INFLUÊNCIA DO MINÉRIO DE FERRO NAS PROPRIEDADES DE LADRILHOS HIDRÁULICOS

Influence of iron ore on the properties of hydraulic tiles

André Guilherme Martins Costa
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | andreguimcosta@gmail.com

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

Luis Felipe dos Santos Lara
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | luislaraenge@gmail.com

Laís Resende
VALE S.A. | Belo Horizonte, Minas Gerais | lais.resende@vale.com

RESUMO

Os ladrilhos hidráulicos (LH) são revestimentos artesanais à base de cimento Portland, cuja produção libera grandes quantidades de CO_2. Para reduzir esse impacto ambiental, este estudo investigou a substituição parcial do cimento por rejeito de minério de ferro. O rejeito foi calcinado a 350°C e 700°C para avaliar seu comportamento térmico e incorporado aos LH em proporções de 25% e 50%. Os ladrilhos foram prensados, curados e submetidos a ensaios de resistência à flexão, abrasão, permeabilidade e pigmentação colorimétrica. Os resultados obtidos indicaram que o rejeito tratado a 700°C e substituição de 25% obtiveram maior resistência à abrasão, menor permeabilidade e flexão superior ao mínimo exigido por norma. O estudo validou a viabilidade da substituição parcial do cimento Portland pelo rejeito de minério de ferro, contribuindo para um revestimento mais sustentável.

Palavras-chave: Ladrilho hidráulico; Cimento Portland; Tratamento térmico; Rejeito; Minério de ferro.

ABSTRACT

Hydraulic tiles (HT) are artisanal coatings made from Portland cement, whose production releases large amounts of CO_2. To reduce this environmental impact, this study investigated the partial replacement of cement with iron ore tailings. The tailings were calcined at 350°C and 700°C to evaluate their thermal behavior and incorporated into the HB in proportions of 25% and 50%. The tiles were pressed, cured and subjected to flexural strength, abrasion, permeability and colorimetric pigmentation tests. The results obtained indicated that the tailings treated at 700°C and 25% replacement obtained greater abrasion resistance, lower permeability and flexural strength above the minimum required by standard. The study validated the feasibility of partially replacing Portland cement with iron ore tailings, contributing to a more sustainable coating.

Keywords: Hydraulic tile; Portland cement; Heat treatment; Reject; Iron ore.

1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro é uma das commodities mais exploradas no Brasil, sendo fundamental para a economia e a indústria global. O país é o segundo maior produtor mundial, atrás apenas da Austrália, com uma extração estimada em 378,5 milhões de toneladas em 2023 (IBRAM, 2024). Essa produção representa cerca de 9% das exportações brasileiras de commodities, ficando atrás apenas da soja e do petróleo (Fazcomex, 2024). A abundância de reservas naturais no Brasil impulsiona investimentos na extração e beneficiamento do minério, consolidando o país como um importante player na indústria primária (Nunes, 2012).

No entanto, a exploração do minério de ferro gera impactos ambientais significativos, especialmente devido à produção de rejeitos durante o beneficiamento, que envolve etapas como extração, cominuição, concentração e disposição (Zinato, 2013). Para mitigar esses danos, estratégias de reaproveitamento de rejeitos têm sido adotadas. A Vale, por exemplo, planeja recuperar 7 milhões de toneladas de rejeitos anualmente até 2030, representando 10% de sua produção em Minas Gerais (VALE, 2024).

Paralelamente, o cimento Portland, amplamente utilizado na construção civil, também gera impactos ambientais consideráveis. Em 2022, o Brasil produziu 62,7 milhões de toneladas de cimento, liberando grandes quantidades de CO_2 durante a fabricação do clínquer, seu principal componente (Cimento.org).

Diante disso, alternativas sustentáveis têm sido buscadas, como a substituição parcial do cimento por rejeitos de minério de ferro na produção de ladrilhos hidráulicos (LH). Esses artefatos, feitos de material cimentício, são curados por imersão em água, dispensando a queima e reduzindo emissões poluentes. A adoção dessa técnica não apenas diminui o consumo de cimento, mas também agrega valor aos rejeitos, contribuindo para a redução de impactos ambientais. Assim, o ladrilho hidráulico usando o rejeito de minério de ferro como material cimentício suplementar surge como uma solução viável e ecológica, alinhando-se às necessidades de sustentabilidade na indústria da construção civil.

2 METODOLOGIA

2.1 MATERIAIS

O rejeito de minério de ferro utilizado neste estudo foi doado pela empresa Vale e coletado em uma mina de Itabirito, Minas Gerais. Por ser uma lama ultrafina com características adequadas, foi avaliado como material cimentício suplementar.

O cimento empregado foi o Portland tipo V de Alta Resistência Inicial (CP-V ARI), adquirido da empresa Cimento Nacional, com cerca de 95% de clínquer em sua composição. Por fim, as areias industriais utilizadas foram classificadas como média e grossa.

2.2 MÉTODOS

Na preparação do rejeito, ele foi destorroado em moinho de bolas, seguido por secagem para remoção de umidade. Realizou-se então a termogravimetria que analisou o comportamento do rejeito em altas temperaturas, identificando picos em 350°C e 700°C, direcionando assim os processos de calcinação nessas temperaturas. O material foi submetido a queima por 8 horas em forno a gás, resultando em três condições: In Natura, calcinado a 350°C e a 700°C.

A caracterização do rejeito incluiu ensaios de fluorescência de raios X (FRX) para análise química, difração de raios X (DRX) para identificação de fases cristalinas, BET para avaliação da área superficial e granulometria a laser. Além disso, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para observação da estrutura dos grãos e suas alterações após a calcinação.

A produção dos ladrilhos hidráulicos envolveu a moldagem de três camadas distintas. A primeira camada, responsável pelo acabamento superficial, foi composta por uma pasta de água, cimento e rejeito de minério de ferro em diferentes proporções (25% e 50% de substituição do cimento pelo rejeito). A segunda camada foi feita com cimento e areia média sem adição de água, e a terceira camada incluiu água, cimento e areia grossa. O molde utilizado seguiu as especificações da ABNT NBR 9457:2013, garantindo dimensões adequadas para os ladrilhos, a partir disso, foi adotada a dosagem dos precursores que segue a tabela a seguir, na qual foi utilizada para todos os ladrilhos produzidos seguindo a Tabela 1.

Tabela 1: Dosagem de precursores e proporção de cada camada no ladrilho

	Precursor em pó (%)		Água (%)	Proporção em volume no ladrilho (%)
Camada 1	Rejeito	25/50	50	25
	Cimento	75/50		
Camada 2	Cimento	50	0	30
	Areia média	50		
Camada 3	Cimento	25	25	45
	Areia grossa	75		

Fonte: Próprio autor

Os ladrilhos foram moldados e prensados a 10 kN para garantir compactação. O processo de cura ocorreu em três etapas: 24 horas em ambiente úmido, 24 horas submerso e cura ao ar até a realização dos ensaios, totalizando um mínimo de 28 dias.

Os ensaios realizados avaliaram as propriedades mecânicas e físico-químicas dos ladrilhos. O ensaio de resistência à flexão foi conduzido conforme a NBR 9457 (ABNT, 2013), que exige um mínimo de 3,5 MPa. O ensaio de resistência à abrasão simulou o desgaste superficial dos ladrilhos por meio de um ensaio com roda de borracha e areia, registrando a perda de massa ao longo do tempo.

O ensaio de permeabilidade analisou a infiltração de água nos ladrilhos e por fim, a análise colorimétrica foi realizada a partir de fotografias das superfícies dos ladrilhos, permitindo identificar as variações de cor entre as diferentes composições e temperaturas de calcinação.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 CARACTERIZAÇÕES DO REJEITO

A composição química do rejeito de minério de ferro foi identificada por meio de FRX e os resultados mostraram que ele é composto majoritariamente por óxidos de ferro (47,40%) e óxido de silício (42,00%), enquanto os demais óxidos representam cerca de 5% do total, com destaque para Al_2O_3 (4,38%) e MnO (0,73%). Essa composição era esperada, visto que o rejeito provém de um minério de ferro com teores equilibrados de óxidos ferrosos e argilosos.

Os resultados de DRX confirmaram a presença de fases minerais esperadas, como caulinita ($Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$), hematita (Fe_2O_3), quartzo (SiO_2), goethita (FeO(OH)) e magnetita (Fe_3O_4). O quartzo foi identificado devido ao alto teor de sílica no rejeito, enquanto a caulinita, um argilomineral comumente presente em rejeitos de minério de ferro, foi associada à plasticidade do material. A goethita, presente no rejeito in natura, não foi observada nos rejeitos calcinados, pois se desidrata com o aquecimento. A hematita foi identificada em todas as temperaturas, aumentando sua intensidade de difração conforme a temperatura da calcinação se elevava, o que evidencia a conversão da goethita em hematita. Já a magnetita apareceu em maior intensidade nos rejeitos calcinados a 700°C.

Os ensaios de BET e granulometria a laser mostraram que o diâmetro médio das partículas se manteve próximo entre os rejeitos analisados, sendo menor para o *In Natura* (23,23 µm), intermediário para o rejeito calcinado a 350°C (24,62 µm) e maior para o rejeito calcinado a 700°C (29,51 µm). A área superficial específica foi maior para o rejeito a 350°C (20,80 m²/g), enquanto os demais apresentaram valores semelhantes entre si (8,87 m²/g para *In Natura* e 10,13 m²/g para 700°C).

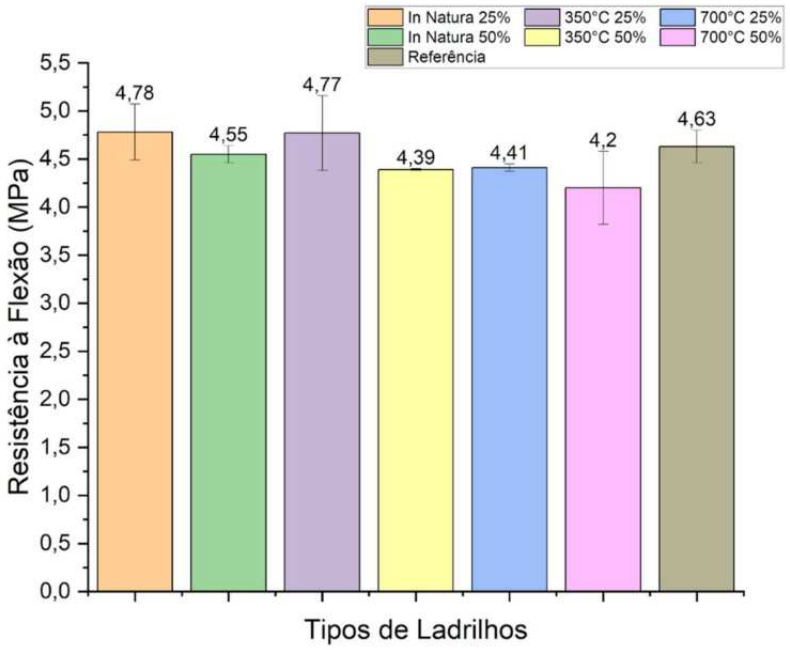
A microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou microestruturas distintas para cada rejeito. No rejeito in natura, foram observadas estruturas aciculares típicas da goethita e cristais lisos de quartzo. No rejeito calcinado a 350°C, a microestrutura apresentou partículas com morfologias variadas e baixa granulometria, enquanto o rejeito calcinado a 700°C mostrou grãos de quartzo envolvidos por hematita, evidenciando a forte interação entre óxidos de ferro e sílica. O cimento Portland (CPV) demonstrou uma estrutura mais homogênea, com partículas de formatos menos dispersos.

3.2 ENSAIOS DOS LADRILHOS

Nos ensaios mecânicos dos ladrilhos hidráulicos, a resistência à flexão atendeu à norma ABNT NBR 9457:2013, que exige um mínimo de 3,5 MPa. Observou-se que o aumento do teor de rejeito no sistema reduziu a resistência à flexão, devido à menor presença de silicatos de cálcio no cimento. Entretanto, a substituição de até 25% de cimento por rejeito manteve a resistência próxima ao ladrilho de referência,

indicando que a camada superficial tem menor impacto na resistência geral, que é majoritariamente influenciada pelas camadas inferiores do ladrilho.

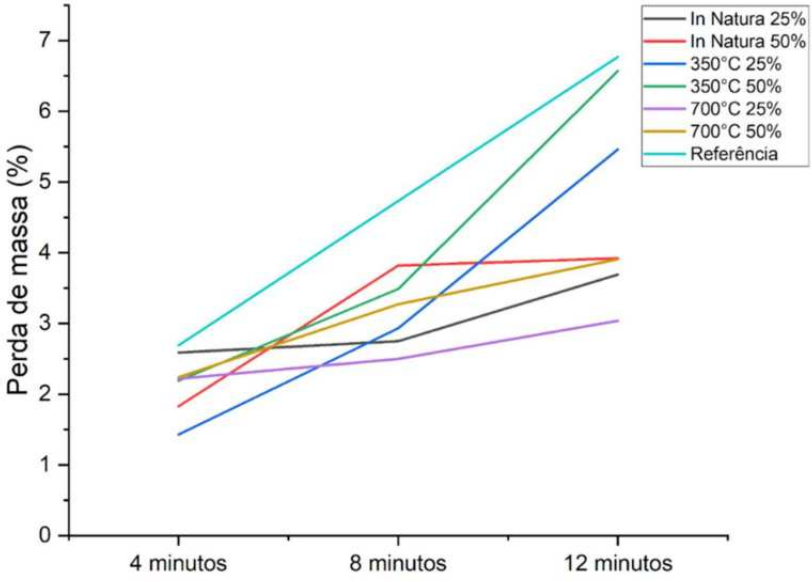
Figura 1: Resistência à flexão dos ladrilhos produzidos



Fonte: Autores

A resistência à abrasão mostrou que os ladrilhos contendo rejeito perderam menos massa ao longo do ensaio, indicando maior resistência ao desgaste quando comparados ao ladrilho referência. Isso pode estar relacionado à presença de hematita e magnetita, minerais mais duros que os constituintes do cimento. Entre os rejeitos calcinados, o material tratado a 700°C teve o menor desgaste, sugerindo que a transformação mineralógica ocorrida durante a calcinação aumentou sua resistência mecânica.

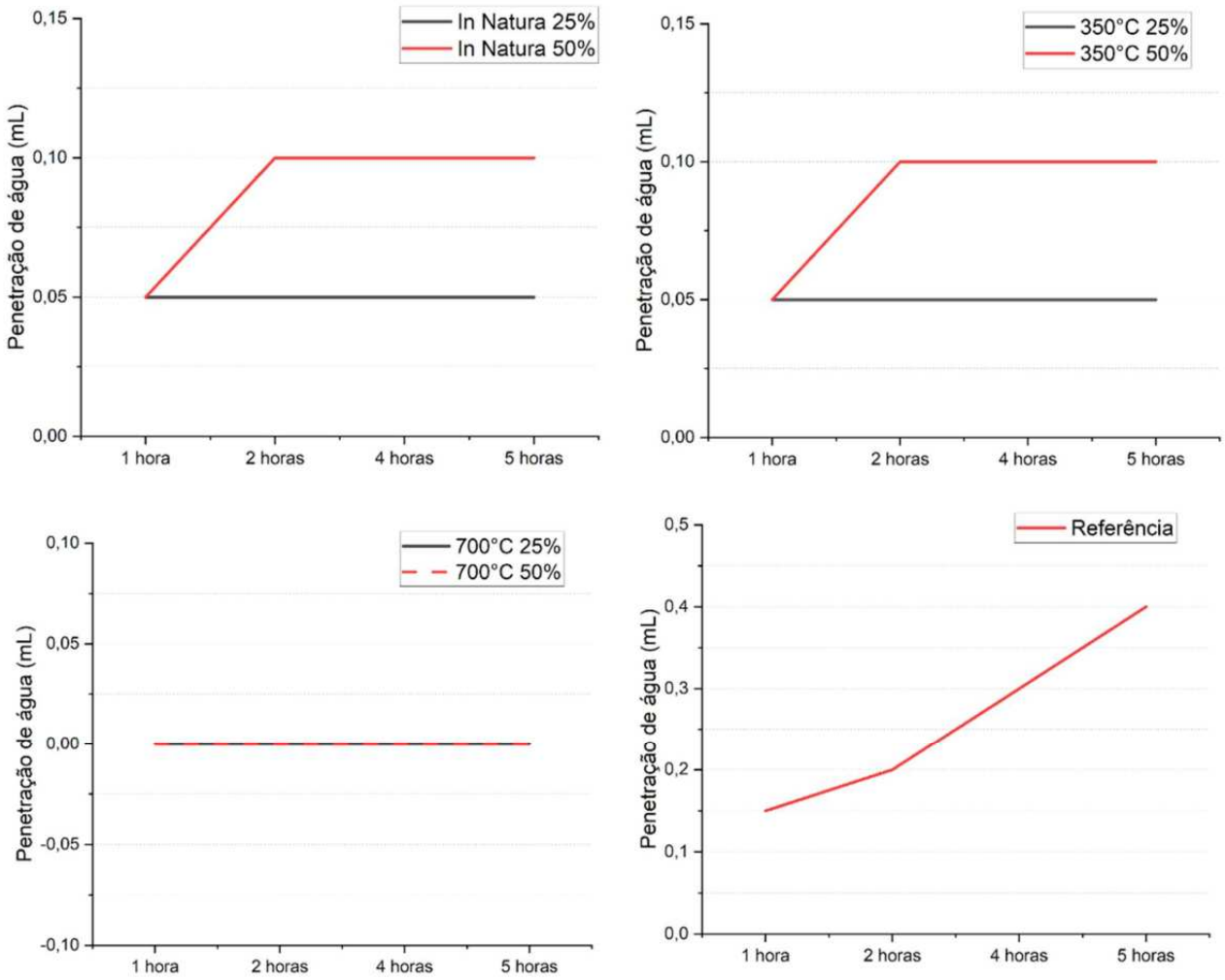
Figura 2: Resistência à abrasão dos ladrilhos produzidos



Fonte: Autores

A permeabilidade dos ladrilhos foi avaliada pela penetração de água em sua superfície ao longo de cinco horas. Os ladrilhos com rejeito demonstraram menor permeabilidade em relação ao referência, e os produzidos com rejeito calcinado a 700°C não apresentaram absorção significativa de água. Isso pode ser atribuído à remoção de grupos hidroxila da caulinita, o que favorece a reação de sílica na hidratação do cimento e reduz a porosidade do material.

Figura 3: Permeabilidade dos ladrilhos produzidos



Fonte: Autores

Na análise de colorimetria, os ladrilhos apresentaram variações de tonalidade conforme o tipo de rejeito utilizado. O ladrilho in natura apresentou uma tonalidade marrom devido à presença de argilas e goethita, enquanto o ladrilho contendo RMF calcinado a 350ºCapresentou um tom marrom-avermelhado, devido à conversão parcial de goethita em hematita. O ladrilho com rejeito calcinado a 700°C apresentou coloração avermelhada mais intensa, associada à maior presença de hematita pura. O ladrilho referência manteve uma tonalidade acinzentada, característica dos compostos cimentícios. Esse aspecto estético pode agregar valor comercial ao produto, oferecendo novas possibilidades de design para aplicações em revestimentos.

4 CONCLUSÕES

O trabalho atingiu seus objetivos ao realizar tratamentos térmicos no rejeito de minério de ferro a 350°C e 700°C, impactando significativamente as propriedades dos ladrilhos produzidos. A moldagem dos ladrilhos foi padronizada com sucesso, garantindo conformidade com normas técnicas e reduzindo variações entre as amostras. Ensaios de caracterização, como FRX, DRX, BET e MEV, permitiram identificar fases minerais como caulinita, quartzo, hematita, magnetita e goethita, além de analisar granulometria e estrutura do material. Os ensaios de resistência à flexão mostraram que os ladrilhos atendem as exigências normativas. O ladrilho contendo o RMF tratado a 700ºCdemonstrou maior resistência à abrasão e menor permeabilidade devido à sua composição mais compacta. A análise de colorimetria destacou variações de cor associadas às transformações químicas, agregando valor estético e econômico ao produto.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por seu apoio para participação no evento e com infraestrutura de equipamentos [Convênio: PCE-00405-24, APQ-

01425-22 e RED-00191-23], 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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13818** – Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9457** - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

COSTA, A. C. *et al.* Utilização de rejeitos de minério de ferro como material cimentício suplementar**. Revista Brasileira de Engenharia Civil**, v. 12, n. 3, p. 45-60, 2021.

FAZCOMEX. Exportação de minério de ferro. Disponível em: https://www.fazcomex.com.br/comex/exportacao-de-minerio-de-ferro/. Acesso em: 16 jan. 2025.

GUPTA, S.; KUMAR, R. Iron ore: Global production, consumption, and market trends. **Journal of Mining Studies**, v. 34, n. 2, p. 120-138, 2022.

IBRAM. Em 2023, mineração repete faturamento do ano anterior e pretende ampliar investimentos até 2028. Disponível em: https://ibram.org.br/release/em-2023-mineracao-repete-faturamento-do-ano-anterior-e-pretende-ampliar-investimentos-ate-2028/. Acesso em: 16 jan. 2025.

NUNES, R. P. A Importância dos Minerais no Comércio entre China e América do Sul. Dissertação de Mestrado — Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: https://www.ie.ufrj.br/images/IE/PEPI/disserta%C3%A7%C3%B5es/2012/RODRIGO%20PACHECO%20NUNES.pdf. Acesso em: 16 jan. 2025.

O Mercado do Cimento Brasil em 2022. Disponível em: <https://cimento.org/o-mercado-do-cimento-brasil-em-2022/>. Acesso em: 27 jan. 2025.

SANTOS, M. E. *et al.* Efeitos do uso de rejeito de minério de ferro na resistência e durabilidade do concreto. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 115-130, 2021.

SANTOS, M. E. *et al.* Propriedades pozolânicas de rejeitos de minério de ferro para a construção civil. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 112-125, 2022.

SILVA, T. C. *et al.* Blocos de concreto com rejeito de minério de ferro: desenvolvimento e avaliação de propriedades mecânicas. **Revista de Engenharia Civil**, v. 44, p. 134-145, 2022.

SILVA, T. C. *et al.* Impactos ambientais das barragens de rejeitos em Minas Gerais. **Environmental Science and Policy Review**, v. 34, n. 1, p. 15-28, 2020.

SOUZA, C. Pesquisa reconstitui história dos ladrilhos hidráulicos. Jornal da USP, 14 nov. 2018. Disponível em: https://jornal.usp.br/ciencias/ciencias-humanas/pesquisa 48 reconstitui-historia-dos-ladrilhos-hidraulicos/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 28 jan. 2025.

VALE. Vale planeja recuperar cerca de 7 milhões de toneladas de minério de ferro a partir do reaproveitamento de rejeitos e estéril este ano. Disponível em: https://www.vale.com/w/vale-planeja-recuperar-cerca-de-7-milhoes-de-toneladas-de-minerio-de-ferro-a-partir-do-reaproveitamento-de-rejeitos-e-esteril-este-ano. Acesso em: 16 jan. 2025.

ZINATO, N. L.; *et al.* Caracterização tecnológica dos rejeitos de minério de ferro gerados no processo de beneficiamento e dispostos em barragens de rejeito: faixas finas e ultrafinas. Disponível em: https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/caracterizao-tecnolgica-dos-rejeitos-de-minrio-de-ferro-gerados-no-processo-de-beneficiamento-e-dispostos-em-barragens-de-rejeito-faixas-finas-e-ultrafinas. Acesso em: 16 jan. 2025.