tais como: corrosão das armaduras, eflorescência e reação álcali-agregado (RAA) (AL-SAFAR, WONG & PAUL, 2023 e SALOMA *Et al.*, 2015). Para elucidar a capacidade das nanopartículas utilizadas em aprimorar a durabilidade do concreto, foram realizados ensaios de permeabilidade forçada de íons cloreto e obtenção de resultados de absorção de água e de índice de vazios, conforme as respectivas normas.

Os resultados de absorção de água e de índice de vazios foram coerentes

entre si. Comparativamente ao concreto controle, houve redução da absorção e do índice de vazios proporcionalmente à dosagem de aditivo nanotecnológico aplicado ao concreto. As respectivas atenuações na absorção foram de 6%, 7% e 12% (Figura 2), enquanto as reduções dos índices de vazios alcançaram valores de 1,5%, 4,9% e 9,8% menores que o valor encontrado para o concreto sem adição de aditivo contendo $nSiO_2$. Nota-se, por meio dos resultados comparativos, a redução relativa da porosidade dos concretos com adição de $nSiO_2$ que devem evitar a permeação de água ao longo do tempo. Quanto maior a quantidade adicionada, menor se mostrou a porosidade, comprovando o efeito previsto de densificação da matriz (KUMAR, KUMAR & KUJUR, 2019). Comportamento comumente atribuído à atividade pozolânica do nanomaterial empregado, juntamente com a ação de preenchimento de poros articulado pela presença dele no meio (TJAHJANI *et al.*, 2023 e RUNCİ, PROVIS & SERDAR, 2022).

Com base nos resultados obtidos de resistência mecânica e durabilidade, foi selecionada a condição de incorporação de 0,5% de $nSiO_2$, para seguir com o ensaio de migração de íons cloreto. Os resultados demonstraram uma carga elétrica passante de 2462 Coulombs para a amostra referência e 2030 Coulombs para o traço com incorporação de nanotecnologia. Dessa forma, foi verificada uma redução de 18% da migração / penetração de íons cloreto quando comparado ambos os traços, como pode-se verificar na Figura 3. O ensaio realizado não depende apenas da porosidade da matriz, mas também da agressividade da solução iônica de teste, conforme a norma ASTM C1202 (2012). Os resultados obtidos

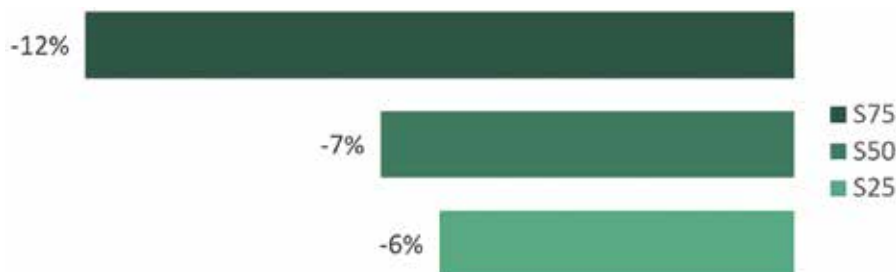


FIGURA 2

GRÁFICO DE REDUÇÃO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES



FIGURA 3

GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DE REDUÇÃO DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

FONTE: ELABORADO PELOS AUTORES

reforçam a capacidade das nanopartículas de reduzir o volume e dimensão da porosidade, impactando positivamente a durabilidade do concreto. Este mecanismo é derivado justamente da atividade pozolânica e do efeito nucleante das partículas de sílica presentes no aditivo nanotecnológico (KUMAR, KUMAR & KUJUR, 2019, PRAVEEN KUMAR & DEY, 2023).

5. CONCLUSÕES

Os estudos, apresentados neste trabalho, concernentes aos efeitos do aditivo químico para concreto com incorporação de nSiO₂ (NEXT ACnano) contou com ensaios de resistência mecânica, testes de porosidade e absorção de água para comprovar os benefícios prometidos pelo produto comercial. Os resultados discuti-

dos no presente trabalho permitem concluir que o aditivo nanotecnológico teve atuação efetiva e positiva no aumento da resistência mecânica e no prolongamento da durabilidade do concreto. O aditivo nanotecnológico apresentou maior efeito de acréscimo de resistência inicial, demonstrando que as atuações de atividade pozolânica e efeito de ponto de nucleação podem gerar aceleração da reação de hi-

dratação do cimento, resultando em aceleração do ganho de resistência. Os resultados demonstram ganhos de até 58% para o primeiro dia e de até 28% aos 7 dias. A porosidade foi refinada pela adição de nSiO₂ por meio do aditivo químico ao concreto, inferindo-se pelos resultados de redução de índice de vazios em até 9,8% e de absorção de água de até 12% proporcionais às dosagens incrementadas nos traços. ☺

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AL-SAFFAR, F. Y.; WONG, L. S.; PAUL, S. C. An Elucidative Review of the Nanomaterial Effect on the Durability and Calcium-Silicate-Hydrate (C-S-H) Gel Development of Concrete. Gels, 2023.
- [2] FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. Tendências do mercado de cimento Portland. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/pt/portland-cement-market-112870>. Acesso em: 05 jun. 2025.
- [3] GONÇALVES, G. M.; LEONI, V. L.; FERREIRA, F. G. DA S. Efeito da nanosilica nas propriedades mecânica, física e térmica de concretos. Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, v. 60, n. 1, p. 50, 30 mar. 2023.
- [4] HAKEEM, I. Y. *et al.* Properties of sustainable high-strength concrete containing large quantities of industrial wastes, nanosilica and recycled aggregates. Journal of Materials Research and Technology, v. 24, 2023.
- [5] HLOBIL, M.; KUMPOVÁ, I.; HLOBILOVÁ, A. Surface area and size distribution of cement particles in hydrating paste as indicators for the conceptualization of a cement paste representative volume element. Cement and Concrete Composites, v. 134, 1 nov. 2022.
- [6] ISFAHANI, F. T. *et al.* Effects of Nanosilica on Compressive Strength and Durability Properties of Concrete with Different Water to Binder Ratios. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2016, 2016.
- [7] KUMAR, S.; KUMAR, A.; KUJUR, J. Influence of nanosilica on mechanical and durability properties of concrete. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, v. 172, n. 11, 2019.
- [8] MORDOR INTELLIGENCE. Tamanho do mercado de cimento e análise de participação - Relatório de pesquisa da indústria. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/cement-market>. Acesso em: 05 jun. 2025.
- [9] OBSERVATÓRIO CIENTÍFICO UFC. Fabricação de cimento, grande emissor industrial de carbono, pode ser menos poluente com troca de matéria-prima. Disponível em: <https://observatoriocientifico.ufc.br/pt/fabricacao-de-cimento-grande-emissor-industrial-de-carbono-pode-ser-menos-poluente-com-troca-de-materia-prima/>. Acesso em: 05 jun. 2025.
- [10] PEREIRA, Ana; OLIVEIRA, Andrielli; CASCUDO, Oswaldo. Efeito da sílica ativa e nano sílica na durabilidade frente a cloretos e CO₂ - um mapeamento da literatura para futuras pesquisas: ternary effect of silica fume and nano-silica on the durability in front of chlorides and CO₂ - a literature mapping for future research. Revista Tecnica, v. 8, 2023.
- [11] PRAVEEN KUMAR, V. V.; DEY, S. Study on strength and durability characteristics of nano-silica based blended concrete. Hybrid Advances, v. 2, 2023.
- [12] RUIZ, A. I. *et al.* Sustainable low-cement blends featuring blast furnace slag, metakaolin and nanosilica show remarkable long-term durability against chlorides for one day curing age. Case Studies in Construction Materials, v. 22, 1 jul. 2025.
- [13] RUNCI, A.; PROVIS, J.; SERDAR, M. Microstructure as a key parameter for understanding chloride ingress in alkali-activated mortars. Cement and Concrete Composites, v. 134, 2022.
- [14] SALOMA; NASUTION, Amrinsyah; IMRAN, Iswandi; ABDULLAH, Mikrajuddin. Improvement of concrete durability by nanomaterials. Procedia Engineering, v. 125, p. 608-612, 2015.
- [15] SANTOS, Altair. Meta da indústria do cimento é emissão zero de CO₂ até 2050. ABCIC, 2025. Disponível em: <https://abcic.org.br/Noticia/Exibir/meta-da-industria-do-cimento-e-emissao-zero-de-co-ate-2050>. Acesso em: 05 jun. 2025.
- [16] SINGH, L. P. *et al.* Beneficial role of nanosilica in cement based materials - A review. Construction and Building Materials, 2013.
- [17] TANIMOLA, J. O.; EFE, S. Recent advances in nano-modified concrete: Enhancing durability, strength, and sustainability through nano silica (nS) and nano titanium (nT) incorporation. Applications in Engineering Science, v. 19, 1 set. 2024.
- [18] TJAHJANI, A. R. *et al.* Comparative analysis of natural nanosilica versus commercial nanosilica on compressive strength and durability of high-performance concrete. Archives of Civil Engineering, v. 69, n. 3, 2023.