

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE REJEITOS DE BARRAGEM PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO

Cleide Martins ¹; Flaviane Beltrão²; Marcelo Franco³; Vitor Reis ⁴; Rafael Augusto ⁵;

Resumo – A mineração desempenha papel fundamental na economia brasileira, mas gera grandes volumes de rejeitos, cuja disposição em barragens demanda extensas áreas e envolve riscos geotécnicos. Este estudo investiga o potencial de aproveitamento de um rejeito arenoso filtrado, proveniente do beneficiamento de minério de ferro da Mina de Brucutu (MG), como material para camadas de pavimentação. O rejeito (denominado comercialmente areia A2) foi caracterizado física e mecanicamente, puro e estabilizado com diferentes teores de cimento Portland (1,5%, 2,0% e 3,0%). Os ensaios incluíram granulometria, limites de Atterberg, massa específica dos grãos, compactação (energias Normal, Intermediária e Modificada), Índice de Suporte Califórnia (CBR) e Módulo de Resiliência (MR). Os resultados indicaram que o material é uma areia siltosa não plástica com baixa expansão e o CBR da areia pura mostrou-se elevado. A adição de cimento melhorou significativamente o desempenho mecânico, especialmente o Módulo de Resiliência, com as misturas atendendo aos critérios técnicos de normas do DNIT para aplicação em sub-base e base de pavimentos. O aproveitamento deste rejeito estabilizado apresenta-se como uma alternativa técnica e ambientalmente promissora, contribuindo para a sustentabilidade na engenharia viária e a gestão de resíduos da mineração.

Abstract – Mining plays a fundamental role in the Brazilian economy but generates large volumes of tailings, whose disposal in dams requires extensive areas and involves geotechnical risks. This study investigates the potential use of a filtered sandy tailing, originating from iron ore processing at the Brucutu Mine (MG), as material for pavement layers. The tailing (commercially known as A2 sand) was physically and mechanically characterized, both in its natural state and stabilized with different contents of Portland cement (1.5%, 2.0%, and 3.0%). The tests included grain size distribution, Atterberg limits, specific gravity, compaction (Standard, Intermediate, and Modified energies), California Bearing Ratio (CBR), and Resilient Modulus (MR). The results indicated that the material is a non-plastic silty sand with low expansion. The CBR of the natural sand was found to be high. Cement addition significantly improved mechanical performance, especially the Resilient Modulus, with the mixtures meeting the technical requirements of DNIT standards for application in pavement subbase and base layers. The use of this stabilized tailing emerges as a technically and environmentally promising alternative, contributing to sustainability in road engineering and mining waste management.

Palavras-Chave – Rejeito de mineração; pavimento sustentável; viabilidade econômica.

1. INTRODUÇÃO

Com vastas reservas naturais, principalmente nos estados do Pará e Minas Gerais, o Brasil é um dos maiores produtores de minério de ferro do mundo (Oda et al., 2021). Este minério é um componente essencial para diversas indústrias, e sua extração representa um pilar importante na economia do país. Ainda na concepção dos autores Arantes; Rigatto e Ferreira (2024), o setor

¹ Eng. Civil., MSc, Universidade Federal de Minas Gerais, cleidemm1981@gmail.com

² Eng. Civil., MSc, Universidade Federal de Minas Gerais, flavianebeltrao@eng.mest.ufmg.br

³ Eng. Civil, PhD, Universidade Federal de Minas Gerais, marcelo@etg.ufmg.br

⁴ Eng.Civil, MSc, Universidade Federal de Minas Gerais, vitorovreis@gmail.com

⁵ Eng.Civil, Pós, Universidade Federal de Minas Gerais, ra2361982@ufmg.br

mineral é essencial e imprescindível para o mundo, sendo esse ramo de atividade considerado como importante no avanço das atividades econômicas e considerado um símbolo do crescimento nacional. De acordo com os dados do IBRAM, (2023) a produção mineral brasileira em 2022 obteve a marca de U\$48 bilhões. As exportações minerais totalizaram 12% das exportações totais brasileiras, representando U\$41,67 bilhões, e ainda com a previsão de um investimento de US\$50 bilhões até 2027 para a mineração no Brasil. No entanto, de acordo com (Oda et al., 2021) essa atividade tão importante economicamente acarreta danos significativos e severos ao meio ambiente.

Segundo Garoto (2019), o impacto social da mineração, ao comparar as percepções entre empresas e comunidades locais, ressalta a relevância do envolvimento das partes interessadas na compreensão desses impactos, uma vez que existem múltiplos efeitos sociais, incluindo a dependência econômica, o desenvolvimento de infraestrutura e as preocupações ambientais, enfatizando a necessidade de uma estrutura de avaliação abrangente. Isso sugere que consultas às comunidades podem resultar em benefícios a longo prazo e aprimorar as relações entre as empresas e as populações locais. Há uma necessidade premente de integrar avaliações de impacto social em projetos de mineração para mitigar as consequências negativas.

A gestão dos grandes volumes de rejeitos gerados pela mineração representa um desafio geotécnico e ambiental significativo, demandando vastas áreas para disposição em estruturas como barragens e pilhas. A busca por alternativas que permitam o aproveitamento desses materiais em outras aplicações de engenharia é, portanto, importante não apenas para mitigar os riscos associados ao armazenamento e reduzir o impacto ambiental, mas também para promover a economia circular no setor. Nesse contexto, a utilização de rejeitos de minério de ferro, devidamente caracterizados e, se necessário, estabilizados, na construção de camadas de pavimentação surge como uma alternativa técnica e ambientalmente promissora, especialmente para uso em vias internas ou de serviço dentro das próprias áreas de mineração ou em projetos de infraestrutura próximos (Arraes et al., (2023) e (Cunha et al., (2021)).

2. GERAÇÃO E PROCESSAMENTO DO REJEITO

Conforme dados da Agência Nacional de Mineração (ANM, 2025), o Brasil possui 916 barragens de mineração registradas, das quais 332 estão em Minas Gerais. Este cenário evidencia o enorme volume de rejeitos gerados e a importância de encontrar destinos alternativos para esse material, visando reduzir a necessidade de grandes áreas de disposição e os riscos geotécnicos associados. O processo geral, desde a geração do rejeito até seu potencial aplicação em pavimentação após estabilização, é esquematizado na Figura 1. As etapas principais são descritas a seguir.

FRAMEWORK

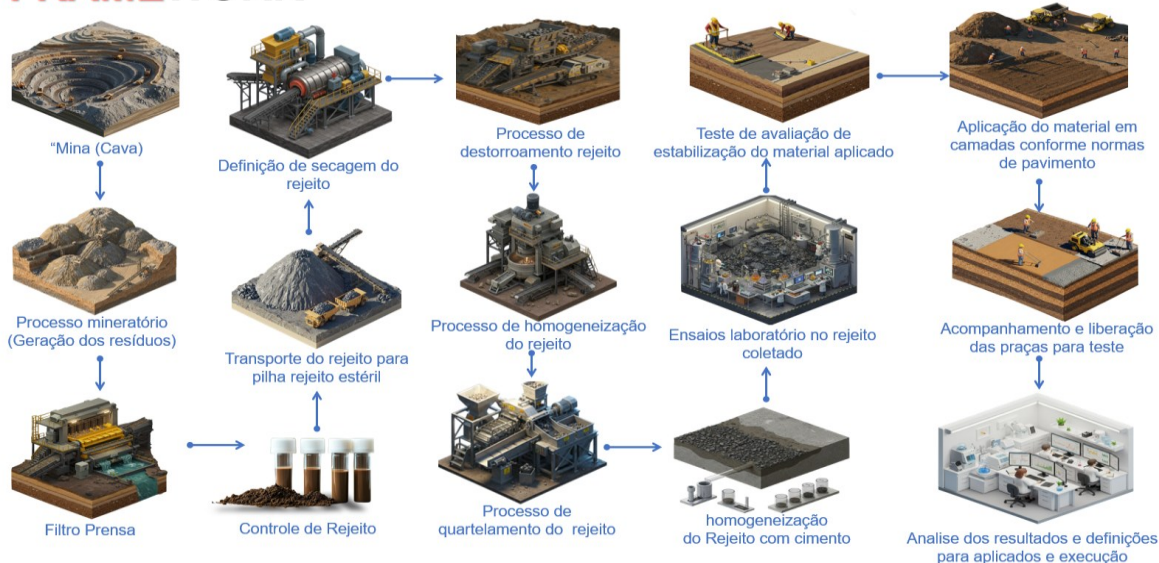


Figura 1. Etapas do processo. Elaborado pelos autores (2025)

O processo inicia-se na mina (cava) com a extração do minério, gerando rejeitos como subproduto. Durante o beneficiamento, os materiais de interesse são separados dos resíduos (rejeitos). Este material residual é então direcionado a um filtro prensa, onde parte da umidade da polpa é removida. A umidade do material filtrado é avaliada antes do transporte para a pilha de rejeito e estéril, onde é armazenado temporariamente.

O controle de umidade também é realizado na pilha antes de qualquer manuseio subsequente. Após verificação, define-se o tipo de secagem adicional, se necessário, para viabilizar o uso do rejeito. Segue-se o destorroamento e processamento mecânico para reduzir a granulação e facilitar a manipulação, além da homogeneização para garantir características uniformes. Realiza-se o quarteramento para obtenção de amostras representativas para análise.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Localização do experimento

O experimento de campo foi conduzido em um pátio rodoviário da empresa AGERA, localizado próximo à Rodovia MG-129, dentro da área da Mina de Brucutu. As coordenadas aproximadas do local são 667.580,058 E / 7.801.325,861 N (Sistema de Coordenadas UTM – Zona 23S – Datum SIRGAS2000). A Mina de Brucutu situa-se no município de São Gonçalo do Rio Abaixo, a aproximadamente 100 km de Belo Horizonte, capital de Minas Gerais, com acesso pela rodovia BR-381/BR-262. A Figura 2 apresenta a localização geral da área do experimento.



Figura 2. Localização do Experimento. Fonte: Google Earth (2025).

Para melhor visualização, a Figura 3 identifica o local exato escolhido, nesta vista foi realizada uma fotografia com drone.



Figura 3. Vista aérea do experimento. Fonte: Autores (2025)

4. 4. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROJETO DA PILHA DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS (PDR)

O experimento foi conduzido em uma área adjacente a uma Pilha de Disposição de Rejeitos (PDR) em construção na Mina de Brucutu, cujo projeto teve início em 2020. A PDR foi projetada para ser constituída por rejeitos filtrados compactados (denominado "Caso Base" no projeto original), seguindo diretrizes técnicas específicas (Documento MO1450AA-X-00008, BVP, 2022) para garantir a estabilidade da estrutura.

Os parâmetros de compactação definidos para a PDR incluíam um grau de compactação mínimo de 97% em relação ao ensaio Proctor Normal, controle do índice de vazios e monitoramento da densidade seca in situ. O projeto da PDR também contemplava sistemas de drenagem interna e superficial, estruturas de contenção de sedimentos (sumps) e um sistema de monitoramento e instrumentação geotécnica (piezômetros, marcos de deslocamento, medidores de vazão, indicadores de nível d'água e medidores de turbidez). A Figura 4 apresenta o arranjo geral da área onde o projeto da PDR está sendo implementado.

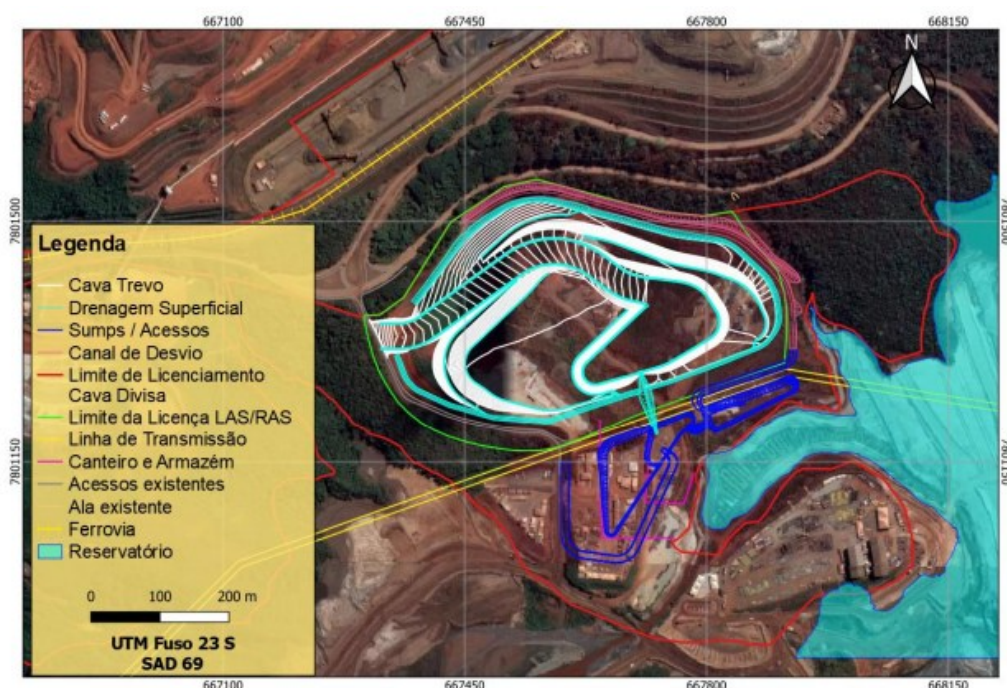


Figura 4. Arranjo Geral do Local a ser implementado o Projeto. Fonte: Autores (2025).

5. CONSTRUÇÃO DA FUNDAÇÃO DA ÁREA DO EXPERIMENTO

Para a construção da fundação da área implantada, foram realizados estudos geológicos e geotécnicos onde foi possível identificar a composição e características dos solos presentes da área implantada. A fundação da área onde foi implantada o experimento é composta por um espesso manto de solos alóctones sotoposto por um solo residual/saprolítico de filito/xisto de acordo com os furos de sondagem. A Figura 5 abaixo mostra as locações das campanhas geológicas e geotécnicas executadas.

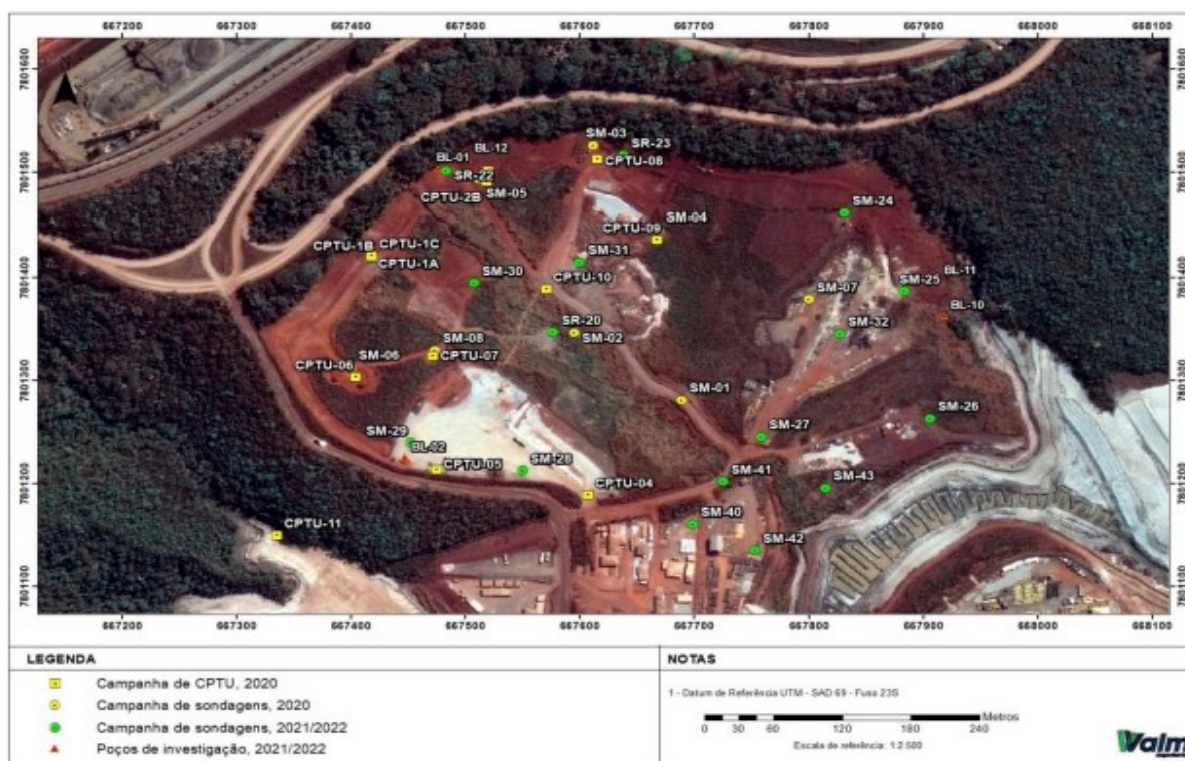


Figura 5. localização dos furos de sondagem. Fonte: Valm (2020).

Foram encontrados solo coluvionares e laterídicos com consistências moles, por isso foram removidos assim como a camada de aluvião encontrada. Em seguida foram realizadas duas campanhas de investigação geotécnica e geológica sendo a primeira nos anos de (2019-2020), composta de 08 sondagens mistas e 12 ensaios CPTU e a segunda composta por 13 sondagens mistas, 04 rotativas, além de ensaios de campo instalação de 15 indicadores de nível de água.

Ainda nesta etapa, foram feitas também mapeamentos geológicos abrangendo toda área da pilha. O estudo de mapeamento foi finalizado com a identificação dos solos encontrados: colúvio, laterídico, canga e residual. Os procedimentos de execução da fundação seguiram a seguinte ordem: Preparo do Terreno (remoção dos solos moles e compactação da superfície); Investigação complementar (ajuste nos projetos) implantação da fundação e monitoramento (controle geotécnico e instalação de indicadores de nível de água para avaliação da estabilidade).

6. CONSTRUÇÃO DO ATERRO EXPERIMENTAL (SEGMENTO COM REJEITO ESTABILIZADO)

Na etapa da construção do Aterro de Pilha, foi utilizado rejeitos filtrados compactados que se enquadraram no Caso Base, seguindo alguns critérios como:

- Umidade de compactação: compactação das camadas dentro da umidade alvo de compactação (9,0% a 10,0% para compactação com vibração de alta frequência, ou 10,0% a 13,5% para compactação sem vibração);

- Índice de vazios e densidade: de 0,60 após compactação controle da densidade in situ em função do índice de vazios (0,60) e do percentil 90 da densidade dos grãos;
- Grau de saturação: Máximo de 80% e verificação do Proctor Normal, sendo indicado o mínimo de 97% deste (não sendo este o critério para liberação das camadas);
- Os procedimentos executivos seguiram, conforme especificação Técnica Construtiva (ET-1450AA-X-00035, WALM, 2023). Em relação à geometria, o aterro da PDR foi construído com uma inclinação de 2,5H: 1,0V, bermas com largura mínima de 8 m e altura máxima dos bancos de 10,0 m. A Figura 6 abaixo, mostra a realização da construção do aterro.

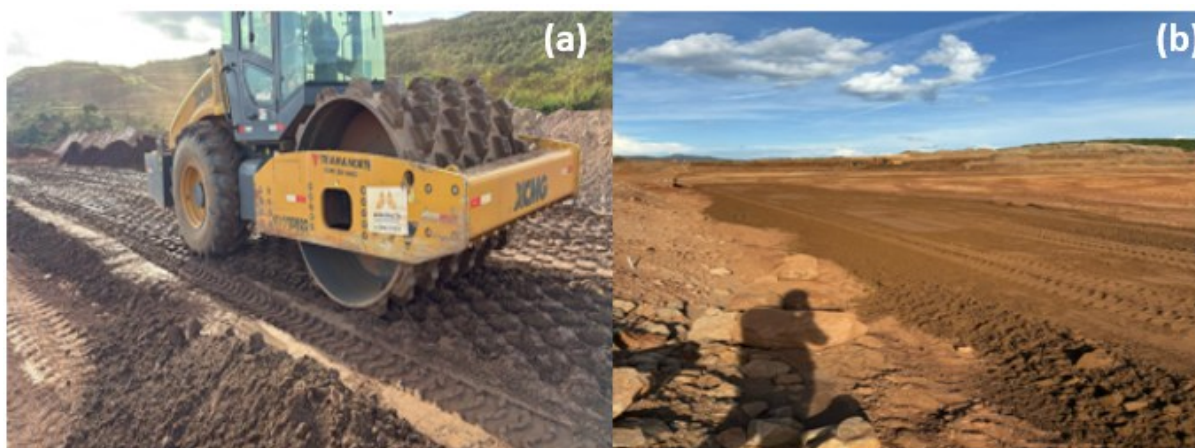


Figura 6. Compactação (a) e espalhamento do material (b). Fonte: Autores (2025).

7. SISTEMA DE DRENAGEM INTERNA

A concepção do sistema de drenagem teve como objetivo desviar as águas provenientes da precipitação direta incidente sobre a área ao entorno da PDR, para garantir integridade da mesma. Para a precipitação direta sobre a área da PDR, foram propostos dispositivos de drenagem que visaram o direcionamento das águas para os canais periféricos ou para a descida de água, sendo que o direcionamento final é para os sumps localizados entre a PDR e a Barragem Sul.

A drenagem interna da PDR Trevo foi constituída por drenos trapezoidais, com seção drenante de enrocamento (D50 = 175 mm) e transições de brita 3, brita 0 e Areia com 30 cm de espessura, cada. Estes drenos ficaram apoiados em um tapete drenante do tipo “sanduíche”, formado por transições de areia, com espessuras de 30 cm cada, e brita 0 com espessura de 65 cm. A inclinação do tapete foi de 1%. Por sua vez, o tapete drenante permaneceu sobre uma camada de regularização de material competente, com finalidade de conduzir o escoamento da drenagem interna para o canal de ligação.

8. COLETA DO MATERIAL E ENSAIOS LABORATORIAIS

O material base investigado neste estudo consiste em um rejeito arenoso filtrado, subproduto do processo de beneficiamento de minério de ferro da Mina de Brucutu, localizada em Barão de Cocais, Minas Gerais. Este rejeito, após passar por processo de filtragem para redução de umidade na própria planta da mina, é manuseado e comercializado pela empresa AGERA sob a designação de 'Areia A2'. Para os experimentos de estabilização química visando a aplicação em pavimentação, utilizou-se esta Areia A2, conforme Figura 7.

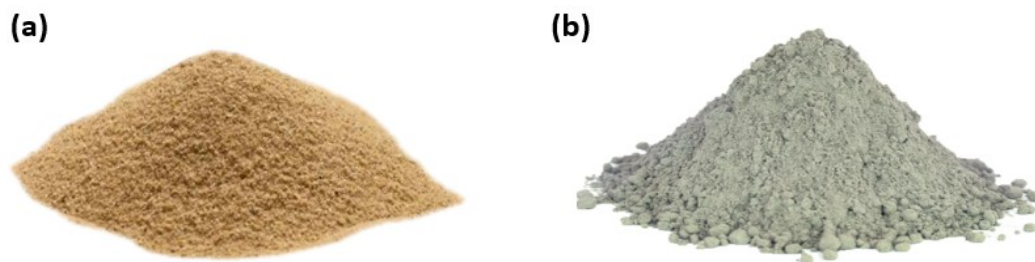


Figura 7. Materiais selecionados para estudo: Areia A2 (a) e cimento Portland (b).

Fonte: Autores (2025).

9. ENSAIOS DE LABORATÓRIO E CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DE AREIA A2 B E CIMENTO

As amostras de Areia A2 (rejeito filtrado) e das misturas com cimento Portland foram submetidas a ensaios de caracterização física e mecânica em laboratório (SOLOCAP), seguindo as normas técnicas brasileiras pertinentes A Tabela 1 lista os principais ensaios realizados.

Tabela 01: Ensaios de Caracterização dos materiais realizados

Norma	Ensaios
ABNT NBR 7182/2015	Ensaios de Compactação
ABNT NBR 9895/2017	Índice Suporte Califórnia
ABNT NBR 6459/2017	Determinação do Limite de Liquidez
ABNT NBR 7180/2016	Limite de Plasticidade
ABNT NBR 7181/2018	Análise Granulométrica por peneiramento e sedimentação
ABNT NBR 6458/2017	Massa Específica dos Grãos
DNIT 181/2018	Determinação do Módulo de Resiliência

Fonte: Autores (2025)

10. PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS PARA ENSAIOS

Após a caracterização da Areia A2 pura, foram preparadas três misturas distintas com adição de cimento Portland CPIII E 32, variando o teor de cimento em relação à massa seca da areia, conforme detalhado na Tabela 2. Estas misturas foram utilizadas nos ensaios de compactação, CBR e Módulo de Resiliência. As energias de compactação utilizadas foram: Proctor Normal, Intermediário e Modificado.

Tabela 2: Misturas realizadas

Mistura	% areia	% cimento	Representação
Areia A2B + Cimento	98,5	1,5	M1
Areia A2B + Cimento	98	2	M2
Areia A2B + Cimento	97	3	M3

Fonte: Autores (2025)

11. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo teve como foco a avaliação da viabilidade técnica e ambiental do aproveitamento de um rejeito arenoso filtrado da mineração de ferro, reforçando seu potencial contribuição para práticas sustentáveis na engenharia viária. Do ponto de vista granulométrico, o material apresenta 61% de areia, 31% de silte e 7% de argila, dentro dos limites normativos. A ausência de plasticidade (NP) e a expansão nula observada nos ensaios são indicativos positivos para o controle das deformações volumétricas.

O elevado Índice de Suporte Califórnia (CBR), variando entre 90% e 281% mesmo sob compactação padrão, evidencia um desempenho mecânico superior ao mínimo exigido. Com adições de 1,5% a 3% de cimento, observou-se significativa melhora no módulo de resiliência (MR), atingindo valores acima de 600 MPa, comprovando a eficácia da estabilização química.

Além do bom desempenho em laboratório, a experiência prática em obras como os aterros da PDR CMD e PDR Trevo (VALE, 2023) valida o comportamento técnico do material, especialmente quando são adotados controles rigorosos de umidade, densidade seca, índice de vazios ($\leq 0,60$) e grau de saturação (até 80%). O comportamento dilatante sob compactação em 97% do Proctor Normal reforça sua estabilidade volumétrica e resistência a cargas repetitivas. Assim, a reutilização da Areia A2B em pavimentação se configura como uma solução técnica e ambientalmente estratégica, alinhada aos princípios da economia circular e da gestão sustentável de resíduos sólidos da mineração.

12. CONCLUSÃO

Os ensaios realizados evidenciaram que o rejeito arenoso proveniente da Mina de Brucutu apresenta propriedades físico-mecânicas compatíveis com as exigências de pavimentação, atendendo de forma satisfatória aos critérios estabelecidos pelas normas DNIT 139/2010 e 141/2022. A adequada distribuição granulométrica, a ausência de plasticidade, os elevados valores de Índice de Suporte Califórnia (CBR) e o módulo de resiliência superior qualificam o material para uso em camadas de sub-base. Adicionalmente, com a incorporação de teores de cimento variando entre 1,5% e 3%, o material também se torna apto para aplicação em camadas de base.

A utilização desse rejeito configura-se como uma solução tecnicamente viável e ambientalmente sustentável, promovendo a redução da extração de recursos naturais e incentivando a reutilização de resíduos oriundos da atividade mineradora. No entanto, sua aplicação em escala real requer um rigoroso controle tecnológico, especialmente em relação aos parâmetros de compactação, teor de umidade e índice de vazios. Dessa forma, recomenda-se a execução de trechos-piloto como etapa prévia à adoção definitiva, visando validar, em condições de campo, os resultados obtidos em laboratório.

Este estudo reforça a relevância estratégica da geotecnia na conciliação entre desempenho técnico e sustentabilidade ambiental, contribuindo com subsídios técnicos e científicos para a formulação de políticas públicas e diretrizes normativas que viabilizem a utilização segura e eficiente de rejeitos minerais em obras de infraestrutura viária.

13. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Código de Financiamento 001).

REFERÊNCIAS

ARANTES, L. A.; RIGATTO, I. B.; FERREIRA, L. D. “*Reutilização de Rejeitos de Minério de Ferro em Camadas de Pavimentação: Análise de Viabilidade.*” Anais do xxi congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica. Anais. Em xxi congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica. Editora Omnis Scientia, 2024. Disponível em: <https://editoraomnisscientia.com.br/post-artigo/?artigo=4421>. Acesso em: 4 mar. 2025.

ARRAES, L. M. et al. “*Estabilização de rejeitos com cimento para uso em camadas de pavimentos: análise mecânica e ambiental.*” Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2023.

CUNHA, M. B. et al. “*Avaliação do uso de rejeito de mineração como material para base e sub-base em pavimentação.*” Revista Brasileira de Geotecnia, v. 42, n. 3, p. 105-122, 2021.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2010). “*Norma DNIT 139/2010-ES: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente*” – Especificação de serviço. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/normalizacao-tecnica/normas-tecnicas/download/139_2010_es.pdf. Acesso em 10/03/2025.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2022). “*Norma DNIT 141/2022-ES: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente*” – Especificação de serviço. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/normalizacao-tecnica/normas-tecnicas/download/141_2022_es.pdf. Acesso em 10/03/2025.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO.” *Panorama do setor mineral brasileiro no ENIC*. Brasília. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/ibram-apresenta-panorama->. Acesso em 04/03/2025.

GEROTTO, Gisela et al. “Impacto social da mineração: Uma comparação entre a percepção da empresa ea da comunidade. Contextus–Revista Contemporânea de Economia e Gestão, v. 17, n. 3, p. 139-166, 2019.

Mantilla, A. P. P., & Santamaría, J. E. V. (2023). “*La gestión del riesgo de desastres en la reglamentación local de Bogotá, Medellín y Cali: análisis de la inclusión del enfoque diferencial de género para la garantía de derechos de mujeres y niñas. Academia y Derecho, 14(25).*” Disponível em: <https://doi.org/10.18041/2215-8944/academia.25.10529>. Acesso em: 28 jul.

ODA, S. et al. “*Uso de rejeitos de mineração em pavimentos rodoviários: um referencial teórico.*” Qualidade e Sustentabilidade na Construção Civil, p. 152, 2021

VALE S.A. “*Manual de Operação da PDR Trevo*”. MO-1450AA-X-00005-Rev.2.

DNIT - “*Departamento nacional de infraestrutura de transportes*”. Normas DNIT 139/2010 e 141/2022.