XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8938

Potencial uso do rejeito do minério de manganês da região Amazônica como agregado na construção civil

Potential use of manganese ore waste from the Amazon region as aggregate in civil construction

Maurílio Gomes-Pimentel
Universidade Federal do Pará | Belém | Brasil | mauriliogp@ufpa.br
Márcio Rodrigo Nunes de Souza
Instituto Federal do Amapá | Macapá | Brasil | marcio.souza@ifap.edu.br
Danielle Viveiros
Universidade Federal do Pará | Belém | Brasil | dvarquiteta@gmail.com
Euclydes Luiz Pires Coelho
Universidade Federal do Pará | Belém | Brasil | coelhoeuclydes@gmail.com
Paulo Sérgio Mota dos Santos Junior
Universidade Federal do Amapá | Macapá | Brasil | paulosergiomota@unifap.br
Marcelo de Souza Picanço
Universidade Federal do Pará | Belém | Brasil | marcelosp@ufpa.br

Resumo

A crescente demanda por concreto no Brasil tem intensificado a exploração de areia de rio, agravando impactos ambientais e estimulando a busca por materiais alternativos. Entretanto, ainda são escassos estudos sobre o uso de rejeitos de minério de manganês provenientes de barragens de rejeitos como agregado miúdo em concretos. Neste estudo, avaliou-se o uso de rejeito de minério de manganês (MnW) em substituição parcial à areia natural. Foram produzidos concretos com 15, 20, 25 e 30% de MnW. Aos 28 dias, o MnW não influenciou significativamente a resistência à compressão, a resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade. Além disso, reduziu a absorção de água por capilaridade, indicando potencial como agregado miúdo alternativo para concretos mais sustentáveis.

Palavras-chave: Concreto. Agregado miúdo alternativo. Absorção capilar. Resíduos de mineração. Propriedades mecânicas.

Abstract

The growing demand for concrete in Brazil has intensified river sand extraction, increasing environmental impacts and encouraging the search for alternative materials. However, studies on the use of manganese mining waste from tailings dams as fine aggregate in concrete remain scarce. This study evaluated the use of manganese mining waste (MnW) as a partial replacement for natural sand. Concrete mixtures containing 15, 20, 25, and 30% MnW were produced. At 28 days, MnW did not significantly affect the compressive strength, splitting tensile strength, or elastic modulus of the concretes. Furthermore, it reduced capillary water absorption, indicating its potential as an alternative fine aggregate for the production of more sustainable concrete.

Keywords: Concrete. Alternative fine aggregate. Capillary water absorption. Mining residues. Mechanical Properties.

GOMES-PIMENTEL, M.; SOUZA, M. R. N.; VIVEIROS, D.; COELHO, E. L. P.; SANTOS JUNIOR, P. S. M.; PICANÇO, M. S. Potencial uso do rejeito do minério de manganês da região Amazônica como agregado na construção civil. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

INTRODUÇÃO

Os rejeitos de minério de manganês (MnW) representam um passivo inerente às atividades de extração e beneficiamento do minério de manganês (1). No Brasil, destacam-se reservas expressivas desse minério, especialmente na Serra dos Carajás, no estado do Pará, uma das principais regiões produtoras do país (2). Em virtude da ampla utilização do manganês na produção de ligas metálicas, aço, baterias e produtos químicos, grandes volumes de rejeitos sem valor econômico são gerados e frequentemente dispostos em barragens a céu aberto. Embora as barragens de rejeitos sejam projetadas para o armazenamento seguro desses materiais, o acúmulo contínuo de grandes volumes de resíduos constitui um importante desafio ambiental, especialmente pelos riscos potenciais de contaminação decorrentes de falhas ou vazamentos (3). Durante períodos chuvosos, por exemplo, pode ocorrer o carreamento desses materiais para corpos hídricos, ocasionando impactos ambientais negativos. Nesse contexto, o reaproveitamento de rejeitos de manganês na construção civil tem sido investigado como alternativa para reduzir os impactos associados à sua disposição final. Salguero et al. (2014) (4) e Gomes-Pimentel at al. (2022) (5) revelaram a viabilidade da utilização desse resíduo como filler em concretos e argamassas, enquanto Bai et al. (2022) (6) avaliaram o uso de uma areia de rejeito de manganês (*manganese tailing sand*), um material granular gerado durante o beneficiamento do minério, como substituição da areia natural, observando melhorias no desempenho mecânico para teores moderados de substituição. Entretanto, permanecem escassos estudos sobre a utilização de rejeitos de minério de manganês armazenados em barragens de rejeitos, especialmente aqueles provenientes da Amazônia brasileira, como agregado miúdo em concretos.

Paralelamente, a crescente demanda por concreto no Brasil, impulsionada pelos investimentos em infraestrutura (7), tem intensificado o consumo de areia de rio (AR), principal agregado miúdo utilizado na produção de concreto. Contudo, a extração excessiva desse recurso natural tem provocado sérios impactos ambientais, incluindo aprofundamento dos leitos dos rios, redução do nível freático e intrusão salina (8,9). Além disso, as restrições ambientais associadas à atividade extrativa têm contribuído para o aumento significativo do custo da areia natural, afetando diretamente a cadeia produtiva da construção civil (9). Dessa forma, torna-se essencial o desenvolvimento de alternativas sustentáveis e tecnicamente viáveis para substituição parcial da areia de rio.

Diante desse cenário, observa-se uma convergência estratégica entre a indústria mineradora, grande geradora de resíduos, e a construção civil, potencial consumidora desses materiais. Assim, esta pesquisa tem como objetivo avaliar o desempenho físico-mecânico de concretos produzidos com rejeito de minério de manganês (MnW) em substituição parcial à areia de rio (AR). Para isso, foram desenvolvidas misturas contendo substituições de 15, 20, 25 e 30% de AR por MnW. A utilização desse resíduo representa uma oportunidade de reduzir a dependência de recursos naturais, minimizar os impactos ambientais associados à disposição dos rejeitos de mineração e promover soluções mais sustentáveis para a indústria da construção civil.

MATERIAIS E MÉTODOS

BENEFICIAMENTO E PROCESSAMENTO DA MATÉRIA-PRIMA

As amostras de rejeito de minério de manganês (MnW) foram coletadas na barragem de rejeitos localizada na Serra de Buritirama, Pará, região Amazônica (Figura 1A). Após a coleta, o material foi encaminhado ao laboratório, onde foi seco em estufa a (100 ± 5) ºC por 24 h. Posteriormente, o rejeito passou por um processo de beneficiamento por peneiramento em peneira de 4,80 mm, com o objetivo de reter partículas de maiores dimensões e adequar a granulometria do material para utilização como agregado miúdo em concretos, na Figura 1B é revelado aspecto da amostra após o beneficiamento. Após essa etapa, o material foi submetido às análises de caracterização.

Foram avaliadas as propriedades físicas do MnW in natura, juntamente com a areia de rio (AR) e o agregado graúdo (Quadro 1). A caracterização mineralógica do rejeito de minério de manganês (MnW) foi realizada por difração de raios X (DRX), conforme apresentado na Figura 1C. As análises foram conduzidas em um difratômetro de feixe divergente equipado com goniômetro θ–θ e tubo de raios X com radiação Cu-Kα (λ = 1,5406 Å), utilizando filtro de Ni para eliminação da radiação Kβ. As condições de operação foram: tensão de 40 kV, corrente de 40 mA, fenda de divergência de 0,6 mm, fendas de Soller de 2,5° nos feixes incidente e difratado, varredura de 5° a 75° (2θ), passo de 0,02° e tempo de contagem de 0,5 s por passo. A distribuição granulométrica da areia de rio (AR) e do MnW foi determinada conforme a ABNT NBR NM 248, sendo os resultados apresentados na Figura 1D.

Quadro 1: Propriedades físicas dos agregados (Dmáx = diâmetro máximo característico).

Agregados	Massa específica (g/cm³)	Massa unitária (g/cm³)	Índice de vazios (%)	Dmáx (mm)	Módulo de finura
MnW	3,84	1,63	57,55	4,75	2,84
Areia de rio	2,57	1,61	37,00	2,36	1,95
Agregado graúdo	2,63	1,50	–	19,00	6,25

Fonte: os autores.

Para a determinação da composição química, utilizou-se um espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX) sequencial, equipado com tubo cerâmico de raios X, ânodo de ródio (Rh) e potência máxima de 2,4 kW. Os resultados da análise quantitativa indicaram que o MnW é predominantemente composto por óxidos de manganês, apresentando também a presença de SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3, cujos teores combinados foram inferiores a 20% (Quadro 2).

Quadro 2: Composição química do rejeito de minério de manganês (MnW), expressa em porcentagem (%). PF = perda ao fogo.

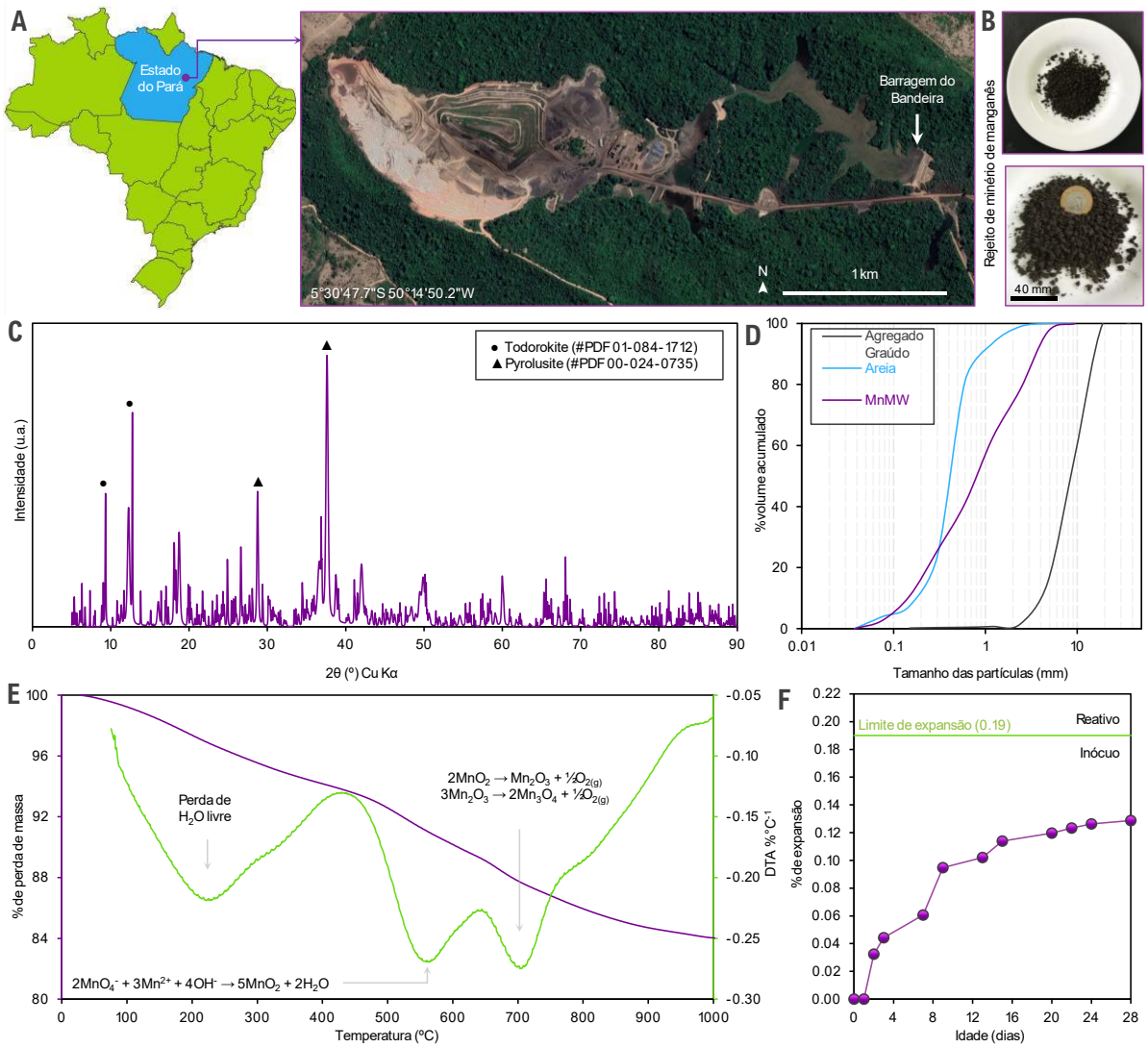
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	TiO_2	BaO	K_2O	NiO	ZnO	PF
6.38	7.25	4.68	60.46	0.35	0.21	0.34	1.46	2.29	0.2	0.37	15.94

Fonte: os autores.

A estabilidade térmica do rejeito de minério de manganês (MnW) foi avaliada por análise termogravimétrica (TG), sendo os resultados apresentados na Figura 1E. Os ensaios foram realizados utilizando aproximadamente 10 mg de amostra,

acondicionada em cadinho de alumina (α-Al_2O_3), sob atmosfera de nitrogênio (50 mL/min), com aquecimento da temperatura ambiente até 1000 ºC à taxa de 10 ºC/min. O potencial de reatividade álcali-agregado do MnW foi avaliado conforme a ABNT NBR 15577, sendo os resultados apresentados na Figura 1F.

Figura 1: Localização do resíduo do manganês e caracterização física, mineralógica, térmica e potencial reativo do resíduo de minério de manganês.



Nota: (A) Localização da área de coleta do resíduo de minério de manganês no Estado do Pará, Brasil, incluindo vista aérea da área de mineração e da barragem de rejeitos. (B) Aspecto visual da amostra de resíduo de minério de manganês utilizada no estudo. (C) Difratograma de raios X (XRD) do resíduo, evidenciando a presença das fases mineralógicas todorokita e pirolusita. (D) Distribuição granulométrica acumulada do resíduo de minério de manganês (MnMW) em comparação com a areia e o agregado graúdo. (E) Curvas termogravimétrica (TG) e derivada termogravimétrica (DTG) do resíduo, destacando eventos associados à perda de água livre e transformações térmicas dos óxidos de manganês. (F) Resultado do ensaio acelerado de expansão, indicando o comportamento inócuo do material frente à reação expansiva. Fonte: em (A) imagem de satélite obtida via Google Earth, nos demais painéis é autoria própria.

DESENVOLVIMENTO DAS MISTURAS E CARACTERIZAÇÃO DO DESEMPENHO DOS CONCRETOS

Foi utilizado cimento Portland CP IV-32 (cimento Portland pozolânico), com massa específica de 3,09 g/cm³. Como agregados, empregaram-se areia de rio (AR) como

agregado miúdo natural e seixo rolado de origem sedimentar fluvial como agregado graúdo, ambos de origem local. A água de amassamento utilizada foi potável, com temperatura média de 28 °C e pH igual a 6.

Foram produzidas cinco misturas de concreto com substituições parciais da areia de rio (AR) por rejeito de minério de manganês (MnW) nos teores de 15, 20, 25 e 30% em massa. As misturas foram denominadas Ref., 15MnW, 20MnW, 25MnW e 30MnW, sendo Ref. correspondente ao concreto de referência, sem incorporação de MnW, e as demais nomenclaturas relacionadas ao respectivo teor de substituição de AR por MnW. O concreto de referência foi dosado com traço 1:1,82:2,71 (cimento:agregado miúdo:agregado graúdo), correspondente a um traço global de 1:4,53, relação água/cimento de 0,58, teor de argamassa de 51% e resistência característica de projeto (F_{ck}) de 30 MPa e abatimento de tronco de cone de 100 mm ± 10 mm.

As propriedades mecânicas dos concretos foram avaliadas aos 28 dias por meio dos ensaios de resistência à compressão axial, conforme a ABNT NBR 5739:2018 (10), utilizando corpos de prova cilíndricos. Também foram realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral, de acordo com a ABNT NBR 7222:2011 (11), e módulo estático de elasticidade, conforme a ABNT NBR 8522-1:2021 (12). A permeabilidade dos concretos foi avaliada pelo ensaio de absorção de água por capilaridade, segundo os procedimentos da ABNT NBR 9779:2012 (13).

Os dados experimentais foram inicialmente analisados quanto à normalidade e homogeneidade das variâncias por meio dos testes de Shapiro–Wilk e Levene, respectivamente. Posteriormente, aplicou-se análise de variância de uma via (ANOVA), seguida do teste de Tukey para comparação múltipla das médias. Diferenças estatisticamente significativas foram consideradas para valores de $p < 0,05$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

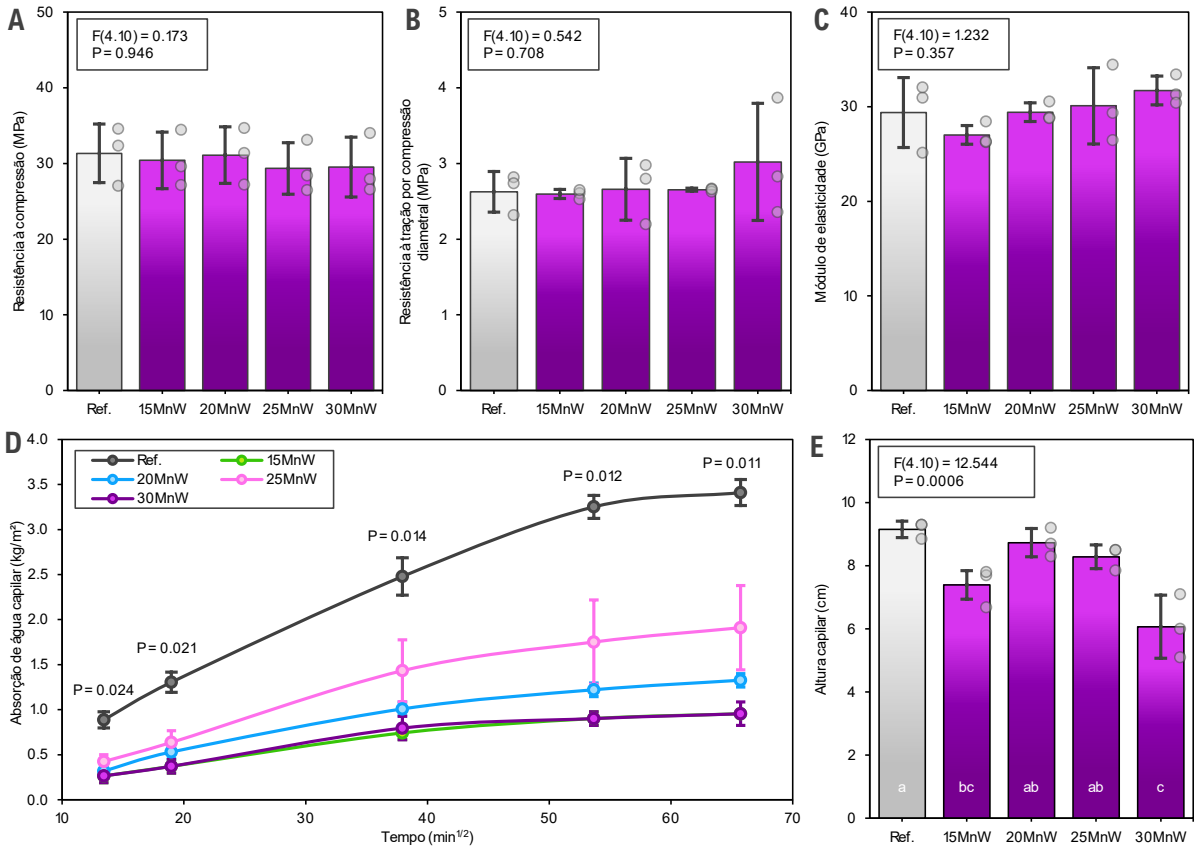
A substituição parcial da areia de rio (AR) por rejeito de minério de manganês (MnW) não promoveu alterações estatisticamente significativas nas propriedades mecânicas dos concretos aos 28 dias, conforme apresentado na Figura 2. Os resultados de resistência à compressão (Figura 2A) indicaram valores próximos entre todas as misturas, com ANOVA evidenciando ausência de diferença significativa ($P = 0,946$). De modo semelhante, a resistência à tração por compressão diametral (Figura 2B) também apresentou comportamento estatisticamente equivalente entre os concretos ($P = 0,708$). Para o módulo de elasticidade (Figura 2C), embora tenha sido observada uma tendência de incremento nas misturas com maiores teores de MnW, especialmente na composição 30MnW, as diferenças também não foram significativas ($P = 0,357$).

A manutenção das propriedades mecânicas mesmo com a substituição parcial da AR pelo MnW sugere que o resíduo apresentou compatibilidade física com a matriz cimentícia, sem comprometer a integridade estrutural do concreto. Esse comportamento pode estar associado à granulometria contínua e ao formato angular das partículas de MnW, que favorecem o empacotamento particulado e a aderência na zona de transição interfacial (ZTI) (14,15). Além disso, a textura superficial rugosa do MnW pode ter contribuído para maior intertravamento mecânico entre agregado

e pasta cimentícia, promovendo transferência eficiente de tensões na matriz do concreto (16,17).

Embora os ganhos mecânicos tenham sido discretos, os resultados revelam que a incorporação de até 30% de MnW não prejudicou o desempenho estrutural dos concretos, indicando viabilidade técnica para substituição parcial da areia natural.

Figura 2: Desempenho mecânico e comportamento de absorção capilar dos concretos contendo resíduo de minério de manganês.



Nota: (A) Resistência à compressão dos concretos produzidos com diferentes teores de resíduo de minério de manganês (MnW). (B) Resistência à tração por compressão diametral. (C) Módulo de elasticidade dos concretos em função do teor de substituição por MnW. (D) Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo para as diferentes formulações, incluindo indicação de diferenças estatisticamente significativas. (E) Altura de ascensão capilar após o ensaio de absorção capilar e ruptura dos concretos, evidenciando a penetração de água nos diferentes sistemas. Valores expressos como média ± desvio padrão. Em (E) Letras minúsculas diferentes dentro das colunas indicam diferenças estatisticamente significativas entre os grupos de concretos para a mesma variável (ANOVA, $p < 0.05$; Tukey). Fonte: Autoria própria.

Já na absorção de água capilar, a substituição parcial da AR por MnW influenciou significativamente a absorção de água por capilaridade dos concretos, conforme apresentado na Figura 2D. Todas as misturas contendo MnW apresentaram menores taxas de absorção capilar em comparação ao concreto de referência ao longo de todo o período analisado. Observa-se que, com o avanço do tempo, o concreto de referência apresentou aumento expressivo da absorção, enquanto os concretos com MnW mantiveram crescimento mais moderado, evidenciando menor permeabilidade da matriz.

As misturas 15MnW e 30MnW apresentaram os menores valores de absorção capilar, indicando maior resistência ao transporte de água por sucção capilar. Esse

comportamento também foi confirmado pelos resultados de altura capilar (Figura 2E), nos quais todas as misturas com MnW apresentaram valores inferiores ao concreto de referência, com diferença estatisticamente significativa (P = 0,006). A composição 30MnW apresentou a menor altura capilar entre todas as formulações.

A redução da absorção capilar pode ser atribuída principalmente ao melhor empacotamento particulado promovido pelo MnW. A distribuição granulométrica contínua e a presença de partículas com diferentes dimensões favoreceram o preenchimento mais eficiente dos vazios entre os agregados e a matriz cimentícia, resultando em uma microestrutura mais densa (18). Como consequência, ocorreu redução da conectividade dos poros e maior dificuldade para o transporte de água no interior do concreto (19). Embora as misturas contendo 20 e 25% de MnW tenham apresentado absorção capilar ligeiramente superior às misturas com 15 e 30% de substituição, essa diferença não caracteriza uma tendência monotônica e pode estar associada à variabilidade experimental inerente aos materiais cimentícios ou a pequenas diferenças na distribuição espacial das partículas do rejeito na matriz. Considerando que todas as misturas contendo MnW apresentaram redução da absorção em relação ao concreto de referência, os resultados sugerem que o efeito predominante do resíduo foi a diminuição da capilaridade, independentemente do teor de substituição avaliado.

Além disso, a morfologia angular e a superfície rugosa das partículas de MnW podem ter favorecido um melhor intertravamento mecânico e um empacotamento mais eficiente do sistema granular, reduzindo a continuidade dos vazios disponíveis para o transporte capilar de água. Esse comportamento é consistente com a menor absorção capilar observada e está de acordo com estudos que demonstram que a forma e a textura superficial dos agregados influenciam significativamente a permeabilidade e o desempenho em serviço dos concretos (20). Considerando que a penetração de água está diretamente associada a mecanismos deletérios, como ingresso de agentes agressivos e processos de deterioração, os resultados obtidos indicam que o uso de MnW pode contribuir positivamente para o desempenho em serviço dos concretos (21).

Apesar dos resultados demonstrarem a viabilidade técnica do uso de MnW como substituição parcial da areia natural, algumas limitações do estudo devem ser consideradas. A avaliação do desempenho foi restrita à idade de 28 dias e a propriedades mecânicas e de absorção capilar, não contemplando análises de durabilidade em longo prazo, como penetração de íons cloreto, carbonatação, resistência a ciclos agressivos ou comportamento frente a ataques químicos. Além disso, embora os resultados indiquem refinamento microestrutural e redução da permeabilidade, não foram realizadas técnicas quantitativas avançadas de caracterização da porosidade, como porosimetria por intrusão de mercúrio ou microtomografia, que poderiam aprofundar a compreensão dos mecanismos associados ao empacotamento particulado promovido pelo MnW. Dessa forma, estudos futuros devem investigar o desempenho em idades avançadas, a durabilidade em condições agressivas e o comportamento da zona de transição interfacial por técnicas microestruturais mais refinadas. Adicionalmente, análises ambientais e de

lixiviação são recomendadas para avaliar a estabilidade química do resíduo e ampliar a aplicação segura e sustentável do MnW em concretos estruturais.

CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o potencial de utilização do rejeito de minério de manganês (MnW), proveniente de barragem de rejeitos da Amazônia brasileira, como substituição parcial da areia de rio na produção de concretos convencionais. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

- A substituição de até 30% da areia natural por MnW, em massa, não comprometeu as propriedades mecânicas dos concretos aos 28 dias, demonstrando a viabilidade técnica do resíduo como agregado miúdo alternativo.
- A incorporação de MnW reduziu a absorção de água por capilaridade e a altura de ascensão capilar em relação ao concreto de referência, indicando menor suscetibilidade ao transporte de água por capilaridade e potencial melhoria do desempenho em serviço.
- Os resultados demonstram que rejeitos de minério de manganês armazenados em barragens de rejeitos podem ser valorizados como agregados para concreto, ampliando as alternativas de reaproveitamento desse passivo ambiental e reduzindo a demanda por areia natural.
- Considerando o desempenho físico-mecânico observado, os concretos produzidos com MnW apresentam potencial para aplicação em elementos estruturais convencionais e artefatos de concreto, desde que atendidos os requisitos de projeto e as exigências normativas específicas de cada aplicação.
- Os resultados deste estudo contribuem para ampliar o conhecimento sobre o aproveitamento de rejeitos de manganês provenientes de barragens de rejeitos da Amazônia brasileira na construção civil, fornecendo subsídios técnicos para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis para a gestão desses resíduos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao técnico Joel Martins, do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (UFPA), pelo auxílio na realização dos ensaios mecânicos. Agradecem também ao Prof. Rômulo Angélica, do Instituto de Geociências da UFPA, pelo suporte nas análises de fluorescência de raios X (FRX); ao Prof. Marcondes Lima da Costa, do Museu de Geociências da UFPA, pelo auxílio nas análises termogravimétricas (TGA); e ao Prof. Cláudio Remédios, do Laboratório de Raios X, Análise Térmica e Dielétrica da UFPA, pelo suporte técnico e científico durante o desenvolvimento das análises experimentais.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, os autores utilizaram o ChatGPT (OpenAI, GPT-5.5) exclusivamente para auxiliar na correção gramatical, no aprimoramento da clareza, da coesão e da fluidez do texto em português. A ferramenta não foi utilizada para geração, interpretação ou análise dos resultados científicos, tampouco para elaboração das conclusões do estudo. Após a utilização da ferramenta, os autores revisaram, editaram e validaram integralmente o conteúdo do manuscrito, assumindo total responsabilidade pela precisão, integridade, originalidade e conteúdo científico do artigo.

REFERÊNCIAS

[1] U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries 2021**. 12201 Sunrise Valley Drive 988 National Center Reston, VA 20192, 2021. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2021>

[2] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_metalicos__rev_2.pdf>

[3] DONG, L.; DENG, S.; WANG, F. Some developments and new insights for environmental sustainability and disaster control of tailings dam. **Journal of Cleaner Production**, v. 269, p. 122270, out. 2020.

[4] SALGUERO, F. et al. Recycling of manganese gangue materials from waste-dumps in the Iberian Pyrite Belt – Application as filler for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 363–368, mar. 2014.

[5] GOMES-PIMENTEL, M. et al. Manganese mining waste as a novel supplementary material in Portland cement. **Materials Letters**, v. 309, p. 131459, 15 fev. 2022.

[6] BAI, M.; LONG, G.; WANG, F. Properties and Microstructural Characteristics of Manganese Tailing Sand Concrete. **Materials**, v. 15, n. 16, p. 5583, 15 ago. 2022.

[7] TAVARES, J. C. Trajetórias da infraestrutura no Brasil. Concepções, operacionalizações e marcos conceituais em perspectiva. **Cadernos Metrópole**, v. 26, n. 60, p. 443–464, maio 2024.

[8] RENTIER, E. S.; CAMMERAAT, L. H. The environmental impacts of river sand mining. **Science of The Total Environment**, v. 838, p. 155877, set. 2022.

[9] BENDIXEN, M. et al. Time is running out for sand. **Nature**, v. 571, n. 7763, p. 29–31, 4 jul. 2019.

[10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739: 2018. Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro© ABNT, , 2018.

[11] ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de JaneiroABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 2011.

[12] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1. Hardened concrete - Determination of elasticity and deformation modulus Part 1: Static modulus by compression**. , 2021.

[13] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779. Mortar**

and hardened concrete — Determination of water absorption by capillarity. , 2012.

[14] CASTRO, A. L. DE; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18–32, mar. 2009.

[15] JAYASIMHA, N.; SUJINI, B.; ANNAPURNA, B. P. A study on durability and strength properties of high strength concrete with partial replacement of iron ore tailings with fine aggregates. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 1922–1929, 2022.

[16] 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, set. 2016.

[17] XU, F. et al. The mechanical properties of tailing recycled aggregate concrete and its resistance to the coupled deterioration of sulfate attack and wetting–drying cycles. **Structures**, v. 27, p. 2208–2216, out. 2020.

[18] CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 2, p. 264–277, fev. 2006.

[19] JACOBSEN, J. et al. Nano-scale hydrogen-bond network improves the durability of greener cements. **Scientific Reports**, v. 3, n. 1, p. 2667, 16 set. 2013.

[20] SCRIVENER, K. L.; CRUMBIE, A. K.; LAUGESEN, P. The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete. **Interface Science**, v. 12, n. 4, p. 411–421, out. 2004.

[21] WANG, L.; ZHANG, Q. Investigation on water absorption in concrete after subjected to compressive fatigue loading. **Construction and Building Materials**, v. 299, p. 123897, set. 2021.