CARACTERIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PARA POTENCIAL APLICAÇÃO EM REVESTIMENTOS PRIMÁRIOS DE RODOVIAS NÃO-PAVIMENTADAS

Characterization of iron ore tailings for potencial application in subgrades of unpaved roads

Matheus da Silva Salomão
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, Minas Gerais| matheus.0698874@discente.uemg.br

Maria Eduarda Coelho Queiroz
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, Minas Gerais | maria.0698882@discente.uemg.br

Fabiane Leocádia da Silva
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, Minas Gerais | fabiane.leocadia@uemg.br

Coralie Heinis Dias
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, Minas Gerais | coralie.dias@uemg.br

Resumo

O presente estudo avalia a viabilidade técnica do uso de rejeitos de minério de ferro como camada granular em subleitos de rodovias não-pavimentadas. O objetivo é promover soluções alternativas ao empilhamento do material em estruturas de barramentos e fornecer matéria-prima de baixo custo para a construção e correção de estradas vicinais. Para isso, foram realizados ensaios laboratoriais de umidade ótima, liquidez, plasticidade, compactação e compressão simples. Os resultados indicaram umidade ótima de 6% e características de não plasticidade, apresentando limite de liquidez de 17,64%. Os ensaios de compressão mostraram resistência de 146,67 kPa, 130 kPa e 146,47 kPa nos tempos de cura de 3, 7 e 12 dias, respectivamente.

Palavras-chave: Ensaios mecânicos; Caracterização; Estradas vicinais; Rejeitos de mineração; Minério de ferro.

ABSTRACT

This study evaluates the technical feasibility of using iron ore tailings as a granular layer in subgrades of unpaved roads. The goal is to promote alternative solutions to the stacking of the material in dam structures and to provide low-cost raw material for the construction and maintenance of unpaved roads. To achieve this, laboratory tests were conducted to determine optimal moisture content, liquidity, plasticity, compaction, and unconfined compression. The results indicated an optimal moisture content of 6% and non-plastic characteristics, with a liquid limit of 17.64%. The compression tests showed strengths of 146.67 kPa, 130 kPa, and 146.47 kPa at curing times of 3, 7, and 12 days, respectively.

Keywords: Mechanical testing; Characterization; Unpaved roads; Mining tailings; Iron Ore.

1 INTRODUÇÃO

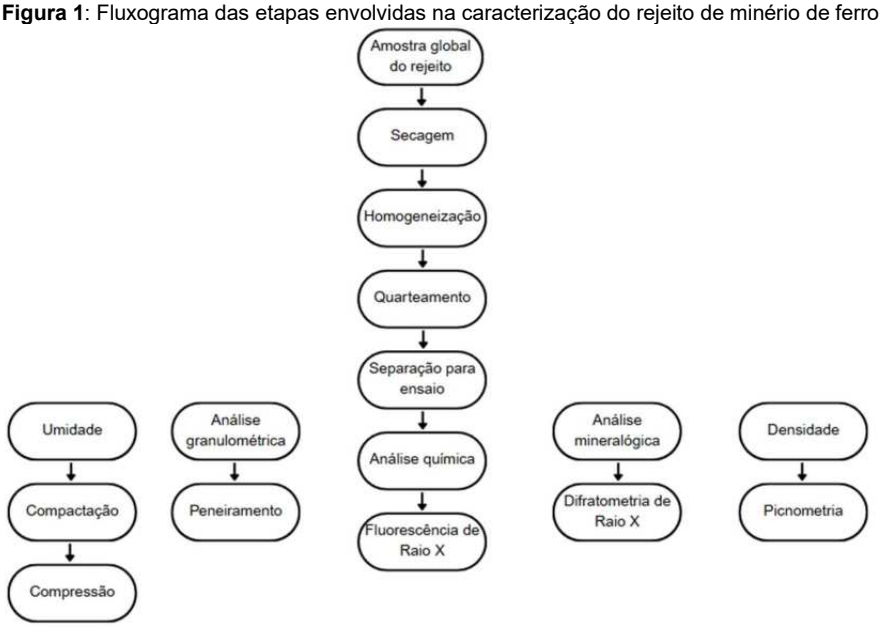
As estradas desempenham um papel fundamental em qualquer infraestrutura civil, sejam elas urbanas ou rurais. São importantes vias de acesso, responsáveis pelo fluxo de trabalho e pelos meios de produção necessários (Carmo *et al*., 2013). Entretanto, do ponto de vista estrutural, as estradas não pavimentadas enfrentam dificuldades. Isso acontece devido à ausência de uma camada de vedação que proporcione estabilidade e resistência. Sua construção é adaptada ao relevo natural, em escalas reduzidas, em vez de seguir padrões geométricos específicos. De acordo com a Confederação Nacional do Transporte, aproximadamente 78,5% da malha rodoviária brasileira não possui pavimentação (CNT, 2022). A inexistência dessa cobertura superficial contribui para processos erosivos e para o desgaste provocado pelo tráfego de veículos.

No meio acadêmico há amplos estudos sobre o reaproveitamento de resíduos industriais, que são analisados como substitutos de diversos materiais utilizados na infraestrutura viária. A aplicação de rejeitos de mineração tem demonstrado um bom desempenho em camadas estruturais de pavimentos conforme evidenciado em estudos de Lara *et al.* (2018), Rodrigues (2018), Buitrago (2016), entre outros. Nesse sentido, o presente trabalho foi baseado na seguinte pergunta-problema: qual a viabilidade técnica da utilização de rejeitos provenientes do processamento do minério de ferro na pavimentação, sendo utilizado como sub-base?

2 METODOLOGIA

Esse trabalho apresenta natureza quantitativa e qualitativa. Inicialmente foi desenvolvido através de revisão bibliográfica, a partir do levantamento de artigos e pesquisas acerca do tema. Posteriormente, a investigação torna-se experimental, visando compreender as principais características do rejeito de minério de ferro analisado. As amostras foram preparadas para ensaios de caracterização física, química, mineralógica e determinação de umidade, conforme apresentado no fluxograma da figura 1.

Figura 1: Fluxograma das etapas envolvidas na caracterização do rejeito de minério de ferro



Fonte: Autores (2025)

2.1 MATERIAL

O rejeito de minério de ferro utilizado nesse trabalho foi do tipo sem lama e foi fornecido pela Mina do Andrade, localizada no município de Bela Vista de Minas (MG). As amostras foram coletadas em pontos aleatórios da pilha do processo de beneficiamento, totalizando 10 kg. Em seguida, foram encaminhadas ao laboratório do Centro Tecnológico (CTec) da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) e submetidas a ensaios mecânicos, químicos e microscópicos.

2.2 MÉTODOS

Para os ensaios de caracterização, a preparação da amostra global de rejeito seguiu a norma NBR ISO 3082 (ABNT, 2019). A homogeneização e quarteamento foram realizados, e para os ensaios subsequentes a amostra global foi dividida em três partes: uma para ensaios físicos, e duas para determinação da composição química e distribuição granulométrica. Para a determinação da massa específica seguiu-se a norma NBR 6458 (ABNT, 2017), utilizando apenas os sólidos passantes na peneira de 2mm de abertura.

A análise granulométrica foi realizada de acordo com a NBR ISO 4701 (ABNT, 2020). Valeu-se do método de peneiramento a seco, realizado na Mina do Andrade empregando uma série de quatro peneiras de aberturas 1mm, 0,15mm, 0,106mm e 0,075mm.

O teor dos elementos e compostos químicos presentes foi determinado por fluorescência de raios X, no laboratório da mineradora. Um espectômetro foi utilizado para a análise quantitativa e as amostras pulverizadas e fundidas para reduzir os efeitos da matriz e melhorar reprodutibilidade e precisão analítica. A composição mineralógica foi obtida por difração de raios-x, utilizando o método do pó.

Nos ensaios de compactação segundo a NBR 7182 (ABNT, 2016) a amostra foi dividida em cinco partes iguais para representar os pontos determinados. Para a criação da curva, o peso da água foi aumentado em 2% a cada ponto, com o objetivo de encontrar o teor ótimo de umidade.

A determinação do Limite de Liquidez das amostras de rejeito foi fundamentada na NBR 6457 (ABNT, 2016). Portanto, utilizou-se do mesmo procedimento utilizado para solos, dada a ausência de normas específicas para o material estudado. Da mesma forma, valeu-se da NBR 7180 (ABNT, 2016) para balizar os ensaios de Limite de Plasticidade.

Seguiu-se a norma NBR 7182 (ABNT, 2016) para confeccionar os corpos de prova, cuja composição foi de rejeito em estado de umidade ótima. Foram preenchidos três cilindros metálicos, de 10 cm de altura por 5 cm de diâmetro, com a quantidade necessária de material. Depois, um soquete manual foi utilizado para realizar 26 golpes em 3 camadas de material, segundo as orientações normativas. No total foram confeccionados 15 corpos de prova, que foram submetidos a cura ao ar livre durante 3, 7 e 12 dias. Por fim, após os tempos de cura dos corpos de prova, os ensaios de compressão simples foram realizados utilizando-se uma prensa hidráulica manual.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A análise química da amostra de rejeito de minério de ferro analisada está apresentada no Quadro 1.

Quadro 1: Análise química do rejeito de minério de ferro

Amostra	% Fe	% SiO_2	% Al_2O_3	% P	% Mn	% CaO	% TiO_2	% MgO	Outros
Rejeito	29,21	50,90	1,63	0,11	0,12	0,48	0,08	0,75	16,72

Fonte: Autores (2025)

3.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

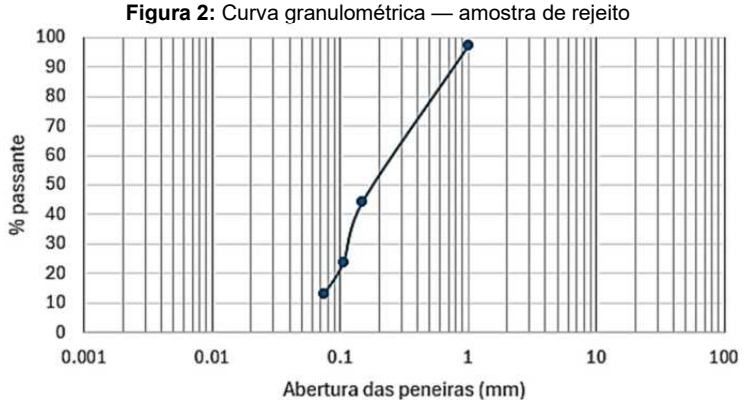
No difratograma de raios X observou-se picos menos intensos de dolomita ($CaMg(CO_3)_2$) e caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) e picos mais intensos de quartzo (SiO_2). Nota-se que os resultados da difração de raios X estão aderentes aos resultados observados na análise química. De acordo com o Quadro 1, a sílica apresenta o maior teor encontrado no rejeito (50,90%), seguidos de ferro (24,03%) e óxidos de alumínio (1,63%). O teor de ferro apresentado na análise química justifica-se pela presença de hematita no material.

3.3 CURVA GRANULOMÉTRICA

De acordo com a curva granulométrica apresentada na figura 2, observa-se que aproximadamente 97,14% passam pela peneira de 1mm. Isso indica uma baixa quantidade de partículas grossas (cascalho e areia grossa). 12,86% do material passa pela peneira de 0,075mm, o que indica uma quantidade limitada de finos (silte e argila).

Baseando-se na NBR 6502/2022 (ABNT, 2022), o rejeito pode ser considerado como areia média a fina, já que a maioria das partículas está na faixa entre 0,15mm e 1mm.

Figura 2: Curva granulométrica — amostra de rejeito



Fonte: Autores (2025)

3.4 LIMITE DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE

A partir do quadro 2, observa-se que não foi possível obter os valores usando os cilindros de 3mm e 10mm conforme solicitado pela norma. Percebe-se então que o rejeito pode ser considerado um material não plástico (NP), devido possivelmente às suas propriedades físicas e mineralógicas.

Quadro 2: Limites de liquidez e plasticidade do rejeito

Material	Limite de Liquidez – LL (%)	Limite de Plasticidade – LP (%)	Índice de Plasticidade – IP (IP = LL-LP)
Rejeito	15.41	NP	NP

Fonte: Autores (2025)

3.5 COMPACTAÇÃO (UMIDADE ÓTIMA)

O teor de umidade ótimo e os pesos específicos aparentes estão descritos na Tabela 1.

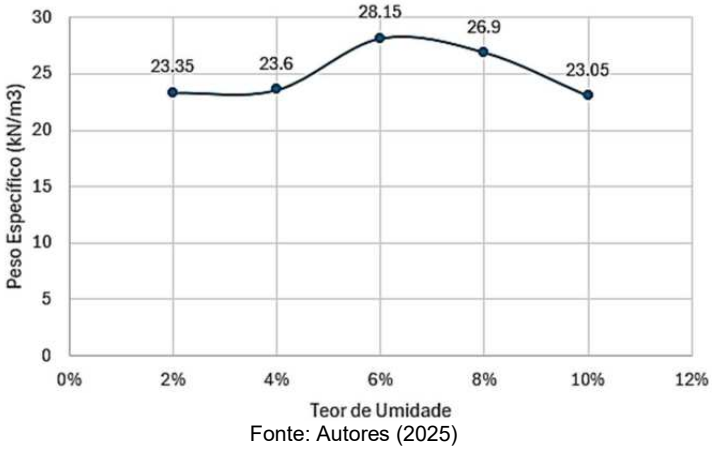
Tabela 1: Peso específico e teor de umidade do rejeito

Amostras	Peso Específico (kN/m³)	Umidade (%)
1	23,35	2
2	23.6	4
3	28.15	6
4	26.9	8
5	23.05	10

Fonte: Autores (2025)

A partir desse resultado foi traçado o gráfico representado o comportamento do peso específico do rejeito à medida que o teor de umidade é alterado, conforme figura 2. Assim, observa-se que o peso específico máximo para o rejeito analisado é de aproximadamente 28,15 kN/m³, apresentando teor de umidade ótimo de 6%.

Figura 3: Compactação do rejeito

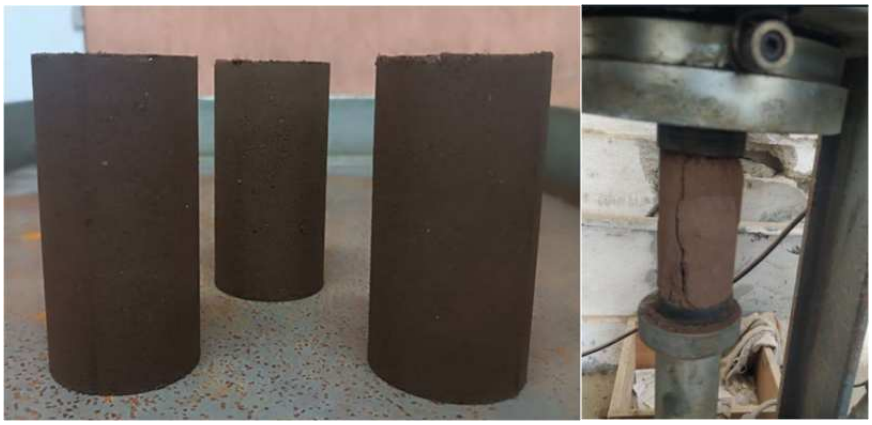


Fonte: Autores (2025)

3.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A resistência à compressão simples foi determinada analisando-se a média dos resultados encontrados em grupos de três corpos de prova, conforme figura 4.

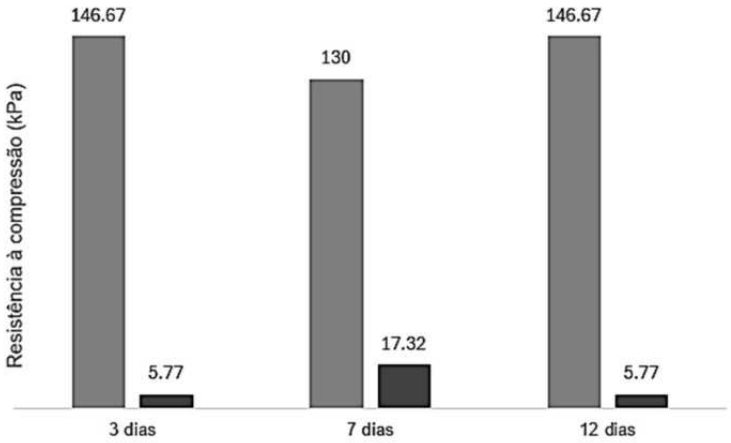
Figura 4: Corpos de prova moldados e corpo de prova rompido após ensaio de compressão



Fonte: Autores (2025)

Os resultados dos ensaios de compressão simples após cálculo médio dos 15 corpos de prova avaliados, bem como os respectivos desvios-padrão, são apresentados na figura a seguir.

Figura 5: Resistência à compressão simples e desvio-padrão das amostras



Fonte: Autores (2025)

Observa-se que os tempos de cura de 3 e 12 dias apresentaram desvios padrão idênticos e baixos, indicando maior uniformidade nos resultados de resistência. Em contraste, o tempo de cura de 7 dias apresentou o maior desvio padrão, o que pode indicar uma fase de transição ou variação significativa no desenvolvimento das propriedades mecânicas do material.

Galhardo (2015) ressalta que as avaliações tradicionais para previsão do comportamento de solos e rejeitos nem sempre encontram resultados exatos, o que também é observado nos estudos de Campanha (2011) e Rede (2018). Portanto, essa variação pode estar relacionada ao fato de existir diversos fatores influenciadores no comportamento do rejeito, como à heterogeneidade das amostras ou a efeitos intermediários no processo de cura.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo avalia a viabilidade técnica do uso de rejeitos de minério de ferro como camada granular em subleitos de rodovias não-pavimentadas. Para tal, foram analisados peso específico, granulometria, liquidez, plasticidade, compactação e resistência à compressão simples.

A partir dos dados coletados, pode-se concluir que o rejeito de beneficiamento de minério de ferro analisado é quimicamente inerte, pois sua composição é predominantemente de dióxido de silício (SiO_2). Dessa forma, apresenta baixo risco de contaminação e não libera contaminantes tóxicos no solo e em recursos hídricos.

Do ponto de vista físico, apresenta comportamento de areias finas a médias. Portanto, possui elevada permeabilidade dada à predominância de partículas arenosas, baixa coesão — o que pode implicar em menor resistência ao cisalhamento — e baixa retenção de água, influenciando diretamente no comportamento geotécnico ao qual está inserido.

Dessa forma, o material analisado nesse estudo apresenta uso potencial em bases e sub-bases de pavimentação devido à sua boa drenabilidade. No entanto recomenda-se, para aplicação em camadas de pavimentos, a composição do material de estudo com outros de característica argilosa com o objetivo de melhorar suas capacidades coesivas. Com isso, espera-se melhores resultados mecânicos de resistência à compressão.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela atenção e apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3082**: Minérios de ferro — Procedimento de amostragem e preparação de amostras. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

____ **NBR ISO 4701**: Minérios de ferro e pré-reduzidos — Determinação da distribuição granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

____ **NBR 6457**: Amostra de solos — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

____ **NBR 6458**: Solo — Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

____ **NBR 7180**: Solo — Determinação de limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

____ **NBR 7182**: Solo — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BUITRAGO, N. D. T. Aplicabilidade do agregado siderúrgico açobrita misturado com solo em camadas de pavimentos rodoviários. 2016. xviii, 85 f., il. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

CAMPANHA, Â. Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação. 2011. 106f. Monografia (Especialização) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

CARMO, F. C. A.; *et al.,* Análise da densidade ótima de estradas florestais em propriedades rurais. **Cerne,** v.19, n.3 (2013), p. 451-459.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. CNT. Anuário CNT de Transportes - Estatísticas Consolidadas 2022 - Brasília: 2016.

GALHARDO, D. C. Estudo sobre a viabilidade técnica da utilização de rejeitos de mineração de ferro em camadas de pavimentos rodoviários. 2015. 186p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://transportes.ime.eb.br/DISSERTA%C3%95ES/2015%20DANIEL%20CORR%C3%8AA%20GALHARDO.pdf>. Acesso em: 16 abr.2024

LARA, L. L. D. *et al.,* Estudo do comportamento de um solo com adição de rejeito de flotação de minério de ferro para utilização em camadas de pavimentos. In: 32º CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES DA ANPET GRAMADO. 2018. Gramado – RS. Infraestrutura - Materiais granulares e Concreto I. Gramado: ANPET, 2018. p.1966-1977.

REDE DE PESQUISAS APLICADAS À PAVIMENTAÇÃO (REDE). Estudo da viabilidade técnica de utilização de rejeitos de minério de ferro em pavimentos rodoviários. Nova Lima, MG, 2018. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/RDT_VIA040_REL_FINAL_REJEITOS_DE_MINERACAO.pdf> Acesso em: 20 mai.2024

RODRIGUES, K. H. P. Estudo de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração. 2018. 108p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia – Núcleo de Geotecnia. Ouro Preto - MG, 2018.