

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes

Vagner Lucas Ribeiro da Silva

**ANALISE DO USO DE REJEITO DE MINERAÇÃO
PARA APLICAÇÃO EM CAMADA DE SUBLASTRO
FERROVIÁRIO**

Belo Horizonte

2024

Vagner Lucas Ribeiro da Silva

**ANALISE DO USO DE REJEITO DE MINERAÇÃO PARA
APLICAÇÃO EM CAMADA DE SUBLASTRO FERROVIÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Transportes

Orientador: Prof. Dr. Ronderson Queiroz Hilário

Belo Horizonte

2024

S586a	<p>Silva, Vagner Lucas Ribeiro da. Análise do uso de rejeito de mineração para aplicação em camada de sublastro ferroviário [recurso eletrônico] / Vagner Lucas Ribeiro da Silva. – 2024. 1 recurso online (73 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Ronderson Queiroz Hilário.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 64-73.</p> <p>1. Transportes – Teses. 2. Mineração – Minas Gerais – Teses. 3. Resíduos – Minérios de ferro – Reaproveitamento – Teses. 4. Minérios de ferro – Reaproveitamento – Teses. 5. Polímeros – Teses. 6. Ferrovias – Construção – Teses. I. Hilário, Ronderson Queiroz. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 656(043)</p>
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DO USO DE REJEITO DE MINERAÇÃO PARA APLICAÇÃO EM CAMADA DE SUBLASTRO FERROVIÁRIO

VAGNER LUCAS RIBEIRO DA SILVA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração TRANSPORTES. Aprovada em 24 de junho de 2024, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Ronderson Queiroz Hilário - Orientador (UFMG)
Prof. Marcelo Franco Porto (UFMG)
Prof. Thiago Bomjardim Porto (CEFET-MG)

Belo Horizonte, 24 de junho de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Ronderson Queiroz Hilario, Chefe de departamento**, em 24/06/2024, às 12:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thiago Bomjardim Porto, Usuário Externo**, em 24/06/2024, às 13:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Franco Porto, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 19/08/2024, às 15:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3321090** e o código CRC **561FCC36**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por mais essa vitória.

À minha família, em especial aos meus pais Venício Ribeiro e Lucia da Luz, ao meu irmão Vinícius Ribeiro pelo apoio e carinho.

A minha esposa Maria Neta e a minha filha Helena, por tanto apoio, carinho, companheirismo, ajuda, atenção e paciência, principalmente nesta etapa final. Meu muito obrigado por seu cuidado, pelos incentivos e por tornar tudo tão melhor.

À Universidade UFMG, ao departamento DEMIN/UFMG e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e transporte e seus professores por apoiarem, por contribuírem com a realização desta pesquisa e por entender a distância das idas e vindas para estar nas aulas.

Ao gerente Paulo Henrique pelo incentivo e apoio, e companhia Vale, pelo compromisso na evolução de conhecimentos e melhoria contínua.

E, para finalizar, meus agradecimentos aos que não estão mencionados aqui, mas que, de alguma forma, colaboraram para que este trabalho fosse concretizado, seja direta ou indiretamente, seja na vida pessoal ou profissional, gratidão a todos que participaram desta jornada.

RESUMO

As atividades de mineração geram uma quantidade significativa de estéreis e rejeitos, subprodutos do processo de lavra e beneficiamento do minério, os quais apresentam características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas variáveis em função do tipo de minério e do próprio processo de beneficiamento. Essa situação tem sido uma preocupação das mineradoras, em função de questões ambientais, técnicas e econômicas. Portanto, tornam-se viáveis o uso de técnicas e materiais alternativos, diante da falta de recursos financeiros para aplicação nos mais diversos setores da economia e da necessidade de proteção ambiental. A adição de polímeros em materiais granulares, como rejeitos de mineração, é uma técnica de melhoria de solos que propicia ganho de resistência mecânica ao compósito, reduzindo impactos ao meio ambiente. O rejeito arenoso estudado foi coletado nos municípios de Congonhas e São Gonçalo do Rio Abaixo no estado de Minas Gerais. Nesta pesquisa, o objetivo principal foi avaliar a possibilidade de reaproveitar o rejeito de minério de ferro na construção de camada estrutural de pavimento ferroviário. A pesquisa experimental realizou estudos de caracterização física com os ensaios de análise granulométrica, limites de Atterberg e densidade real. Para a caracterização mineralógica realizou os ensaios de difração por raio x, e para a caracterização mecânica do rejeito, realizou os ensaios de compactação, expansão e índice de suporte Califórnia (CBR). Com base nos resultados obtidos com os ensaios citados, pôde-se concluir, que a utilização do rejeito arenoso, para uma amostra, em camada de sublastro ferroviário não é viável, pois o rejeito não apresenta propriedades mecânicas de interesse à pavimentação, com baixa capacidade de suporte. No entanto, para a amostra com a estabilização química com a adição de 2% do polímero SOILTECH, os resultados foram satisfatórios. Houve o aumento da umidade ótima, massa específica, CBR, e redução da expansão.

Palavras-chave: rejeito de minério de ferro; pavimento ferroviário; resistência.

ABSTRACT

Mining activities generate a significant amount of waste and tailings, byproducts of the mining and beneficiation process, which have mineralogical, geotechnical and physical-chemical characteristics that vary depending on the type of ore and the beneficiation process itself. This situation has been a concern for mining companies due to environmental, technical and economic issues. Therefore, the use of alternative techniques and materials has become viable, given the lack of financial resources for application in the most diverse sectors of the economy and the need for environmental protection. The addition of polymers to granular materials, such as mining tailings, is a soil improvement technique that provides increased mechanical resistance to the composite, reducing impacts on the environment. The sandy tailings studied were collected in the municipalities of Congonhas and São Gonçalo do Rio Abaixo in the state of Minas Gerais. The main objective of this research was to evaluate the possibility of reusing iron ore tailings in the construction of a structural layer for railway paving. The experimental research carried out physical characterization studies with granulometric analysis tests, Atterberg limits and true density. For the mineralogical characterization, X-ray diffraction tests were performed, and for the mechanical characterization of the tailings, compaction, expansion and California Bearing Index (CBR) tests were performed. Based on the results obtained with the aforementioned tests, it was possible to conclude that the use of sandy tailings for a sample in a railway subballast layer is not viable, since the tailings do not present mechanical properties of interest to paving, with low support capacity. However, for the sample with chemical stabilization with the addition of 2% of the SOILTECH polymer, the results were satisfactory. There was an increase in optimum moisture, specific mass, CBR, and reduction in expansion.

Key words: iron ore tailings; railway paving; resistance.

Lista de figuras

Figura 1 – Malha Ferroviária	12
Figura 2 – Malhas Esquema geral de sistemas em camadas para pavimentação	20
Figura 3 – Estrutura ferroviária convencional e seus componentes	20
Figura 4 – Desenho Esquemático de um Pavimento Ferroviário	21
Figura 5 – seção tipo de corte em tangente.	28
Figura 6 – seção tipo de aterro em tangente.....	28
Figura 7 – Fluxograma típico do processo de mineração de ferro – Mina de Viga	30
Figura 8 – Razões médias entre o produto final e rejeito gerado	30
Figura 9 – Curvas granulométricas de rejeitos de minério de ferro	32
Figura 10 – Fluxograma de mineração	33
Figura 11 – Faixas granulométricas das lamas e rejeitos de flotação, típicas das usinas de processamento de minério de ferro.....	34
Figura 12 – Exemplo de pilha de rejeitos e estéril de mineração	35
Figura 13 – Fluxograma de trabalho de pesquisa.....	42
Figura 14 e Figura 15 – Local de coleta e armazenamento da amostra, pronta para transportar para o laboratório	43
Figura 16 – Amostra do rejeito de minério Fe	44
Figura 17 – Ensaio de Granulometria por Perneiramento e Sedimentação	47
Figura 18 – Ensaio Densidade real dos grãos	47
Figura 19 – Cps imerso após 96 horas e prensa mecânica utilizada para obtenção do CBR.....	49
Figura 20 – Curva granulométrica do solo estudado – amostra 01.....	51
Figura 21 – Curva granulométrica do solo estudado – amostra 02	52
Figura 22 – Densidade relativa dos grãos de rejeito (Gs).....	54
Figura 23 – Difração por raio X amostra 1	59
Figura 24 – Difração por raio X amostra 2	59

Lista de tabelas

Tabela 1 – Densidade de Ferrovias.....	12
Tabela 2 – Comparação superfície territorial x extensão de malha ferroviária	13
Tabela 3 – Estimativa para produção de rejeitos para o período de 2010-2030.....	16
Tabela 4 – Especificações de Lastro.....	24
Tabela 5 – Distribuição granulométrica.....	24
Tabela 6 – Características químicas e físicas do produto	44
Tabela 7 – Correlações entre as classificações TRB e SUCS	56
Tabela 8 – Resultados dos Parâmetros do ensaio de Compactação, Expansão e CBR	57
Tabela 9 – Resultados dos Parâmetros do ensaio de Compactação, Expansão e CBR + adição de polímero	57
Tabela 10 – Identificação das fases cristalinas por difração	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa.....	17
2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	18
2.1	Objetivo geral.....	18
2.2	Objetivos específicos	18
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	19
3.1	Pavimento ferroviário.....	19
3.1.1	Lastro	22
3.1.2	Sublastro.....	25
3.1.3	Subleito	27
3.2	Minério de Ferro	28
3.3	Rejeito de minério.....	29
3.3.1	Características do rejeito de minério	34
3.3.2	Disposição dos rejeitos.....	35
3.4	Estabilização e melhoramento de solos	36
3.5	Pesquisas com rejeito de minério.....	37
3.6	Pesquisas com Polímeros.....	38
4	MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1	Considerações Iniciais.....	42
4.2	Materiais utilizados	43
4.2.1	Rejeito de minério de ferro	43
4.2.2	Polímero	44
4.3	Ensaio realizados.....	45
4.3.1	Caracterização Física	45
4.3.2	Caracterização Geotécnica	47
4.3.3	Caracterização Mineralógica	48
4.3.4	Caracterização Mecânica.....	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
5.1	Caracterização física	50
5.1.1	Análise granulométrica.....	50
5.1.2	Massa específica dos grãos.....	53

5.1.3	Limites de Atterberg.....	54
5.1.4	Índice de Grupo (IG).....	55
5.1.5	Classificação TRB e SUCS.....	55
5.2	Caracterização Mecânica.....	56
5.2.1	Compactação, Expansão e CBR.....	56
5.3	Caracterização Mineralógica	58
6	CONCLUSÕES E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	62
6.1	Conclusões.....	62
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

O sistema ferroviário brasileiro tem uma extensão de 29.291 km, que são distribuídos entre 16 malhas ferroviárias, como apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Malha Ferroviária



Fonte: Valec, 2020.

Com o crescente investimento em ferrovias, nos últimos anos, existiu também um ganho no setor ferroviário, porém, mesmo com esse aumento, a densidade ferroviária nacional ainda continua reduzida, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Densidade de Ferrovias

País	Área (milhões km ²)	Ferrovias (mil km)	Ferrovias/Áreas (km/1000 km ²)
Estados Unidos	9,83	293,56	29,80
Índia	3,29	68,53	20,80
África do Sul	1,22	20,99	17,20
Argentina	2,78	36,92	13,30
China	9,60	124,00	13,20
México	1,96	15,39	7,80
Canadá	9,98	77,93	7,80
Rússia	17,10	87,16	5,10
Austrália	7,74	36,97	4,80
Brasil	8,52	29,18	3,40

Fonte: ANTF – 10/03/2022.

A função principal da matriz de transporte é oferecer o suporte necessário às atividades produtivas que vão atender às demandas internas e externas do país. Portanto, na composição da matriz de transporte, a modalidade de ferrovia deveria desenvolver corredores de longas distâncias para exportação e importação de produtos, ligando o país de norte a sul e leste a oeste, transportando produtos de carga mais pesada em distâncias maiores, interligando-se, então, com rodovias destinadas ao transporte de cargas mais leves, ao longo de distâncias menores e de distribuição radial, Silva (2002).

Por outro lado, a Tabela 2 mostra o estudo das matrizes de transporte por meio de comparações entre superfícies territoriais e respectivas extensões das malhas ferroviárias, constatando-se ser necessário um plano nacional de reestruturação e desenvolvimento do transporte ferroviário no Brasil.

Tabela 2 – Comparação superfície territorial x extensão de malha ferroviária

País	Área (milhões km ²)	Ferrovia (mil km)	Ferrovias/Área (km/km ²)
Brasil	8,52	30,81	3,62
EUA	9,83	293,56	29,86
Rússia	17,10	86,00	5,03
Canadá	9,98	77,93	7,81
Índia	3,29	108,71	33,04
China	9,60	141,40	14,73
África do Sul	1,22	24,28	19,9
Austrália	7,74	33,34	4,31
Mexico	1,96	26,91	13,73
Argentina	2,78	18,00	6,47

Fonte – Adaptado <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>.

A malha ferroviária precisa ser conduzida para formar corredores de escoamento produtivo na direção dos portos. Em sua maior parte, está necessitando de manutenção urgente, pois apresenta problemas de conservação, adequação, atualização técnica e ainda existem várias regiões afastadas e muito carentes de ligação ferroviária.

Por outro lado, esta expansão e atualização precisa de tecnologia inovadora para fazer face à escassez de recursos, típica de um país em desenvolvimento com situação econômica agravada com as sucessivas crises econômicas, principalmente nas duas últimas décadas. Estas crises afetaram a capacidade de investimentos públicos e privados tanto para abertura e implantação de novos trechos ferroviários quanto para a manutenção da malha ferroviária existente.

As técnicas de engenharia empregadas nos projetos de ferrovias, assim como os métodos aplicados no dimensionamento de pavimentos ferroviários, seguem as prescrições gerais determinadas pelas normalizações específicas criadas em países da Europa ou nos Estados Unidos. Estas normas privilegiam materiais granulares e pétreos beneficiados que têm alto custo econômico e ambiental incorporados.

Uma das formas para contribuir para diminuir estes custos, tanto ambientais quanto de implantação, é a construção de trechos experimentais instrumentados com o uso de materiais alternativos e desenvolver métodos de dimensionamento modernos calcados na mecânica dos pavimentos. Os pavimentos constituem a infraestrutura necessária e adequada para o tráfego dos veículos, podendo ser agrupados segundo sua adequação aos diversos tipos. Logo, rodovias são dimensionadas para o tráfego de carros e caminhões, ferrovias para o tráfego de trens e os pavimentos aeroportuários para o pouso e decolagem de aeronaves, dentre outros (Spada, 2003).

Dentre os materiais alternativos que podem ser utilizados em reforços, sublastro e lastro de pavimentos ferroviários, têm-se os solos finos locais, rejeito de mineração, escórias de aciaria, finos de pedreiras, entulho da construção civil, cinzas etc. Particularmente no âmbito do chamado Quadrilátero Ferrífero (QF) de Minas Gerais, os resíduos de mineração, em função de suas características geoambientais negativas e grandes volumes gerados, poderiam ser uma opção bastante interessante, sendo utilizados isolada ou conjuntamente com solos localmente disponíveis. Uma alternativa adicional seria o emprego destes resíduos associados a materiais sintéticos.

Neste contexto, os resíduos de minério de ferro do QF de Minas Gerais podem ser empregados sem aditivos químicos, por meio da estabilização granulométrica direta na pista, sem a necessidade de usinas de solos para misturas prévias. A reciclagem dos resíduos de minério de ferro permite a mitigação dos danos ambientais, com redução de área para depósito de bota-foras e não impõe a necessidade de desmatamento e frentes de lavra para exploração de materiais granulares tradicionais.

Cada vez mais as mineradoras têm o desafio de tornar a mineração mais sustentável e reduzir a geração de rejeitos em suas operações. Esse rejeito, que é resultado do beneficiamento do minério de ferro, vem sendo trabalhado buscando atender as necessidades ambientais, técnicas e econômicas. E uma das formas de reaproveitamento desse produto é buscar dar condições de emprego para que possa ser aplicado em outras áreas, como por exemplo, em obras de infraestrutura viária.

Barbosa *et al.* (2016) demonstram que os impactos ambientais podem ser reduzidos com a reciclagem dos resíduos de minério de ferro, mas também pela redução de área para depósitos de “bota-fora” e do desmatamento, e de frente de lavra para exploração de materiais granulares tradicionais. O reaproveitamento desses resíduos na construção civil pode agregar valor a esse subproduto e minimizar as consequências ambientais. Em exemplo, a sua aplicação na pavimentação é viável porque esta categoria de obra requer o uso abundante de agregados, podendo aproveitar, assim, um grande volume de resíduos na substituição destes materiais convencionalmente utilizados, desde que as distâncias de transportes dos materiais sejam economicamente viáveis, Apaza *et al.* (2018).

Rodrigues *et al.* (2018) colocam que o processo de mineração gera uma quantidade enorme de subprodutos e que as suas disposições, ao final do processo, afetam o meio ambiente. Logo, o seu aproveitamento adequado, pode agregar valor ao rejeito, diminuir os gastos com a estocagem, com o tratamento e a destinação final destes em aterros de contenção de resíduos. Pode dessa forma proporcionar à construção civil queda do preço do material granular, além da possibilidade de emprego de um material tecnicamente competitivo.

Tem outro estudo de rejeito de minério de ferro, na forma de pellet para aplicação na produção de blocos de concreto para pavimentação, que mostra que percentuais de adição de 5 e 10% desse produto apresentaram um aumento na resistência das peças de 6,6% e 3% respectivamente (Guerra, 2014).

Barbosa *et al.* (2018) estudaram o reaproveitamento do resíduo de flotação do minério de ferro, como material de construção em sistemas de drenagem superficial, meio-fio e sarjetas. Para isso, foram estudados concreto sem rejeito (concreto de referência) e concretos utilizando o rejeito. O rejeito foi incorporado na formulação dos concretos nas formas de adição e substituição ao agregado miúdo, em teores de utilização variando conforme o uso especificado.

Consoli *et al.* (2022), estudaram o comportamento de misturas de rejeitos de minério de ferro compactados e cimento Portland a serem dispostos por empilhamento. A influência do grau de compactação, bem como da quantidade de cimento Portland nas propriedades de resistência e rigidez foi avaliada. As misturas estudadas aqui foram compactadas com teor de umidade ideal.

Além disso, o rejeito pode ser misturado com outros materiais, como cimento ou asfalto, para melhorar suas propriedades e torná-lo mais adequado para uso como pavimento.

O processo de lavra e beneficiamento do minério de ferro, gera a razão média de 2/1 entre o produto e a geração de rejeitos (Abrão, 1987), que são dispostos em barragens e em

pilhas de estéreis. Observa-se na Tabela 3: a estimativa para produção de rejeitos para o período de 2010 a 2030.

Tabela 3 – Etimativa para produção de rejeitos para o período de 2010-2030

Substância	Quantidade Total de resíduos (1.000 t)		Contribuição % média de cada minério no total de resíduos	
	1996-2005	2010-2030	1996-2005	2010-2030
Ferro	765.977	4.721.301	35,14%	41,38%
Ouro	295.295	1.111.320	13,55%	9,74%
Titânio	276.224	1.018.668	12,67%	8,93%
Fosfato/Rocha	244.456	1.128.198	11,21%	9,89%
Estanho	149.369	357.952	6,85%	3,14%
Zircônio	116.236	490.183	5,33%	4,30%
Calcário	89.398	341.045	4,10%	2,99%
Alumínio (Bauxita)	69.783	493.925	3,20%	4,33%
Cobre	53.498	819.636	2,45%	7,18%
Nóbio	35.690	119.372	1,64%	1,05%
Níquel	35.076	637.380	1,61%	5,59%
Caulim	24.346	90.729	1,12%	0,80%
Manganês	12.064	36.071	0,55%	0,32%
Zinco	12.562	44.097	0,58%	0,39%
Total	2.179.974	11.409.877	100,00%	100,00%

Fonte: IPEA/PNRS – adaptado

Segundo Vale (2023), cada tonelada de areia produzida, representa uma tonelada de rejeito que precisa ser armazenado em barragens ou em pilhas. Isso não só aumenta a segurança das operações, ao minimizar a necessidade de barragens, como também reduz o impacto das nossas atividades no meio ambiente, já que menos área é utilizada para que esse material fique estocado.

Para assegurar o atendimento de todas as necessidades citadas é de suma importância validar o comportamento e a confiabilidade do emprego do rejeito, por isso a importância dos estudos mais aprofundados e sistemáticos desse material, buscando identificar seu real potencial frente a determinadas aplicações.

Dentro deste contexto, um estudo de viabilidade técnica da utilização do rejeito de minério foi analisado como uso em sublastro em pavimento ferroviário, por meio do estudo das propriedades mecânicas, físicas e mineralógica do rejeito.

1.1 Justificativa

A possibilidade de se alcançar, no rejeito do beneficiamento do minério de ferro, propriedades tecnológicas passíveis de contribuir como material de construção de infraestrutura viária foi a razão para o desenvolvimento deste trabalho.

Alternativas tecnologicamente viáveis e ambientalmente corretas como a utilização dos rejeitos granulares estabilizados granulometricamente, mecanicamente ou quimicamente para fins em pavimento, tornam-se uma opção em função da sua grande disponibilidade em face do aumento significativo da produção mineral nos últimos anos no Brasil. Como mostra alguns estudos com rejeitos de minério para melhorar o comportamento e aumentar a estabilidade do pavimento.

Galhardo (2015) estudou a viabilidade técnica do emprego de misturas de solos com rejeitos arenosos oriundos do beneficiamento de minério de ferro, visando seu emprego em camadas estruturais, como base e sub-base, de pavimentos rodoviários.

Valadares (2016), Apaza (2016) e Arêdes (2016) estudaram o comportamento mecânico de misturas asfálticas, considerando variados teores do rejeito da mineração de ferro e tipos de misturas. Já Carneiro (2020) estudou o comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com polímero.

Os estudos dos autores reforçam a importância de buscar alternativas para melhoramento dos solos e a estabilização de outros produtos para o aumento a resistência mecânica do pavimento.

Nesse contexto, a utilização de rejeitos granulares oriundos do processo de mineração de minério de ferro se apresenta bastante atrativa, como uma forma alternativa de dispor adequadamente de parte da produção de rejeitos gerado, pois minimizaria a ocorrência de risco ambiental, da possibilidade do seu uso como material de construção para fins ferroviários.

Estudos e práticas com a utilização do rejeito em pavimento rodoviário foram aplicados como citados por autores, entre outros estudos com bloco de concreto e melhorando com utilização de polímeros. Tem a possibilidade e necessidade em utilizar o rejeito em pavimento rodoviário. Porém, não foi encontrado na literatura a utilização do rejeito como sublastro. É uma grande necessidade na utilização desse rejeito para que possa ser aplicado no pavimento ferroviário.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.1 Objetivo geral

Diante do exposto, o objetivo geral desta dissertação é estudar as características físicas, mineralógicas e mecânicas do rejeito do beneficiamento de minério de ferro e fazer a avaliação como camada de sublastro ferroviário.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar fisicamente o rejeito através dos ensaios de granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade;
- Avaliar em laboratório o comportamento do rejeito através do ensaio de compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC);
- Avaliar em laboratório as características mineralógicas através do ensaio de Difração raio X;
- Propor uma alternativa de uso para o grande volume de rejeitos produzido pela empresa mineradora, visando a redução do volume das pilhas de rejeito com a consequente redução de possíveis impactos ambientais provocados pela atividade de mineração.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Pavimento ferroviário

Segundo Brown e Selig (1991), o dimensionamento de pavimentos foi tratado de forma empírica e como uma área secundária da Mecânica dos Solos, desde as primeiras décadas do século XX.

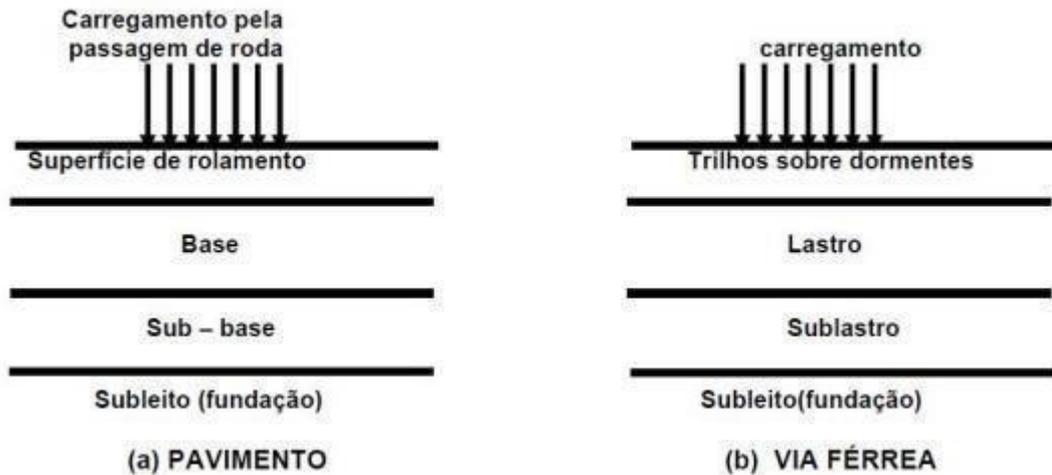
No entanto, com o crescimento econômico das nações, e a necessidade crescente por transportes, buscou-se um melhor entendimento da resposta do pavimento frente às suas solicitações, direcionando com o surgimento da Mecânica dos Pavimentos, definida por Medina (1988) responsável por estudar os pavimentos como um sistema multicamadas e que está sujeito às cargas oriundas dos veículos que neles trafegam.

Os pavimentos constituem a infraestrutura necessária e adequada para o tráfego dos veículos, podendo ser agrupados segundo sua adequação aos diversos tipos. Logo, rodovias são dimensionadas para o tráfego de carros e caminhões, ferrovias para o tráfego de trens e os pavimentos aeroportuários para o pouso e decolagem de aeronaves, dentre outros (Spada, 2003).

Em todos os casos, o pavimento consiste em um sistema em camadas – pelo menos uma – assente sobre um subleito, que é a camada final de terraplenagem, dotado de revestimentos adaptados às necessidades específicas dos veículos que nele venham a trafegar. A Figura 2, apresenta exemplos típicos para: (a) um pavimento geral (rodovias, pavimentos aeroportuários, e outros), e (b) um pavimento ferroviário ou via férrea (também denominado de via permanente no meio ferroviário), segundo Brown e Selig (1991). A via férrea também se constitui em um pavimento: o pavimento ferroviário como define Medina (1988).

O pavimento ferroviário compara-se ao pavimento tradicional rodoviário porque ambos são estruturas em camadas que se apoiam no solo de fundação e destinam-se a distribuir as cargas de tráfego.

Figura 2 – Malhas Esquema geral de sistemas em camadas para pavimentação

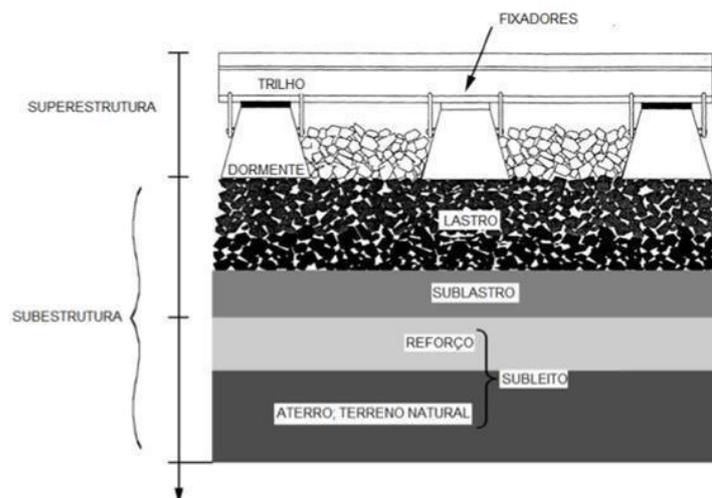


Fonte: Brown e Selig (1991).

De acordo com o DNIT (ISF 207), a infraestrutura é constituída pelo subleito que contém uma camada final de material selecionado. A superestrutura é constituída pelos trilhos, fixações, dormentes, lastro e sublastro.

De acordo com Selig e Waters (1994), a estrutura ferroviária convencional é dividida em duas partes, a saber, a superestrutura e a subestrutura, que são as partes superior e inferior, respectivamente, conforme é mostrado na Figura 3. A superestrutura inclui os trilhos, o sistema de fixação e dormentes, sendo separada da subestrutura pela interface dormente-lastro, que é a região mais importante na distribuição de esforços às camadas mais profundas. A subestrutura inclui lastro, sublastro e subleito, que são os materiais geotécnicos dentro do sistema ferroviário.

Figura 3 – Estrutura ferroviária convencional e seus componentes



Fonte: Selig e Waters (1994).

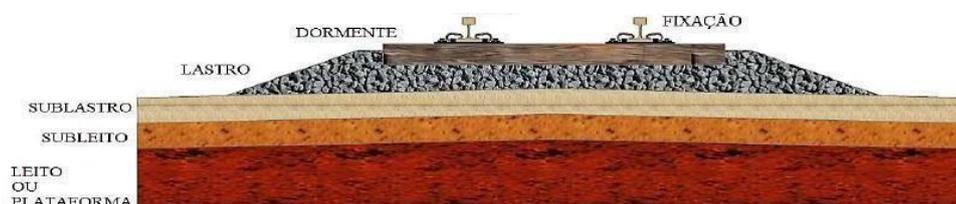
Dentre as funções mais importantes da subestrutura destacam-se: resistir aos esforços verticais, laterais e longitudinais aplicados pelo trem aos trilhos, fixações e dormentes, e ainda possuir resiliência adequada, que permita a absorção da energia oriunda do contato roda-trilho. Além disso, os vazios no lastro fornecem a drenagem necessária da água na via. A subestrutura, através do subleito, proporciona uma fundação estável para a estrutura da via.

As camadas que compõem o pavimento desempenham funções específicas, a saber:

- Trilhos: constituir a superfície de rolamento para as rodas dos veículos ferroviários;
- Lastro: distribuir convenientemente sobre a plataforma os esforços resultantes das cargas dos veículos, fornecer amortecimento ao sistema, impedir o deslocamento do dormente, entre outras;
- Sublastro: promover uma separação entre a camada de lastro e o subleito, evitar a penetração de lastro na plataforma, aumentar a resistência do subleito à erosão e a penetração da água, entre outras;
- Subleito: camada de fundação do sistema.

A Figura 4 mostra um exemplo de um pavimento ferroviário típico de um trecho de uma obra brasileira, segundo mostra a foto de Oliveira (2013).

Figura 4 – Desenho Esquemático de um Pavimento Ferroviário



Fonte: Oliveira (2013).

As cargas impostas pela passagem dos trens nos trilhos geram uma complexa reação de cargas estáticas e dinâmicas. O conjunto de elementos que constituem a via permanente possibilita a transferência das cargas provenientes da passagem dos veículos para a fundação. Cada um dos elementos absorve parte das tensões que nele chegam, transmitindo tensões menores para a camada seguinte (Esveld, 2001).

Forças nas direções vertical, lateral e longitudinal agem sobre a estrutura da via ao movimento do tráfego. Mensurar as tensões que atuam nas camadas granulares é importante para monitorar a deterioração da subestrutura. Sendo assim, o uso de sensores de carga nas

camadas de lastro e sublastro ajudará no monitoramento das tensões que são transferidas da superestrutura.

3.1.1 Lastro

De acordo com Paiva (2016), o lastro tem as seguintes funções:

- Certificar uma boa drenagem, afastando-se que os dormentes fiquem imersos em água;
- Certificar boa elasticidade à via, agindo como amortecedor das vibrações oriundas das composições, permitindo, assim, um tráfego suave e confortável;
- Certificar um apoio firme e estável para os dormentes, absorvendo e transmitindo as cargas para as camadas abaixo;
- Evitar que ocorra deslocamentos dos dormentes, seja no sentido longitudinal, seja no transversal;
- Garantir rapidez e eficiência na manutenção viária, seja ela mecânica ou manual, no nivelamento e traçado da via férrea.

A partir da análise de Paiva (2016), para um bom desempenho de suas funções, o material de lastro deve apresentar as seguintes funções:

- Ter tenacidade alta com o alvo de resistir às agulhas das socadoras, e o efeito abrasivo do movimento relativo entre as britas;
- Apresentar resistência ao desgaste e à abrasão, com o fim de impedir a fragmentação das partículas;
- Alta resistência à compressão, para aguentar os esforços verticais e dissipá-los para as camadas adjacentes;
- Apresentar baixa porosidade impedindo, assim, a absorção de água, a sua quebra, quando aplicado carga, e, então, majorando a via útil do material;

- Apresentar uma adequada distribuição granulométrica, a fim de proporcionar uma boa drenagem da camada. As partículas do lastro precisam ser no formato cúbico.

Os materiais usualmente utilizados como lastro são:

- Solo: menor custo, porém com qualidade mais baixa. É frequente sua saturação pela água, ocasionando o desnivelamento da via, podendo até ocorrer acidentes à composição ferroviária;
- Areia: apresenta qualidade pouco compressível e permeável, isto é, tem muita facilidade de ser levada pela água. Também produz poeira com facilidade, de grãos duros, podendo penetrar nas partes móveis dos vagões e/ou locomotivas, produzindo desgastes nos veículos ferroviários;
- Cascalho: boa qualidade, principalmente quando quebrado, formando arestas vivas. Em alguns casos, é aplicado tal como encontrado nas “cascalheiras”, porém, para ser empregado em vias de maior tráfego, aconselha-se a lavagem, para fazer a separação da terra e possíveis impurezas;
- Escórias: algumas escórias de usinas metalúrgicas, como a de aciaria, apresenta dureza e resistência o suficiente para serem utilizadas como lastro ferroviário (porém, não podem ser utilizadas do mesmo modo que são produzidas, pois primeiro necessitam passar por um processo de estabilização química) e facilidade de transporte. São empregadas em vias próximas às siderúrgicas.
- Pedra Britada: melhores materiais para serem explorados como lastro, por sua resistência, inalterável aos agentes atmosféricos, e por ter permeabilidade, permitindo, assim, um bom nivelamento (socaria) do lastro. Apresenta elasticidade limitada e não produz poeira. Devem ser selecionadas as britas de rochas com boa resistência.

Na Tabela 4 exibe as especificações para o emprego do lastro em ferrovias. A NBR ABNT 5564/2014 é que regulamenta os parâmetros de utilização de lastro no Brasil.

Tabela 4 – Especificações de Lastro

Características	Valor
Forma média das partículas	Cúbica
Partículas não cúbicas (máximo)	15%
Massa específica aparente (mínima)	2500 kg/m ³
Absorção de água (máxima)	0,80%
Porosidade Aparente (máxima)	1,50%
Resistência à intempérie (máxima) ^a	10%
Resistência à compressão axial (mínima)	100 MPa
Resistência ao choque (índice de tenacidade Treton máximo)	25%
Teor de fragmentos macios e friáveis ^a	5%
Material pulverulento (máximo)	1%
Torrões de argila (máximo)	0,50%
Limite de massa unitária	1,25 g/dm ³
Resistência ao desgaste (abrasão Los Angeles máxima)	30%
^a verificação opcional	

Fonte: ABNT NBR 5564/2014 – Adaptado.

Em analogia à faixa granulométrica a ser usada, as britas para lastro não podem ter grandes tamanhos, pois podem funcionar como “cunhas” e o nivelamento da via poderia não durar por muito tempo, porém, tamanhos muito pequenos poderiam provocar a “colmatação” da brita, fazendo com que uma de suas funções, a drenagem, fique prejudicada (Brina, 1988).

A ABNT NBR 5564/2014 preconiza duas faixas de distribuição granulométrica para lastro: o “Padrão A”, que é para linhas principais, e o “Padrão B”, que é para aplicação em pátios. A distribuição granulométrica está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Distribuição granulométrica

Lado da malha da peneira de acordo com a ABNT NBR NM ISO 3310-1 (mm)	Porcentagem em massa acumulada (%)	
	Padrão A	Padrão B
76,2	-	0 – 0
63,5	0 – 0	0 – 10
50,8	0 – 10	-
38	30 – 65	40 – 75
25,4	85 – 100	-
19	-	90 – 100
12	95 – 100	98 – 100

Fonte: ABNT NBR 5564/2014 – Adaptado.

3.1.2 Sublastro

Segundo Brina (1988), sublastro é o elemento da superestrutura ferroviária intimamente ligado à infraestrutura e que tem as seguintes finalidades, aumentar a capacidade de suporte da plataforma, permitindo elevar a taxa de trabalho no terreno, ao serem transmitidas as cargas através do lastro e, por conseguinte, permitir menor altura do lastro, evitar a penetração do lastro na plataforma, aumentar a resistência do leito à erosão e a penetração da água, concorrendo, pois para uma boa drenagem da via e permitir relativa elasticidade ao apoio do lastro, para que a via permanente não seja rígida.

Brina (1988) afirma que a utilização do sublastro melhora consideravelmente o padrão técnico da via permanente e reduz a manutenção dela. Selig e Waters (1995) também consideram estas funções muito importantes para o desempenho satisfatório da via. Com isso, na falta da camada de sublastro, os esforços de manutenção podem ser elevados, a menos que essas funções sejam desempenhadas de alguma outra forma.

Sendo o lastro um material até certo ponto caro e de grande consumo (cerca de 1,5m³ por metro corrente) e às vezes de difícil obtenção, a utilização do sublastro, com material mais barato e encontrado nas proximidades do local de emprego, traz grande economia à superestrutura ferroviária, além de melhorar consideravelmente o padrão técnico da via permanente e de baixo custo para a manutenção da ferrovia, informa Brina (1988).

O sublastro tem grande importância na via permanente, sendo fundamental como separador de camadas (entre lastro e plataforma), atuando como filtro, bem como no suporte da estrutura do pavimento ferroviário em conjunto com o lastro, especialmente em uma condição operacional de ferrovia de carga pesada (heavy haul)¹. Absorver os esforços transmitidos pelo lastro e transferi-los para o terreno subjacente, na taxa adequada à sua capacidade de suporte, evitar o fenômeno do bombeamento de finos do subleito e diminuir a altura necessária de lastro, são as funções do sublastro.

O material para sublastro deve obedecer aproximadamente às seguintes características, Brina (1988):

- IG (Índice de grupo) – igual a 0 (zero);
- LL (Limite de liquidez) máximo 35;

¹ O termo Heavy Haul é utilizado para indicar ferrovias com tráfego de carga pesada ou cargas variadas, caracterizada por trens com carga mínima de 25 toneladas por eixo.

- IP (Índice de plasticidade) máximo 6;
- Material que se enquadre, de preferência o grupo A1 de classificação de solos TRB (*Transportation Research Board*);
- Expansão máxima 1%;
- CBR (Índice de suporte Califórnia) mínimo de 30.

O sublastro deverá ser compactado de modo a obter-se peso específico aparente correspondente a 100% do obtido no ensaio de proctor.

No caso de não se encontrar, nas proximidades da ferrovia, material que satisfaça às especificações apresentadas, podem ser adotadas a solução de misturas de dois solos ou de um solo com areia agregado, desde que esse procedimento não venha aumentar o custo demasiado do sublastro.

A espessura do sublastro deverá ser tal que a distribuição de pressões através dele cause, na sua base (plataforma), uma taxa de trabalho compatível com a capacidade de suporte dela.

Com relação à sua graduação, o sublastro, em geral, é um material granular com parcela significativa da granulometria entre 0,075 mm e 25 mm, podendo ser usados agregados britados ou solos (locais ou provenientes de jazidas). O uso de materiais locais (solo) e alternativos (coproduto de mineração) pode ser interessante do ponto de vista econômico e ambiental. Com essas características e funcionalidades, o sublastro pode reduzir a necessidade de uma maior espessura da camada de lastro, sendo economicamente vantajoso.

Os materiais a serem empregados no sublastro poderão ser obtidos in natura (lateritas, cascalhos, solos arenosos etc.), ou obtidos pela mistura de dois ou mais materiais, aqui incluindo-se também o rejeito de mineração. Entretanto, é desejável que os produtos resultantes tenham as seguintes características (DNIT – ISF 212):

- A granulometria do material deverá se enquadrar numa das faixas A, B, C, D, e/ou F da AASHTO, segundo o método DNER-M 80-64;
- A capacidade de suporte deverá ser medida pelo ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC, ou CBR), determinado segundo o método DNER-ME-49-64 e com a energia de compactação (Proctor Intermediário), definida pelo método DNER-ME-48-64. O índice de suporte Califórnia (ISC) mínimo admissível de projeto é de 20;
- O agregado retido na peneira nº 10 deve ser constituído de partículas duras e duráveis, isentas de fragmentos moles, alongados ou achatados, isento de matéria vegetal ou outra substância prejudicial;

- A percentagem do material que passa na peneira nº 200 (0,074 mm), não poderá superar 2/3 da percentagem que passa na peneira nº 40 (0,42 mm). A fração que passa na peneira nº 40 deve apresentar um limite de liquidez (LL) inferior ou igual a 25% e um índice de plasticidade (IP) inferior ou igual a 6%;
- O agregado retido na peneira nº 10 deve ser constituído de partículas duras e duráveis, isentas de fragmentos moles, alongados ou achatados, isento de matéria vegetal ou outra substância prejudicial;
- Expansão máxima de 1,0%;
- O índice de grupo (IG) deverá ser igual a zero;
- No caso de solos lateríticos, a expansão máxima admitida será de 0,5% no ensaio de ISC. A fração que passa na peneira nº 40 deverá ter limite de liquidez inferior ou igual a 40% e índice de plasticidade inferior ou igual a 15%.

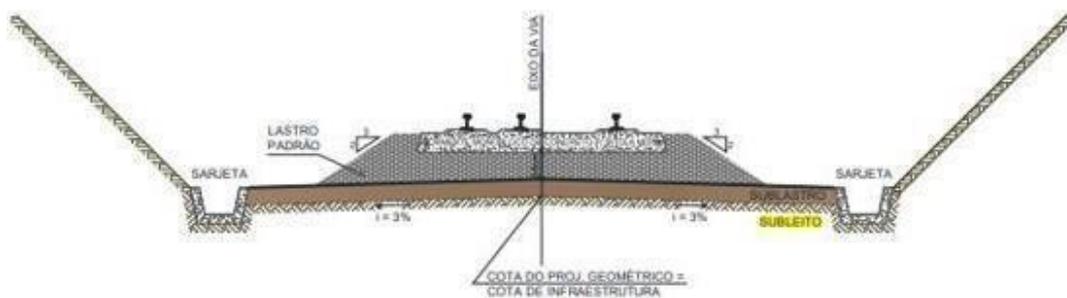
3.1.3 Subleito

De acordo com Spada (2003), a camada de subleito é a fundação de uma ferrovia, que tem como principal função a garantia de uma camada estável para a estrutura de uma linha férrea, dificultando o enfraquecimento da toda a estrutura por redução da capacidade de carga ou até mesmo recalques significativos.

De acordo com o DNIT (ISF 207), nos aterros das ferrovias, subleito define uma superfície acabada de terraplenagem, representada por suas últimas camadas comumente denominadas reforço do subleito. Nos cortes das ferrovias, tendo sido praticados rebaixos de camadas naturais ou não, o subleito define a superfície regularizada no formato das camadas de preenchimentos dos rebaixos ou de superfícies não rebaixadas, como mostra as Figuras 5 e 6.

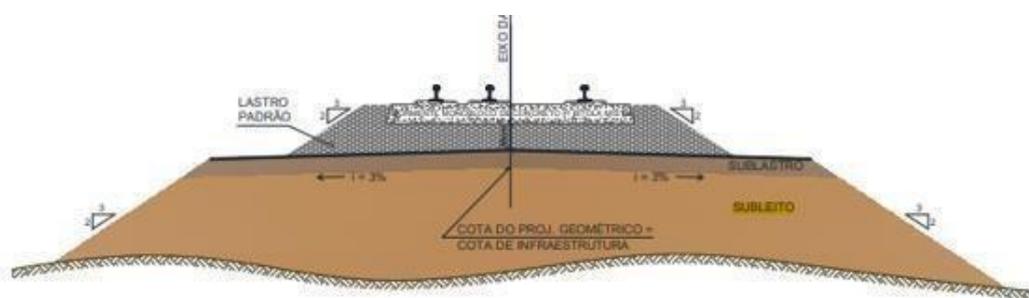
Em ambos os casos, o eixo da superfície do subleito é definido pelas cotas das estacas do projeto geométrico da infraestrutura da via, que devem estar compatíveis nas formas, nas capacidades de resistência e deformações para suportarem as cargas transmitidas pela superestrutura da via, através de sua primeira camada de contato denominada sublastro.

Figura 5 – seção tipo de corte em tangente.



Fonte: DNIT ISF 207

Figura 6 – seção tipo de aterro em tangente



Fonte: DNIT ISF 207

3.2 Minério de Ferro

O minério de ferro possui importância fundamental para o desenvolvimento histórico do estado de Minas Gerais. É um dos mais importantes bens minerais para o desenvolvimento industrial do país, uma vez que é parte ativa da indústria do aço, onde mundialmente cerca de 98% de todo o minério de ferro extraído é utilizado, sendo que o restante é utilizado em indústrias de ferro-liga e cimentos, conforme Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais. A principal aplicação do minério de ferro (cerca de 98% de todo o minério extraído no mundo) é na indústria do aço, que é, basicamente, uma liga de ferro e carbono. O aço encontra-se como uma matéria-prima básica utilizada em diversos produtos e aspectos da vida moderna, com aplicações na Engenharia Civil, na indústria de transportes e automobilística, na produção de aparelhos eletroeletrônicos, e em vários outros setores de produção.

Existem aproximadamente 300 minerais que possuem o ferro como componente essencial, mas destes, apenas os óxidos apresentam concentrações suficientes para serem tratados como minério. O ferro nativo (fora da estrutura de algum mineral) é raro na natureza.

O minério de ferro consiste em óxidos de ferro, cujas formas primárias são a magnetita (Fe_3O_4) e a hematita (Fe_2O_3), substâncias que, quando aquecidas na presença de um agente redutor, liberam ferro em sua forma metálica (Fe), (CAXITO; DIAS, 2018).

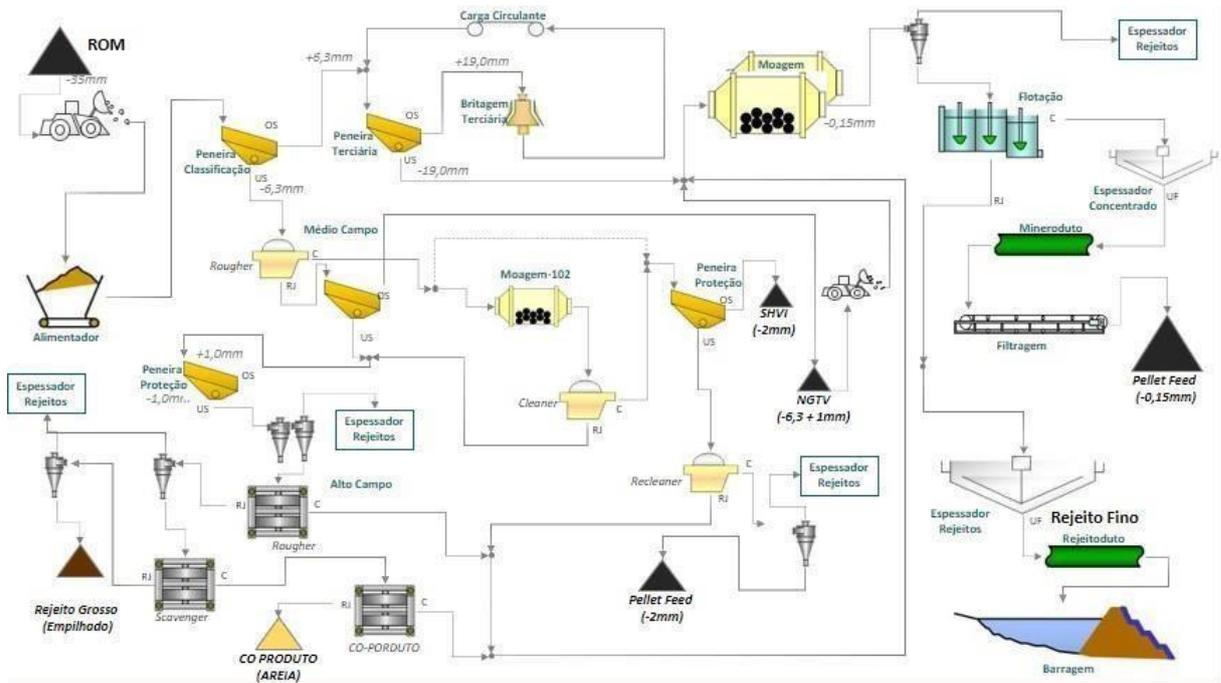
O minério de ferro é a rocha, a qual, pode ser obtido o ferro metálico de maneira economicamente viável (CAXITO; DIAS 2018). O ferro é um elemento químico de símbolo Fe, número atômico 26 e massa atômica relativa igual a 55.845. Em temperatura ambiente encontra-se em estado sólido, mas por ser um elemento muito reativo, não é encontrado na natureza na forma metálica, ou seja, sem estar ligado quimicamente a outro elemento. Na proporção de 4,2% é o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre, inferior apenas ao oxigênio, silício e alumínio, e dentre todos os metais é o mais utilizado no cotidiano.

3.3 Rejeito de minério

Wijewickreme *et al.* (2005) definem os rejeitos de mineração como sendo essencialmente partículas de rochas trituradas derivadas do processamento do minério. A mineralogia, granulometria e a morfologia das partículas dos rejeitos de minério variam muito em função da composição da rocha mãe e do processo de beneficiamento a que foram submetidos.

A Figura 7 apresenta um exemplo de fluxograma geral de uma usina de minério de ferro, destacando-se todas as etapas envolvidas no processo, tais como a lavra e a consequente disposição de estéreis, as operações de beneficiamento (tratamento) e os respectivos produtos e resíduos gerados. Tais processos de beneficiamento industrial têm naturezas diversas, devido à diversidade de fatores que podem influenciar nas operações e nos consequentes produtos do processo de mineração. Dentre estes fatores, destacam-se as características mineralógicas e os teores do minério de ferro explorado em cada mina.

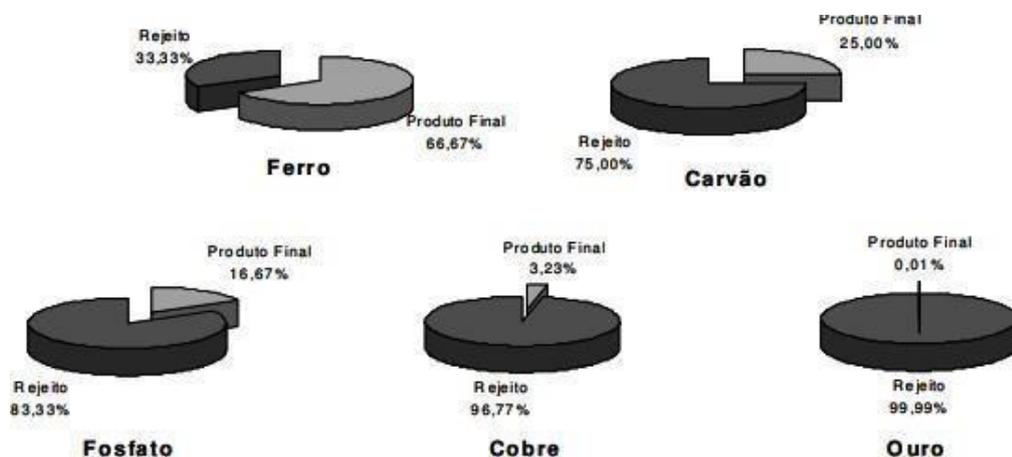
Figura 7 – Fluxograma típico do processo de mineração de ferro – Mina de Viga



Fonte: VALE, 2023.

Na região do chamado “Quadrilátero Ferrífero” de Minas Gerais, área correspondente a cerca de 7000 km², estão localizadas imensas reservas de minério de ferro, ouro e um grande número de outros minerais, cuja exploração sistemática e intensa resulta em volumes consideráveis de rejeitos. Os volumes gerados em grande escala são abordados por Abrão (1987) em relações produto final / rejeito gerado. Razões médias entre o produto final e o rejeito gerado podem ser destacadas como um exemplo explicativo da quantidade de resíduos gerados no processo de mineração: ferro 2/1, carvão 1/3, fosfato 1/5, cobre 1/30 e ouro 1/10000 (Figura 8).

Figura 8 – Razões médias entre o produto final e rejeito gerado



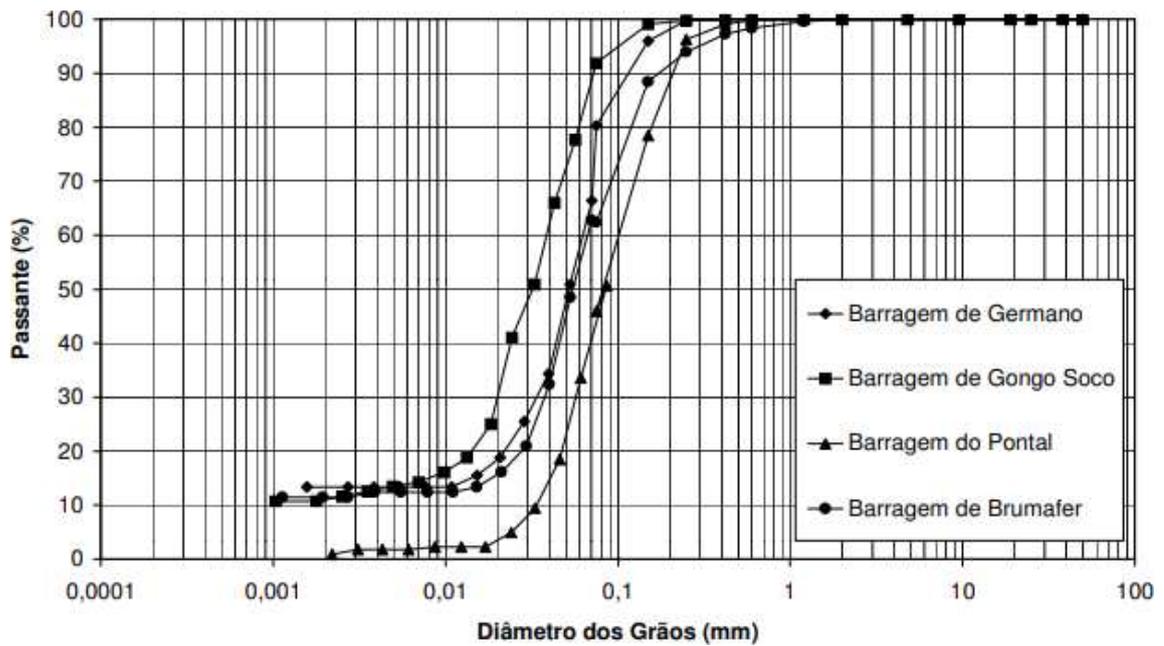
Fonte: Abrão (1987).

Neste contexto, na mineração, a disposição de estéreis e dos rejeitos oriundos do processo produtivo exige um planejamento racional e criterioso, a partir do plano de lavra e das premissas de recuperação do minério, em virtude dos grandes volumes envolvidos. Os planos de lavra consideram os rejeitos em termos de pesos e não de volumes, uma vez que não se conhece "a priori" as características de compressibilidade dos rejeitos, não se dispendo, portanto, da densidade final deles. Assim, o plano de lavra não constitui, por si só, elemento de análise final para a estimativa da capacidade de estocagem dos rejeitos.

Em geral, os rejeitos são dispostos por via úmida através de barramentos construídos com ou sem a utilização dos próprios rejeitos (barragens de contenção) ou por via seca mediante as chamadas pilhas de rejeito que, ao contrário das barragens, não têm o objetivo de reter líquidos conjuntamente com a matéria sólida descartada. Em alguns casos, podem ser usados dispositivos especiais, como, por exemplo, os hidrociclones, para separação das frações grossa e fina dos rejeitos. Em outros casos, o processo de segregação natural das vinte e cinco partículas do rejeito pode se tornar um fenômeno muito complexo em face das diferentes densidades dos minerais presentes (evento típico em minerações de ferro, devido à interação de diferentes granulometrias e densidades de grãos de sílica e óxidos de ferro). Os estéreis são depositados sob a forma de pilhas, executando-se adequados sistemas de drenagem interna para fluxo das águas de chuva.

Para estudos geotécnicos relacionados a projetos de infraestrutura rodoviária e ferroviária, é fundamental estabelecer a caracterização tecnológica dos resíduos de mineração, por meio de metodologias específicas em termos de ensaios de laboratório ou ensaios de campo (Gomes *et al.*, 1999).

Os rejeitos de mineração podem variar de materiais granulares não plásticos até solos muito finos e de elevada plasticidade. Para ilustrar os efeitos destes condicionantes citados anteriormente, a Figura 9 apresenta as curvas granulométricas de diferentes amostras de rejeitos de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais (Pereira, 2001).



Fonte: Pereira (2001).

Os rejeitos ditos granulares normalmente apresentam alta permeabilidade e, conseqüentemente, baixa compressibilidade. Além disso, os parâmetros de resistência ao cisalhamento destes materiais encontram-se na faixa de 25° a 35° para o ângulo de atrito, com coesão muito baixa ou nula. Adicionalmente, a densidade dos grãos (GS) apresenta valores elevados pela influência direta das partículas de minério de ferro remanescentes no rejeito.

O conhecimento do resíduo de mineração, estéril ou rejeito, como um material geotécnico definido, é incipiente e a modelação dos problemas geotécnicos envolvendo estes materiais é tipicamente estabelecida a partir de uma generalização dos princípios clássicos da mecânica dos solos (Gomes, 2002).

Rejeitos, entretanto, não se comportam necessariamente como solos e esta lacuna tecnológica representa uma intensa perda no domínio do conhecimento em projetos e construção de empreendimentos envolvendo resíduos de mineração.

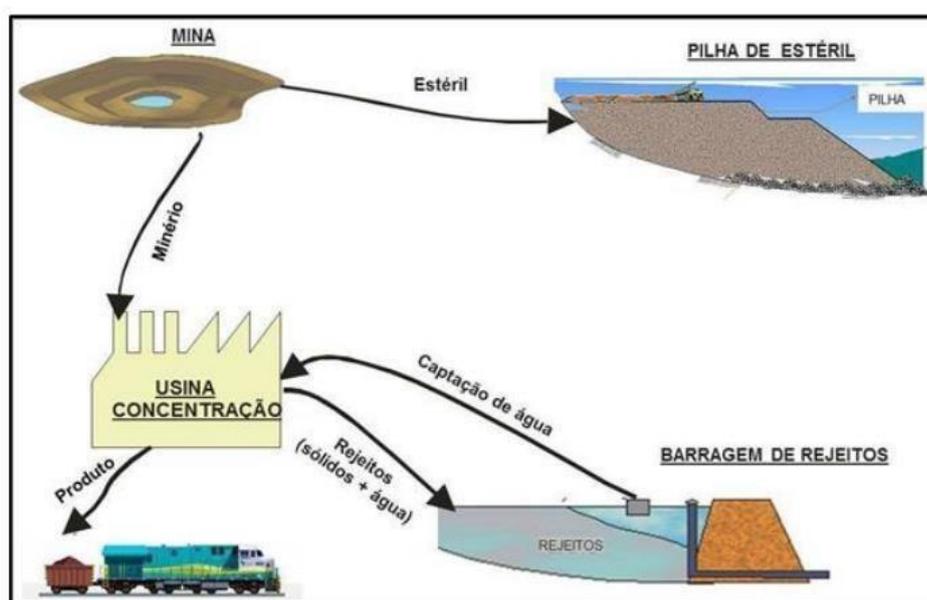
De acordo com a Norma Reguladora de Mineração (NRM - 18 – Beneficiamento), entende-se por beneficiamento de minérios os processos de tratamento industrial que prepara granulometricamente os minerais por métodos físicos ou químicos sem alteração da constituição química dos minerais (DNPM, 2011).

Conceitualmente, mineral é todo corpo inorgânico de composição química e de propriedades físicas definidas, encontrado na crosta terrestre. Minério é toda rocha constituída

de um mineral ou agregado de minerais contendo um ou mais minerais valiosos, possíveis de serem aproveitados economicamente (CETEM, 2004).

O rejeito denominado estéril é resultado da primeira etapa do processo de escavação da rocha, que é retirado o solo que envolve a rocha e é realizado o desmonte. Etapa inicial que é chamada de lavra. O estéril é disposto em pilhas, em função do solo de cobertura e agregado no interior da rocha não tem valor econômico, Figura 10. A partir de então, esse minério é encaminhado para beneficiamento, etapa que visa preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios por métodos físicos ou químicos, sem alteração da constituição química dos minerais (Ministério das Minas e Energia, 2008).

Figura 10 – Fluxograma de mineração



Fonte: COBRAMSEG (2016) adaptado.

O mineral de interesse encontra-se agregado a outros, faz-se então necessário efetuar tratamento para apuração daquele, cujas propriedades físico-químicas são objetivo do investimento.

O beneficiamento divide o mineral bruto em concentrado e rejeito, este último, sem valor econômico, é armazenado em diques ou barragens. Segundo Abrão (1987), os rejeitos podem comportar-se como solos não plásticos (rejeitos granulares), tendendo a areias finas e médias ou como solos de granulometria fina e alta plasticidade (lamas) características dos siltes e argilas.

O ferro concentrado é obtido através das etapas de britagem, moagem, deslamagem e flotação em colunas. Os rejeitos do beneficiamento de ferro de interesse deste trabalho serão os

produzidos por separação magnética e flotação para os quais apresentam-se algumas definições divulgadas pelo Ministério de Minas e Energia.

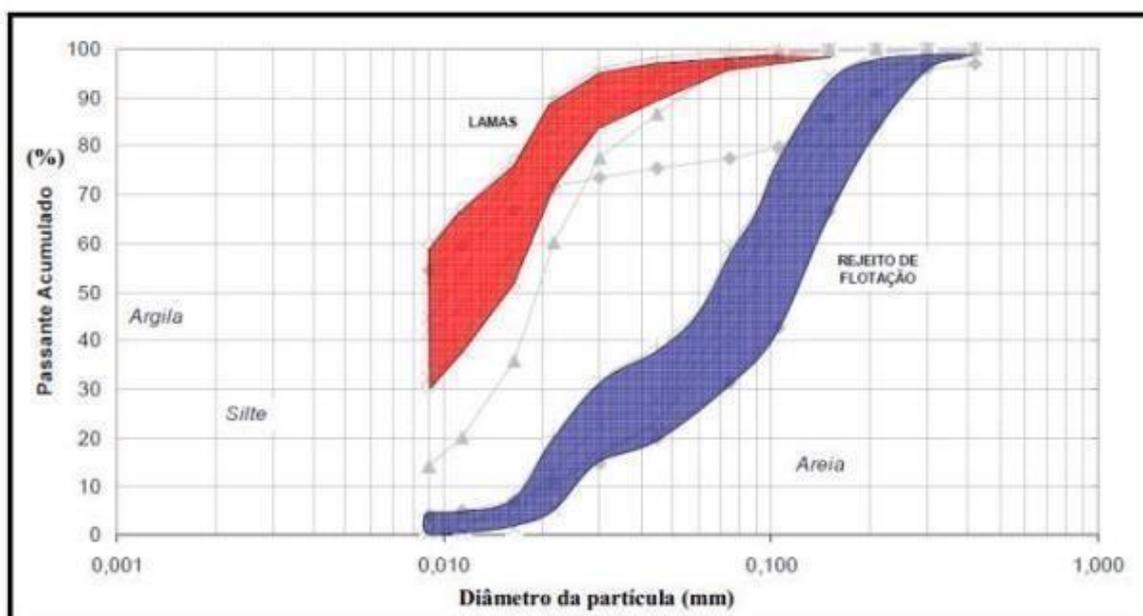
De acordo com Araújo *et al.* (2007), os minérios de alto teor de ferro são usualmente tratados em etapas de fragmentação, classificação por tamanho, espessamento e filtragem. No caso de minérios de baixo teor de ferro e com uma granulometria mais grossa, estes devem ser tratados em etapas de britagem, moagem, classificação por tamanho, concentração gravítica e flotação. Da flotação resultam dois produtos: um concentrado final e um rejeito final, que seguirá para a área de descarte.

3.3.1 Características do rejeito de minério

A maioria dos rejeitos de minério de ferro é considerada granular, com boas condições de drenagem e resistência e baixo potencial poluidor, cujo comportamento geotécnico é determinado por essas características e pela forma de deposição.

No beneficiamento de extração de minério de ferro na região do Quadrilátero Ferrífero do estado de Minas Gerais, Campanha (2011) revelou através de avaliação genérica dos rejeitos, que cerca de 60% a 70% destes rejeitos apresentam uma granulometria tendendo a areias finas e médias silteosas, conforme pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Faixas granulométricas das lamas e rejeitos de flotação, típicas das usinas de processamento de minério de ferro.



Fonte: Campanha (2011).

Pinto (2013) também confirmou a tendência já relatada sobre as faixas granulométricas dos rejeitos oriundos do processo de beneficiamento por flotação e concentração magnética. Os resultados alcançados por Campanha (2011) e Pinto (2013) se convergiram na classificação destes materiais como sendo não plásticos ou com plasticidade muito baixa e apresentaram valores de pesos específicos dos sólidos elevados e superiores a 30 kN/m^3 , possivelmente em função dos altos teores de ferro ainda presentes nos mesmos. Os pesos específicos elevados se justificam pela existência do elemento ferro nos argilominerais como a hematita (Fe_2O_3), peso específico entre $5,17$ e $5,18 \text{ g/cm}^3$, goethita (FeO.OH), peso específico entre $5,158$ e $5,180 \text{ g/cm}^3$ e do alumínio na gibsita ($\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{H}_2\text{O}$), peso específico da ordem de $2,60 \text{ g/cm}^3$.

3.3.2 Disposição dos rejeitos

As barragens de contenção de rejeitos são metodologias construtivas e obras geotécnicas que exigem critérios bastante rigorosos, uma vez que podem ser susceptíveis a eventos de ruptura com enormes perdas econômicas, sociais e ambientais (Silva, 2007).

A disposição final de rejeitos não constitui problema mais sério, quando destinados aos trabalhos de recuperação das áreas. Quando esses depósitos ficam muito volumosos (ver Figura 12), tornam-se, por si mesmos, instáveis e sujeitos a escorregamentos localizados.

Figura 12 – Exemplo de pilha de rejeitos e estéril de mineração



Fonte: Silva (2007).

As avaliações das interações ambientais do uso de rejeitos de mineração são baseadas de acordo com a NBR 10.004 (ABNT 2004a,2004b,2004c), onde define os resíduos sólidos como: resíduos nos estados sólidos e semissólidos, resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. A classificação

dos resíduos está ligada a seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, a fim de dar um destino adequado e manuseio. A sua periculosidade está intrinsecamente relacionada às suas propriedades físicas, químicas e/ou infectocontagiosas.

3.4 Estabilização e melhoramento de solos

A estabilização de solos é como uma metodologia que confere ao material maior resistência estável às cargas, desgaste ou erosão, seja por meio da compactação, ajuste granulométrico e plasticidade seja pela adição de produtos que conferem coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos seus grãos (Vargas, 1977).

Os três tipos de estabilização, de acordo com Almeida *et al.* (2016), são: química, mecânica e física. A estabilização química consiste nas reações que ocorrem entre a massa de solo, agente estabilizante e a água. Já a estabilização mecânica é um conjunto de operações mecânicas que alteram o arranjo das partículas do solo ou granulometria cujo objetivo principal é a redução dos vazios do solo. Por fim, a estabilização física consiste na correção da granulometria do substrato, tendo como exemplo a adição de fibras (Pinto, 2008).

Van Impe (1989 *apud* Casagrande, 2005) afirma que a estabilização pode ser temporária, permanente e permanente com adição de novos materiais. Sendo a temporária no período de execução da obra ou certa fase. A permanente sem adição equivale aos processos de compactação e tratamentos térmico. Enquanto a permanente com adição de novos materiais combina compactação e adição de um segundo material.

Casagrande (2005) define melhoramento de solo como tratamentos químicos que visam o incremento das propriedades mecânicas, buscando o aumento da resistência do compósito e diminuição da compressibilidade e permeabilidade do solo natural.

As pesquisas sobre utilização de rejeitos como materiais de construção são recentes, devido à grande diversidade destes produtos e por sua utilização só ser aconselhável em alguns projetos. Geralmente, os rejeitos de minério não apresentam boa propriedade geotécnica, sendo necessário a combinação de algum material com boa característica ou um reforço da matriz de rejeito. Campanha (2011) analisou as características químicas, mineralógicas e geotécnicas dos rejeitos de minério de ferro da região do quadrilátero ferrífero. Os resultados indicaram que há viabilidade técnica da aplicação de rejeitos de minério de ferro em obras de construção rodoviária, observando a compatibilidade para emprego em camadas de base e sub-base,

principalmente quando melhorados com cimento, tanto quanto à granulometria quanto aos valores de ISC e expansão.

3.5 Pesquisas com rejeito de minério

As pesquisas sobre rejeitos de minérios iniciaram o interesse no grupo científico após a ocorrência de acidentes em barragens de mineração, acerca da disposição destes rejeitos.

O desempenho mecânico desses materiais pode alterar, quando comparado ao solo natural, já que estes sofrem um grande desgaste físico e químico durante a sua formação, por isso, a importância de um estudo para melhor compreensão do comportamento destes materiais.

Os estudos sobre utilização de rejeitos como materiais de construção são recentes, as pesquisas sobre utilização de rejeitos como materiais de construção são recentes, devido à grande variabilidade destes produtos e por sua utilização só ser aconselhável em alguns projetos.

Coelho (2008) realizou uma mistura com argila (20%), rejeito de minério de ferro fino (10%) e rejeito de jigagem (70%) reforçado com fibras de polipropileno para aplicação na base em aterros rodoviários. Após o estudo, o autor concluiu que a adição de fibra reduziu a resistência inicial do compósito favorecendo maiores efeitos de ductilidade e impondo um comportamento elasto-plástico de enrijecimento do material. A envoltória de resistência se apresentou bi-linear na qual o primeiro trecho possui um baixo intercepto coesivo, mas alto ângulo de atrito enquanto o segundo trecho um alto intercepto coesivo, porém o ângulo de atrito é reduzido. Por fim, foi possível concluir que a mistura não é indicada, pois foi encontrado efeitos maiores de contração sob cisalhamento tornando crítico o risco de liquefação de rejeitos.

Campanha (2011) analisou as características químicas, mineralógicas e geotécnicas dos rejeitos de minério de ferro da região do quadrilátero ferrífero. Os resultados indicaram que há viabilidade técnica da aplicação de rejeitos de minério de ferro em obras de construção rodoviária, observando a compatibilidade para emprego em camadas de base e sub-base, principalmente quando melhorados com cimento, tanto quanto à granulometria quanto aos valores de ISC e expansão.

Grasse *et al.* (2019) analisaram, por meio de ensaio de compressão simples, um solo de comportamento laterítico estabilizado com cal, em diferentes porcentagens com a adição do rejeito de flotação de minério de ferro. Os autores concluíram que a adição do resíduo promoveu um aumento expressivo nos valores de resistência à compressão simples das misturas.

3.6 Pesquisas com Polímeros

Na engenharia civil, há variadas aplicações dos polímeros, seja em produtos, seja em técnicas. Como exemplo de produtos poliméricos, pode-se citar, dentre outros: produtos para redução da quantidade de água requerida ou melhora da trabalhabilidade de concretos, primers para revestimentos de superfícies. Em obras geotécnicas, as técnicas que utilizam polímeros buscam a melhora de parâmetros de resistência de diferentes tipos de solo. Além da existência de possibilidade de aplicação em áreas como: aterros de solo mole, fundações superficiais, estabilidade de taludes (Barreto *et al.*, 2018), contenção de fluidos durante escavação de fundações profundas e em obras subterrâneas (Lam; Jefferis, 2018), pavimentação, estabilização granulométrica com borracha e asfaltos modificados – asfalto-borrachas e com adição de polímeros (Forde, 2009), geossintéticos e suas inúmeras aplicações (Palmeira, 2018).

A nomenclatura de polímeros segue as regras da International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC, 2009). Basicamente, o nome é poli (em inglês, poly) como prefixo acompanhado pelo manômetro constituinte. Por exemplo, polietileno ($\text{CH}_2 = \text{CH}_2$, o manômetro), poliestireno $(\text{C}_8\text{H}_8)_x$, policloreto de vínica (PVC) $(\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl})_x$, etc. Contudo, há polímeros cujos nomes não começam com o prefixo poli, como o exemplo Carboximetilcelulose (CMC) que é um polímero natural advindo da celulose, pode ser utilizado como bentonita para suporte de líquidos. Outro exemplo são os polímeros do grupo dos Lignosulfonatos que são utilizados como superplastificantes de concretos.

Os fabricantes de polímeros fornecem em sua maioria, o material na forma líquida em maior concentração, havendo necessidade da dissolução em água. A indústria prefere esse tipo de polímero (solução polimérica) do que polímeros em pó, devido maiores dificuldades de dissolver podendo ocorrer redução de sua eficácia (Canevarolo, 2006; Lam; Jefferis, 2018). Quando aplicado corretamente e na dosagem adequada, a aplicação do polímero torna-se um forte estabilizador de solos em estradas não pavimentadas, pisos de estacionamentos, proteção de taludes, como selante no controle de poeira, controle de erosão e camadas de pavimentação. Podendo ser utilizado em aterros com solos finos, pois evita a erosão por intemperismo devido aglutinação dos grãos, melhorando a estabilidade do maciço. Os aditivos poliméricos estão sendo cada vez mais usados devido serem mais confortáveis, eficazes e favoráveis ao meio ambiente.

Para Visconte *et al.* (2001), os copolímeros de butadieno são muito aplicados em misturas poliméricas, originadas de mistura mecânica de dois ou mais polímeros, como

NR/SBR (mistura de borracha natural com o SBR). Zandieh e Yasrobi (2010) aplicaram polímero em solos arenosos advindos de dunas do deserto de Garmsar no Irã. Avaliaram o tempo de cura de 1, 2, 7, 14 e 28 dias com 7 porcentagens diferentes de dois tipos de polímeros, por meio do ensaio de resistência à compressão não confinada. Observaram um aumento considerável na resistência à compressão não confinada e melhora da resistência à deterioração na presença de água. Avaliaram que entre o 3º e 7º dia de cura já há 90% de ganho da resistência a compressão não confinada total.

Khatami e O'Kelly (2013) analisaram o comportamento de um solo arenoso quando misturados a dosagens distintas de um biopolímero. Foi constatado que à medida que aumentava-se a porcentagem de polímero adicionado na amostra, havia um incremento dos valores de resistência a compressão e aumento da tensão desviadora, além de melhorar todos os valores do solo arenoso não tratado.

Garcia *et al.* (2015) estudaram o comportamento de um solo arenoso adicionado polímero, cimentado artificialmente e puro. Após as análises o autor observou altos incrementos nas forças de cimentação, tração e resistência ao cisalhamento do solo arenoso adicionado com polímero quando comparado aos demais.

Kolay *et al.* (2016) investigaram o efeito do polímero líquido em solos finos. As amostras foram compactadas e deixadas curar por 7, 14 e 28 dias. As amostras foram analisadas através de ensaios de compressão não confinada e observou um aumento, mesmo que pequeno, na resistência de ambos os solos estudados com o tempo de cura, independente se a cura ocorreu ao ar livre ou em confinamento. Porém após 14 dias as amostras não aumentaram consideravelmente a resistência.

Xing *et al.* (2018) estudaram o desempenho mecânico de um solo arenoso estabilizado utilizando polímero. Foi avaliado no estudo uma comparação da força, taxa de perda de umidade e energia de tensão sob diferentes tempos de cura, tipo de polímero, quantidade de polímero e condições de teste. Este estudo mostrou que após 14 dias ocorreu a máxima resistência a compressão e a adição de polímeros em condições úmidas e secas melhorou a resistência da amostra.

Liu *et al.* (2018) utilizaram polímero orgânico em diferentes concentrações em um solo arenoso. Para isso, realizaram ensaios de resistência à compressão simples, cisalhamento direto e tração. Os resultados indicam que com a adição do polímero houve um aumento de resistência à compressão, coesão e resistência à tração em todas as amostras, além de aumentar a densidade conforme elevou a concentração de polímero

Okonta (2019) analisou a aplicação de solução polimérica acrílica em diferentes tempos de cura, porcentagens e temperaturas para um solo característico da região da África do Sul. O autor verificou a redução de vazios com o aumento da porcentagem de solução polimérica. Além disso, constatou que a cura submetida à maiores temperaturas gera um incremento da resistência à compressão não confinada quando comparado a cura para mesmo tempo com menor temperatura. O solo estudado tinha predominantemente características arenosas e assim a adição da solução polimérica mostrou-se eficaz por gerar cimentação entre os grãos.

Liu *et al.* (2019) avaliaram as características da areia reforçada com diversos teores fibra de polipropileno (PF) e várias dosagens de polímero orgânico de poliuretano (POP), através de ensaio de compressão não confinada. Para os testes, os autores variaram o tempo de cura e densidade das amostras. Os resultados dos testes indicaram que houve melhora na resistência da areia com 48 horas e o índice de estabilidade da amostra quase chegou na estabilidade quando a densidade atingiu $1,55 \text{ g / cm}^3$ usando o POP de 3%.

Liu *et al.* (2018) estudaram o comportamento mecânico de misturas de solo com polímero de poliuretano (PU) e fibra de polipropileno (PF) em comparação com areia pura. O estudo foi realizado através de ensaio de tração variando o tempo de cura, as proporções de PF/PU/Solo/Água e a densidade seca do material, constatou-se que a resistência a tração foi influenciada por estes fatores. Assim, foi possível concluir que o tempo de cura influencia a resistência a tração da mistura, e que até a saturação, o tempo de cura resultará aumento da resistência a tração.

Barreto *et al.* (2018) analisaram o melhoramento do solo arenoso com a utilização de copolímero de butadieno e estireno modificado (XSBR) através da realização de ensaios de cisalhamento direto e permeabilidade utilizando o permeâmetro de carga variável. Através da realização do ensaio de cisalhamento direto, constataram que houve melhoria nos parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras adicionais com o copolímero, para diferentes tempos de cura e dosagens, quando comparado com a areia pura.

Lee *et al.* (2019) analisaram a viabilidade de aplicação de biopolímero (xanthan gum), na estabilização do solo local, para a construção da estrada no Sri Lanka, através do ensaio de compressão não confinada. Os resultados foram comparados com os realizados com cinzas volantes, cimento portland e cinzas de fundo. A resistência à compressão não confinada do solo melhorado com a solução biopolimérica foi menor nos primeiros dias e maior com 28 dias. Nos resultados do estudo as amostras melhoradas com a solução biopolimérica mostraram-se mais dúcteis do que os outros materiais.

Silva (2020) estudou o comportamento de um solo arenoso melhorado com solução polimérica como agente estabilizante, visando a aplicação em estradas não pavimentadas, base de pavimentos, bem como aterros e taludes. A análise ocorreu por meio de ensaios de compressão simples, cisalhamento direto e simulador de tráfego laboratorial. A autora concluiu através das análises realizadas que a solução polimérica adicionada no solo estudado possa ser aplicada como um novo material geotécnico para melhoramento desse solo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, citam-se os materiais seletivos para a realização deste estudo e o método investigativo adotado para que sejam atingidos os objetivos específicos. A parte experimental foi realizada no Laboratório de Solos – UFMG. Foram utilizados dois rejeitos de minério de ferro para a realização de seis ensaios para caracterização. A pesquisa envolveu a realização de ensaios de caracterização geotécnica, compactação e Índice de Suporte Califórnia (ISC). Além destes, foram realizados e recebidos pela equipe do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) da UFMG, os ensaios de caracterização química e mineralógica, através de difratometria por raio – X.

As etapas da pesquisa são detalhadas neste capítulo e evidenciadas no fluxograma na Figura 13, desde a coleta e preparo dos materiais até os ensaios que avaliaram o comportamento do material em estudo.

Nos itens a seguir, apresenta-se a metodologia para a análise dos resultados obtidos na fase experimental do trabalho.

Figura 13 – Fluxograma de trabalho de pesquisa



Fonte: Autor

4.2 Materiais utilizados

4.2.1 Rejeito de minério de ferro

O rejeito de minério de ferro utilizado na pesquisa é derivado da empresa VALE Mineração S.A, situada nos municípios de Congonhas-MG e São Gonçalo do Rio Abaixo – MG, região do Quadrilátero Ferrífero. Esse material é gerado na etapa de flotação do beneficiamento do minério de ferro das minas de Viga e Brucutu, respectivamente. As amostras foram retiradas a uma distância de 50 metros da crista do barramento, com espaçamento entre pontos de coleta de 100 metros, num total de três furos. Devido à proximidade da linha freática, determinou-se a profundidade de dois metros para a retirada das amostras. Em seguida, as amostras foram transportadas para o Laboratório de Solos da UFMG, através de seis bombonas plásticas, contendo, cada uma, aproximadamente 80 kg de rejeito.

As coletas, transporte e o preparo das amostras foram realizados de acordo com a especificação DNER-ME 041/94. As Figuras 14 e 15 demonstram o registro fotográfico de algumas etapas realizadas.

Figura 14 e Figura 15 – Local de coleta e armazenamento da amostra, pronta para transportar para o laboratório



Fonte: Autor

Figura 16 – Amostra do rejeito de minério Fe



Fonte: Autor

Conforme pode ser visto na Figura 16, visualmente o rejeito de minério de Fe apresenta uma textura arenosa, por isso, será denominado nesta pesquisa como sendo rejeito arenoso.

4.2.2 Polímero

O polímero usado é o SOILTECH á base de algas formulado como um potencializador de solo e água para uso na estabilização de solo. Como um aditivo potencializador o SoilTech permite que o ambiente equilibrado absorva melhor a umidade melhorando as taxas de compressão para o trabalho. SoilTech™ é classificado pelo USDA nos EUA como 68% orgânico.

As informações sobre a composição quali-quantitativa do material não foram fornecidas pelo fabricante, devido sigilo comercial e industrial. A Tabela 6, fornecida pelo fabricante, apresenta propriedades químicas e físicas do produto.

Tabela 6 – Características químicas e físicas do produto

Estado físico	Líquido viscoso
Peso molecular	24.8
pH	6,5 a 7,5 (ASTM D 1293 -95)
Densidade relativa	1,34 kg/L
Solubilidade	Solúvel em água (0,1 a 1,0%)

Fonte: Paradigm Scientific Technologies, LLC – Adaptado.

4.3 Ensaios realizados

4.3.1 Caracterização Física

A propriedade física comumente utilizada para identificar um solo, propriedade de "natureza", é a composição física (ou textura) que pode ser identificada qualitativamente, através da denominada análise tátil-visual, e quantitativamente, através de análise granulométrica. Além da análise tátil-visual dos materiais, foram realizados os ensaios de caracterização física no laboratório.

- Para a caracterização física dos solos foram empregadas as recomendações segundo a ABNT: NBR 6457/2016 - Amostra de Solos - Preparação de Compactação e Caracterização;
- NBR 6457/2016 - Teor de Umidade Natural;
- NBR 6508/2014 - Massa Específica Real dos Grãos;
- NBR 6459/2016 - Solo - Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180/2016 - Solo - Determinação do Limite de Plasticidade;
- NBR 7181/2016 - Solo - Análise Granulométrica.

4.3.1.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada através do processo de peneiramento para a fração grossa (partículas com diâmetro $> 0,074$ mm) e sedimentação para a fração fina (partículas com diâmetro $< 0,074$ mm). Os procedimentos estão de acordo com o método de ensaio "Solo - Análise Granulométrica" - NBR 7181.

O ensaio de sedimentação foi realizado com o uso de hexametáfosfato de sódio, um defloculante, recomendado pela NBR 7181/2016. Os ensaios de sedimentação consistem em colocar 50 gramas de solo destorroado, seco ao ar, passante na peneira # 40 em 125 ml de defloculante (hexametáfosfato) e deixar em repouso por um período de 24 horas. Se procede à dispersão mecânica e coloca-se a mistura em uma proveta de 1000 ml cujo volume é completado com água destilada. A lavagem do material (suspensão) proveniente do ensaio de sedimentação na peneira de abertura 0,075 mm (peneira nº 200) foi realizada com água potável a baixa pressão, com movimentos circulares de peneiramento.

4.3.1.2 Limites de Atterberg

Visando caracterizar a interação do solo com a água, os ensaios de limite de liquidez e de limite de plasticidade foram realizados segundo as normas NBR 6459/2016 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez (ABNT, 2016) e a NBR 7180/2016 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade (ABNT, 2016).

Através dos dados obtidos por meio desses ensaios, foi determinado o Índice de plasticidade (IP, em %), obtido através da diferença entre o limite de liquidez (LL, em %) e o limite de plasticidade (LP, em %), equação 4.1:

$$IP = LL - LP \quad (4.1)$$

4.3.1.3 Análise Granulométrica e Densidade Real

O ensaio de granulometria foi realizado conforme especificação da norma DNER-ME 051/94. Paralelamente ao ensaio de granulometria, foi realizado o ensaio para a determinação da densidade real dos grãos, que é feito de acordo com a norma DNER-ME 093/94. A Figura 17 apresenta o ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação. A Figura 18 apresenta o ensaio de densidade real dos grãos.



Fonte: Autor.

Figura 18 – Ensaio Densidade real dos grãos



Fonte: Autor.

4.3.2 Caracterização Geotécnica

A classificação TRB (Transportation Research Board), é resultante de alterações da classificação do Bureau of Public Roads (BPR), originalmente apresentada em 1929 e cuja proposta era estabelecer uma hierarquização para os solos do sub-leito, a partir da realização de ensaios simples e realizados de forma corriqueira: a análise granulométrica por peneiramento e a determinação dos limites de liquidez e de plasticidade. Publicada nos anais da TRB em 1945, uma nova versão da classificação propôs a subdivisão de alguns dos grupos da classificação original e introduziu o conceito de Índice de Grupo (IG), número inteiro que fornecia subsídio para o dimensionamento de pavimentos.

4.3.3 Caracterização Mineralógica

A composição mineralógica é importante para a explicação do comportamento de muitos solos. Essas análises proporcionam uma identificação mais concreta dos constituintes do solo, pois evidenciam o seu comportamento. Por exemplo, a existência de esmectita, que apresenta uma propriedade de aumento da dupla camada em presença de água, pode conferir ao solo um comportamento expansivo.

4.3.3.1 Difração de Raio X

A identificação dos argilo-minerais constituintes dos solos é de extrema importância para o entendimento de seu comportamento. Um dos ensaios que auxilia na identificação da composição mineralógica da fração silte/argila é a Difração de Raio-X (DRx). Isto é possível porque na maior parte dos sólidos, os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos Raios-X. Ao incidir um feixe de Raios-X em um cristal, ele interage com os átomos presentes, originando o fenômeno de difração.

A identificação dos minerais é possível pois o espectro de difração de raios-X de uma substância cristalina é único e caracteriza-se pela posição e intensidade dos picos observados no ensaio (Cullity; Stock, 2014).

Cada argilo-mineral gera um conjunto característico de reflexões segundo ângulos θ , que podem ser convertidos nas distâncias interplanares formadas pelas estruturas cristalinas.

4.3.4 Caracterização Mecânica

A preparação e moldagem dos corpos-de-prova para a realização do estudo definitivo foram feitas com base nos valores de teor de umidade ótimo e massa específica seca máxima, obtidos no estudo preliminar. Nessa etapa do trabalho foram realizados os seguintes ensaios: compactação, CBR.

4.3.4.1 Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação para os materiais envolvidos foram realizados de acordo com as diretrizes da NBR 7182/2016 (ABNT, 2016), utilizando-se a energia de compactação Proctor intermediário e sem reuso de material.

Os ensaios de compactação foram realizados após o material (solo + água) ser deixado por aproximadamente 24 horas na câmara úmida, conforme recomendado na norma NBR 7182/2016.

4.3.4.2 Ensaio de CBR (Índice de Suporte Califórnia) e Expansão

A capacidade de suporte e expansibilidade foram avaliados utilizando o ensaio de CBR, medindo a resistência à penetração de uma amostra saturada compactada na energia intermediária. Isto é, comparar suas características para uso em camadas de sublastro em pavimento ferroviário.

Foram moldados 1 (um) corpo de prova para cada ensaio com as umidades obtidas no ensaio de compactação dos solos e suas respectivas misturas, moldados na energia intermediária. Foram verificadas as expansões após a saturação dos cps durante 96 horas e em seguida os valores de CBR do solo na prensa, conforme ilustrado na Figura 19.

A norma utilizada para o ensaio foi a NBR 9895/2016 – Solo – Índice Suporte Califórnia.

Figura 19 – Cps imerso após 96 horas e prensa mecânica utilizada para obtenção do CBR



Fonte: Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são exibidos os resultados alcançados pela dissertação. Conforme Capítulo 4, as análises estão divididas em: caracterização física, resistência mecânica, caracterização mineralógica.

5.1 Caracterização física

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de granulometria, massa específica dos grãos, limites de Atterberg, Índice de grupo (IG) e classificação TRB e SUCS.

5.1.1 Análise granulométrica

A curva granulométrica ideal para sublastro ferroviário, deve haver uma boa distribuição entre partículas grandes, médias e pequenas. A maioria do material é composto por agregados de tamanho intermediário, com menores quantidades de partículas finas e grossas. A quantidade de partículas finas, que passam por peneiras menores que 0,075 mm, deve ser mínima para garantir boa drenagem.

Os solos podem ser bem graduados ou mal graduados. Quando o solo é bem graduado, apresenta grãos em diversos diâmetros, o que pode indicar um melhor comportamento para o seu uso em engenharia. Quando é observada a presença de partículas menores, essas ocupam os vazios correspondentes aos grãos maiores, criando um preenchimento, ocasionando uma menor compressibilidade e, conseqüentemente, uma maior resistência. Para isso, foram analisados os valores de coeficiente de não uniformidade (CNU) e coeficiente de curvatura (Cc).

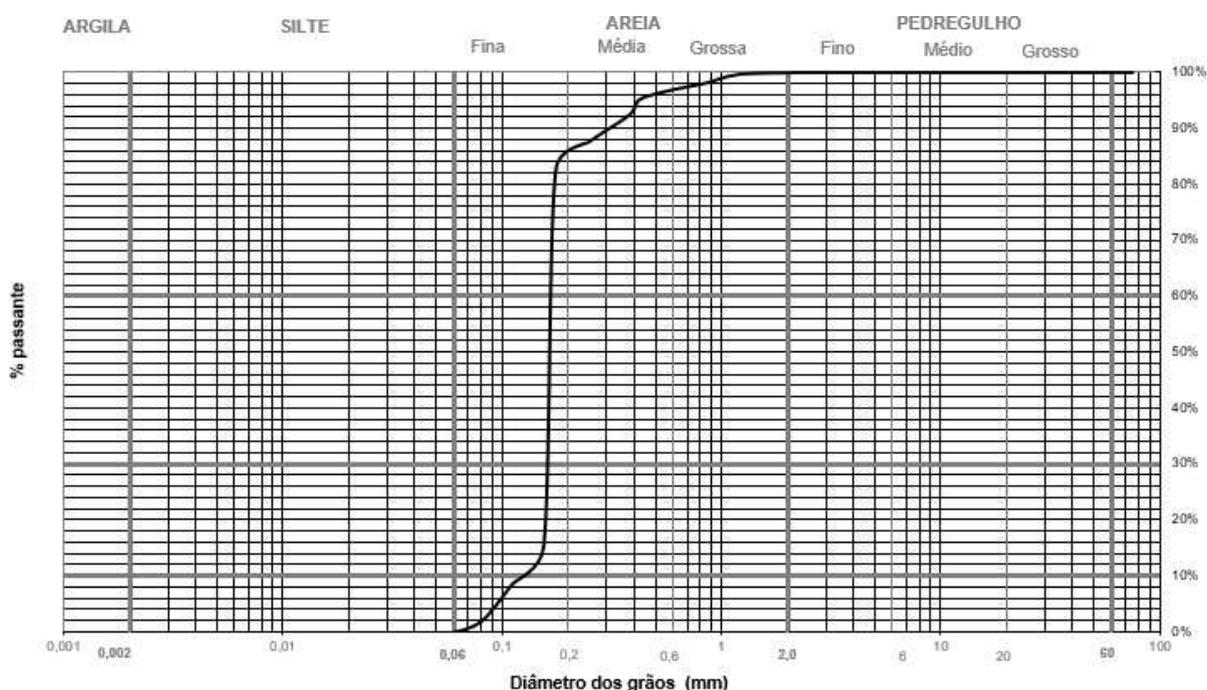
Segundo a curva granulométrica o solo classifica como uniforme quando C_u é menor que 5, e não uniforme quando o C_u é maior do que 15. Em relação a coeficiente de curvatura, para um solo bem graduado, o valor do coeficiente de curvatura, deverá estar entre 1 e 3. Acima de 3 é considerado solo mal graduado.

Considerando a relevância da alta granulometria fina para o sublastro, de acordo com Silva Filho *et al.* (2020), este deve satisfazer o filtro de Terzaghi, que considera que o sublastro deve ter uma granulometria que permita a infiltração da água de chuva, evitando que o contato do lastro com o sublastro acumule água e solo sendo assim suscetível ao bombeamento.

5.1.1.1 Amostra 01

Pelos valores calculados, foi possível concluir que a curva granulométrica do material para a amostra 01 apresentou um coeficiente de não uniformidade (CNU) 1 e de curvatura (Cc) 2,22. Indica um material bem graduado e muito uniforme. A figura 20 apresenta a curva granulométrica.

Figura 20 – Curva granulométrica do solo estudado – amostra 01



Fonte: Autor

O coeficiente de uniformidade dá um conceito da distribuição do tamanho das partículas do solo, valores próximos de um indicam curva granulométrica quase vertical, com os diâmetros variando em um intervalo pequeno, enquanto, para valores maiores a curva granulométrica irá se abatendo e aumentando o intervalo de variação dos diâmetros.

Em relação ao CNU, seu valor indica um solo que apresenta uma distribuição granulométrica que possibilita um bom uso nas obras de engenharia, pois apresenta grãos em diversos tamanhos. Pela análise da curva granulométrica do material, obtém-se apenas a porcentagem de areia, variando de areia fina, média e grossa.

Solos bem graduados, com uma ampla gama de tamanho de partículas, apresentam melhor comportamento em termos de resistência e compressibilidade que os solos com granulometria uniforme, todas as partículas com aproximadamente o mesmo tamanho.

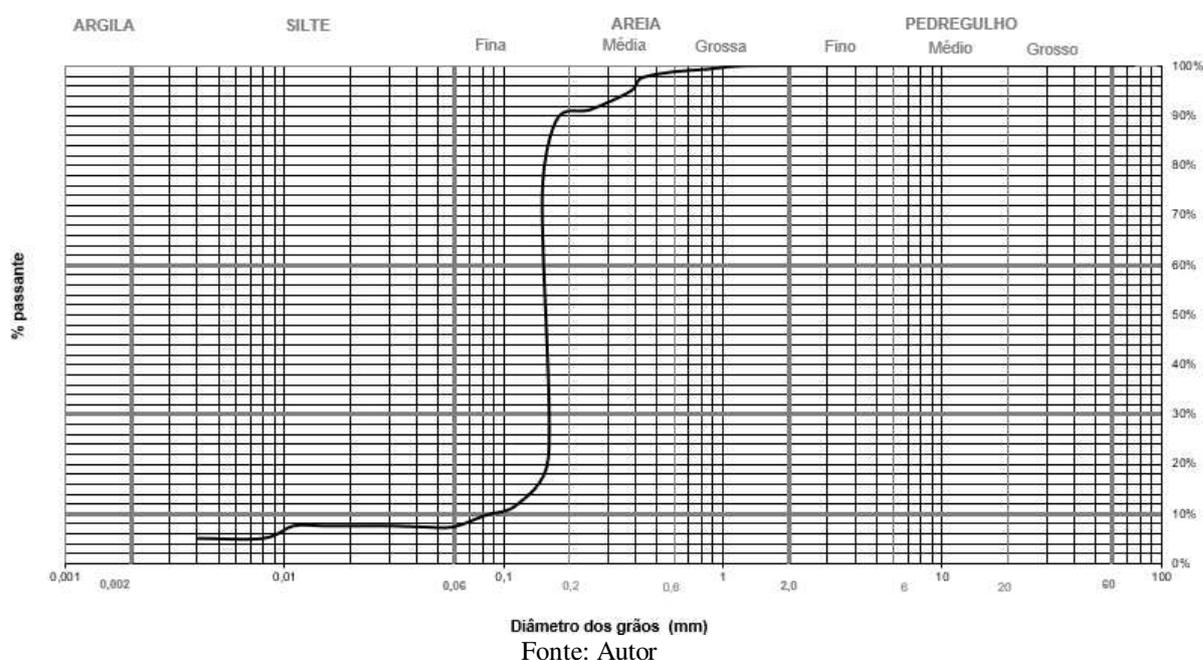
A curva apresenta alta declividade, aproximando-se da vertical. Com a uniformidade do material, não é recomendado para a utilização em camada de pavimento e sim, apenas para corpo de aterro. Por essas características e pela análise microestrutural, é possível afirmar que é um solo sem elementos cimentantes naturais, conferindo comportamento de solo granular.

O material é considerado uniformemente graduado, que pode ser bom para algumas aplicações, mas pode apresentar problemas de drenagem. Em contrapartida, um CNU alto indica ampla distribuição de tamanhos de partículas, o que geralmente contribui para uma melhor compactação e estabilidade do material.

5.1.1.2 Amostra 02

Pelos valores calculados, foi possível concluir que a curva granulométrica do material para a amostra 02 apresentou um coeficiente de não uniformidade (CNU) igual à 2 e de curvatura (CC) igual a 0,74, indicando um solo mal graduado e muito uniforme. Na figura 21 apresenta a curva granulométrica.

Figura 21 – Curva granulométrica do solo estudado – amostra 02



Em relação ao CNU, seu valor indica um solo que apresenta uma distribuição granulométrica com a curva tendenciando a descontinuidade. Pela análise da curva granulométrica do material, obtém-se a porcentagem de silte e com maior porcentagem de areia.

Os solos mal graduados, com granulometria pobre, partículas com dimensões muito semelhantes, pode ser utilizado em sub-bases granulares de pavimento de concreto na faixa (DNIT, 2005). Nos solos mal graduados faltam partículas com certas dimensões e suas curvas granulométricas apresentam trechos quase horizontais. Para o caso de solos mal graduados, a existência de uma granulometria uniforme resulta em uma quantidade de vazios maior. Nestes solos, a estabilidade é garantida pelos contatos interpartículas (grãos), geralmente são de difícil trabalhabilidade, apresentam baixa densidade e elevada permeabilidade.

Solos mal graduados, como areias finas, são difíceis de serem compactados para alcançar altas densidades e são menos desejáveis para suportar pavimentos. Solos contendo grande proporção de finos são inadequados como materiais de subleito.

Nos solos mal graduados não ocorre um melhor entrosamento entre as partículas do solo, ou seja, os espaços deixados pelas partículas maiores não são preenchidos pelas partículas menores.

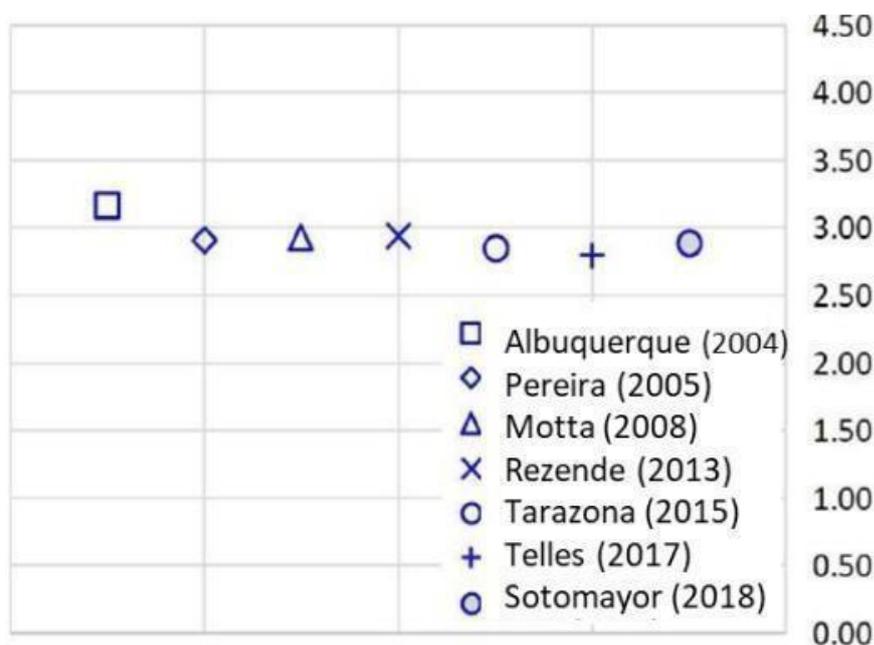
Por ser um solo mal graduado e muito uniforme, não é interessante para uso em pavimento. Um C_u baixo, pode influenciar negativamente a drenagem.

Para o C_c adequado indica boa distribuição dos tamanhos das partículas, o que contribui para a estabilidade e resistência do sublastro. Pelo valor encontrado é um C_c menor do que 1, caracterizando uma distribuição pobre de tamanho das partículas, possivelmente comprometendo a estabilidade e a compactação.

5.1.2 Massa específica dos grãos

Na Figura 22, apresentam-se alguns resultados da densidade relativa dos grãos de rejeitos mineração de ferro, existentes na literatura, pode-se observar coerência com o valor de 2,89 obtido por Sotomayor (2018), com os valores encontrados na literatura. Este valor foi adotado para os ensaios nesta pesquisa. O valor obtido através dos ensaios foi de 1,819 g/cm³ para a amostra 2.

Figura 22 – Densidade relativa dos grãos de rejeito (Gs)



Fonte: Sotomayor (2018).

5.1.3 Limites de Atterberg

Para ambas as amostras, buscou-se os valores para os limites de Atterberg, contudo não foi possível, por ser um solo arenoso. Logo, o índice de plasticidade (IP) é zero (0), solo não plástico (NP).

A amostra 01 é classificada como não plástico (NP), de acordo com a classificação TRB adotada pela AASHTO corresponde como um solo tipo A-3, pois IG é igual a zero (0).

Amostra 02 é classificada como não plástico (NP), de acordo com a classificação TRB adotada pela AASHTO corresponde como um solo tipo A-3, pois IG é igual a zero (0).

O Valor do Limite de Liquidez é o menor teor de umidade com que um solo pode ser capaz de fluir. Já o Limite de Plasticidade é o teor de umidade em que os solos, estando no estado plástico, caso perca umidade, passa para o estado semissólido. O Índice de Plasticidade é uma medida do grau de plasticidade dos finos e pode indicar, indiretamente, a quantidade e o tipo de finos plásticos. Os valores preconizados pelo ISF (212) para serem utilizados em camadas de pavimento são:

A percentagem do material que passa peneira nº 200 (0,074), não poderá superar 2/3 da percentagem que passa na peneira nº 40 (0,42 mm). A fração que na peneira nº40 deve

apresentar um limite de liquidez (LL) inferior ou igual a 25% e um índice de plasticidade (IP) inferior ou igual a 6%.

Em relação aos resultados de LL e IP, os valores ficaram abaixo do limite inferior do recomendado pela norma para a camada de pavimento.

Pinto (2006) apresentou valores, dos Índices de Atterberg, de alguns solos brasileiros, entre eles, uma areia argilosa, cujo valor do LL variou de 20 a 40, e o valor do IP variou de 5 a 15. O valor do LL do material em estudo, em comparação aos materiais analisados por Pinto (2006), não se enquadrou. O baixo valor de IP deve-se ao fato de o material ter uma porcentagem significativa na fração areia. Apesar do material de subleito ter a predominância da fração areia, o que poderia fazer com que o material não tivesse plasticidade (areia não tem coesão), foi encontrado um valor do IP.

Em relação aos resultados de LL e IP, pode-se concluir que, pelo fato de a fração areia ser predominante, o solo não tem plasticidade. Isso está de acordo com o material areia.

5.1.4 Índice de Grupo (IG)

O índice de grupo define a capacidade de suporte da camada de subleito, ou qualquer outra camada em estudo. A qualidade do solo para uso em pavimentação é inversamente proporcional ao valor do IG, isto é, quanto maior o valor do IG, pior será a capacidade de suporte de fundação do seu material para a camada do pavimento. O valor do IG igual a zero mostra que o solo tem uma excelente capacidade de suporte.

Sabendo-se que o valor de IG do material é igual a zero, devido o LL ser zero e um material não plástico (NP =0), foi possível concluir que o rejeito não tem plasticidade e não possui uma boa graduação de suas partículas, o que o preconiza para sua utilização na camada em reforço de subleito.

De acordo com a Instrução de Serviços Ferroviários Projeto de Superestrutura de Via Permanente – Lastro e Sublastro (ISF-212/2015) o valor preconizado para o IG, para material de sublastro, deve ser igual a zero.

5.1.5 Classificação TRB e SUCS

Analisando-se a curva granulométrica e os valores de LL e LP, a classificação TRB adotada pela AASHTO do material de sublastro é A-3. Pois o IG é igual a zero. Essa classificação

inclui materiais constituídos principalmente de areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado. De acordo com a classificação TRB, o material se caracteriza como de “excelente a bom” para ser utilizado em camadas de pavimento. De acordo com Brina (1979), o material de sublastro deve se enquadrar no faixa A-1 da classificação TRB.

Conforme a classificação do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), a amostra 01 é um material como SW e para a amostra 02, SP; S (areia), W(bem graduado) e P (mal graduado). Pode ser visto na Tabela 7.

A porcentagem que passa na peneira (#200) 0,075 mm é menor do que 50%, de acordo com curva granulométrica dos solos, sendo um material arenoso, pois não tem porcentagem de pedregulho na amostra do solo.

Tabela 7 – Correlações entre as classificações TRB e SUCS

Classificação TRB	Classificação Unificada		
	Mais provável	Possível	Possível, mas improvável
A-1-a	GW-GP	SW-SP	GM-SM
A-1-b	SW-SP-GM-SM	GP	-
A-3	SP	-	SW-GP
A-2-4	GM-SM	GC-SC	GW-GP-SW-SP
A-2-5	GM-SM	-	GW-GP-SW-SP
A-2-6	GC-SC	GM-SM	GW-GP-SW-SP
A-2-7	GM-GC-SM-SC	-	GW-GP-SW-SP
A-4	ML-OL	CL-SM-SC	GM-GC
A-5	OH-MH-ML-OL	-	SM-GM
A-6	Classificação Unificada	ML-OL-SC	GC-SM-GC-SC
A-7-5	OH-MH-ML-OL	ML-OL-CH	GM-SM-GC-SC
A-7-6	CH-CL	ML-OL-SC	OH-MH-GC-GM-SM

Fonte: DNIT (2006) – adaptado.

5.2 Caracterização Mecânica

5.2.1 Compactação, Expansão e CBR

Os resultados dos parâmetros do ensaio de compactação, expansão e CBR estão apresentados na Tabela 8 com os ensaios das amostras do minério de ferro e Tabela 9, com os ensaios da mistura rejeito mais polímero.

Tabela 8 – Resultados dos Parâmetros do ensaio de Compactação, Expansão e CBR

Camada	Amostra	Wót (%)	$\rho_{máx}$ (g/cm ³)	Expansão (%)	CBR (%)
Sublastro	1	15,3	1,836	0,04	14,1
Sublastro	2	15	1,819	0,03	4,9

Fonte: Autor.

Tabela 9 – Resultados dos Parâmetros do ensaio de Compactação, Expansão e CBR + adição de polímero

Camada	Amostra	Wót (%)	$\rho_{máx}$ (g/cm ³)	Expansão (%)	CBR (%)
Sublastro	1	15,3	1,874	0,02	26,2
Sublastro	2	15,7	1,86	0,02	11,67

Fonte: Autor.

Nas especificações da atualidade, ainda são utilizados os valores obtidos nos ensaios de CBR, visando o atendimento às especificações do DNIT. É um ensaio importante para avaliar o comportamento do solo. Considera-se que os resultados de expansão obtidos nos ensaios são relevantes no sentido de conhecer o caráter expansivo do material, pois se o pavimento contiver camadas de solo expansivo, poderá produzir acentuada expansão neste, ocasionando variações excessivas de volume, tendo como consequência patologias, tais como: desuniformidade de suporte, deformações do perfil longitudinal do pavimento.

Conforme explica Silva (2015), a expansão ocorre em função da mineralogia, da estrutura e da textura do solo, e, em geral, acredita-se que este comportamento esteja associado ao tipo e quantidade de finos presentes nos solos. Percebe-se que o rejeito é pouco expansivo, apresentando características de material arenoso.

De acordo com Pinto (2006), areias finas argilosas lateríticas, mesmo que a fração areia seja mal graduada, podem apresentar umidades ótimas de 12 a 14%, com massas específicas secas máximas de 1,9 g/cm³. O material em estudo apresentou uma umidade ótima de 15% e uma massa específica seca de 1,839 g/cm³. Isso mostra que o insumo se enquadra nos materiais de mesmas especificidades.

Os resultados dos ensaios, são variáveis de acordo com a textura (granulometria) do solo e da constituição mineral de suas partículas, tornando-se difícil a previsão do CBR. Solos finos em geral, incluindo solos arenosos, apresentam valores de CBR entre 8% e 20%.

Os resultados obtidos através dos ensaios, mostram um material com baixa capacidade de suporte e baixa expansão, caracterizando um rejeito não expansivo e baixa resistência. Para o rejeito da amostra 02, CBR com 4,9% e expansão 0,03%. Essa mesma característica é

observada na amostra 01, apresentando um solo de baixa resistência e baixa expansão, CBR igual a 14,1% e expansão 0,04%.

Com a adição de 2% de polímero na amostra 1, observa-se o aumento do valor do CBR, aumentando a resistência do material e a estabilização da expansão. Mantendo a característica de um material não expansivo.

Para a mistura com 2% de polímero para a amostra 2, observa-se uma estabilização da expansão, porém, um aumento considerado do valor do CBR, tendo um material uma característica de um material não expansivo e com resistência acima de 20%.

Considera-se que os resultados de expansão obtidos nos ensaios são relevantes no sentido de conhecer o caráter expansivo do material, pois se o pavimento contiver camadas de solo expansivo, poderá produzir acentuada expansão neste, ocasionando variações excessivas de volume.

Diante dos resultados encontrados, os valores são semelhantes aos obtidos por outros pesquisadores que estudaram o rejeito de minério de ferro. Campanha (2011) identificou por meio dos valores de ISC que o rejeito de minério de ferro puro pode ser utilizado apenas para camadas de sub-base. Yisa e Sani (2014) encontraram valores de ISC entre 20% e 60% para o rejeito de minério de ferro incorporado a um solo laterítico, podendo a mistura também ser utilizada apenas em camadas de sub-base para pavimentos com tráfego leve.

Os resultados apresentados levam à conclusão de que a adição de polímero ao rejeito arenoso torna o solo mais adequado para uso em sublastro ferroviário, analisando sob o ponto de vista da expansão do material e CBR.

5.3 Caracterização Mineralógica

5.3.1 Difração de Raio X

Por meio da análise de fase por difratometria de Raios-X, Tabela 10, Figura 23 e Figura 24, é possível constatar que o rejeito de minério de ferro estudado, é composto por: quartzo (SiO_2), hematita (Fe_2O_3) e granada (almadina) $\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$.

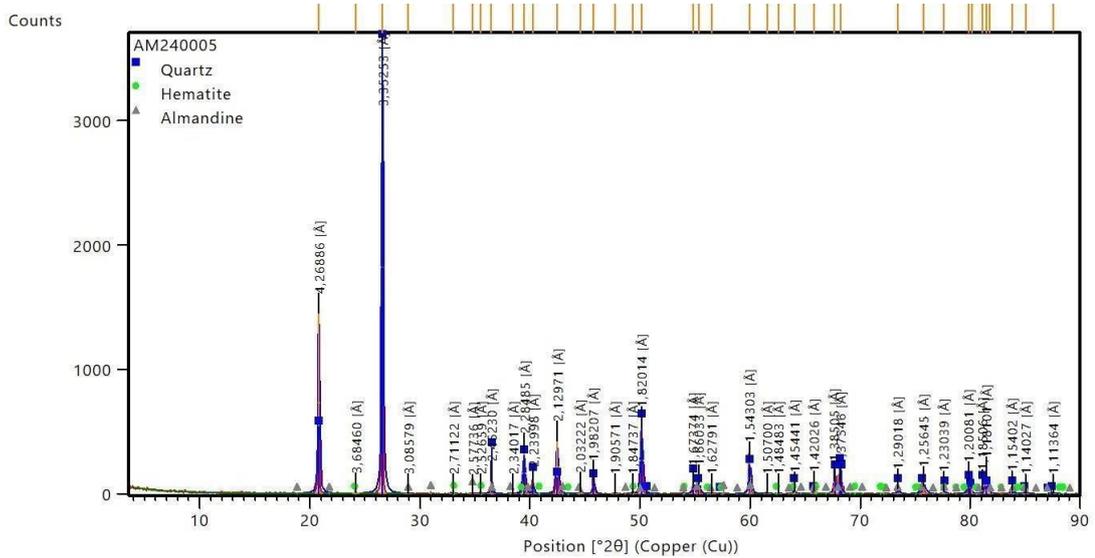
As análises mineralógicas servem para corroborar os resultados obtidos nos ensaios físicos e mecânicos dos solos.

Tabela 10 – Identificação das fases cristalinas por difração

Amostra	Fase Minerais Cristalinas Identificadas
1	quartzo, hematita, almandina
2	quartzo, hematita

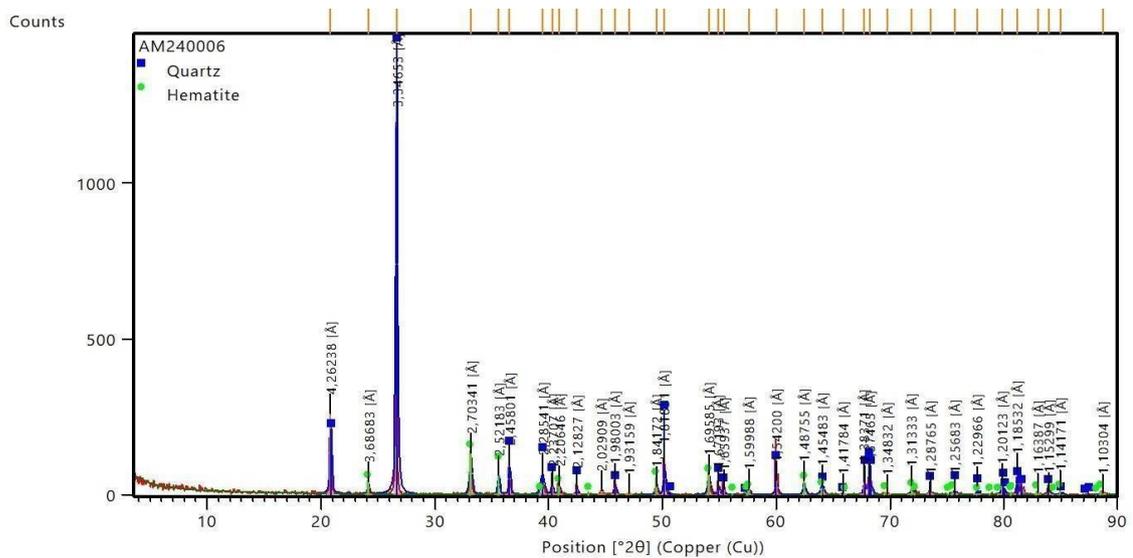
Fonte: Autor.

Figura 23 – Difração por raio X amostra 1



Fonte: Autor

Figura 24 – Difração por raio X amostra 2



Fonte: Autor.

Por meio da análise para a amostra 1 teve as seguintes porcentagens: quartzo (abundante) 96,5%, hematita (baixo) 2,5% e almandina (traço) 1,0 %. Para a amostra 2, quartzo

(abundante) 61,5% e hematita (baixo) 38,5%.

Pode-se observar que, no rejeito de minério de ferro, a sílica é o componente químico mais encontrado e o mineral característico mais abundante deste componente é o quartzo, produto das rochas que apreendem o minério de ferro. A porcentagem de óxido férrico é o segundo componente mais abundante, e o mineral característico é a hematita (Fe_2O_3), mostrando assim ser um rejeito de minério de ferro.

A elevada porcentagem das frações areia, predominantemente quartzosa, tem como características plasticidade nula ou muito baixa. Os solos arenosos são constituídos essencialmente por quartzo, material praticamente inerte, o que faz com que a interação entre as partículas se dê apenas por forças da gravidade.

A predominância de quartzo tem influência direta nos resultados de expansão e resistência do solo. É um mineral que apresenta boa resistência e baixa expansibilidade.

De acordo com os resultados apresentados, o material analisado na pesquisa pode ser utilizado como camada de sublastro de uma ferrovia, se enquadrando em todos os valores exigidos pelas normas. Por ser uma matriz arenosa, o material tem uma baixa deformabilidade e baixa expansão.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

De acordo com os estudos realizados, para uma amostra dentro da faixa granulométrica é um material bem graduado e muito uniforme, que atende para a utilização em corpo de aterro. Para a segunda amostra, é um material mal graduado e muito uniforme, que não é interessante para a camada de pavimento.

Em relação aos limites de Atterberg, o rejeito apresentou comportamento não plástico, visto que não foi possível determinar nenhum dos dois limites (liquidez e plasticidade). Esse comportamento do rejeito também foi observado em outros trabalhos com material similar, como em Galhardo (2015), Bastos *et al.* (2016) e Rodrigues (2018). Por se caracterizar dentro de uma matriz arenosa (granular), esses materiais dificilmente apresentam limites de consistência. Fato que pode ser comprovado no ensaio de difração, pela alta porcentagem de quartzo. A elevada porcentagem das frações areia, predominantemente quartzosa, tem como características plasticidade nula ou muito baixa.

O valor baixo de expansão se deu pela característica do solo e sua granulometria, com predominância na fração arenosa. Por apresentar baixa expansibilidade e $CBR < 20\%$, habilita a utilização do rejeito apenas como material de reforço de subleito.

Com a adição de 2% de polímero, pode ser observar que houve aumento da umidade ótima, massa específica, CBR, e redução da expansão. Com a adição do polímero nas duas amostras, teve redução da expansão e aumento do peso específico. Percebe-se que a inserção de polímero, reduz a permeabilidade no rejeito, havendo redução dos vazios existentes, não houve expansão, conseqüentemente o aumento da resistência. Isso pode ser comprovado que após a mistura rejeito mais polímero o CBR foi para 26,2%, atendendo a norma ISF 212.

A partir da caracterização mecânica do rejeito, os resultados demonstram que o rejeito apresenta potencial para ser utilizado como material de subleito e, se compactado com a mistura de 2% de polímero, pode ser utilizado na execução de sublastro. Por este estudo há viabilidade técnica para a utilização em pavimento ferroviário.

Para a redução de grandes volumes de rejeitos produzidos, a empresa mineradora tem como alternativa a utilização da mistura rejeito e polímero, como sublastro ferroviário, por conseguinte, haverá redução do impacto ambiental.

Considera-se que o estudo realizado é de alta relevância e próspero na área de pavimentação, devido à alta geração de rejeitos pelas atividades de mineração, na finalidade de um aproveitamento total destes rejeitos, com aplicabilidade técnica da amostra rejeito-polímero em obras geotécnicas, a fim de conceder um fim mais nobre a este material, do ponto de vista técnico, ambiental e econômico.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Alguns aspectos relevantes não foram contemplados na pesquisa, por isso, seria interessante a realização de estudos complementares, para uma melhor verificação dos materiais a serem utilizados como pavimento ferroviário. Dentre eles, são destacadas as seguintes sugestões.

- ✓ Realizar os ensaios de módulo de resiliência para o rejeito;
- ✓ Realizar os ensaios de caracterização química, com o ensaio de MEV das amostras;
- ✓ Avaliação de novas dosagens de polímeros;
- ✓ Estudar o incremento de resistência da mistura solo-rejeito por meio de dosagens com estabilizantes químicos: cal ou cimento;
- ✓ Proceder a um estudo sobre a viabilidade econômica do emprego do rejeito arenoso em misturas com os solos desta pesquisa, em comparação aos materiais tradicionais comumente empregados em pavimentação;
- ✓ Avaliar os compósitos rejeito-polímero em ensaios de grande escala ou pela construção de pistas experimentais.

REFERÊNCIAS

ABRÃO, P. C. Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil. In: I Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'87, ABMS/ABGE/CBGB/CE, Rio de Janeiro, RJ, 1987. p. 1-10.

ALMEIDA, G. B. O.; CASAGRANDE, M. D. T.; CALVANCANTE, E. H. Avaliação da resistência à compressão simples de misturas de solo e escória de cobre aditivadas com cimento portland aplicadas à pavimentação. In: 18º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2016. 7 p.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO

APAZA, F. R. A. Estudo de mistura asfáltica contendo resíduo do beneficiamento do minério de ferro. 2015. 212 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2015.

APAZA, F. R. A. et al. Estudo sobre a utilização de resíduo de minério de ferro em microrrevestimento asfáltico. Rev. TRANSPORTES, [s. l.], v. 26, n. 6, p. 118-138, 2018.

ARAÚJO, A. C.; GALERY, R.; VALADÃO, G. E. S.; VIANA, P. R. M. Fragmentação. In: ARAÚJO, A. C.; VALADÃO, G. E. S. Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: UFMG, 2007. cap. 5, p. 85-103.

ARÊDES, M. L. A. Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas utilizando resíduo do beneficiamento do minério de ferro. 2016. 148 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.

AREMA - American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. Manual for Railway Engineering., [s. l.], v. 1, n. 4, 2020.

BAGHINI, M. S.; ISMAIL A.; NASERALAVI S. S.; FIROOZI A. A. Performance evaluation of road base stabilized with styrene-butadiene copolymer latex and portland cement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, [s. l.], v. 9, 2016, p. 321-336.

BARBOSA, S. F.; OLIVEIRA, C. A. S.; SONCIM, S. P.; ALMEIDA, M. O.; ANDRADE, A. S.; COUTO, F. A. O uso do rejeito de flotação na formulação de concretos para sarjetas e meio-fios. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 60., 2018, Foz do Iguaçu. Anais [...]. Foz do Iguaçu: CBC, 2018.

BARBOSA, V. H. R. et al. Aproveitamento do resíduo da mineração para uso em pavimentação. 2016. 13 p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia - IME. Rio de Janeiro, 2016.

BASTOS, L. A. C.; SILVA, G. C.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. Using iron ore tailings from tailing dams as road material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, [s. l.], v. 28, n. 10, p. 04016102-1 – 04016102-9, 2016.

BRASIL. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5564/2014 – Via Férrea – Lastro Ferroviário – Requisitos e Métodos de Ensaio, 2014.

BRASIL. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, Versão Corrigida: 1988, 13 p.

BRASIL. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182: Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, Brasil, 2016, 9 p.

BRASIL. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solo – Índice Suporte Califórnia. NBR 9895. São Paulo, SP, 1987, 14 p.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Determinação do Módulo de Resiliência. DNER - ME 134/2018.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Solos – Determinação do Módulo de Resiliência. DNER - ME 131/94.

BRASIL. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de pavimentação. 3.ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

BRASIL. INSTRUÇÃO DE SERVIÇO FERROVIÁRIO – ISF-207: Estudos Geotécnicos. DNIT, 2015.

BRASIL. INSTRUÇÃO DE SERVIÇO FERROVIÁRIO – ISF-212: Projeto de Superestrutura da Via Permanente – Lastro e Sublastro. DNIT, 2015.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Portaria nº 237, de 18 de outubro de 2001. NRM - Normas Reguladoras de Mineração: Beneficiamento. Brasília, 2001.

BROWN, S. F.; SELIG, E. T. The design of pavement and rail track foundations. In: O'REILLY, M. P.; BROWN, S. F. (Ed.). Cyclic loading of soils: from theory to design. London: Blackie, 1991. Cap. 6.

CALIXTO, F.; DIAS, T. G. Recursos Minerais De Minas Gerais – Ferro. Belo Horizonte: Companhia De Desenvolvimento De Minas Gerais – CODEMGE, 2018.

CAMAPUM, J. DE C.; et al. Solos não saturados no contexto geotécnico. [s.l.: s.n.], 2015. 805 p.

CAMPANHA, A. Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, MG, 2011.

CARNEIRO, A. de A. Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com polímero e do compósito rejeito-polímero reforçado com fibras de polipropileno. 2020. 146 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

CAXITO, F.; DIAS, T. G. Recursos Minerais de Minas Gerais – Ferro. [Minas Gerais]: UFMG: CPMTM, (2018). Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/wpcontent/uploads/2018/10/Ferro.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2022.

CEDEX - Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. CEDEX Track Box (CTB). Espanha. Disponível em: http://www.cedex.es/CEDEX/lang_castellano/. Acesso em: 17 abr. 2024.

COELHO, E. F. Estudo do comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro reforçados com fibras de polipropileno. 2008. 100 fls. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, MG, 2008.

CONSOLI, et al (2022). "Comportamento de rejeitos de minério de ferro compactados e filtrados - blends de cimento Portland: nova tendência brasileira para disposição de rejeitos por empilhamento" *Applied Sciences* 12, no. 2: 836. <https://doi.org/10.3390/app12020836>.

COSTA, R. Proposição de dispositivo de medidas "in situ" para avaliação do comportamento mecânico de lastro ferroviário: Estudo de caso na Estrada de Ferro Carajás. 2016. 176 fls. Dissertação (Mestrado) – Escola politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de engenharia de transportes, São Paulo, 2016.

COSTA, R.; MOURA, E.; BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, R. S.; TEIXEIRA, A.; SGAVIOLI, F.; OLIVEIRA, L. Dispositivo de medição de deslocamentos em via permanente para determinação do módulo de via. *Rev. TRANSPORTES*, [s. l.], v. 24, n. 4, 2016.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. *Elements of X-ray diffraction*. England: Pearson, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM – DNER-ME 080/64. Solos – Análise Granulométrica por peneiramento

ESVELD, C. *Modern railway track*. Holanda: MRT Productions, 2001.

FERNANDES, G. Comportamento de estruturas de pavimentos ferroviários com utilização de solos finos e/ou resíduos de mineração de ferro associados a geossintéticos. 2005. 253 fls. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

FERNANDES, G.; RIBEIRO, L. F. M.; GOMES, R. C.; PALMEIRA, E. M.; PEREIRA, R. A. Estudo de resíduos de minério de ferro para utilização em pavimentos. In: ICTR 2004 - Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, 2004, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: ICTR, 2004.

FORTUNATO, E. M. C. Renovação de plataformas ferroviárias: estudos relativos à capacidade de carga. 2005. 577 fls. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2005.

GALHARDO, D. C. Estudo sobre a viabilidade técnica da utilização de rejeitos de mineração de ferro em camadas de pavimentos rodoviários. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Departamento de Ciência e Tecnologia, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.

GARCIA, N. F.; VALDES, J. R.; CORTES, D. D. Strength characteristics of polymer-bonded sands. *Géotechnique Letters*, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 212–216, 2015.

GOMES, M. A. Caracterização Tecnológica para Rejeitos de Mineração de Ferro. 2009. 89 fls. Dissertação de Mestrado, Engenharia Mineral, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 2009.

GRASSE, B. P.; SONCIM, S. P.; ALMEIDA, M. O.; OLIVEIRA, C. A. S.; BELOTTI, F. M.; CAVALCANTE, E. H.; RESENDE, L. Avaliação do comportamento geotécnico de um solo laterítico estabilizado com cal e rejeito de flotação de minério de ferro. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 33., 2019, Balneário Camboriú. Anais [...]. Balneário Camboriú: ANPET, 2019.

GUERRA, A. N. L. F. Caracterização e Utilização de Rejeito de Minério de Ferro PELLET FEED em Pavimentos de Blocos Intertravados de Concreto. 2014. 214 fls. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

IBRAM. Mineração está presente na história do Brasil. Portal da mineração, IBRAM, Belo Horizonte, [s. d.]. Disponível em: <https://portaldaminerao.com.br/sobre-a-mineracao/historia/>. Acesso em: 19 abr. 2024.

INDRARATNA, B.; SALIM, W.; RUJIKIATKMJORN, C. Advanced rail geotechnology-ballasted. London: Taylor & Francis Group, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. Economia mineral brasileira fevereiro/2020. Belo Horizonte, 2020a. 19 p. Disponível em: <https://www.ibram.org.br>. Acesso em: 18 abr. 2022.

KHATAMI, H. R.; O'KELLY, B. C. Improving mechanical properties of sand using biopolymers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, [s. l.], v. 139, n. 8, 2013.

LARA, L. L. D.; QUEIROZ, B. G.; SONCIM, S. P.; ALMEIDA, M. O.; OLIVEIRA, C. A. S.; BELOTTI, F. M.; CAVALCANTE, E. H.; RESENDE, L. Estudo do comportamento de um solo com adição de rejeito de flotação de minério de ferro para utilização em camadas de pavimentos. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 32., 2018, Gramado. Anais [...]. Gramado: ANPET, 2018. v. 1, p. 1966–1977.

LEEVES, G. G. Standards for track components. In: CONFERENCE COST-EFFECTIVE MAINTENANCE OF RAILWAY TRACK, 1992, London. Proceedings [...]. London: Institution of Civil Engineering, Thomas Telford, 1992. p. 27-36.

LI, B. D.; SELIG, E. T. Resilient modulus for fine-grained subgrade soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, [s. l.], v. 120, n. 6, p. 939–957, 1994.

LI, D. Railway track granular layer thickness design based on subgrade performance under repeated loading. 1994. 321 fls. Tese (Doutorado) - University of Massachusetts Amherst, 1994.

LI, D.; HYSLIP, J.; SUSSMANN, T.; CHRISMER, S. Railway geotechnics. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.

LI, D.; SELIG, E. T. Evaluation of railway subgrade problems. Transportation Research Record, [s. l.], n. 1489, p. 17–25, 1995.

LI, D.; SELIG, E. T. Method for railroad track foundation design I: Development. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, [s. l.], v. 124, n. 4, p. 316-322, 1998.

LU, N.; LIKOS, W. Unsaturated soil mechanics. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2004.

MEDINA, J. Fundamentos de mecânica dos pavimentos. 1988. Tese (Concurso para Professor Titular) - Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1988.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Beneficiamento do minério de ferro. Disponível em: www.pormin.gov.br/biblioteca/.../beneficiamento_de_minerio.pdf. Acesso em: 10 abr. 2024.

MOURÃO, J. M. Estudo prospectivo do setor siderúrgico: caderno de informações de base. Brasília: Associação de Metalurgia e Materiais, CGEE, 2008.

NETTO, Q. M. P.; GUIMARÃES, A. C. R. Caracterização laboratorial de resíduos de mineração como agregado alternativo para misturas asfálticas. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 88-98, jun./jul. 2018.

NR (Network Rail) Geotechnical Asset Standards. Catalogue of Network Rail Standards, n. 129. London: Network Rail, Waterloo General Office, 2023.

OLIVEIRA, R. W. H. Caracterização da escória de ferro silício-manganês para aplicação como agregado em pavimentação ferroviária. 2013. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

PAIVA, C. E. E. L. Super e infraestrutura de ferrovias – critérios para projetos. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

PAIVA, C.; FERREIRA, M.; FERREIRA, A. Ballast drainage in Brazilian railway infrastructures. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 92, p. 58-63, 2015.

PINTO, A. R. A. G. Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo. 2008. 103fls. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Rio de Janeiro, 2008.

PORTUGAL. Instituto Português da Qualidade. EN 13450: agregados para balastro de via férrea. Instituto Português da Qualidade, 2010.

RODRIGUES, K. H. P. Estudo de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração. 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas – Núcleo de Geotecnia, Ouro Preto, Minas Gerais, 2018.

RUSHTON, K. R.; GHATAORA, G. Design for efficient drainage of railway track foundations. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers. Transport*, [s. l.], v. 167, n. 1, p. 3, 2014.

SECRETARIA DE COMÉRCIO EXTERIOR - SECEX. Base de dados do Comex Stat, 2020. SECEX, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>. Acesso em: 18 abr. 2022.

SELIG, E. T.; WATERS, J. M. Track geotechnology and substructure management. Londres: Thomas Telford Services, 1995.

SILVA, L. F. M. Fundamentos teóricos-experimentais da mecânica dos pavimentos ferroviários e esboço de um sistema de gerência aplicado à manutenção de via permanente. 2002. 240 fls. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2020.

SILVA, N. A. B. de S. e. Desempenho de um compósito solo-polímero para aplicabilidade em obras geotécnicas e de pavimentação. 2020. 111 fls. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)—Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

Site: Vale 2023
<https://globalvale.sharepoint.com/teams/inthead/Documentos%20Compartilhados/Forms/AllItems.aspx?id=%2Fteams%2Fint%2Dhead%2FDocumentos%20Compartilhados%2FBrazil%2FBalanco%2DVale%2DMais%5FEdicoes%2Dfinais%2FBalan%C3%A7o%20Vale%2B%20Par%C3%A1%5Fa5%5F2023%5FFINAL%20LEVE%5F4%2Epdf&parent=%2Fteams%2Fint%2Dhead%2FDocumentos%20Compartilhados%2FBrazil%2FBalanco%2DVale%2DMais%5FEdicoes%2Dfinais>

Site: www.antf.org.br

SOTOMAYOR, J. M. G. Avaliação do comportamento mecânico drenado e não drenado de rejeitos de minérios de ferro e de ouro reforçados com fibras de polipropileno. 2018. 184 fls. Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2018.

SPADA, J. L. G. Uma abordagem de mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento do mecanismo de comportamento tensão-deformação da via férrea. 2003. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2003.

SPADA, J. L. G. Uma abordagem de mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento do mecanismo de comportamento tensão-deformação da via férrea. 2003. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2003.

UIC publishes. IRS 70719-1: Track and Structure – Recommendations for the use of Under Ballast Mats (UBM). Union Internationale des Chemins de fer (UIC), Paris, France, 2022.

VALADARES, R. G. Comportamento mecânico de areia-asfalto contendo resíduo do beneficiamento do minério de ferro. 2016. Tese (Doutorado) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.

VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509 p.

WINJEWICKREME, D.; SANIS, M. V.; GREENAWAY, R. G. Cyclic shear response of fine-grained mine tailings. Canadian Geotechnical Journal, [s. l.], v. 42, p. 1408-1421, 2005.

YISA, G. L.; SANI, J. E. Reliability estimate of strength characteristic of iron ore tailing stabilized lateritic soil for road pavement sub-base materials. EJGE - Electronic Journal of Geotechnical Engineering, [s. l.], v. 19, 2014.

ZANDIEH, A. R.; YASROBI, S. S. Study of factors affecting the compressive strength of sandy soil stabilized with polymer. Geotechnical and Geological Engineering, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 139-145, 2010.