INFLUÊNCIA DO CIMENTO DE BAIXO CARBONO NO EMPILHAMENTO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

Influence of low-carbon cement on the stacking of iron ore tailings

Ademir Machado Ribeiro Filho
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | ademir.filho@aluno.ufop.edu.br

Agnes Crystine da Silva Gomes
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | agnes.gomes@aluno.ufop.edu.br

Jessica Fernandes Cotta
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | jessica.cotta@aluno.ufop.edu.br

Ricardo André Fiorotti Peixoto
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | ricardofiorotti@ufop.edu.br

Resumo

As atividades mineradoras geram grandes volumes de rejeitos que demandam disposição segura e ambientalmente adequada. Tradicionalmente armazenados em barragens, esses materiais impõem desafios frente às normas de segurança e à necessidade de soluções sustentáveis. O empilhamento a seco tem se destacado como alternativa segura para reduzir riscos associados às barragens. Neste contexto, a incorporação de materiais cimentantes desponta como solução eficaz para melhorar a estabilidade das pilhas de rejeito. Este estudo investiga a influência do cimento de baixo carbono (CBC), formulado parcialmente com escória de aciaria, na estabilização de pilhas de rejeito de minério de ferro. Os resultados indicam que a composição B40C60 proporciona maior estabilidade às pilhas, com resistências de 411,88 KPa e 392,27 KPa. Além de demonstrar seu potencial na estabilização dessas estruturas, o uso do CBC contribui para a redução das emissões de carbono na produção de cimento e para a valorização de subprodutos industriais.

Palavras-chave: Rejeitos de Mineração; Empilhamento de Rejeito; Cimento de Baixo Carbono; Estabilização.

ABSTRACT

Mining activities generate large volumes of waste that require safe and environmentally suitable disposal. Traditionally stored in dams, these materials pose challenges regarding safety standards and the need for sustainable solutions. Dry stacking has emerged as a safe alternative to reduce risks associated with dams. In this context, the incorporation of cementitious materials has proven to be an effective solution to improve the stability of waste piles. This study investigates the influence of low-carbon cement (LCC), partially formulated with steel slag, on the stabilization of iron ore tailings. The results indicate that the B40C60 composition provides greater stability to the piles, achieving resistances of 411.88 KPa and 392.27 KPa. In addition to demonstrating its potential for stabilizing these structures, the use of LCC contributes to the reduction of carbon emissions in cement production and promotes the valorization of industrial by-products.

Keywords: Mining Waste; Waste Stacking; Low Carbon Cement; Stabilization.

1 INTRODUÇÃO

A mineração é um setor essencial para a economia brasileira, contribuindo com 2,5% e 4% do PIB entre 2000 e 2019 (IPEA, 2021). No primeiro trimestre de 2024, o setor faturou R$ 68 bilhões, com a produção de minério de ferro correspondendo a 64,2% desse valor (IBRAM, 2024). Entretanto, a geração de rejeitos impõe desafios ambientais, impulsionando a busca por métodos alternativos de disposição, como o empilhamento a seco. Porém a umidade excessiva e a alta plasticidade podem comprometer a estabilidade das pilhas, favorecendo rupturas por liquefação (Souza, 2020).

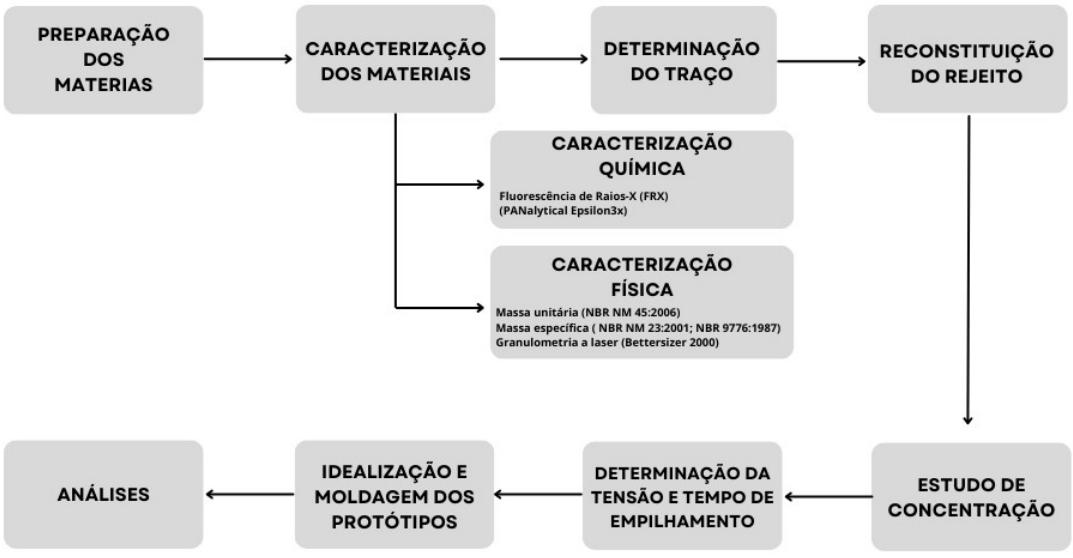
A estabilização química, tradicionalmente realizada com cimento Portland, melhora a resistência e durabilidade das pilhas (Consoli *et al.,* 2022; Oliveira-Filho; Abrão, 2015). No entanto, devido aos impactos ambientais da produção de cimento, a substituição por materiais alternativos tem sido amplamente estudada. Nesse contexto, a escória de aciaria, quando hidratada, surge como uma alternativa promissora, pois apresenta propriedades aglomerantes semelhantes ao cimento Portland que além de melhorar o desempenho mecânico, o uso desses materiais contribui para a redução das emissões de carbono, promovendo sustentabilidade (Gumieri, 2002; Wang, Yang; Yan, 2013; Qiang; Peiyu, 2010).

Diante disso, este estudo avalia a influência do cimento de baixo carbono (CBC), composto por cimento Portland CP-V e escória de aciaria (BOF), na estabilização de rejeitos. A pesquisa investiga a incorporação do CBC em pilhas de rejeito de barragem de minério de ferro (RBMF) e rejeito arenoso de minério de ferro (RAMF), analisando a interação entre os materiais e seu potencial estabilizador. A metodologia inclui análises quantitativas, como desempenho mecânico, e qualitativas, observações visuais quanto a textura, formação de fissuras e padrões de ruptura.

2 METODOLOGIA

As etapas do programa experimental estão resumidas de forma esquemática na Figura 1.

Figura 1: Fluxograma de etapas do estudo



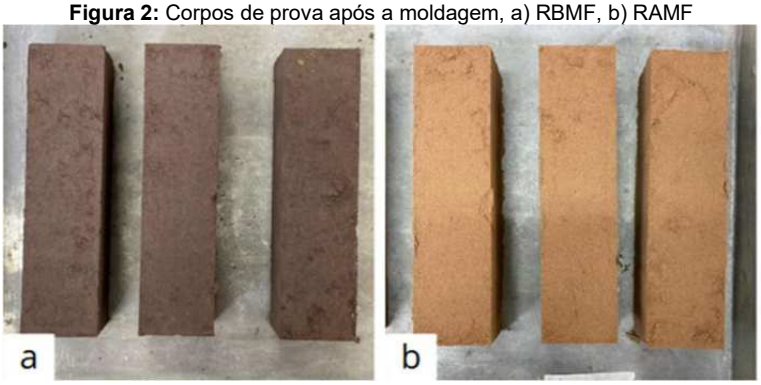
2.1 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

O cimento de baixo carbono (CBC) foi desenvolvido a partir de cimento Portland CP-V, escória de aciaria (BOF) e cloreto de sódio (NaCl) como acelerador de pega. A escória, com massa específica de 3,12 g/cm³, foi armazenada no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC²) da UFOP, onde permaneceu exposta ao intemperismo por 12 anos para reduzir componentes expansivos (Diniz *et al.,* 2017; Silva *et al.,* 2016). Após intemperização, a escória foi seca a (105 ± 5) °C, separada magneticamente (1500 Gauss), triturada (Retsch BB 200) e moída em moinho de esferas (MARCONI MA500) até partículas menores que 4,75 mm. Para as argamassas, utilizou-se areia de rio conforme a NBR 7214 (ABNT, 2015). Os protótipos foram elaborados com RBMF e RAMF, materiais provenientes do quadrilátero ferrífero, com massas específicas de 3,20 g/cm³ e 2,76 g/cm³, respectivamente.

As etapas de preparação e uso do rejeito consitem:

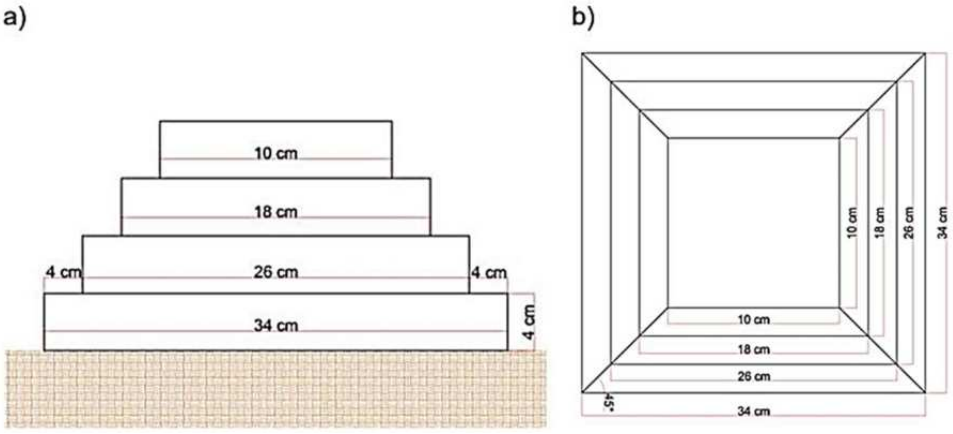
- **Reconstituição do rejeito:** As etapas de reconstituição envolveram: (i) secagem em estufa a 100°C até constância de massa, (ii) destorroamento e (iii) ajuste da proporção sólido-líquido. O RBMF foi misturado com água para alcançar um teor de 70%-30% em massa, enquanto o RAMF foi ajustado para 80%-20%
- **Estudo de concentração:** Foi realizado um estudo para determinar a concentração ótima de CBC, com teores de 0% (REF), 2%, 4% e 16% da massa de sólidos dos rejeitos, e adição de 1% de NaCl como acelerador (Matias, 2022). Corpos de prova prismáticos (4×4×16 cm) foram moldados em duas camadas, cada uma adensada com 30 golpes (NBR 13279:2005). Após moldagem, os corpos foram curados ao ar por 2h, 4h, 8h e 24h, e as medições foram feitas em triplicata.
- **Tensão e tempo de empilhamento:** A tensão de empilhamento, baseada nas dimensões das camadas (Ferreira, 2022), indica a carga necessária para suportar a camada seguinte. O tempo de empilhamento foi definido pela análise da tensão média obtida em ensaios de compressão, calculada a partir da força aplicada e da área da seção transversal. Escolheu-se a menor concentração de CBC e idade em que a tensão média superasse a tensão de empilhamento.
- **Idealização e moldagem dos protótipos:** Os protótipos das pilhas foram projetados com base no método Dry Stacking para rejeitos filtrados, seguindo a metodologia de Ferreira (2022) que propõe quatro camadas de altura constante e sem drenagem interna ou superficial. A inclinação global de 45º representou o cenário crítico de estabilidade (Figura 3). Antes da moldagem, foi realizado um estudo preliminar para definir a energia de compactação e tempo de empilhamento. Para o RBMF, as três primeiras camadas foram compactadas com um cilindro de 850 g e 36 passadas por subcamada, e a última camada com 144 passadas de 226 g. No protótipo de RAMF, utilizou-se um cilindro de 1369 g com 36 passadas por subcamada nas três primeiras camadas, e 160 passadas com cilindro de 226 g na última camada, garantindo compactação eficiente. Cada camada foi moldada após o tempo de empilhamento da camada anterior (Figura 4).
- **Análises qualitativas e quantitativas:** O potencial de estabilização do CBC foi avaliado por meio de análise qualitativa baseada em observações visuais de textura, fissuras e homogeneidade, e de uma análise quantitativa que incluiu testes mecânicos com aplicação progressiva de pesos (Figura 5). O ensaio de resistência ocorreu após o tempo de empilhamento, registrando o peso que a pilha suportaria até o surgimento de fissuras ou colapso. O teste foi finalizado com a ruptura dos modelos.

Figura 2: Corpos de prova após a moldagem, a) RBMF, b) RAMF



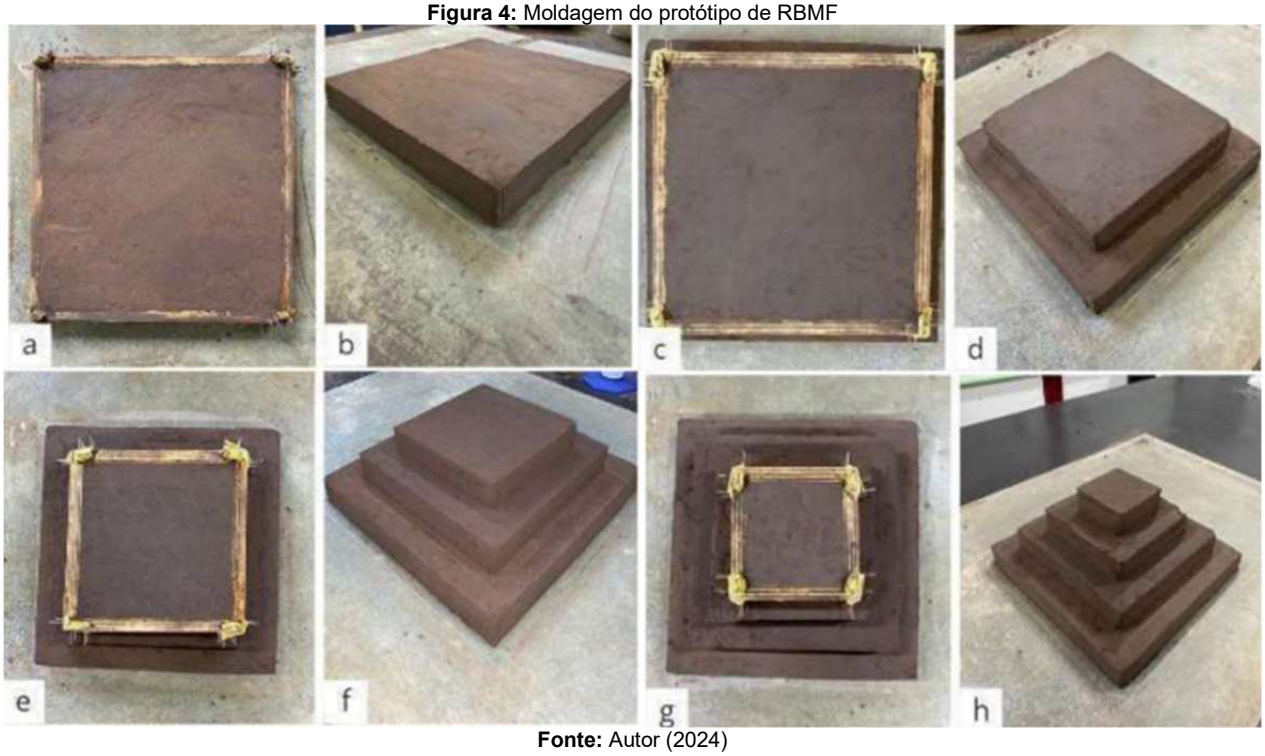
Fonte: Autor (2024)

Figura 3: Modelo da pilha a) vista frontal e b) vista superior



Fonte: Ferreira (2022)

Figura 4: Moldagem do protótipo de RBMF



Fonte: Autor (2024)

Figura 5: Ensaio de ruptura dos protótipos, a) RBMF, b) RAMF



Fonte: Autor (2024)

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

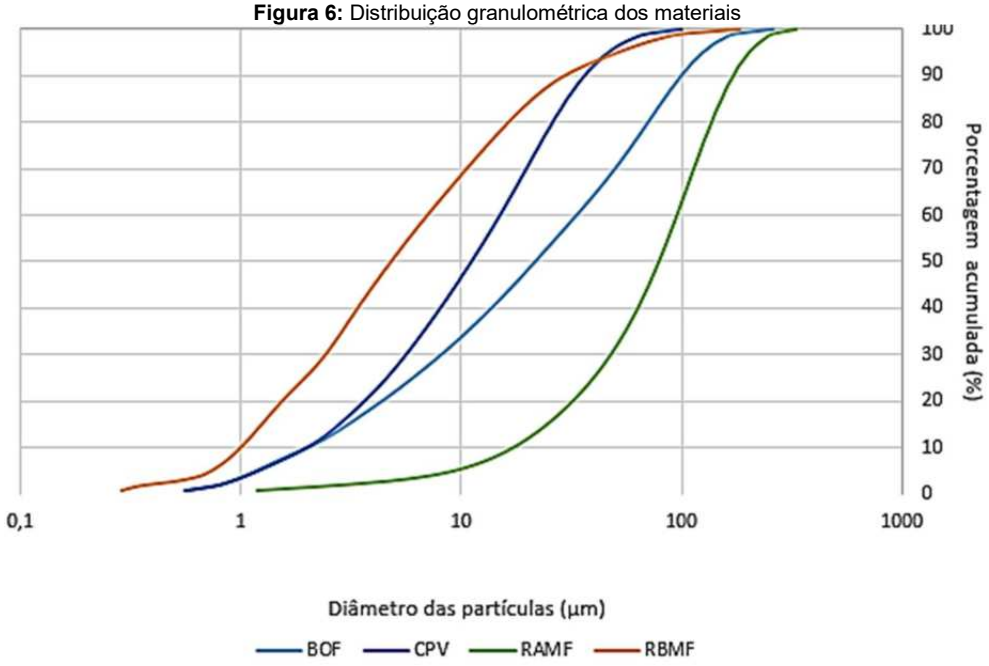
A Figura 6 apresenta as curvas granulométricas dos materiais utilizados neste estudo. A BOF apresentou granulometria mais grosseira (D90 = 99,54 µm) se comparado ao cimento (D90 = 36,13 µm). O RBMF, por sua vez, apresentou D90 = 29,09 µm, com partículas relativamente mais finas do que as do RAMF, cujo D90 é de 172 µm.

3.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS

Na Tabela 1 são apresentados os resultados das análises químicas dos materiais empregados neste projeto. Os resultados indicaram que o RAMF é predominantemente composto por óxido de silício (SiO_2), enquanto o RBMF contém tanto óxidos de silício (SiO_2) quanto de ferro (Fe_2O_3), sendo este último associado

à elevada massa específica observada. Por sua vez, a escória é composta principalmente por óxidos de cálcio, ferro e silício, com destaque para a presença de cálcio e alumínio.

Figura 6: Distribuição granulométrica dos materiais



Fonte: Autor (2024)

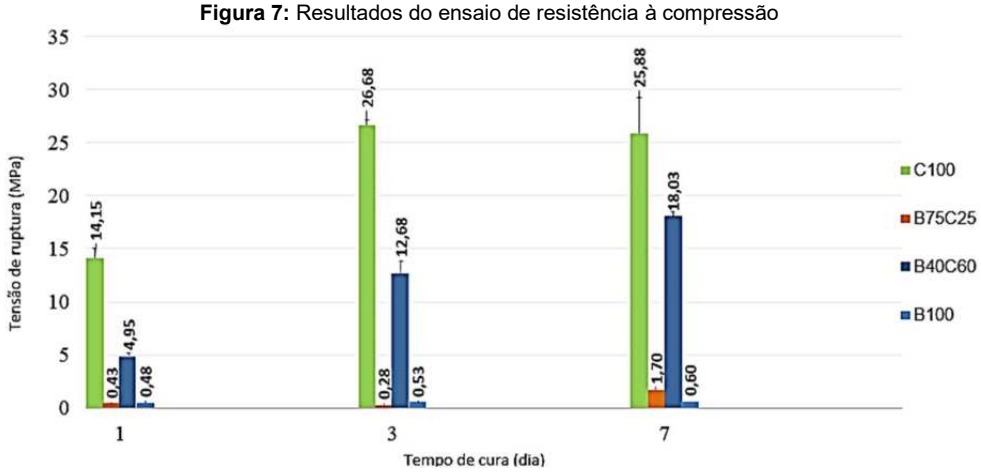
Tabela1: Resultados das análises químicas do BOF, RAMF e RBMF

Óxidos	BOF	RAMF	RBMF
CaO	34,89	-	-
Fe2O3	24,54	9,00	41,90
SiO2	18,43	85,40	55,00
MgO	8,87	-	-
Al_2O_3	5,15	4,10	2,60

3.3 DETERMINAÇÃO DO TRAÇO

A Figura 7 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão dos traços propostos (NBR 5739:2018).

Figura 7: Resultados do ensaio de resistência à compressão



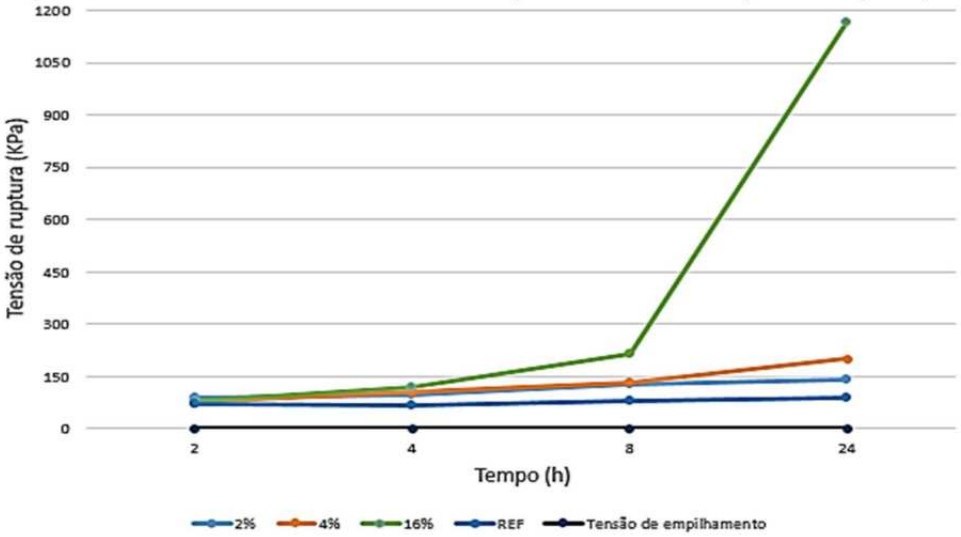
Fonte: Autor (2024)

O traço B75C25 apresentou baixa resistência nas primeiras 24h (0,43 MPa), mas aumentou para 1,70 MPa aos 7 dias, indicando um ganho tardio de resistência com escória de aciaria. O traço B40C60 teve um aumento constante de resistência, alcançando 18,03 MPa aos 7 dias, mas, em comparação ao C100, apresentou uma redução de 65,9% no primeiro dia e 30,3% aos 7 dias. Apesar disso, o B40C60 teve o melhor desempenho entre as composições, sendo, portanto, escolhido para o CBC.

3.4 ESTUDO DE CONCENTRAÇÃO

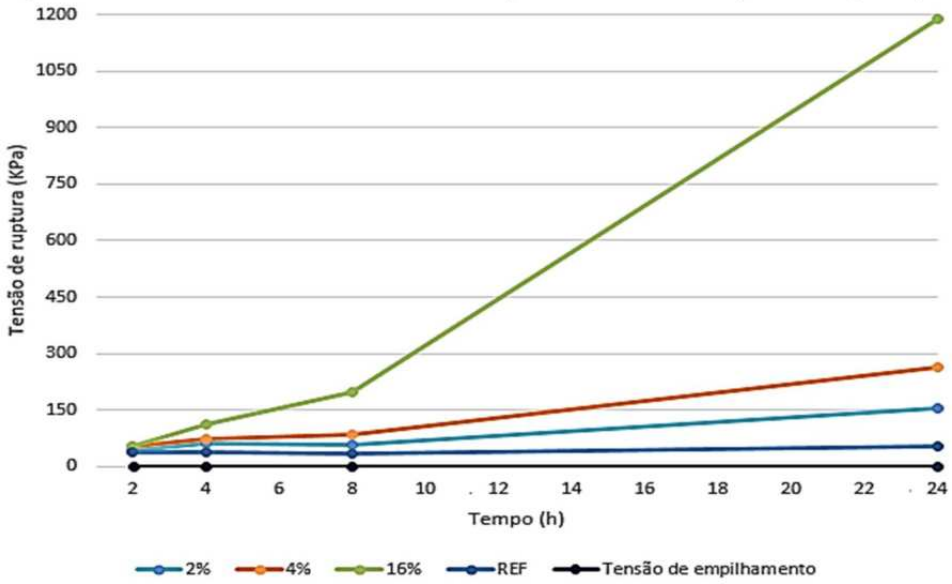
As Figuras 8 e 9 apresentam os resultados do ensaio de resistência à compressão realizados no estudo de concentração.

Figura 8: Resultados do ensaio de resistência à compressão e tensão de empilhamento (RBMF)



Fonte: Autor (2024)

Figura 9: Resultados do ensaio de resistência à compressão e tensão de empilhamento (RAMF)



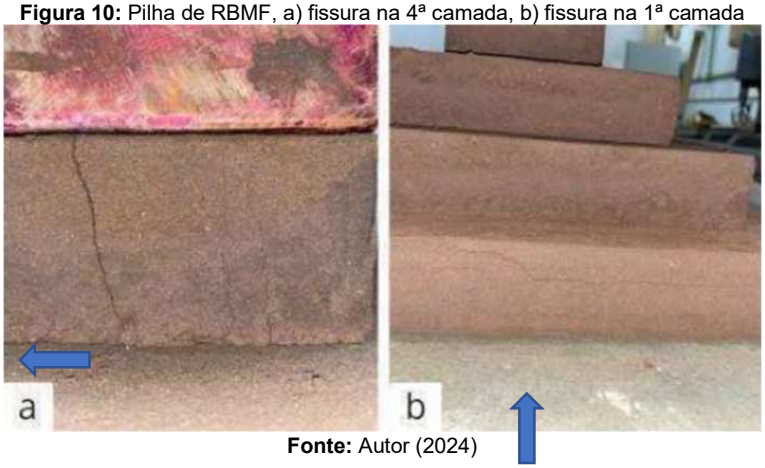
Fonte: Autor (2024)

A tensão de empilhamento foi de 0,73 KPa para o RBMF e 0,63 KPa para o RAMF. O estudo de concentração indicou que 2% de CBC e 2 horas de empilhamento são ideais para moldagem os protótipos das pilhas, considerando as tensões médias 89,58 KPa e43,75 KPa, para o RBMF e RAMF, respectivamente. O critério de seleção foi baseado no menor consumo de cimento e no melhor desempenho mecânico, escolhendo a menor concentração de CBC que garantisse tensões médias superiores à tensão de empilhamento.

3.5 ANÁLISES QUALITATIVAS E QUANTITATIVAS

A pilha de RBMF apresentou fissuras nas camadas 1 e 4 sob 29 kg (Figura 10) com ruptura a 42 kg (411,88 kPa), demonstrando bom desempenho na estabilização com CBC. Em contraste, a pilha de RAMF apresentou fissuras e desprendimento na camada 4 sob 14 kg (Figura 11), rompendo totalmente a 40 kg (392,27 kPa), sugerindo limitações na compactação e homogeneidade do material. A hidratação da escória BOF forma silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (C-S-H e C-A-H) em menor quantidade que o cimento, mas contribuiu para resistência a longo prazo. Sua incorporação melhorou o empilhamento dos rejeitos, aumentando a estabilidade estrutural.

Figura 10: Pilha de RBMF, a) fissura na 4ª camada, b) fissura na 1ª camada



Fonte: Autor (2024)

Figura 11: Pilha de RAMF, a) Desprendimento do material, b) Fissura



Fonte: Autor (2024)

4 CONCLUSÃO

Este estudo avaliou o impacto do cimento de baixo carbono no empilhamento de rejeitos de minério de ferro, com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas das pilhas e promover o desenvolvimento de materiais sustentáveis a partir de resíduos. Os resultados mostraram que a composição B40C60, com 40% de substituição do cimento por escória de aciaria, obteve o melhor desempenho mecânico entre as opções testadas. A adição de 2% de CBC e 1% de NaCl proporcionou maior estabilidade às pilhas de rejeitos, com resistência a tensões de até 411,88 kPa e 392,27 kPa, respectivamente. Os dados obtidos confirmam a eficácia do CBC na melhoria das propriedades mecânicas dos rejeitos nas condições experimentais. Além disso, a substituição parcial do cimento por escória de aciaria apresenta potencial para reduzir a pegada de carbono, oferecendo uma alternativa mais sustentável para o manejo de rejeitos na mineração, conforme os resultados deste estudo.

5 REFERÊNCIAS

CONSOLI, Nilo Cesar *et al.,* Comportamento de rejeitos de minério de ferro compactados filtrados–misturas de cimento Portland: Nova tendência brasileira para disposição de rejeitos por empilhamento. **Ciências Aplicadas,** v. 12, n. 2, p. 836, 2022.

DINIZ, Dayse Horta *et al.* Blast oxygen furnace slag as chemical soil stabilizer for use in roads. **Journal of materials in civil engineering**, v. 29, n. 9, p. 04017118, 2017.

FERREIRA, Larissa Caroline. Influência do cimento Portland no empilhamento do rejeito de barragem de minério de ferro. 2022.

GUMIERI, Adriana Guerra. Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos. 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA.

MATIAS, Ana Carolina de Paula. Influência da adição de compósito estabilizador no comportamento reológico de rejeitos de minério de ferro depositados em barragens. 2022.

OLIVEIRA-FILHO, W. L.; ABRÃO, P. Disposição de rejeitos de mineração. **Geotecnia Ambiental.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SILVA, Michael Lima *et al*. Estudo das propriedades do concreto utilizando escória de fundição visando sua aplicação na construção civil como substituo de agregado miúdo. Engenharia no Século XXI Volume 12, p. 7.

SOUZA, Weber Anselmo dos Ramos. Análise numérica do comportamento de pilhas de rejeito filtrado e co-disposição durante a construção. 2020.

WANG, Qiang; YAN, Peiyu. Propriedades de hidratação de escória de aço de forno de oxigênio básico. **Construction and Building Materials** v. 24, n. 7, p. 1134-1140, 2010.