PAVIMENTO INTERTRAVADO PRODUZIDO COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

Interlocked floor produced with iron ore tailings

Clara Lechtman Gazel
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | lechtman.clara@gmail.com

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

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

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

RESUMO

O presente estudo investigou a utilização de rejeitos de minério de ferro (RMF) como substituto do agregado miúdo na produção de pavimentos intertravados, com o intuito de promover soluções de baixo impacto ambiental e alinhadas aos princípios da economia circular na construção civil. Os blocos foram produzidos sem a adição de aditivos ou plastificantes, e as propriedades físicas e químicas do RMF foram analisadas. Os resultados demonstraram que a resistência à compressão dos pavimentos aumentou conforme a variação no teor de umidade e na relação agregados/cimento. Além disso, os ensaios de lixiviação indicaram que os blocos atendem aos limites estabelecidos pela NBR 10004 para a segurança ambiental. Diante desse contexto, a pesquisa contribui para o desenvolvimento de alternativas de baixo impacto ambiental no setor da construção ao demonstrar a viabilidade do aproveitamento de resíduos industriais como matéria-prima para materiais de pavimentação.

Palavras-chave: Economia circular; Rejeito de minério de ferro; Baixo impacto ambiental; Pavimentação.

ABSTRACT

This research investigated the use of iron ore tailings (IOT) as a substitute for fine aggregates in the production of interlocking pavers, aiming to promote sustainable solutions aligned with the principles of the circular economy in the construction industry. The pavers were produced without the addition of additives or plasticizers, and the physical and chemical properties of the IOT were analyzed. The results demonstrated that the compressive strength of the pavers increased with variations in moisture content and the aggregate/cement ratio. Additionally, leaching tests indicated that the pavers meet the limits established by NBR 10004 for environmental safety. The research contributes to the development of low environmental impact alternatives in the construction sector by demonstrating the feasibility of using industrial waste as raw material for paving materials.

Keywords: Circular economy, Iron ore waste, Low environmental impact, Paving.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil enfrenta uma busca crescente para adotar práticas de baixo impacto ambiental e promover a economia circular, buscando soluções inovadoras para o gerenciamento eficiente de resíduos industriais (Dadzoe *et al.,* 2024; Gamage *et al.,* 2024; Gyimah *et al.,* 2024; Jayakodi; Senaratne; Perera, 2024; Radu *et al.,* 2024; Talla; Mcilwaine, 2024). No contexto específico da mineração, a geração e o armazenamento de rejeitos de minério de ferro (RMF) representa um desafio significativo, mas também uma oportunidade única para a transformação desse rejeito em subproduto (Carvalho *et al.,* 2023; Coelho *et al.,* 2020; He *et al.,* 2023; Islam; Murakami, 2021; Lima, 2024; Qiu *et al.,* 2022; Servi *et al.,* 2022).

A incorporação de resíduos e rejeitos na construção civil tem se destacado na busca por soluções de baixo impacto ambiental alinhadas às diretrizes da economia circular e economia verde promovendo a redução da extração de recursos naturais não renováveis, redução da emissão de gases poluente e destinação nobre aos resíduos e rejeitos (Jayakodi *et al.,* 2024; Schneider *et al.,* 2020; Shooshtarian *et al.,* 2024; Singh; Kumar, 2024).

A crescente consciência ambiental e as pressões para reduzir o impacto da indústria da construção na degradação ambiental têm motivado pesquisadores e profissionais a explorarem alternativas mais ecológicas na produção de materiais de construção (Gyimah *et al.,* 2024; Jayakodi *et al.,* 2024; Jayakodi; Senaratne; Perera, 2024; Radu *et al.,* 2024; Schneider *et al.,* 2020; Shooshtarian *et al.,* 2024; Singh; Kumar, 2024; Talla; Mcilwaine, 2024). Nesse cenário, o rejeito de minério de ferro, muitas vezes considerado um passivo indesejado da atividade mineradora, emerge como uma matéria-prima promissora para a produção de blocos de pavimento intertravado (Paver), um elemento importante em projetos de pavimentação e urbanização.

Estudos anteriores já demonstraram o uso de rejeitos na produção de blocos intertravados, como os trabalhos de Magalhães *et al.* (2020) e Eugênio *et al.* (2023), que avaliaram o desempenho mecânico de materiais cimentícios com adição de rejeitos de mineração. No entanto, estudos com a substituição total do agregado miúdo por RMF em blocos intertravados produzidos sem aditivos avaliados em uma produção em larga escala ainda são escassos. Este artigo científico apresenta um estudo experimental desenvolvido em ambiente industrial, com o objetivo de investigar a incorporação de rejeitos de minério de ferro na produção de paver, alinhando-se aos princípios da economia circular e de baixo impacto ambiental na construção civil. Assim, este trabalho contribui ao explorar o potencial do RMF in natura como substituto integral, investigando sua influência nas propriedades mecânicas e ambientais dos blocos de pavimentação produzidos em uma planta industrial.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais empregados nesta pesquisa incluíram o Rejeito de Minério de Ferro (RMF) como agregado miúdo e pedrisco como agregado graúdo, Cimento Portland (CPV-ARI) como aglomerante e água potável. Não foram empregados plastificantes e nem adições para evitar influências externas e permitir análise da produção dos blocos em função do RMF. O RMF foi obtido em uma mina localizada no Quadrilátero Ferrífero. Minas Gerais, Brasil. As amostras de RMF foram coletadas ao longo das pilhas, seguindo os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 10007 (ABNT, 2004), no período entre os anos de 2021 e 2022. É importante salientar que o rejeito utilizado não passou por nenhum tipo de tratamento, sendo empregado em sua forma natural.

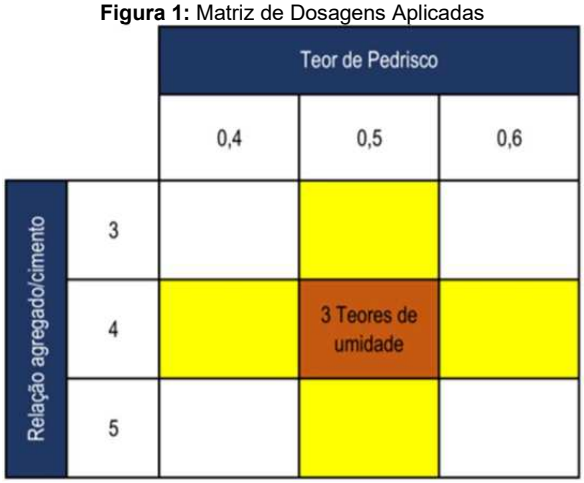
A composição química foi determinada utilizando Espectrômetro de raios X por energia dispersiva Shimadzu EDX – 720, esse ensaio foi utilizado com objetivo de determinar qualitativamente e semi quantitativamente os elementos químicos presentes no RMF. As fases cristalinas foram identificadas por difração de raios X (DRX) a partir da conferência e comparação com as difrações padrões. As amostras de RMF foram maceradas até a forma de pó (<75 µm). Utilizou-se o equipamento da marca SHIMADZU, modelo XRD-7000 com tubo de raios X de cobre (Cu), tensão de 40,0 kV, corrente elétrica de 30,0 mA e varredura por passo de 0,020 θ variando de 5 a 90° com tempo de leitura de 5s/passo. A distribuição granulométrica do RMF foi determinada por peneiramento nas peneiras de abertura 4,75 mm, 2,36 mm,1,18 mm, 600 µm, 300 µm, 150 µm e 75 µm.

O ensaio de perda ao fogo foi realizado no RMF de modo a se obter a perda de massa após aquecimento em forno mufla a 950°C. A amostra de rejeito foi submetida ao ensaio de área superficial específica por adsorção no equipamento NOVA 2200 e da marca Quantachrome, sendo os cálculos realizados

automaticamente pelo software Quantachrome NovaWin através do método Brunauer, Emmett e Teller (BET). As amostras foram tratadas termicamente durante 24 horas a 150°C e o gás utilizado como adsorvato foi o nitrogênio.

Os blocos foram produzidos com substituição total do agregado miúdo pelo RMF. A norma brasileira de peças de concreto para pavimentação descreve como requisito resistência característica à compressão (f_{pk}) superior a 35 MPa para peças de concreto para pavimentação intertravada sujeita ao tráfego de pedestres, de veículos dotados de pneumáticos e áreas de armazenamento de produto NBR 9781 (ABNT, 2013). O teor de umidade da mistura variou em 6, 7 e 8%, a relação de agregados/cimento (m) variou em 3, 4 e 5 e o teor de pedrisco da mistura variou em 50, 60 e 70%. Foi adotada a matriz verificada na Figura 1 referente às diferentes dosagens aplicadas.

Figura 1: Matriz de Dosagens Aplicadas



Fonte: Elaborado pelos autores

Assim, foram definidas sete misturas contendo variações de 0 a 100% de RMF e pedrisco, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Dosagem das misturas analisadas

Traço	Teor de Pedrisco (%)	Relação Agregado/Cimento	Umidade (%)
1	40	4,00	7,00
2	50	3,00	7,00
3	50	4,00	6,00
4	50	4,00	7,00
5	50	4,00	8,00
6	50	5,00	7,00
7	60	4,00	7,00

Fonte: Elaborado pelos autores

Para alcançar os objetivos da pesquisa foi proposto a produção dos pavimentos intertravados seguindo as etapas de: estoque de insumos (1), controle tecnológico dos insumos (2), pesagem dos insumos (3), mistura (4), vibro prensagem (5), cura (6), controle tecnológico (7), estocagem (8) e instalação (9).

3 RESULTADOS E ANÁLISES

A Tabela 2 apresenta as propriedades físicas e químicas do RMF. A densidade foi de 2936 Kg/m³. A massa unitária apresentada foi de 1,51 Kg/m³ e a área superficial foi de 0,660 m²/g. Os resultados da composição química indicam que o rejeito possui como principais componentes o ferro e o silício, o teor de ferro na forma de Fe_2O_3 é de 22,63% e o teor de óxido de silício SiO_2 é de 72,72%. Comparando o RMF desta pesquisa com outros estudos brasileiros, observa-se que a composição é similar, com teores de óxidos de ferro superiores a 40% (Almada *et al.,* 2023; Castro Mendes *et al.,* 2020; Vescovi; Bezerra; Poggiali, 2023).

Tabela 2: Propriedades Físicas e Químicas do RMF

Propriedades Físicas	Valores	Composição Química	Percentuais (%)
Densidade (Kg/m³)	2936	SiO2	72,72
Massa unitária (Kg/m³)	1,51	Fe2O3	22,63
Módulo de finura	0,47	Al2O3	4,04

Área superficial específica (m^2/g)	0,660	SO3	0,30
		MnO	0,11
		CaO	0,09
		Perda ao Fogo	0,80

Fonte: Elaborado pelos autores

Os blocos de pavimento intertravado apresentaram uma superfície relativamente regular, com presença de pequenas irregularidades nas faces. Ressalta-se que esse pavimento intertravado foi produzido utilizando 100% de rejeito em substituição ao agregado miúdo e que não foi utilizado nenhum tipo de aditivo no processo de produção. A cor da peça é marrom escura, devido a presença do RMF. Pesquisas disponíveis na literatura indicam características semelhantes ao encontrado (Magalhães *et al.,* 2020; Eugênio *et al.,* 2023). Na Figura 2 é apresentado uma foto da peça de pavimento intertravado em quatro posições, destacando a face superior e laterais, incluindo uma escala de 1 cm para inferir o tamanho da peça.

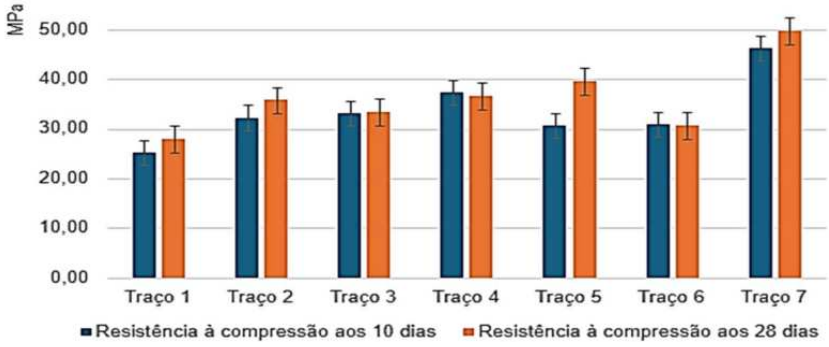
Figura 2: Imagem do pavimento intertravado



Fonte: Elaborado pelos autores

A resistência à compressão aos 10 e aos 28 dias dos sete traços é apresentada na Figura 3. Observou-se que o traço do concreto em estudo foi sensível às alterações no teor de umidade da mistura, no teor de pedrisco e na relação agregados/cimento, verificados no Gráfico de Dispersão na Figura 4.

Figura 3: Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão aos 10 e 28 dias dos 7 traços

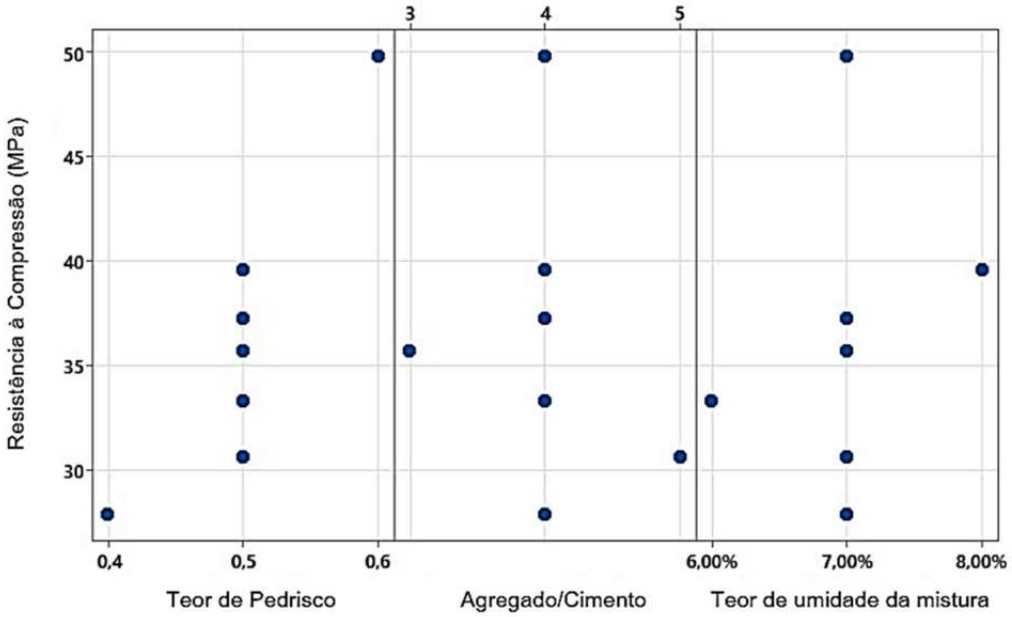


Fonte: Elaborado pelos autores

Verificou-se que a resistência à compressão cresceu com o aumento do teor de pedrisco e obteve as maiores resistências com a relação de agregados/cimento igual a 4. Em relação à umidade, a maior resistência à compressão verificada foi com 7%. Os melhores resultados de resistência à compressão foram referentes ao Traço 7, sendo 46,32 MPa a 10 dias e 49,80 MPa aos 28 dias.

Verifica-se que o bom desempenho mecânico do Traço 7 esteja relacionado à maior proporção de pedrisco (60%) associada à relação agregados/cimento otimizada (4:1), o que favorece uma matriz com melhor empacotamento e menor porosidade. Além disso, a umidade de 7% pode ter promovido uma hidratação mais eficiente do cimento, favorecendo a formação de produtos de hidratação e aumentando a densidade da matriz endurecida.

Figura 4: Gráfico comparativo da resistência à compressão e diferentes dosagens



Fonte: Elaborado pelos autores

Em relação ao ensaio de lixiviação, foram selecionados dois traços produzidos com RMF em substituição total do agregado miúdo para análise, que apresentaram resultados de concentração inferiores ao valor máximo permitido (VPM) NBR 10004 (ABNT, 2004), conforme Tabela 3. Esses resultados demonstram a ausência de risco de contaminações ambientais através da lixiviação de substâncias tóxicas.

Tabela 3: Resultado do ensaio de Lixiviação

Parâmetro	Unidade	Valor Máximo Permitido	Resultado 1	Resultado 2
Arsênio Total	mg/L	1	0,004	< 0,001
Bário Total	mg Ba/L	70	0,32	0,15
Cádmio Total	mg Cd/L	0,50	< 0,001	< 0,001
Chumbo Total	mg Pb/L	1	< 0,01	< 0,01
Cromo Total	mg Cr/L	5	0,11	0,11
Fluoreto	mg F-/L	150	2,51	1,51
Mercúrio Total	mg/L	0,1	< 0,0002	< 0,0002
Prata Total	mg Ag/L	5	< 0,005	0,006
Selênio Total	mg/L	1	< 0,001	< 0,001

Fonte: Elaborado pelos autores

4 CONCLUSÕES

Este trabalho foi desenvolvido para avaliar o potencial da aplicação do RMF em substituição total do agregado miúdo para a produção de pavimentos intertravados. Os resultados mostram que:

(1) Os traços 2,4,5 e 7 produzidos com 100% de RMF atingiu resistência à compressão superior aos 35 MPa aos 28 dias, atendendo ao requisito mínimo exigido pela NBR 9781 (ABNT, 2013).

(2) O traço 7 apresentou os melhores resultados de resistência à compressão, atingindo 46,32 MPa aos 10 dias e 49,80 MPa aos 28 dias, com umidade de 7%. Contudo, ainda existe potencial para explorar uma umidade de 8% nesse traço, o que pode ser investigado em futuras pesquisas.

(3) A análise de lixiviação dos blocos mostrou que os níveis de concentração dos elementos não ultrapassaram os limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2024), garantindo a segurança ambiental do material.

(4) A utilização do RMF na produção de pavimentos intertravados representa uma alternativa de baixo impacto ambiental, reduzindo a extração de materiais naturais não renováveis e promovendo a economia circular na construção civil.

REFERÊNCIAS

ALMADA, B. S. *et al.* Evaluation of the microstructure and micromechanics properties of structural mortars with addition of iron ore tailings. **Journal of Building Engineering**, v. 63, n. October 2022, p. 1–17, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781**. Peças de concreto para pavimentação - Especificações e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**. Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**. Resíduos sólidos – Classificação Parte 1: Requisitos de classificação. Rio de Janeiro, 2024.

CARVALHO, J. V. DE A. *et al.* Evaluation of Strength Parameters for Application in Cemented Iron Ore Tailings Stacks. **Indian Geotechnical Journal**, v. 53, n. 4, p. 775–788, 2023.

CASTRO MENDES, J. *et al.* Coating mortars based on mining and industrial residues. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, n. 5, p. 1569–1586, 2020.

COELHO, D. G. *et al.* Evaluation of Metals in Soil and Tissues of Economic - Interest Plants Grown in Sites Affected by the Fundão Dam Failure. v. 16, n. 5, p. 596–607, 2020.

DADZOE, F. *et al.* Towards a circular economy: a knowledge-attitude gap between demand and supply-side operators on 9º ENARC 2025 green building construction in Ghana. **Smart and Sustainable Built Environment**, v. 13, n. 4, p. 763–779, 2024.

GAMAGE, I. *et al.* Implementing Circular Economy throughout the Construction Project Life Cycle: A Review on Potential **Practices and Relationships. Buildings,** v. 14, n. 3, 2024.

GYIMAH, S. *et al.* Exploring the contributions of circular business models towards the transition of green economy in the Ghanaian construction industry. **Smart and Sustainable Built Environment**, 2024.

HE, X. *et al.* Multi-solid waste collaborative production of clinker-free cemented iron tailings backfill material with ultra-low binder-tailing ratio. **Construction and Building Materials**, v. 367, n. November 2022, p. 130271, 2023.

ISLAM, K.; MURAKAMI, S. Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020. **Global Environmental Change**, v. 70, n. March, p. 102361, 2021.

JAYAKODI, S. *et al*. Circular economy assessment using project-level and organisation-level indicators for construction organisations: A systematic review. **Sustainable Production and Consumption**, v. 48, n. March, p. 324–338, 2024.

JAYAKODI, S.; SENARATNE, S.; PERERA, S. Circular Economy Business Model in the Construction Industry: A Systematic Review. **Buildings**, v. 14, n. 2, p. 1–18, 2024.

LIMA, L. R. Exploring Fallacies and Environmental Responsibilities in the Socio-Environmental Reports of the Brazilian Company Vale S. A.: A Case Study on the Dam Disasters in Mariana and Brumadinho. v. 16, n. 1, p. 1–14, 2024.

QIU, J. *et al.* Effect of microbial-cemented on mechanical properties of iron tailings backfill and its mechanism analysis. **Construction and Building Materials**, v. 318, n. October 2021, p. 126001, 2022.

RADU, T. *et al.* Industrial Wastes as Filler in Bituminous Materials for Construction Industry: Toward Circular Economy. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 12, n. 1, p. 433–441, 2024.

SCHNEIDER, P. *et al*. Feasibility of substitute building materials for circular use in urban green infrastructure. **Civil Engineering Design**, v. 2, n. 5–6, p. 159–168, 2020.

SERVI, S. et al. Mechanical response of filtered and compacted iron ore tailings with different cementing agents: Focus on tailings-binder mixtures disposal by stacking. **Construction and Building Materials**, v. 349, n. March, 2022.

SHOOSHTARIAN, S. et al. Circular economy in action: the application of products with recycled content in construction projects – a multiple case study approach. **Smart and Sustainable Built Environment**, v. 13, n. 2, p. 370–394, 2024.

SINGH, A. K.; KUMAR, V. R. P. Integrating blockchain technology success factors in the supply chain of circular economy-driven construction materials: An environmentally sustainable paradigm. **Journal of Cleaner Production**, v. 460, n. November 2023, p. 142577, 2024.

TALLA, A.; MCILWAINE, S. Industry 4.0 and the circular economy: using design-stage digital technology to reduce construction waste. **Smart and Sustainable Built Environment,** v. 13, n. 1, p. 179–198, 2024.

VESCOVI, P. H. T.; BEZERRA, A. C. DA S.; POGGIALI, F. S. J. Iron ore tailing (IOT) chemical composition and content impact on the physical, mechanical, and durability properties of blended cement. **Journal of Building Engineering**, v. 80, n. November, p. 108119, dez. 2023.