UTILIZAÇÃO DE COMPÓSITO ESTABILIZADOR COMO SUPRESSOR DE PARTICULADOS ATMOSFÉRICOS PARA PILHAS DE REJEITO DE MINERAÇÃO

Use of Stabilizing Composite as a Suppressant of Atmospheric Particulates for Mining Tailing Piles

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

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

Joao Lucas Beserra Silva
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais |
joao.beserra@aluno.ufop.edu.br

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

Resumo

A dispersão de partículas geradas pelo empilhamento de rejeitos de mineração pode impactar a saúde pública, degradar bens materiais, causar danos ambientais e comprometer a segurança nas operações mineradoras e áreas adjacentes. Diante das limitações dos métodos tradicionais de controle de poeira, este estudo avaliou um compósito estabilizador produzido com rejeitos superfinos de siderurgia, ativadores inorgânicos e aglomerantes hidráulicos. Um protótipo foi desenvolvido em escala laboratorial, utilizando técnicas convencionais de empilhamento de rejeitos desaguados, e submetido à ação simulada de chuva e vento. A análise visual indicou que, na concentração de 2%, o compósito preveniu a suspensão de partículas, demonstrando seu potencial como alternativa sustentável. Assim, seu uso viabiliza a reinserção de rejeitos da siderurgia, reduz emissões nas operações de mineração de ferro e fomenta oportunidades de desenvolvimento econômico, social e ambiental em regiões impactadas.

Palavras-chave: *Rejeito de Mineração. Empilhamento de Rejeito. Compósito Estabilizador de poeira.*

ABSTRACT

The dispersion of particles generated by the stacking of mining waste can impact public health, degrade material assets, cause environmental damage and compromise safety in mining operations and adjacent areas. Given the limitations of traditional dust control methods, this study evaluated a stabilizing composite produced with superfine steel mill waste, inorganic activators and hydraulic binders. A prototype was developed on a laboratory scale, using conventional techniques of stacking dewatered waste, and subjected to simulated rain and wind action. Visual analysis indicated that, at a concentration of 2%, the composite prevented the suspension of particles, demonstrating its potential as a sustainable alternative. Thus, its use enables the reinsertion of steel mill waste, reduces emissions in iron mining operations and fosters opportunities for economic, social and environmental development in impacted regions.

Keywords: *Mining Tailings. Tailings Piling. Stabilizing Composite Dust Suppression.*

1 INTRODUÇÃO

As atividades de mineração, além de alterarem significativamente as paisagens, contribuem para a emissão de material particulado no ar. Durante o descarregamento de minério em queda livre, como na formação de pilhas de rejeito, partículas finas se dispersam e permanecem vulneráveis às intempéries, formando nuvens de poeira transportadas por longas distâncias, com riscos à saúde humana (Azhar; Rani, 2020).

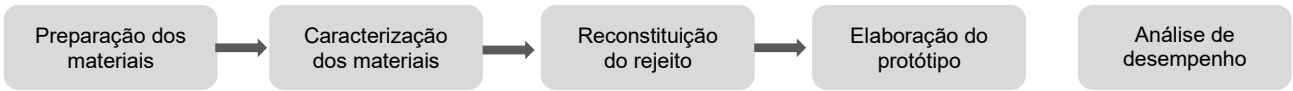
Em Minas Gerais, onde atuam mais de 1.800 empresas do setor mineral (FIEMG, 2021), esses problemas são frequentes, especialmente em períodos secos e com elevada incidência de ventos. Recentemente, tempestades de poeira afetaram cidades como Mariana e Itabirito, enquanto Congonhas-MG registrou altas concentrações de partículas inaláveis, levando a intervenções da FEAM (Baeta, 2023; Siqueira, 2023).

Métodos convencionais de supressão de poeira, como aspersão de água e aditivos químicos, apresentam eficácia limitada e altos custos (Nazareno *et al.,* 2018; Wang; Du; Wang, 2022). Neste contexto, este estudo propõe um compósito estabilizador (CE) à base de aglomerante hidráulico, rejeito siderúrgico e ativador inorgânico, visando reduzir a poeira e promover a reutilização de resíduos, fomentando o desenvolvimento econômico e ambientalmente sustentável.

2 METODOLOGIA

As etapas envolvidas no programa experimental estão esquematicamente resumidas na Figura 1.

Figura 1: Fluxograma das etapas do estudo



2.1 PREPARAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O CE foi desenvolvido a partir de cimento Portland CPV-ARI combinado com escória de aciaria (BOF) e cloreto de sódio (NaCl), este último utilizado como acelerador de pega. As proporções dos materiais que compõem o CE foram estabelecidas com base em Matias (2022), que recomenda, para a estabilização de rejeitos, a utilização de 25% de cimento, 75% de finos de escória e 0,2% de NaCl (em relação a massa total do CE). A preparação do CE envolveu a homogeneização das frações finas reativas — cimento Portland, finos de escória de aciaria e cloreto de sódio — seguida da adição de 235 g de água. A concentração de CE adotada nesse estudo foi de 2% em relação à massa de sólidos dos rejeitos. A eficiência do CE foi avaliada em um rejeito arenoso de minério de ferro (RAMF) proveniente do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.

Figura 2: Materiais utilizados no estudo



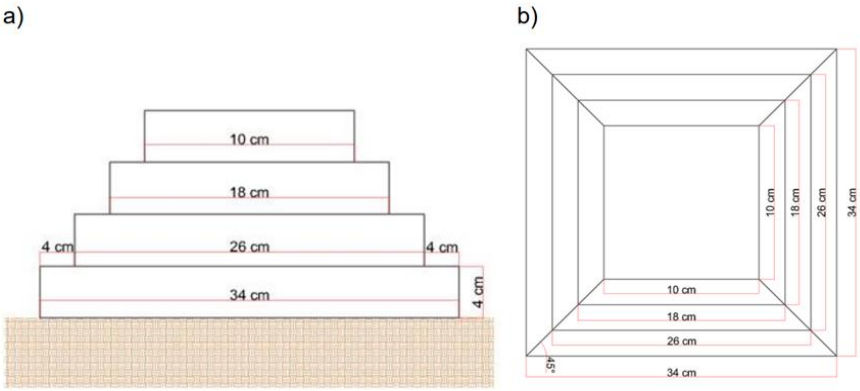
Os materiais foram caracterizados de acordo com suas propriedades físicas de massa específica (NBR 16605:2017), massa unitária (NBR NM 45:2006) e granulométrica por difração a laser (Bettersize 2000). A composição química foi determinada por Fluorescência de Raios-X (PANalytical Epsilon3x).

As etapas de reconstituição incluíram: (i) exposição a lâmpadas UV por 48 horas, (ii) determinação da umidade do rejeito, (iii) destorroamento, e iv) reconstituição do teor sólidos – líquidos de 80-20%.

2.2 ELABORAÇÃO DO PROTÓTIPO

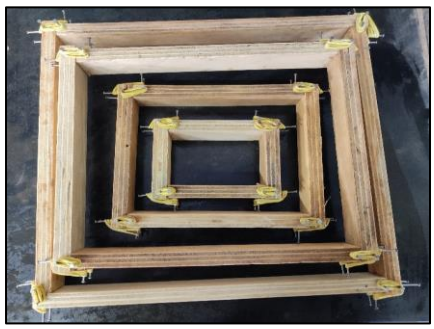
O protótipo foi desenvolvido conforme Ferreira (2020). As Figuras 3 e 4 ilustram as dimensões utilizadas e os moldes confeccionados para esse experimento.

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



Fonte: Ferreira (2022)

Figura 4: Moldes do protótipo



Fonte: Autor (2024)

Antes da moldagem, foi conduzido um estudo para determinar a energia de compactação ideal das camadas. Com base nos resultados, as três primeiras camadas foram compactadas com um cilindro de 850 g, aplicando-se 36 passadas, enquanto a camada final foi adensada com um cilindro de 226 g, realizando-se 160 passadas devido à limitação do tamanho da camada.

O processo de empilhamento consistiu na moldagem da camada inicial, seguida por um intervalo de 2 horas antes da aplicação da camada subsequente. Esse procedimento foi repetido até a finalização das quatro camadas. Imediatamente após a retirada do molde da camada superior, foi determinada a massa da pilha. Em seguida, com o auxílio de um borrifador, procedeu-se com a aplicação do CE em toda a superfície da pilha, de forma uniforme e continua. Pesou-se novamente a pilha tratada com o compósito.

2.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO

A eficiência do CE como supressor de poeira foi analisada por meio de avaliação visual e medição da perda de massa da pilha de rejeito sob a ação das intempéries. Para tal, a pilha foi submetida a cargas eólicas e pluviais, sendo sua resposta avaliada quanto à textura, fissuração e uniformidade. Para garantir a representatividade do modelo e a fidelidade das condições simuladas, correlacionaram-se os parâmetros geométricos da pilha de rejeito real e do modelo reduzido, conforme apresentado na Tabela 1.

Dados coletados na região indicaram que a maior precipitação entre janeiro e novembro de 2024 foi de 41 mm em 24 horas. Com base na correlação geométrica entre a pilha real e o protótipo, determinou-se um volume de chuva equivalente de 4,74 L, aplicado ao protótipo por 38 minutos. A simulação foi realizada com uma mangueira de borracha com bico para aspersão, mantendo vazão controlada e altura constante.

Tabela 1: Parâmetros utilizados nas simulações

Área da pilha real (m_2)	292.929,3
Área do protótipo (m_2)	0,1156
Precipitação (mm)	41
Fator de escala (A. real / A. protótipo)	2.533.990,5
Volume de chuva na pilha real em 24h (m_3)	12.020,1
Intensidade media do vento na pilha real em 24h (m/s)	2,20

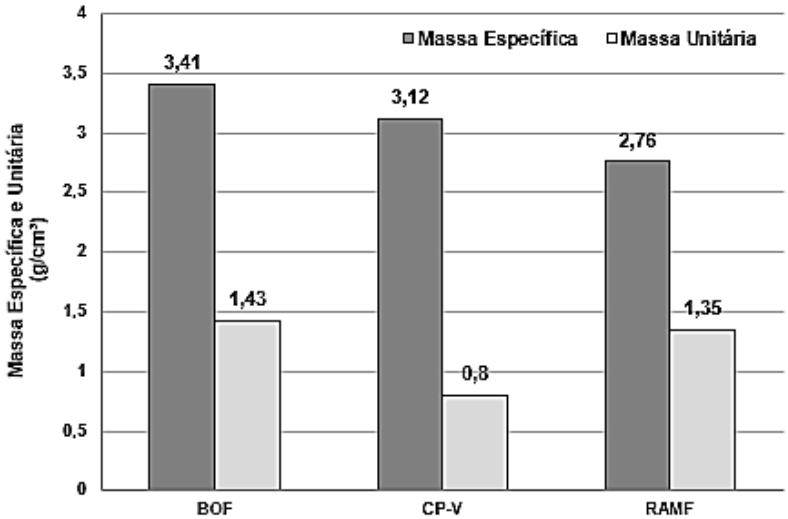
Para a simulação de vento, utilizou-se um dispositivo de ventilação, gerando uma velocidade de 8 m/s por 5 minutos. A precisão da velocidade foi garantida por meio de medições com um anemômetro.

3 RESULTADOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

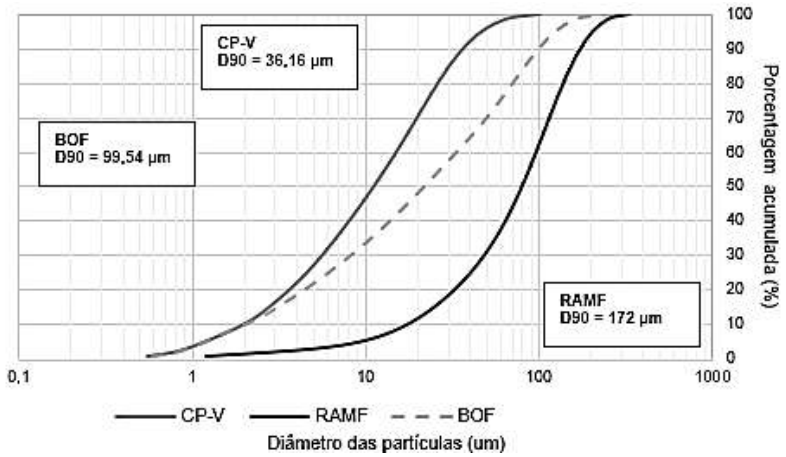
A Figura 5 apresenta os resultados obtidos nos ensaios relativos à massa específica e unitária dos materiais utilizados. Nota-se que a BOF apresentou a maior massa específica (3,41 g/cm³), seguida pelo CP-V (3,12 g/cm³) e pelo rejeito RAMF (2,76 g/cm³). Esse comportamento pode ser atribuído à alta concentração de ferro na BOF, fator que contribui para o aumento da densidade do material.

Figura 5: Massa especifica e massa unitária dos materiais



A Figura 6 apresenta os resultados da distribuição granulométrica dos materiais obtidos por difração a laser. Notavelmente, a BOF apresentou partículas relativamente grosseiras (D90 = 99,54 µm) em comparação ao cimento (D90 = 36,13 µm), cuja granulometria mais fina favorece sua reatividade química e a formação de produtos de hidratação estáveis. Por sua vez, o RAMF exibiu o maior D90 entre os materiais analisados (172 µm).

Figura 6: Distribuição granulométrica dos materiais



A Tabela 2 apresenta os resultados das análises químicas da escória de aciaria e do rejeito arenoso. Nota-se que o RAMF é constituído majoritariamente por óxido de silício, enquanto a escória é constituída predominantemente por óxidos de cálcio, ferro, silício. A presença de cálcio e alumina nas escórias possibilitam que esses resíduos participem das reações de hidratação, contribuindo para formação de produtos de hidratação estáveis adicionais quando finamente moídas e combinadas com o cimento Portland (Carvalho *et al*, 2021; Wang, 2018).

Tabela 2: Resultados das análises químicas dos materiais

Elementos químicos (%)	BOF	RAMF	CP-V
CaO	35	-	64
Fe_2O_3	25	9	3
$Si0_2$	18	85	15
MgO	9	-	-
Al_2O_3	5	4	5

3.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO

Previamente às simulações, aplicou-se o CE sobre a superfície da pilha, na concentração de 2% em relação à massa de sólidos dos rejeitos. A Figura 7 ilustra o ensaio de chuva realizado, simulando a precipitação e seus efeitos na estabilidade.

Figura 7: Simulação de chuva sobre a pilha de rejeito (protótipo)



Observou-se que a massa da pilha tratada com CE aumentou de 12,02 kg para 13,99 kg, incremento atribuído à incorporação do compósito e ao efeito de impermeabilização, que favoreceu a retenção de umidade no material e de água na superfície da pilha. A formação dessa barreira protetora também contribuiu para minimizar a emissão de partículas durante movimentações subsequentes. A inspeção visual indicou que não ocorreram alterações significativas na textura, geometria ou sinais de erosão do material durante ou após a simulação de chuva. Após a secagem, no entanto, foram observadas pequenas fissuras na superfície (Figura 8), provavelmente associadas ao processo de moldagem, movimentação e impactos prévios. Apesar dessas imperfeições, o desempenho do CE permaneceu satisfatório, sem evidências de movimentação de massa ou perda de estabilidade.

Decorridas 72h da simulação de chuva, aproximadamente, a pilha de rejeito foi submetida a vento de 8 m/s por 5 minutos com o auxílio de um dispositivo de ventilação. A Figura 9 ilustra o ensaio realizado. Não foi observada variação significativa na massa da pilha após o ensaio, evidenciando a eficácia do compósito na mitigação do transporte de particulados por ação do vento. Esse comportamento é atribuído à evolução da microestrutura do material, promovida pelas reações de hidratação dos compostos presentes no cimento Portland, especialmente dos silicatos tricálcicos (C_3S) e dicálcicos (C_2S), que resultam na formação

progressiva de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável pelo ganho de coesão e resistência mecânica do compósito.

Figura 8: Fissuras observadas na pilha de rejeito (protótipo)



Figura 9: Simulação de vento sobre a pilha de rejeito (protótipo)



Paralelamente, sugere-se que a disponibilidade de óxidos de cálcio e alumínio nas escórias tenha favorecido a formação de novos produtos de hidratação, enquanto a incorporação de cloreto de sódio tenha atuado como catalisador, acelerando a cinética de hidratação dos aluminatos de cálcio presentes nos aglomerantes hidráulicos (Diniz, 2017; Cao *et al.,* 2020 *apud* Matias, 2022). Em síntese, as interações químicas entre os silicatos, aluminatos e carbonatos presentes nos finos de escória e no cimento Portland impulsionaram a nucleação e o crescimento de produtos hidratados, densificando a matriz. Essa reorganização microestrutural resultou na formação de uma camada superficial contínua, coesa e resistente, capaz de suportar esforços externos e limitar tanto a erosão hídrica quanto a dispersão de particulados sob ação do vento. Resultados similares foram observados por Ferreira (2022), que evidenciou que a adição de cimento Portland a rejeitos de minério de ferro promove a formação de matrizes densas e estruturadas, com significativa melhora na estabilidade das pilhas de rejeito.

4 CONCLUSÃO

Este estudo avaliou o potencial de um compósito estabilizador (CE), produzido com aglomerante hidráulico, rejeito de siderurgia e ativador orgânico, para a estabilização superficial de pilhas de rejeito de minério, visando à mitigação da emissão de particulados atmosféricos. As análises visuais demonstraram que o CE foi eficaz na prevenção da suspensão de partículas, especialmente quando as pilhas foram expostas a intempéries como chuva e vento. Esse desempenho está associado às reações de hidratação do cimento Portland e da escória de aciaria, que formaram uma camada coesa e resistente na superfície da pilha,

conferindo maior estabilidade. Adicionalmente, a presença de escória na matriz não apenas reforçou a resistência mecânica do compósito, como também contribui para a sustentabilidade do processo, ao reduzir a demanda por cimento e promover o reaproveitamento de subprodutos industriais, alinhando-se aos princípios da economia circular. Dessa forma, este estudo contribui para a redução das emissões de particulados em pilhas de rejeito e destaca práticas mais sustentáveis nas indústrias de mineração e siderurgia.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, FAPEMIG, CNPq e UFOP pelo apoio à pesquisa, bem como à infraestrutura e colaboração do Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos – RECICLOS – CNPq.

5 REFERÊNCIAS

AZHAR, N. A. L.; RANI, S. I. Experimental Study of Airborne Dust Generation During Powder Free Falling. **Acta Mechanica Malaysia,** v. 3, n. 2, p. 37–39, 2020.

BAETA, A. Fortes Tempestades de Poeiras Tóxicas em Cidades Históricas Mineiras e o Alerta Global da ONU. Disponível em: <https://www.cedefes.org.br/fortes-tempestades-de-poeiras-toxicas-em-cidades-historicas-mineiras-e-o-alerta-global-da-onu/>. Acesso em: 23 nov. 2023

CARVALHO, J. M. *F et al.* Influence of particle size-designed recycled mineral admixtures on the properties of cement-based composites. **Construction and Building Materials,** v. 272, p. 121640–121640, 1 fev. 2021.

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, L. Influência do cimento Portland no empilhamento do rejeito de barragem de minério de ferro. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2022 (Monografia).

FIEMG. Fonte de renda e crescimento, a indústria da mineração é a história de Minas Gerais G1 - Globo. Disponível em: https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/especial-publicitario/fiemg-industria-com-voce/mineracao/noticia/2021/10/18/fonte-de-renda-e-crescimento-a-industria-da-mineracao-e-a-historia-de-minas-gerais.ghtml. Acesso em: 13 jan. 2025.

MATIAS, A.C.P. Influência da adição de compósito estabilizador no comportamento reológico de rejeitos de minério de ferro depositados em barragens. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2022 (Disertação de Mestrado).

NAZARENO *et al.,* Estudo de caso - Poeira nas operações de Mina: alta eficiência no controle de particulados a través do uso de supressor natural. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, n. octubre, 8 out. 2018

SIQUEIRA, J. Vídeo: tempestade de poeira atinge cidade de Minas Gerais e irrita moradores |O TEMPO. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/cidades/video-tempestade-de-poeira-atinge-cidade-de-minas-gerais-e-irrita-moradores-1.3028599>. Acesso em: 21 nov. 2023.

SHI, Z*. et al.* Effects of triisopropanol amine, sodium chloride and limestone on the compressive strength and hydration of Portland cement. **Construction and Building Materials,** v. 125, p. 210–218, 2016.

WANG, Shuang *et al.* Study on Cementitious Properties and Hydration Characteristics of Steel Slag. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 27, n. 1, 2018.

WANG, Y.; DU, C.; WANG, F. Formulation and Performance Characterization of Polymeric Dust Suppressants for Stockpiles. **ACS Omega**, v. 7, n. 11, p. 9891–9899, 11 mar. 2022.