

Produção de argamassa ecológica de alto desempenho com adição de rejeito de minério de ferro.

Production of eco-friendly high-performance mortar with the addition of iron ore tailings.

Abner Araújo Fajardo, Mestre em Construção Civil, UFMG

Fajardo.aabner@gmail.com

Sílvia Roberta Souza, Mestre em Construção Civil, UFMG

silvia.rsouza@yahoo.com

Jordana Gonçalves de Macedo, Graduanda em Engenharia Civil, UFMG

jordanagdmacedo@gmail.com

Vinicius Ferreira Lanna, Graduando em Engenharia Civil, UFMG

vferreiralanna@gmail.com

White José dos Santos, Ph.D em Construção Civil, UFMG

whitejsantos@gmail.com

Resumo

Este estudo investigou o desempenho mecânico e a durabilidade de argamassas estruturais de alto desempenho com adição mineral de rejeitos de minério de ferro (IOT) aos 112 dias de idade. As argamassas contendo IOT demonstraram porosidades inferiores a 2,1%, alta resistência à compressão (> 95 MPa) e a flexão (37% superior) e redução de 4,55% nas emissões de CO₂. Conclui-se que a incorporação de IOTs em argamassas proporciona melhorias nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade, além de ser ecologicamente mais sustentável.

Palavras-chave: Rejeito de minério de ferro; argamassa de alto desempenho; argamassa ecológica

Abstract

This study investigated the mechanical performance and durability of high-performance structural mortars with mineral admixture of iron ore tailings (IOT) at 112 days of age. Mortars containing IOT showed porosities lower than 2.1%, high compressive strength (> 95 MPa) and flexural strength (37% higher) and a reduction of 4.55% in CO₂ emissions. It is concluded that the incorporation of IOTs in mortars provides improvements in physical, mechanical and durability properties, in admixture to being ecologically more sustainable.

Keywords: Iron ore tailings; High performance mortar; Eco-friendly mortar

1. Introdução

O Brasil, como o segundo maior produtor mundial de minério de ferro, detém uma significativa importância econômica, ficando atrás somente da Austrália. Em 2022, a produção brasileira totalizou 410 milhões de toneladas em todo o território nacional, a Austrália produziu cerca de 880 milhões de toneladas, e a China 380 milhões de toneladas conforme dados do [1]. O setor de mineração gerou 204 mil empregos diretos e 2,25 milhões de empregos ao longo de toda a cadeia produtiva e do mercado [2]. O beneficiamento do minério de ferro gera um subproduto conhecido como rejeito de minério de ferro, cujo descarte acarreta sérios riscos para a população local e causa diversos impactos ambientais [3]. Toneladas de rejeitos são depositadas em barragens ou empilhadas, desencadeando processos de lixiviação e contaminando as águas superficiais, subterrâneas e o solo com metais pesados presentes [4;5]. Nos últimos anos, o Brasil enfrentou duas tragédias decorrentes do rompimento de barragens, ocorridas nas cidades de Mariana (em 2015) e Brumadinho (em 2019), ambas situadas no Estado de Minas Gerais.

A construção civil surge como uma alternativa viável para a destinação do rejeito de minério de ferro, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais. Diversas pesquisas têm sido conduzidas para explorar a aplicação do rejeito de minério de ferro na produção de diferentes subprodutos utilizados na construção civil, como sua incorporação em asfalto ou pavers [6], tintas e materiais coloridos [7], substituindo agregados [8], compósitos cimentícios [9 -11]. Utilizar esses resíduos como adição às misturas de cimento tende a beneficiar a sociedade do ponto de vista ambiental, uma vez que a produção do cimento Portland é responsável pela emissão de CO₂, [10;12]. Deste modo, o objetivo geral deste trabalho é estudar o comportamento de argamassas estruturais de alto desempenho, com uso de adição mineral dos rejeitos de minério de ferro *in natura* na idade de 112 dias.

2. Materiais e métodos

Os materiais utilizados foram: cimento CPV-ARI; areia normal fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT); Sílica ativa da marca Tecnosil (% SiO₂ > 90%, superfície específica: 20.000 m²/kg, massa específica: 2220 kg/m³, diâmetro da partícula 200 nm⁻¹); aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, de pega normal MC-PowerFlow 4001 da marca MC-Bauchemie (densidade 1,12 kg/m³). O rejeito de mineração de ferro (IOT - Itabirito de Minério de Ferro) no estado *in natura*, obtidos de uma mina localizada no quadrilátero ferrífero em Minas Gerais. Os traços das argamassas estão na tabela 1.

Tabela 1: Traços das amostras em volume

Argamassa	Cimento	Areia	Sílica Ativa	Rejeito de minério de ferro	Água (a/c)	Superplastificante
REF	1	3	25%	0%	0,375	2%
IOT	1	3	25%	40%	0,375	3%
Consumo por m ³						
REF	515	1545	129	0	193	10
IOT	489	1467	122	196	183	15

Após a definição do traço dos materiais secos, o teor de água e aditivo superplastificante foram determinados. Para isso, foi utilizado o espalhamento na *Flow table* [13].

Utilizou-se a betoneira para misturar os corpos de prova, em seguida utilizou-se a mesa vibratória para o adensamento. Para o processo de cura, deixou os corpos de prova submerso em água. Após a cura, foram determinadas:

- a) a resistência à compressão (5 corpos de prova cúbicos - 5x5x5 cm) [14], máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL20000, com velocidade de carregamento de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s;
- b) resistência à tração na flexão (3 corpos de prova prismáticos - 4x4x16 cm) [15], máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL20000, com velocidade de carregamento de $(1,00 \pm 0,15)$ MPa/s.;
- c) porosidade [16] a água com uso de balança com precisão de 0,01 g;
- d) resistividade elétrica volumétrica e superficial (corpo de prova cilíndrico de Ø10x20 cm) [17 -18], utilizou-se o equipamento Resipod, que exhibe os valores em kΩcm. O valor obtido do display do aparelho deve ser dividido por $2\pi a$ (onde “a” é o espaçamento das sondas, ou 3.8 cm, ou 5.0 cm). O corpo de prova ficou submerso em água por um período de 72 horas antes da realização do ensaio. O equipamento utilizado foi o Resipod da PROCEQ, cuja precisão é de $(\pm 0,2$ a $\pm 2,0$ kWcm);
- e) para a avaliação dos poros por meio do MEV, moldou-se um corpo de prova cúbico (5x5x5 cm) pastas. Após a cura, os corpos de prova foram cortados em serra de disco diamantado, extraindo-se da região interna amostras de dimensões aproximadamente (1x1x1) cm para fazer as imagens de MEV-EDS.

Para a análise quantitativa dos poros em imagens de MEV, três fragmentos foram coletados em diferentes locais para cada tipo de argamassa e pasta, totalizando 20 imagens por tipo. A análise foi conduzida utilizando o software Image J e escalas de cinza, variando de 0 a 255, onde valores mais próximos de 0 correspondem à cor preta e valores mais próximos de 255 à cor branca. A determinação dos poros foi baseada na proximidade com a faixa de 0, considerando a imagem como um todo e levando em conta a contribuição do agregado para a porcentagem total de poros.

3. Resultados

A análise granulométrica do rejeito, da sílica ativa e do cimento (conforme mostrado na Tabela 2) revela que o rejeito é mais fino do que o cimento, conforme esperado. No entanto, acredita-se que possa haver uma faixa ainda mais fina (com partículas menores que 1 µm) que não seja detectável pelo granulômetro. O rejeito de minério de ferro apresenta como principais fases cristalinas: quartzo, goethita, hematita e magnetita.

Tabela 2: Parâmetros granulométricos dos materiais.

Decil	Amostra		
	IOT	CP-V	Sílica Ativa
D ₉₀	12,1	28,7	24,41
D ₅₀	2,9	8,3	13,74
D ₁₀	0,4	0,7	3,76
Médio	4,7	11,8	13,92

Ao avaliar as amostras com 112 dias de cura, Figura 1, a amostra de IOT registrou um resultado de 95,42 MPa, enquanto a amostra de REF alcançou o valor de 94,25 MPa. A amostra de IOT apresentou um aumento de desempenho de 3,22% em relação à amostra REF. Além

disso, o resultado da amostra de IOT destacou-se em comparação com outros estudos que analisaram com 91 dias, como os 66,00 MPa de [19] e os 62,00 MPa de [20]. Observa-se que na análise da resistência à tração na flexão, o IOT apresentou um valor de 8,26 MPa, enquanto a referência registrou 6,21 MPa. Notavelmente, a argamassa de rejeito exibiu um desempenho 33% superior em relação à argamassa de referência.

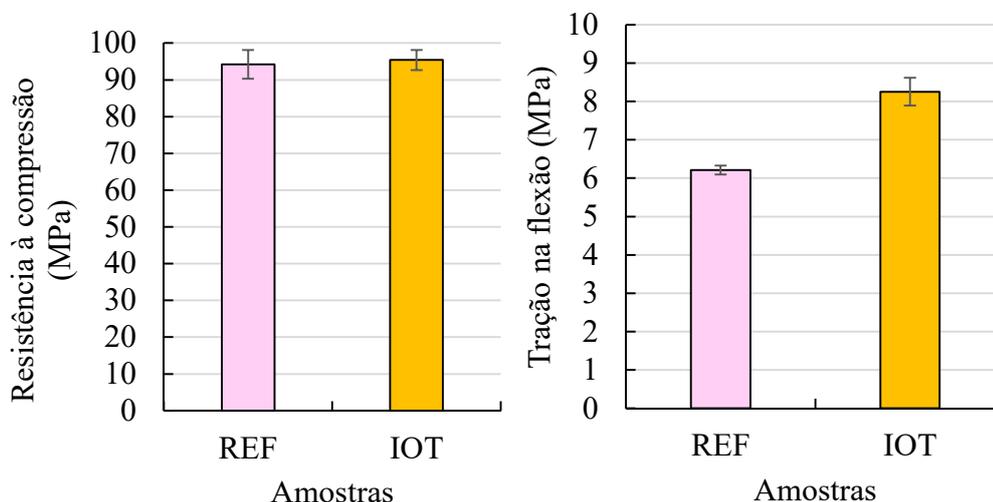


Figura 1: Resultados da compressão e tração na flexão das argamassas. Fonte: elaborado pelos autores.

As argamassas ficaram submersa em água até a realização dos ensaios e foi utilizado o equipamento Resipod, basendo no método de quatro pontos, também conhecido como método Wenner [21-22]. A resistividade elétrica, sendo um ensaio não destrutivo, pode ser utilizado como método para avaliar a qualidade e durabilidade de materiais [23]. No caso da resistividade elétrica superficial (Figura 2), a argamassa de IOT apresentou um valor de 833 k Ω .cm, enquanto a argamassa de REF registrou 680 k Ω .cm. Portanto, a argamassa de IOT exibiu um valor 22,55% superior ao da argamassa de REF. As argamassas alcançaram em todas as amostras o limite máximo de medição do aparelho para resistividade elétrica volumétrica (Figura 2), registrando 1.973 Ω .m. Não é possível identificar qual argamassa apresentou o maior valor nem determinar esse valor. A resistividade elétrica volumétrica tem uma grande importância para a avaliação da sua durabilidade [24].

Os resultados na Figura 3 indicam que a amostra de REF registrou a maior porosidade aberta, com 2,12%, enquanto o IOT atingiu 1,64%. Consequentemente, a argamassa de IOT apresentou um desempenho superior, mostrando uma redução de 22,52% em comparação com a argamassa de REF. Nas análises de poros quantitativos, realizadas por MEV e tratamento de imagens binárias, os resultados das argamassas mostraram valores semelhantes à porosidade aberta: 1,68% para o REF e 1,51% para o IOT. Portanto, a argamassa de IOT registrou uma diminuição de 10,12% em relação ao REF. Quanto aos resultados das pastas, também houve proximidade nos valores de porosidade aberta e nos poros quantitativos por MEV das argamassas. A argamassa de IOT atingiu 2,02%, enquanto a de REF registrou 1,65%, resultando em um aumento de 22,42% para a argamassa de IOT em relação à de REF.

As imagens da microestrutura (Figura 4) sustentam os resultados mecânicos e os indicadores de durabilidade, uma vez que revelam um baixo teor de porosidade. Isso resulta em uma microestrutura compacta que, por sua vez, aumenta as propriedades mecânicas e de durabilidade.

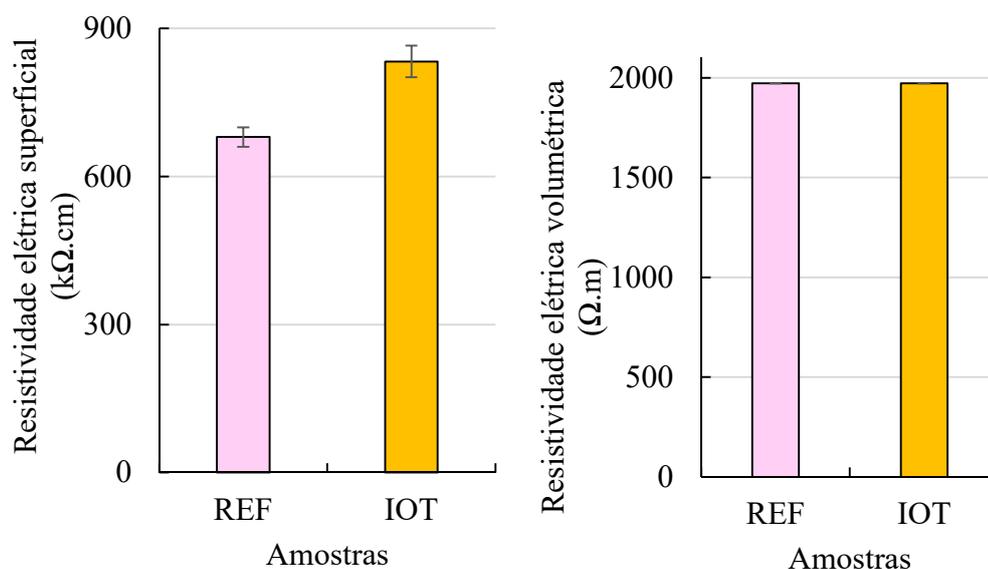


Figura 2: Resultados da resistividade elétrica volumétrica e superficial. Fonte: elaborado pelos autores.

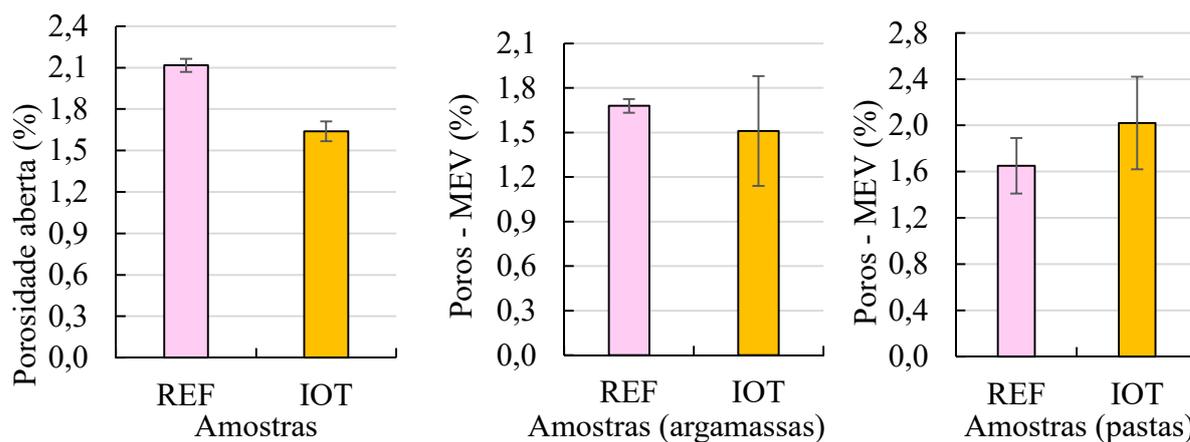


Figura 3: Resultados da porosidade aberta, poros por meio do MEV das argamassas e pastas. Fonte: elaborado pelos autores.

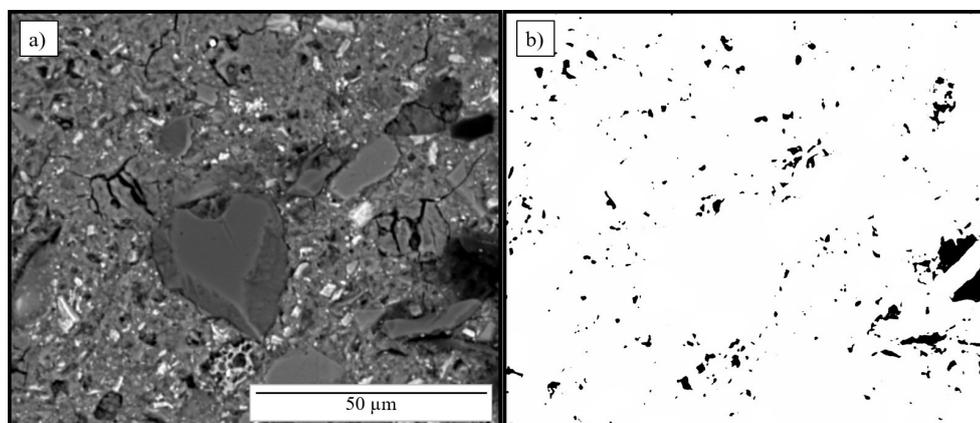


Figura 4: Imagens de (a) MEV-BSE e (b) poros em imagem binária da pasta de rejeito de minério de ferro. Fonte: elaborado pelos autores.

O equivalente de dióxido de carbono ($\text{CO}_2\text{-eq}$) em relação a 1 m^3 de compósito cimentício (argamassa) foi calculado para cada composição investigada nos compósitos deste estudo, juntamente com algumas referências que conduziram estudos similares/complementares [25]. Multiplicando a quantidade de cada componente pela sua emissão de CO_2 equivalente por quilograma de material, é possível obter um índice correspondente. Assim sendo, observa-se na Figura 5, que a argamassa de rejeito de minério de ferro emitiu $460,66 \text{ CO}_2\text{-eq/Kg}$ sendo menor do que a argamassa de REF, $482,28 \text{ CO}_2\text{-eq/Kg}$. Assim sendo, o rejeito emitiu 4,69% menos de CO_2 em relação a argamassa de referência.

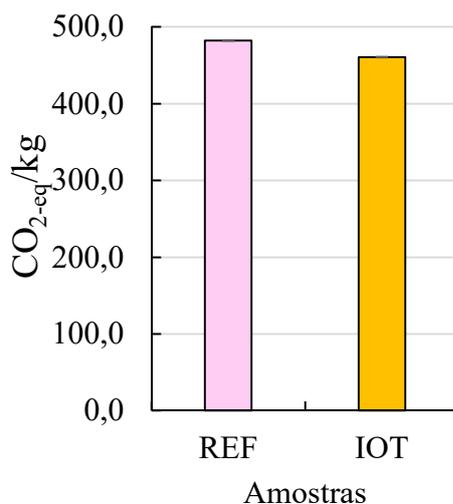


Figura 5: Gráfico de emissão de CO_2 das argamassas

4. Análises dos Resultados

O aumento da resistência à compressão da amostra de IOT, 3,22%, neste estudo pode ser atribuído ao empacotamento de partículas e à granulometria fina do rejeito de minério de ferro, que provavelmente contribuíram para a formação de pontos de nucleação e para a promoção das reações da sílica ativa e do cimento. O aumento de 33% na resistência à flexão à tração na argamassa de IOT em relação à argamassa de REF pode ser atribuído à melhor aderência das partículas às pastas de cimento. Influenciada positivamente pela sílica ativa como material pozolânico, juntamente com a nucleação facilitada pela incorporação de IOT, potencializando a hidratação dos compósitos cimentícios. Essa melhoria também pode ser correlacionada ao eficiente empacotamento das partículas do rejeito de minério de ferro, favorecido por uma baixa relação água/cimento (0,375).

Os valores de resistividade elétrica volumétrica são analisados por faixas de níveis de penetração de cloretos, sendo o valor de $1.973 \Omega \cdot \text{m}$ se encontrando na faixa de muito baixa para penetração de cloretos [26]. Para a resistividade elétrica superficial, a argamassa de IOT, teve um aumento de 22,55% e estando na faixa de potencial de corrosão insignificante, de acordo com [27]. O fator a/c de 0,375, pode ter contribuído positivamente para o resultado da resistividade elétrica na pesquisa atual. Além disso, a presença de 25% de sílica ativa pode ter sido outro fator que resultou em uma resistividade elevada. A sílica ativa é conhecida por induzir refinamento dos poros e redução da permeabilidade do concreto, o que pode ter influenciado nesse resultado.

Na análise de porosidade aberta, verifica-se que produziu uma argamassa com alta densificação e porosidade reduzida. Além disso, há indicações de que a presença de adições de IOT, reduziu em 22,52% a porosidade e gerou pontos de nucleação e efeito de preenchimento, acelerando as reações químicas de hidratação do cimento e as pozolânicas da sílica ativa ao longo do tempo. Isso leva ao refinamento dos poros e à redução da porosidade em idades mais avançadas [10-12]. Para a análise de quantitativos de poros das argamassas por meio de tratamento de imagens de MEV, a redução da quantidade de poros no rejeito, 10,12%, pode ser atribuída às suas partículas finas, que promovem um empacotamento mais denso das partículas. Isso, por sua vez, facilita a atuação das partículas como pontos de nucleação para a precipitação e crescimento dos cristais durante o processo de cimentação das partículas de rejeito de minério de ferro. Esse fenômeno está alinhado com a análise da porosidade aberta. Para a análise do quantitativo de poros das pastas, o rejeito apresentou um valor baixo, entretanto, 22,42% superior a argamassa REF. Um motivo para o aumento do quantitativo de poros da pasta de IOT, pode ser devido ao erro de análises das imagens e tratamentos pelo software Image J. Mas em ambos os casos, as pastas apresentaram uma baixa porosidade.

Para a emissão de CO₂ considerou para o rejeito de minério de ferro, 0.004587 kg de CO₂-eq/kg [23-26], para a sílica ativa 0.00031 kg de CO₂-eq/kg, água 0.0003 kg de CO₂-eq/kg e superplastificante 0.75 kg de CO₂-eq/kg, agregado fino 0.014 kg de CO₂-eq/kg [23]. Para a emissão de CO₂ do rejeito de minério de ferro considerou-se o processo de transporte, uma vez que é *in natura*, não precisando do processo de moagem. Assim sendo, a argamassa de IOT reduziu em 4,69% da emissão de CO₂, fazendo com que a argamassa de rejeito de minério de ferro seja mais ecológica e prejudicando menos o meio ambiente. Na tabela 3 é possível verificar todos os resultados.

Tabela 3: Resumo dos resultados das análises das argamassas

Análises	Argamassas	
	REF	IOT
Resistência à compressão	94,25 MPa	95,42 MPa
Resistência à tração na flexão	6,21 MPa	8,26 MPa
Resistividade elétrica superficial	680 kΩ.cm	833 kΩ.cm
Resistividade elétrica volumétrica	1973 Ω.m	1973 Ω.m
Porosidade aberta	2,12 %	1,64 %
Poros – MEV argamassa	1,68 %	1,51 %
Poros – MEV pastas	1,65 %	2,02 %
Emissão de CO ₂	482,28 CO ₂ -eq/kg	460,66 CO ₂ -eq/kg

5. Conclusão

Este estudo apresentou que ao utilizar o rejeito de minério de ferro *in natura* como adição mineral, por meio do empacotamento de partículas pode gerar argamassas estruturais de alto desempenho e ecológico. Estas melhorias incluem a maximização das resistências à compressão (95,42 MPa) e à tração na flexão (8,26 MPa), além do aumento da durabilidade. Após 112 dias de cura, as propriedades mecânicas revelaram valores elevados de resistividade elétrica superficial (833 kΩ.cm) e volumétrica (1.973 Ω.m). Esses resultados são atribuídos à melhor

ancoragem das partículas nas pastas de cimento, influenciada pela sílica ativa como material pozolânico, à nucleação promovida pela adição de IOT, que potencializa a hidratação dos compostos cimentícios, ao empacotamento mais eficiente das partículas do rejeito de minério de ferro e a uma baixa relação água/cimento (0,375).

As características dos materiais e o processo de empacotamento gerou argamassas com alta densificação e reduzida porosidade (menor que 2,2% nas três análises diferentes de porosidade - porosidade aberta, quantitativos de poros por meio de MEV da argamassa e pasta), uma vez que os valores foram bem baixos. A argamassa de IOT reduziu em 4,69% da emissão de CO₂, fazendo com que a argamassa de rejeito de minério de ferro cause menos impactos negativos ao ecossistema. A principal limitação encontrada foi o baixo teor de a/c, de 0,375, pois é necessário um bom superplastificante para que a argamassa adquira a consistência adequada. Outro fator importante é controlar bem a temperatura e a umidade durante a produção das argamassas, para garantir a eficiência do baixo teor de a/c.

Foi constatado que a inclusão de rejeitos de minério de ferro *in natura* possibilitou a produção de argamassas com bom desempenho mecânico e durabilidade excepcional. Isso evidencia a viabilidade de alcançar elevada resistência em argamassas por meio dessa adição mineral. Assim como também é possível reduzir a emissão de CO₂ para a produção destas argamassas, fazendo com que este produto seja mais ecológico e causando menos impacto ao meio ambiente. Como se utiliza o rejeito *in natura*, não são necessários tratamentos complexos, o que facilita sua produção para uso no setor da construção civil.

As seguintes sugestões são apresentadas para a continuidade do trabalho, visando avaliar o impacto de certos fatores em argamassas estruturais de alto desempenho com a adição de rejeito de minério de ferro *in natura*. Estudo das propriedades mecânicas e indicadores de durabilidade em diferentes processos de cura. Avaliação das propriedades mecânicas e durabilidade em idades mais avançadas, 180 dias e 365 dias.

Referências

- [1] UNITED STATE GEOLOGICAL SURVEY (USGS). National Minerals Information Center – Mineral Commodity Summaries, 2023. Disponível em: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2023>. Acesso em: 29/05/2023.
- [2] INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. Relatório Anual de Atividades, Janeiro à Dezembro de 2022a. Disponível em: <https://ibram.org.br/relatorios-de-atividades/>. Acesso em 29/05/2023.
- [3] CORDEIRO, L. C. A. Caracterização de rejeito de beneficiamento de minério de ferro em faixas ultrafinas antes e após tratamento térmico. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 117 p., 2014.
- [4] LUO, L.; LI, K.; FU, W. et al. Preparation, characteristics and mechanisms of the composite sintered bricks produced from shale, sewage sludge, coal gangue powder and iron ore tailings. **Construction and Building Materials**. v. 232, p. 117250, jan. 2020.
- [5] CANCIO, A, S.; COELHO, J, R, C.; DUARTE, M. et al. Study of the Reuse of Iron Ore Tailing in Cementitious Compounds. **International Journal of Science and Engineering Investigations**. v. 7, n. 77, p. 77, jun. 2018.