CARACTERÍSTICAS DE DURABILIDADE EM CONCRETOS USANDO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM SUBSTITUIÇÃO DA AREIA

Durability characteristics in concretes using iron ore tailings as sand replacement

Lucas Thadeu da Silva Ramos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | lucas.ramos@cefetmg.br

Janaina Aguiar Park
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais | Santa Luzia, Minas Gerais | janaina.park@ifmg.edu.br

Anna Szijártó
Budapest University of Technology and Economics | Budapest, Hungary | szijarto.anna@emk.bme.hu

Elvys Dias Reis
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | elvysreis@yahoo.com.br

Augusto Cesar da Silva Bezerra
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | augustobezerra@cefetmg.br

Resumo

Este estudo investigou o impacto da substituição de areia por rejeito de minério de ferro (RMF) no concreto, focando na permeabilidade a íons cloreto (PIC), porosidade e distribuição de poros (DP). Foram analisados concretos com substituições de 0%, 30% e 50% de RMF, denominados CRMF0, CRMF30 e CRMF50, respectivamente. Os resultados mostraram que o teor de substituição afeta as propriedades de resistência e durabilidade do concreto. CRMF30 apresentou redução da porosidade e aumento da resistência à compressão, mas elevação da PIC devido ao crescimento de grandes poros. O CRMF50 apresentou desempenho geral próximo ao CRMF0, com baixa PIC e redução moderada na resistência mecânica. A análise de DP por fotogrametria destacou-se como ferramenta eficaz para compreender os efeitos da adição de RMF na microestrutura do concreto. Ajustes nos aditivos e na granulometria do RMF são recomendados para equilibrar resistência e durabilidade, promovendo a aplicação sustentável desse resíduo na construção civil.

Palavras-chave: Rejeito de minério de ferro; concreto; durabilidade; distribuição de poros; migração de íons cloreto.

ABSTRACT

This study investigated the impact of replacing sand with iron ore tailings (IOT) on concrete, focusing on chloride ion migration (CIM), porosity and pore distribution (PD). Concretes with replacements of 0%, 30% and 50% of IOT, called CIOT0, CIOT30 and CIOT50, respectively, were analyzed. The results showed that the replacement content affects the resistance and durability properties of concrete. CIOT30 showed reduced porosity and increased compressive strength, but increased CIM due to the growth of larger pores. CIOT50 presented overall performance close to CIOT0, with low CIM and moderate reduction in mechanical strength. PD analysis by photogrammetry stood out as an effective tool to understand the effects of IOT addition on the concrete microstructure. Adjustments to the additives and granulometry of the IOT are recommended to balance resistance and durability, promoting the sustainable application of this waste in civil construction.

Keywords: Iron ore tailings; concrete; durability; pore distribution; chloride ion migration.

1 INTRODUÇÃO

O RMF é um resíduo da mineração gerado em grandes volumes (Liu *et al.*, 2022). Portanto, seu reaproveitamento é uma frente de pesquisa relevante para a sustentabilidade (Ma *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2023). A substituição de agregados, argilas e cimentos é uma possibilidade de uso do RMF no setor da construção civil (Huang, *et al.*, 2013; Huang, Ranade; Li, 2013; Weishi *et al.*, 2018), tendo em vista a crescente demanda do setor por materiais alternativos (Ramos; Azevedo; *et al.*, 2024). O concreto com RMF em substituição à areia (CRMF), apresenta resultados mecânicos superiores para substituições na faixa de 30% a 50% (Arbili *et al.*, 2022; Shettima *et al.*, 2016a; Yellishetty *et al.*, 2008; Zhang, *et al.*, 2020; Zhao; Fan; Sun, 2014). De modo geral, a análise das propriedades mecânicas concentra-se principalmente na resistência à compressão (Arbili *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022; Mandal; Panda; Nayak, 2023; Ramos; Azevedo; *et al.*, 2024). Embora a resistência à compressão seja a principal característica dos concretos, é importante considerá-la em conjunto com outras características que influenciam a durabilidade e, consequentemente, a resistência desses materiais à longo prazo.

Dentre as propriedades relacionadas à durabilidade, a PIC e a porosidade são parâmetros pouco explorados para CRMF. A PIC avalia a difusão dos íons de cloreto no concreto e indica risco de despassivação (El-Dieb, 2009; Li *et al.,* 2020). A porosidade permite avaliar a suscetibilidade à deterioração causada pela intrusão de elementos deletérios ou pelo carreamento de partículas pela matriz do concreto (ABNT, 2005; Borges *et al.*, 2019; Shettima *et al.*, 2016b). De maneira complementar, a análise de distribuição de poros (DP) por fotogrametria é uma técnica simples que proporciona uma estimativa da alocação de poros e seus tamanhos (França *et al.,* 2023). Este trabalho investigou a durabilidade relacionada à permeabilidade dos CRMF. Foram investigados PIC, índice de vazios (i_{vazios}) e DP de CRMF. Os resultados complementam o estudo apresentado em (Ramos; Mourão; *et al.*, 2024), avaliando outros parâmetros de durabilidade de amostras com as mesmas formulações.

2 METODOLOGIA

Nesta pesquisa produziram-se concretos com diferentes teores de substituição de areia por RMF, sendo: 0%, 30% e 50%. Os concretos foram produzidos conforme NBR 12655 (ABNT, 2015), sendo o traço determinado conforme método da ABCP (ABCP, 2020). Foram produzidos 10 CP de cada traço, totalizando 30 CP. Os materiais utilizados estão apresentados na **Tabela 1**. O procedimento de mistura seguiu o roteiro de adição de agregado graúdo com uma parcela de água, seguido da adição do cimento com outra parcela de água e então a adição do agregado com a parte final da água, finalizando com a inserção dos aditivos.

Tabela 1: Proporções de mistura para produção de concreto (kg/m³)

Traço	CP-II-E-32	Areia	RMF	Brita	Água	Polifuncional	Hiperplastificante
CRMF0	357,44	668,73	-	876,44	152,15	0,36	0,36
CRMF30	357,44	451,00	193,29	876,44	140,24	1,07	0,36
CRMF50	357,44	334,01	334,01	876,44	130,33	1,43	1,07

A redução do volume de água demonstrado na **Tabela 1** para os traços CRMF30 e CRMF50, de 8% e 14% foi compensada com um aumento no volume de polifuncional em 197% e 297% e hiperplastificante em 0% e 197%, respectivamente. As quantidades de água e aditivos foram aplicadas de forma a garantir uma trabalhabilidade que permitisse todos os traços serem produzidos em betoneira e moldados em duas concretagens, garantindo as características do traço e o tempo adequado para moldagem.

Utilizou-se cimento Portland CP-II-E-32, brita 01 e areia de rio média lavada. O RMF, oriundo de uma barragem de mineração em MG, apresentou teor de Fe_2O_3 de 26% e SiO_2 de 70%. A caracterização desses materiais está na **Tabela 2**.

Tabela 2: Caracterização dos materiais

Material	Índice de finura (%)	Massa esp. Aparente (g/cm³)	Módulo de finura	D_{max} (mm)	d_{10} (µm)	d_{50} (µm)	d_{90} (µm)
Cimento	24	2,99	-	-	-	-	-
Areia	-	2,71	2,24	2,00	-	-	-
Brita	-	2,70	6,84	19,10	-	-	-
RMF	-	2,87	-	-	12,66	43,48	79,68

A moldagem e cura foram desenvolvidas conforme a NBR 12655 (ABNT, 2015). Na idade de 28 dias foi feita a análise do i_{vazios} conforme NBR 9778 (ABNT, 2009), utilizando dois CP de cada amostra, utilizando-se corpos de prova completamente saturados e uma balança hidrostática. Para a idade de 180 dias foram realizadas a PIC conforme norma europeia NT BUILD 492 (METHOD, 1999), utilizando seis CP de cada amostra e o equipamento de medição da marca Controls, modelo 58-E5218. A DP foi feita utilizando dois CP de cada amostra a partir da preparação da superfície de corpos de prova (CP) cortados, lixados, pintados de preto e recobertos com material branco e pulverulento (Ø < 75 µm), para que este penetre os poros (REIS et al., 2024). São produzidas então imagens, onde o contraste do fundo escuro com o poro preenchido de branco, permite uma análise computacional para o reconhecimento do diâmetro dos poros da superfície preparada (França *et al.,* 2023; Rabbani; Jamshidi; Salehi, 2014; Reis *et al.*, 2024).

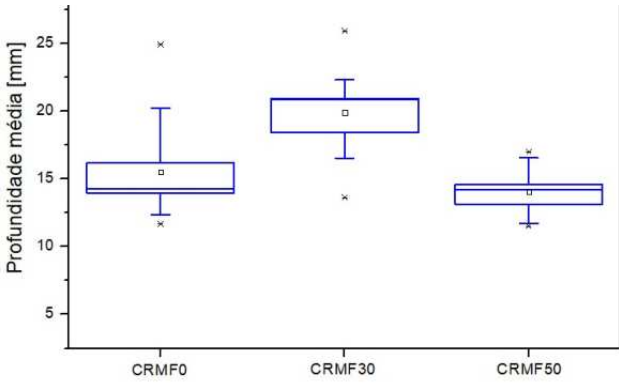
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da PIC observou variação na coloração da região de migração (**Figura 1**), registrada por fotografias para o cálculo da profundidade média (**Figura 2**). Verificou-se que CRMF30 resultou em maior penetração, com a profundidade média alcançando 19,1 mm. Já o CRMF50 apresentou redução na profundidade, sendo esta de 14,1 mm, enquanto o CRMF0 apresentou 15,5 mm.

Figura 1: Exemplo de CP após aspersão de nitrato de prata e medição da região de PIC



Figura 2: Penetração de íons de cloreto



A **Figura 3** apresenta resultados do coeficiente de migração e i_{vazios}. Como consequência da maior penetração de íons cloreto, CRMF30 apresenta maior coeficiente de migração, cerca de 48,4% maior que a amostra referência, enquanto CRMF50 apresenta redução de aproximadamente 7,7%. O ensaio de porosidade revelou que CRMF30 apresentou diminuição do i_{vazios}, reduzindo-o de 13,98 para 11,95. Em contrapartida, CRMF50 mostrou o efeito contrário, com o aumento do i_{vazios} para 14,76.

Figura 3: Coeficiente de migração (x10^{-12}m^2/s) e i_{vazios}

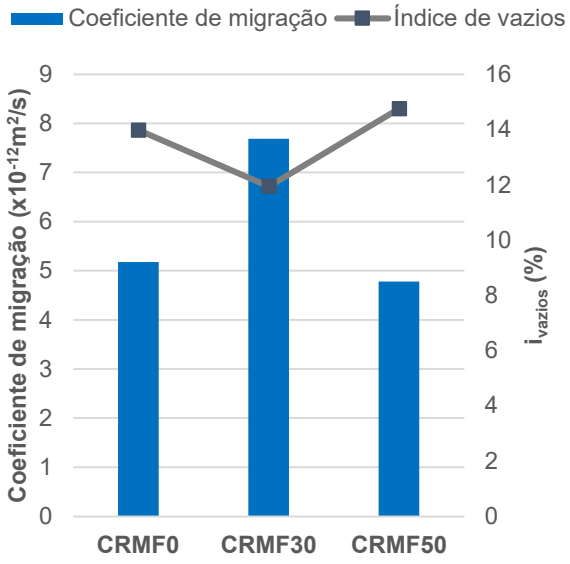
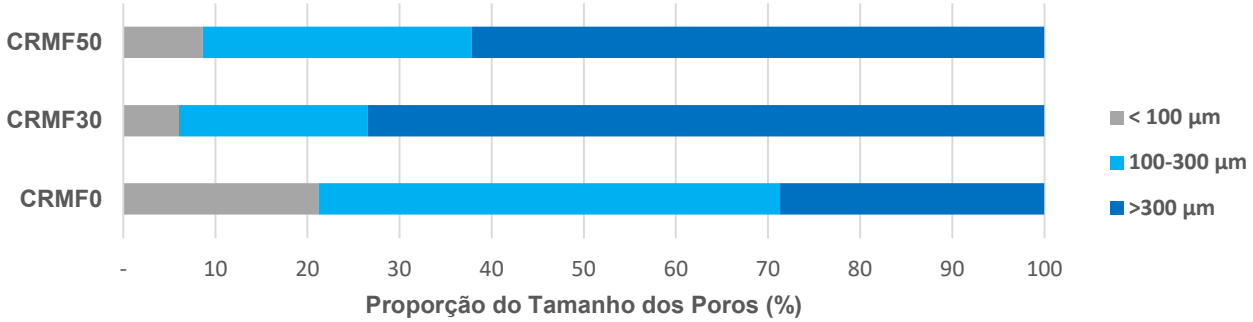


Figura 4: CP com poros destacados – Análise de DP



A **Figura 4** apresenta o CP utilizado na análise de DP. A **Figura 5** apresenta a distribuição média do tamanho dos poros nas amostras testadas. A substituição de areia por RMF resultou no aumento dos poros maiores (>300 µm) e na redução dos poros menores (<50 µm). Essa tendência foi mais acentuada no CRMF30, com aumento de aproximadamente 45% nos poros maiores e redução de cerca de 15% nos poros menores, em comparação à amostra referência. No CRMF50 observou-se aumento de cerca de 33% nos poros maiores e redução de cerca de 13% nos poros menores, também em relação à amostra referência. Verificou-se ainda que a quantidade de poros detectados apresentou redução, a referência apresentou média de 76 mil poros identificados, entre os CP testados, o CRMF30 apresentou média de 56 mil poros e o CRMF50, média de 49 mil poros, redução de 27% e 36%, respectivamente.

Figura 5: Distribuição de Poros



A penetração de íons cloreto no concreto pode induzir o processo de corrosão, levando à deterioração e redução da vida útil de estruturas de concreto (Chen *et al.*, 2018). O ensaio de PIC revelou um aumento na permeabilidade a esses íons para CRMF30, sugerindo que esse nível de substituição prejudica a durabilidade do concreto em relação a esse parâmetro. Em contrapartida, CRMF50 apresentou permeabilidade a íons cloreto similar à amostra de referência. Estes resultados, de uma piora para a substituição de 30%, mas com melhora na resistência à PIC com a maior substituição, 50%, são corroborados por resultados observados na literatura (Arbili *et al.*, 2022; Shettima *et al.*, 2016a; Zhang, W. *et al.*, 2020; Zhang, Z. *et al.*, 2020).

Considerando que a PIC está diretamente relacionada à porosidade do material, seria esperado observar aumento da porosidade para o CRMF30 e redução para o CRMF50. No entanto, os resultados obtidos apresentaram tendência inversa, com redução da porosidade no CRMF30 e aumento no CRMF50. Esses resultados de porosidade estão alinhados com os dados de resistência à compressão reportados em (Ramos; Mourão *et al.*, 2024), conforme **Tabela 3**, onde o CRMF30 demonstrou aumento significativo na resistência à compressão em todas as idades em comparação ao concreto de referência, indicando um concreto mais denso. Da mesma forma, CRMF50 apresentou redução na resistência à compressão aos 28 dias, consistente com um concreto mais poroso.

Tabela 3: Resultados das médias do teste de resistência à compressão por idade (MPa)

Traço	7 dias	28 dias	150 dias
CRMF0	19,26	29,54	27,59
CRMF30	27,56	39,88	41,34
CRMF50	18,55	25,47	27,15

Fonte: (Ramos; Mourão; *et al.*, 2024)

Os poros impactam significativamente as características macroscópicas dos materiais, como deformação, resistência e durabilidade (Wang *et al.*, 2016). Em princípio, melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade dos materiais requer, essencialmente, a diminuição do volume total de poros físicos e a redução da presença de poros maiores (Huang, J. *et al.*, 2021). Neste estudo, o CRMF30 apresentou redução da porosidade, o que indica que o RMF atuou como reforço na matriz de cimento. No entanto, a DP revelou que essa redução da porosidade foi acompanhada do aumento da quantidade de poros maiores, prejudiciais à resistência à penetração de íons cloreto. Embora tenha apresentado resultados melhores de resistência à compressão e de porosidade, o CRMF30 apresenta queda de desempenho em durabilidade relacionada à PIC devido à presença de poros maiores. O CRMF50 apresentou resultados mais próximos ao concreto referência em relação a todos os parâmetros analisados. A discreta redução da resistência mecânica pode ser também relacionada à DP, a qual apresenta aumento dos poros maiores, em comparação ao concreto referência. É importante salientar que a presença do RMF demonstrou reduzir a quantidade total de poros numa correlação direta com a substituição da areia. Contudo a DP demonstrou que essa redução na

quantidade de poros vem acompanhada de uma mudança na distribuição de seus diâmetros, o que impacta nos resultados de i_{vazios} e PIC.

O RMF apresenta granulometria menor que a areia. Até determinado teor, a substituição da areia pelo RMF tende a melhorar o empacotamento dos agregados e a densificação do concreto. Porém, se a taxa de substituição for muito alta, haverá um excesso de finos que não apenas preenchem os vazios, mas também podem gerar regiões de fraqueza na matriz (Ramos; Mourão *et al.*, 2024). O aumento do teor de finos também provoca efeitos negativos na trabalhabilidade da mistura, dificultando o adensamento ou exigindo maior quantidade de água (Recena, 2023), ou aditivo, como foi o caso deste trabalho, onde as pequenas reduções de água, da ordem de até 15% em relação à referência, exigiram uma correção com uso de aditivo aumentado em até quase 300%, para garantia de trabalhabilidade. A redução dos vazios e o aumento da resistência a compressão do CRMF30 sugerem que a substituição de 30% resultou em um empacotamento mais eficiente dos agregados, enquanto a substituição de 50% levou a um excesso de material fino. Ademais, é possível que a adição do RMF tenha deteriorado a trabalhabilidade da mistura e o adensamento do concreto, provocando o aumento de poros maiores. Esse efeito negativo poderia ser aprimorado com ajuste dos aditivos utilizados para melhorar a trabalhabilidade sem adição de água à mistura, além da ampliação da faixa de teores de substituição testados entre 30% e 50% para otimização da curva granulométrica dos agregados.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a PIC de CRMF é significativamente influenciada pelo tamanho e formato dos poros. Mesmo apresentando redução da porosidade, o CRMF30 sofreu aumento da penetração de íons cloreto causada pelo aumento de poros maiores. Por outro lado, o CRMF50, embora apresente resistência à compressão ligeiramente inferior, demonstrou melhor desempenho no teste de PIC. A análise de DP por fotogrametria se mostrou um método simples e eficaz para análise do tamanho e distribuição dos poros, ajudando a esclarecer uma aparente contradição entre os resultados de PIC e porosidade. Ajustes adicionais na formulação, como a incorporação de aditivos específicos e a otimização da granulometria do RMF, poderiam contribuir para a obtenção de concretos mais duráveis e com desempenho adequado tanto em propriedades mecânicas quanto em durabilidade. Esses avanços são fundamentais para promover o uso sustentável do RMF, reduzindo os impactos ambientais e ampliando sua aplicação no setor da construção civil. Reitera-se que, como as propriedades de durabilidade dos concretos apresentam relação intrínseca com a porosidade de sua matriz e que a porosidade, por sua vez, sofre influência direta do fator água-cimento, deve-se considerar que uma variação desse fator pode influenciar nos resultados observados. Sendo assim, sugere-se que sejam realizados experimentos mantendo-se o fator água-cimento, bem como os aditivos para avaliar os impactos disso nas propriedades de durabilidade.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por seu apoio com infraestrutura de equipamentos [Convênio: PCE-00405-24, APQ-01425-22 e RED-00191-23], ao Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET-MG) pelo apoio para participação no evento e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo de produtividade em pesquisa [Convênio: PQ 316846/2023-6], bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ABCP. Método de dosagem de concreto. Disponível em: <https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2020/07/Metodo_Dosagem_Concreto_ABCPonLINE_22.07.2020.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2020.

ABNT. **NBR 12655**, Portland cement concrete - Preparation, control, receipt and acceptance - Procedure. 2015

ABNT. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. 2005

ARBILI, M. M. *et al*. Concrete Made with Iron Ore Tailings as a Fine Aggregate: A Step towards Sustainable Concrete. **Materials**, v. 15, n. 18, 2022.

BORGES, P. H. R. *et al.* Reuse of iron ore tailings in the production of geopolymer mortars. **Revista Escola de Minas**, v.

72, n. 4, p. 581–587, 2019.

CHEN, Y. *et al.* Evaluation and optimization of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) subjected to harsh ocean environment: Towards an application of Layered Double Hydroxides (LDHs). **Construction and Building Materials,** v. 177, p. 51–62, 2018.

EL-DIEB, A. S. Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers. **Materials and Design,** v. 30, n. 10, p. 4286–4292, 2009.

FRANÇA, S. *et al.* The durability of alkali-activated mortars based on sugarcane bagasse ash with different content of Na_2O. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 8, n. 2, 2023.

HUANG, J. et al. Evaluation of pore size distribution and permeability reduction behavior in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 290, 2021.

HUANG, X. *et al.* Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates. **Construction and Building Materials,** v. 44, p. 757–764, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.088>.

HUANG, X.; RANADE, R.; LI, V. C. Feasibility Study of Developing Green ECC Using Iron Ore Tailings Powder as Cement Replacement. **Journal of Materials in Civil Engineering,** v. 25, n. 7, p. 923–931, 2013.

LI, J. *et al.* Durability of ultra-high performance concrete – A review. **Construction and Building Materials**, v. 255, 2020.

LIU, K. *et al.* Effect of iron ore tailings industrial by-product as eco-friendly aggregate on mechanical properties, pore structure, and sulfate attack and dry-wet cycles resistance of concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, 2022.

MA, Z. *et al.* Characterization of sustainable mortar containing high-quality recycled manufactured sand crushed from recycled coarse aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 132, 2022.

MANDAL, R.; PANDA, S. K.; NAYAK, S. Rheology of Concrete: Critical Review, recent Advancements, and future prospectives. **Construction and Building Material**s, v. 392, 2023.

METHOD, N. BUILD 492 1 NT BUILD 492 - Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments. . Finland: [s.n.]. , 1999

RABBANI, A.; JAMSHIDI, S.; SALEHI, S. An automated simple algorithm for realistic pore network extraction from micro-tomography images. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 123, p. 164–171, 2014.

RAMOS, L. T. DA S.; MOURÃO, A. B.; et al. Durabilidade de concretos produzidos com substituição de areia por rejeito de minério de ferro. 2024, Maceió - AL: ANTAC, 2024. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/5921>.

RAMOS, L. T. DA S.; DE AZEVEDO, R. C.; et al. Iron ore tailings as a new product: A review-based analysis of its potential incorporation capacity by the construction sector. **Cleaner Waste System**s, v. 7, 2024.

RECENA, F. A. P. Retração do Concreto. 1. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2023.

REIS, E. D. *et al.* Assessment of physical and mechanical properties of concrete with carbon nanotubes pre-dispersed in cement. **Journal of Building Engineering**, v. 89, 2024.

SHETTIMA, A. U. *et al.* Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 72–79, 2016a.

SHETTIMA, A. U. *et al.* Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials,** v. 120, p. 72–79, 2016b. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816308273>.

WANG, Y. B. *et al.* Experimental study of ultra-high-strength concrete under triaxial compression. **ACI Materials Journal,** v. 113, n. 1, p. 105–112, 2016.

WEISHI, L. *et al.* The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings. **Journal of Cleaner Production**, v. 204, p. 685–692, 2018.

WU, H. *et al.* Micro-macro characterizations of mortar containing construction waste fines as replacement of cement and sand: A comparative study. **Construction and Building Materials,** v. 383, 2023.

YELLISHETTY, M. *et al.* Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 11, p. 1283–1289, 2008.

ZHANG, W. *et al.* Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 260, 2020.

ZHANG, Z. *et al.* Utilization of iron tailings sand as an environmentally friendly alternative to natural river sand in high-strength concrete: Shrinkage characterization and mitigation strategies. **Materials**, v. 13, n. 24, p. 5614, 2020.

ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 540–548, 2014.