

# Avaliação do Desempenho de Misturas Compactadas de Solo com Rejeito de Mineração para Aplicação em Base e Sub-Base Rodoviária

Vinicius Lago Silva  
Engenheiro Civil, UESC, Ilhéus, Brasil, [vl Silva.egc@uesc.br](mailto:vl Silva.egc@uesc.br)

Cleverson Alves de Lima  
Professor Doutor, UESC, Ilhéus, Brasil, [clalima@uesc.br](mailto:clalima@uesc.br)

Paulo A. L. Figueiredo Coelho  
Professor Doutor, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, [pac@dec.uc.pt](mailto:pac@dec.uc.pt)

Niel Nascimento Teixeira  
Professor Doutor, UESC, Ilhéus, Brasil, [nnteixeira@uesc.br](mailto:nnteixeira@uesc.br)

**RESUMO:** A crescente importância da reutilização de resíduos de mineração surge de preocupações ambientais, econômicas e sociais. O acúmulo de rejeitos de mineração em barragens representa um desafio global com sérios impactos ambientais. Buscar soluções sustentáveis, como a reutilização desses materiais para recuperar minerais valiosos e reduzir a exploração ambiental, é de suma importância. A pesquisa examina misturas de rejeitos de mineração e areia grossa mal graduada em diferentes proporções (70%-30%, 80%-20% e 100%-0%) para avaliar sua viabilidade técnica e sustentabilidade. Os ensaios incluem caracterização dos materiais, análises mecânicas de desempenho e avaliação de expansibilidade e Índice de Suporte California (ISC). As misturas mostraram baixa expansibilidade, adequadas para chuvas intensas, mas resultados insatisfatórios para base e sub-base rodoviária. Contudo, são promissoras como reforço de subleito, contribuindo para a pesquisa em sustentabilidade na indústria de mineração.

**PALAVRAS-CHAVE:** Mineração, Rejeito, Ensaio Laboratoriais, ISC.

**ABSTRACT:** The growing importance of reusing mining waste arises from environmental, economic and social concerns. The accumulation of mining tailings in dams represents a global challenge with serious environmental impacts. Seeking sustainable solutions, such as reusing these materials to recover valuable minerals and reduce environmental exploitation, is crucial. The research examines mixtures of mining tailings and poorly graded coarse sand in different proportions (70%-30%, 80%-20% and 100%-0%) to assess their technical feasibility and sustainability. The tests include material characterization, mechanical performance analysis and assessment of expansibility and California Support Index (ISC). The mixtures showed low expansibility, suitable for heavy rainfall, but unsatisfactory results for road base and sub-base. However, they are promising as subgrade reinforcement, contributing to sustainability research in the mining industry.

**KEYWORDS:** Mining, Waste, Laboratory Tests, ISC.

## 1. INTRODUÇÃO

No território brasileiro foram construídas diversas barragens apresentando variações em dimensões e finalidades, seja para armazenamento de água, geração de energia ou e diques destinados a retenção de resíduos industriais como os da mineração. Contudo, a diversidade dessas estruturas reflete-se nas condições de manutenção, com algumas em conformidade com os padrões internacionais de segurança e outras negligenciadas, sujeitas a riscos como enchentes, galgamentos e ultrapassagem dos níveis de segurança, podendo resultar em falhas estruturais.

Diante disso a sociedade enfrenta desafios significativos, que é o de continuar utilizando os recursos naturais e obtendo as matérias-primas para o desenvolvimento da vida moderna e a sustentabilidade ambiental.

Neste contexto, a mineração se destaca como uma das indústrias de maior impacto ambiental sendo responsável por expressiva produção de rejeitos, em especial aqueles provenientes de minerais metálicos, como ferro, ouro, alumínio, cobre, estanho, manganês, nióbio e níquel, que precisam ficar armazenados em grandes estruturas de contenção. Esta condição põe a mineração no foco de debates contínuos quanto aos processos de exploração dos recursos naturais e armazenamento de seus rejeitos, principalmente nas jazidas minerais com baixos teores, como a extração de ouro ou minas com produção maduras, sendo necessária a extração de grandes volumes de minerais para a obtenção de pequenas quantidades de minério metálico concentrado.

Estimativas da ONU (2019) dão conta que a indústria mineral é a maior produtora de descarte, chegando a ordem de 65 bilhões de toneladas/ano, sendo 14 bilhões destas de particulados finos menores que 150 µm. Ainda, de acordo com o Relatório de Segurança de Barragens (ANA, 2018), 68% das barragens avaliadas têm alto potencial de causar danos, enquanto 23% delas têm um alto nível de risco associado, apresentando potencial de causar danos às comunidades situadas a jusante e representarem uma ameaça ao meio ambiente. Nesse contexto, a gestão da produção, reúso ou reaplicação dos rejeitos desempenham um papel importante no desenvolvimento tecnológico, industrial e ambiental ligado ao gerenciamento das atividades de mineração e no aumento da segurança das barragens.

Partindo-se desta problemática, foi avaliada uma forma de reaplicação de rejeitos oriundos da mineração de ferro em misturas para bases e sub-bases rodoviárias como método alternativo para disposição de parte destes considerando sua viabilidade mecânica. Avaliou-se a capacidade de suporte e o comportamento das misturas de rejeito de mineração com solo para verificar se atendem aos requisitos de qualidade necessários para obras rodoviárias.

Pretende-se com este estudo contribuir para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis e inovações tecnológicas que minimizem os impactos ambientais da indústria mineradora por meio da reaplicação de resíduos dos recursos naturais.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados foram solos lateríticos e rejeitos de mineração oriundos de uma barragem de Minas Gerais, que foram caracterizadas individualmente no laboratório de geotecnia da Universidade de Coimbra, Portugal. A metodologia aplicada foi subdividida em 06 etapas sequenciais, sendo:

1. Caracterização física do rejeito: abrangendo a granulometria e sedimentação com o objetivo de identificar as propriedades fundamentais dos materiais utilizados;
2. Caracterização física do solo laterítico: que também foi realizado o ensaio de granulometria e sedimentação com o objetivo de identificar as propriedades fundamentais do solo e ponto de partida na formulação das misturas;
3. Preparação cuidadosa de misturas com diferentes proporções de rejeito-solo: Foram estabelecidas 04 misturas com teores de rejeito-solo de 70%-30%, 80%-20%, e 100%-0%. Estas foram homogeneizadas e avaliadas suas características de consistência e plasticidade no processo de investigação do comportamento de cada composição.
4. Realização de ensaios de compactação: cada mistura foi compactada individualmente com energia de Proctor Modificado com o registro dos parâmetros de peso específico dos solos e umidade, que outrora serão necessários para avaliar a capacidade de suporte.
5. Avaliação da capacidade de suporte: foram realizados ensaios de Índice de Suporte California (ISC/CBR) para avaliar o comportamento das misturas rejeito-solo, à luz dos parâmetros de desempenho das normas de rodoviárias brasileiras (DNIT).
6. Tratamento e análise de dados: foram aplicadas técnicas de visualização de dados na identificação dos padrões, correlações e tendências, na busca das respostas significativas quanto ao uso das misturas em bases rodoviárias.

Foram usadas as normas brasileiras do DNIT (DNER) como referências para os ensaios, destacando: DNER – ME 041/1994, DNER – ME 049/1994, DNER – ME 051/1994, DNER – ME 080/1994, DNER – ME 082/1994, DNER – ME 093/1994, DNER – ME 122/1994, DNER-ME 213/1994, DNIT 164/2013 – ME, tanto na fase de caracterização quanto na avaliação do desempenho frente as condições de uso. A Figura 1 apresenta

os materiais utilizados nesta investigação, sendo (a) o rejeito da mineração de ferro e (b) uma das misturas rejeito-solo utilizadas na pesquisa.



Figura 1. (a) Rejeito e Mineração utilizado, (b) Uma das misturas rejeito-solo

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O processo começou com a caracterização granulométrica do rejeito e do solo utilizado por meio do ensaio de peneiramento e sedimentação, onde pôde-se encontrar que cerca de 85% do material é passante na peneira #200, indicando a proeminência de material fino oriundo dos rejeitos (Figura 2a). Tal situação indica que o solo selecionado para a mistura precisa ter granulometria aberta nas fases mais finas, com maiores frações de silte e areia. Logo, foi selecionado um solo com maior fração arenosa para a realização dos ensaios, onde pode ser observado na Figura 2b que menos de 0,5% deste é passante na peneira #200, confirmado posteriormente por meio do ensaio de sedimentação, onde quase 100% do material sedimentou nos primeiros minutos.

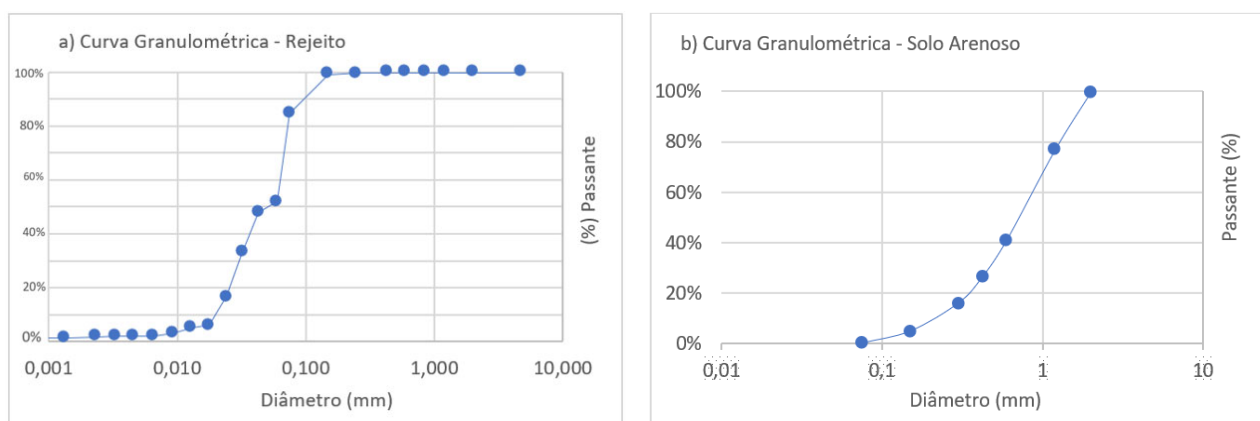


Figura 2. Ensaio de granulometria no (a) rejeito de mineração de ferro e (b) em um solo arenoso usado para a mistura

Em seguida, procedeu-se as misturas nos teores rejeito-solo arenoso mal graduado de 70%-30%, 80%-20%, e 100%-0% e foi realizado o ensaio mecânico de compactação com energia modificada de Proctor. Essas proporções tiveram o intuito de se obter uma estrutura terrosa com a maior capacidade carga com o maior consumo de rejeito possível, com o objetivo secundário de se reduzir o passivo ambiental.

Nesta fase, as misturas foram homogêneas e compactadas em 5 teores de umidade para se obter a umidade ótima na curva de compactação. Como referência, foram utilizados os valores obtidos por Camacho (2021) para o mesmo material, onde a umidade ótima ficou entre 9 e 11%. As misturas preparadas foram

armazenadas em câmara úmida por 24 horas para homogeneização da umidade antes da compactação. A Figura 3 (a), (b) e (c) mostra os resultados iniciais, obteve-se que a mistura 70%-30% apresentou peso específico seco menor e com baixa umidade, enquanto a mistura 100%-0% apresentou peso específico seco maior e maior absorção de umidade. Isto indica que quanto maior o percentual de rejeito em relação ao solo, maior será o peso específico seco da amostra. Sendo assim, como rejeito de minério de ferro geralmente possui uma densidade aparente menor do que a areia grossa mal graduada. A presença de um material mais leve, no caso o rejeito, na mistura aumenta o peso específico seco da composição geral.

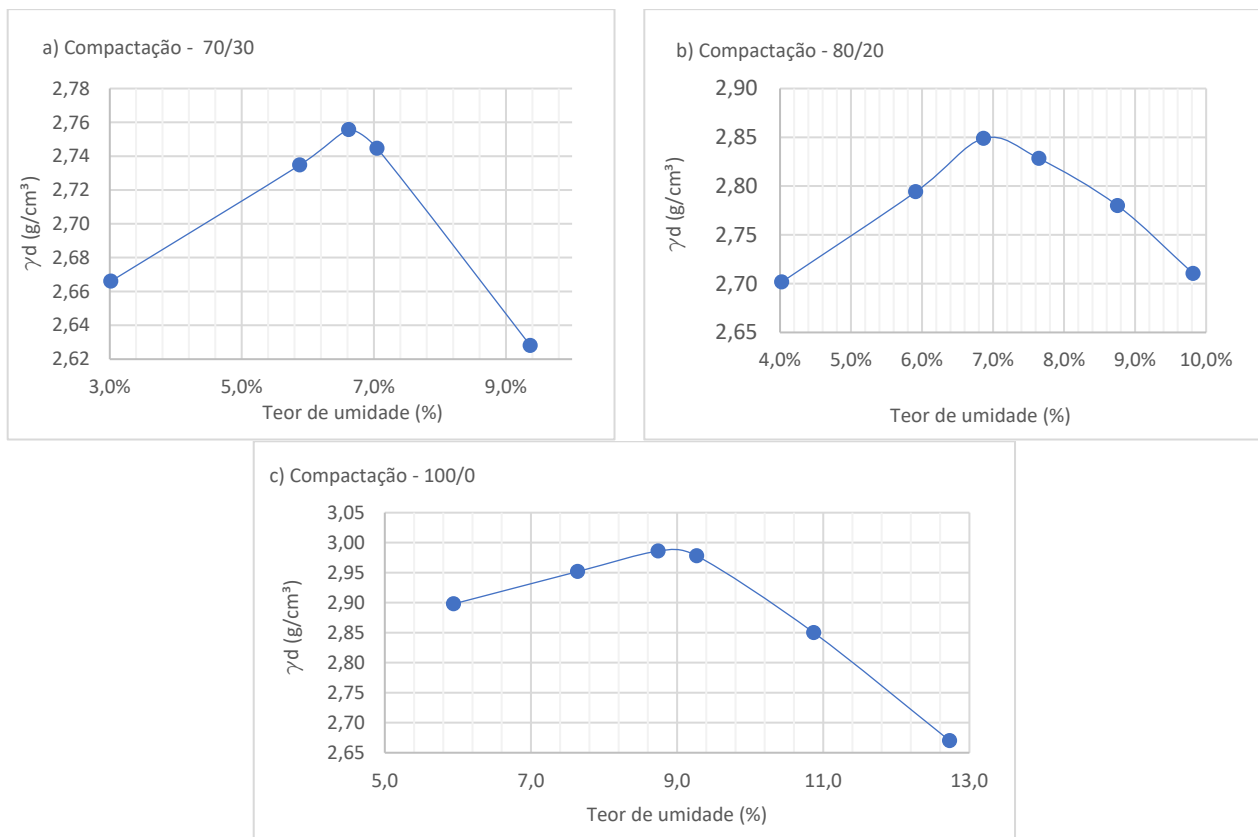


Figura 3. Curva de Compactação da mistura rejeito-solo (a) 70%-30% (b) mistura 80%-20% (c) mistura 100%-0%

A partir dos ensaios ISC evidenciou-se que existe uma relação entre a taxa de expansão e ISC com as proporções entre o rejeito e a areia. Ficou evidente que quanto maior o percentual de rejeito, haverá uma queda no ISC além de um aumento na expansão do material. Estas características são danosas para uma obra rodoviária requerendo uma correção química da mistura, o que tornaria inviável a aplicação da mistura rejeito-solo devido aos custos envolvidos. Observou-se que na mistura 70%-30% o ISC foi de 5,27% com uma taxa de expansão de 0,03%; na mistura 80%-20, um ISC de 4,56% e uma taxa de expansão de 0,09%; e utilizando 100% de rejeito, temos um ISC de 0,91%, com uma taxa de empansão de 0,09%. Dessa forma, a melhor mistura que agrega as melhores condições de suporte, resistência e expansão foi a 70%-30%. Um resumo foi apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Resumo dos resultados dos ensaios de expansão e Penetração do ISC.

Misturas	ISC (%)	Expansão (%)
<b>70%-30%</b>	5,27	0,03
<b>80%-20%</b>	4,56	0,09
<b>100%-0%</b>	0,91	0,09

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados encontrados indicaram que o objetivo principal de se acrescentar o rejeito desta barragem de mineração em uma mistura com solo arenoso com o objetivo de se obter uma capacidade de suporte satisfatória não foi atingida. Segundo consta no Manual de Pavimentação DNIT (2006), para a aceitabilidade de uma amostra aplicada em sub-base rodoviária, o ISC mínimo deve ser igual ou superior a 20%. Ou seja, além do valor encontrado para a melhor mistura, no caso a 70%-30% com  $ISC = 5,27\%$ , indicando a impossibilidade do uso desta mistura para a finalidade proposta. Este estudo encontra-se em fase preliminar, pois serão feitas avaliações com inserções sintéticas e adição de cal/cimento na amostra para avaliar se há a melhoria da capacidade de suporte. Para estes casos, serão consideradas o acréscimo financeiro para o cálculo do custo x benefício da mistura. Acredita-se na possibilidade do reúso do rejeito em misturas de até 30% de rejeito e correção química dentro de um centro de custo aceitável para obras rodoviárias, o que possibilitará na indicação de uma nova aplicação para o rejeito de mineração, que é um passivo ambiental permanente.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). ANA lança Relatório de Segurança de Barragens 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-lanca-relatorio-de-seguranca-de-barragens-2018>

Camacho, David Lamberto Diehl. Reconstituição e Caracterização de Amostras de Rejeito de Minério de Ferro. Dissertação de Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Universidade de Coimbra. Coimbra, p.49. 2021.

DNER-ME 041/94: Solos – Preparação de amostras para ensaio de caracterização. Brasil, 1994.

DNER-ME 049/94: Solos – determinação do Índice de Suporte California utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 051/94: Solos – Análise granulométrica. Brasil, 1994.

DNER-ME 080/94: Solos – Análise granulométrica por peneiramento. Brasil, 1994.

DNER-ME 082/94: Solos – Determinação do limite de plasticidade. Brasil, 1994.

DNER-ME 093/94: Solos – Determinação da densidade real. Brasil, 1994.

DNER-ME 122/94: Solos – Determinação do limite de liquidez – método de referência. Brasil, 1994. 34.

DNER-ME 213/94: Solos – Determinação do teor de umidade. Brasil, 1994.

DNIT – IPR 719. Manual de Pavimentação. 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT 164/2013-ME. Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método do ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ONU - Organização das Nações Unidas. FAO: Se o atual ritmo de consumo continuar, em 2050 mundo precisará de 60% mais alimentos e 40% mais água. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/68525-fao-se-o-atual-ritmo-de-consumo-continuar-em-2050-mundo-precisar%C3%A1-de-60-mais-alimentos-e-40>