

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes**

Débora Dávila Cruz Santos

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM  
PAVIMENTO DE ACESSOS DE MINA**

Belo Horizonte

2024

Débora Dávila Cruz Santos

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM  
PAVIMENTO DE ACESSOS DE MINA**

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 Mestra em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Transportes

Orientador: Prof. Dr. Ronderson Queiroz Hilário

Belo Horizonte

2024

S237e

Santos, Débora Dávila Cruz.

Estudo da utilização de rejeito de minério de ferro em pavimento de acessos de mina [recurso eletrônico] / Débora Dávila Cruz Santos. - 2024.

1 recurso online (88 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Ronderson Queiroz Hilário.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 85-88.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Transportes - Teses. 2. Resíduos de mineração - Teses. 3. Pavimentos flexíveis - Teses. 4. Minérios de ferro - Reaproveitamento - Teses. I. Hilário, Ronderson Queiroz. II.. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 656(043)



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

### FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM PAVIMENTO DE ACESSOS DE MINA

DÉBORA DÁVILA CRUZ SANTOS

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 21 de março 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, 21 de março de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Thiago Bomjardim Porto, Usuário Externo**, em 21/03/2024, às 14:52, 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 **Ronderson Queiroz Hilario, Chefe de departamento**, em 22/03/2024, às 09:03, 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 25/03/2024, às 10:02, 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](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3119808** e o código CRC **7B5BA9B3**.

*À minha avó, Juscelina (in memoriam),  
por ser exemplo de força e fé, dedico este trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus que, em todo momento, está presente em minha vida, me dando força, paciência, saúde e sabedoria. Graças ao seu abençoado amor, me manteve firme neste longo caminho na busca de atingir minha conquista.

Agradeço aos meus pais, Aloísio e Cláudia, pelo apoio, pelos ensinamentos e por me incentivarem a buscar o meu melhor. Ao meu irmão, Patrick, pelos momentos de convivência proporcionados. Eu amo vocês e seremos sempre uma boa família, mesmo que distante.

Agradeço, em especial, à minha avó, Juscelina, que não está mais entre nós. Obrigada, Vó, por todos os ensinamentos e por ter sido a pessoa que a senhora foi. Meu maior exemplo de vida, de força e, principalmente, de fé. Felizmente, eu tive o prazer de conviver com a senhora por tanto tempo, sou muito grata. E, infelizmente, a senhora não está aqui para vibrar com esta conquista comigo, mas sei que participou de grande parte desta trajetória e estará feliz junto comigo.

À Larissa agradeço pela paciência e pelo melhor companheirismo, que escutou as minhas lamentações, que presenciou meus momentos de crise e complicações e que estava sempre ao meu lado, me acolhendo e acalmando. Obrigada por todo suporte e por existir na minha vida. Eu te amo muito!

Agradeço imensamente ao professor e orientador Ronderson, por toda paciência, compreensão, incentivo e toda a orientação durante esses anos, sempre esteve disposto a sanar minhas dúvidas. Agradeço também aos professores do mestrado da UFMG, pelos ensinamentos e conhecimentos compartilhados durante o curso. Vocês são responsáveis pela excelência do ensino público, e também são grandes exemplos de profissionais.

À Marina Donato, uma grande amiga e professora, por todo o incentivo, e momentos compartilhados de sufoco, desabafo, mas também de superação e boas conquistas. Sem você, Marina, este momento não seria concretizado.

Meus agradecimentos aos meus colegas de trabalho e à mineradora. A parceria de vocês foi especial para a realização desta pesquisa. Obrigada pelo incentivo e todo o apoio que me proporcionou tornar este momento vivenciado.

À Universidade Federal de Minas Gerais, por ter me proporcionado conhecer pessoas e profissionais incríveis, e também pela qualidade no ensino público.

E, agora, para finalizar, meus agradecimentos aos que não estão citados aqui, mas que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho fosse realizado, seja direta ou

indiretamente, seja na vida pessoal ou profissional, gratidão a todos que participaram desta jornada.

“A persistência é o caminho do êxito.”

*Charles Chaplin, Vida e pensamento, 1997*

## RESUMO

O aumento da demanda mundial por minério de ferro, especialmente ocasionada pela expansão do mercado da China, a diminuição dos teores de ferro dos produtos extraídos das minas e, ainda, as alterações nas legislações brasileiras quanto ao uso de estruturas para a disposição de rejeito, sendo esta última influenciada pelos acidentes que ocorreram em Minas Gerais nos últimos anos com os rompimentos de barragens de rejeito de mineração de minério de ferro, são os fatores que propulsionaram a elevação de estudos direcionados à utilização dos rejeitos da indústria mineradora, assim como dos métodos de disposição desses resíduos para atender às normativas atuais. Assim, as empresas mineradoras necessitaram identificar utilidades para esse resíduo e, de preferência, com mais valia, o que proporciona a aplicação desse material, agora mais seco devido aos processos de filtragens, dentro da própria mineração. Desse modo, somando-se ao valor de que a maioria das estradas de mina em complexos de minério de ferro são originadas sem nenhum critério de dimensionamento, ao serem comparadas com as rodovias de tráfego comum, e que no transporte de minério grande parte dos custos de operação incluem a manutenção de acessos e os de operação dos caminhões fora-de-estrada intimamente relacionada à depreciação dos equipamentos que trafegam nas estradas, foi observada uma oportunidade de aplicação dos rejeitos de minério de ferro em camadas de estruturas de pavimentos de vias. Esta pesquisa analisa o comportamento geotécnico e estrutural do rejeito de minério de ferro aplicado como material de infraestrutura de estradas de mina, assim como verifica a viabilidade técnica da aplicação de camadas de pavimento nas estradas de mina, caracteriza o rejeito e estuda as condições da composição ideal do pavimento. O produto utilizado para este estudo, conhecido como rejeito de minério de ferro, foi fornecido por uma mineradora multinacional do Quadrilátero Ferrífero. Foram realizados ensaios de caracterização, compactação, CBR e expansão, conforme preconizados pelas normas brasileiras, a fim de identificar a utilização como camadas de uma via de acordo com o manual do DNIT (2006). Dentre eles, realizaram-se ensaios além dos recomendados no manual, como a compactação do Proctor Intermediário e do Proctor Modificado. Depois das análises, as camadas do pavimento flexível, o subleito e o reforço do subleito foram constatadas como compatíveis para o rejeito, enquanto a sub-base e a base não atestaram positivas à submissão, até mesmo quando aumentada a energia de compactação do material.

**Palavras-chave:** rejeitos de minério de ferro; pavimento flexível; infraestrutura de acessos de mina.

## ABSTRACT

Due to the increase in global demand for iron ore especially caused by the expansion of the Chinese market, a decrease in the iron content of products extracted from mines and also changes in Brazilian legislation regarding the use of structures for the disposal of waste, which is the latter influenced by accidents that occurred in Minas Gerais in recent years with the collapse of iron ore mining tailings dams. These factors are the drivers for increasing studies aimed at the use of waste from the mining industry as well as methods for disposing of this waste to meet current regulations. Therefore, mining companies needed to identify uses for this waste preferably with greater value which led to the application of this material, now drier due to filtration processes within the mining itself. Thus, adding to the fact that most mine roads in iron ore complexes are created without any sizing criteria when compared with common traffic highways and that in ore transport a large part of the operating costs include the maintenance of accesses and the operation of off-road trucks closely related to the depreciation of equipment that travels on the roads, it is an opportunity to apply iron ore waste in layers of road pavement structures was observed. This research aims to analyze the geotechnical and structural behavior of iron ore waste applied as infrastructure material for mine roads as well as verify the technical feasibility of applying layers of pavement on mine roads characterize the waste and study the conditions of the ideal pavement composition. The product used for this research known as iron ore tailings was supplied by a multinational mining company in the Iron Quadrangle. Characterization, compaction, CBR and expansion tests were carried out as recommended by Brazilian standards in order to identify the use as layers of a road in accordance with the DNIT Manual (2006). Among them, tests were carried out in addition to those recommended in the manual, such as compaction of the intermediate proctor and the modified proctor. After the analyses among the flexible pavement layers the subgrade and subgrade reinforcement could be identified as compatible for the waste, while the subbase and base did not attest to positive submission, even increasing the compaction energy of the waste material.

**Keywords:** iron ore tailings; flexible flooring; mine access infrastructure.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de pavimento .....	22
Figura 2 – Estrada de mina .....	25
Figura 3 – Distância de visibilidade em acessos de mina.....	28
Figura 4 – Diagrama típico do tratamento de minério.....	31
Figura 5 – Barragem de alteamento a montante .....	34
Figura 6 – Barragem de alteamento a jusante.....	35
Figura 7 – Barragem de alteamento por linha de centro.....	35
Figura 8 – Granulometria dos materiais .....	39
Figura 9 – Valor de CBR em função do peso do caminhão .....	40
Figura 10 – Fatores de equivalência de operação.....	43
Figura 11 – Ábaco de dimensionamento de pavimentos flexíveis – DNER .....	45
Figura 12 – Representação esquemática do dimensionamento pelo método do DNER .....	46
Figura 13 – Fluxograma das etapas do programa PRO-MEDINA.....	48
Figura 14 – Tela principal <i>software</i> MEDINA.....	49
Figura 15 – Fluxograma de trabalho de pesquisa .....	51
Figura 16 – Mapa do Quadrilátero Ferrífero .....	52
Figura 17 – Pilha de rejeito filtrado.....	53
Figura 18 – Execução de ensaio de caracterização do solo.....	54
Figura 19 – Execução de ensaio de compactação de solos.....	54
Figura 20 – Representação esquemática das dimensões e peso do soquete AASHTO.....	57
Figura 21 – Granulometria para base granular .....	59
Figura 22 – Curvas de compactação de um solo com diferentes energias .....	60
Figura 23 – Curva granulométrica da Amostra 1-A.....	62
Figura 24 – Curva granulométrica da Amostra 1-B .....	62
Figura 25 – Curva granulométrica da Amostra 2-A.....	63
Figura 26 – Curva granulométrica da Amostra 2-B .....	63
Figura 27 – Curva granulométrica da Amostra 3-A.....	64
Figura 28 – Curva granulométrica da Amostra 3-B .....	64
Figura 29 – Dimensões das partículas .....	65
Figura 30 – Classificação dos solos (TRB) .....	69
Figura 31 – Sistema unificado de classificação de solos.....	71

Figura 32 – Gráfico de plasticidade.....	72
Figura 33 – Método auxiliar de identificação de plasticidade em laboratório .....	73
Figura 34 – Inter-relações entre a classificação TRB e a unificada .....	77
Figura 35 – Inter-relações entre a classificação unificada e TRB .....	78
Figura 36 – Valores prováveis de CBR para os grupos de SUCS.....	79
Figura 37 – Valores prováveis de CBR para os grupos da classificação TRB.....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Altura média de chuva x fator climático regional .....	43
Tabela 2 – Coeficiente de equivalência estrutural dos materiais da engenharia rodoviária.....	44
Tabela 3 – Espessura mínima de revestimentos asfálticos .....	44
Tabela 4 – Porcentagem passante por peneira.....	61
Tabela 5 – Frações do material de acordo com a granulometria.....	65
Tabela 6 – Densidade real dos grãos .....	66
Tabela 7 – Índice de grupo .....	66
Tabela 8 – Limites de Atterberg.....	67
Tabela 9 – Resultados dos parâmetros do ensaio de compactação normal, expansão e CBR .....	74
Tabela 10 – Resultados dos parâmetros do ensaio de compactação intermediária, expansão e CBR.....	75
Tabela 11 – Resultados dos parâmetros do ensaio de compactação modificada, expansão e CBR.....	75
Tabela 12 – Compilado dos resultados da pesquisa .....	80

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
ASTM	<i>American Society for Testing an Materials</i>
B	espessura da base
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
C <sub>c</sub>	índice de compressão
C <sub>c</sub>	coeficiente de curvatura
CNU	coeficiente de não uniformidade
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
DER/SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
D <sub>10</sub>	diâmetro correspondente ao valor de 10% das partículas passando na peneira x, tomado na curva granulométrica
D <sub>30</sub>	diâmetro correspondente a 30% das partículas passando na peneira x, tomado na curva granulométrica
D <sub>60</sub>	diâmetro correspondente a 60% das partículas passando na peneira x, tomado na curva granulométrica
EQOP	equivalência de operações
FE	fator de eixo
FEC	fator de equivalência de carga
FEO	fator de equivalência de operação
FR	fator climático regional
GVW	<i>Gross Vehicle Weight</i>
H <sub>m</sub>	hematita
H <sub>m</sub>	espessura equivalente total do pavimento
H <sub>n</sub>	espessura acima do reforço do subleito
h <sub>n</sub>	espessura do reforço do subleito

$H_t$	espessura total do pavimento ou da cobertura
$H_{20}$	espessura acima da sub-base
$h_{20}$	espessura da sub-base
IG	índice de grupo
IP	índice de plasticidade
ISC	Índice Suporte Califórnia
K	coeficiente de equivalência estrutural
$K_B$	coeficiente de equivalência estrutural da base
kN	quilonewton
$K_R$	coeficiente de equivalência estrutural do revestimento
$K_{ref}$	coeficiente de equivalência estrutural do reforço do subleito
$K_S$	coeficiente de equivalência estrutural da sub-base
LL	limite de liquidez
LP	limite de plasticidade
MCT	Miniatura Compactada Tropical
MEDINA	Método de Dimensionamento Nacional
Mpa	megapascal
N	número equivalente de operações de um eixo-padrão
NBR	Norma Brasileira Registrada
$p_n$	porcentagem de veículos de n eixos
PP	período de projeto
$p_2$	porcentagem de veículos de 2 eixos
$p_3$	porcentagem de veículos de 3 eixos
R	espessura do revestimento
ROM	<i>run-of-mine</i>
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
tf	toneladas-força
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
tt	taxa de crescimento anual
VM	volume médio diário de tráfego
$V_t$	volume total de veículos no período de projeto
$V_1$	volume médio diário de tráfego no ano de abertura

$w_{ót}$	umidade ótima
$\gamma_{S,máx}$	densidade seca máxima

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>20</b>
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral .....</i>	<i>20</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>20</i>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>20</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura da dissertação.....</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>Pavimento.....</b>	<b>22</b>
<i>2.1.1</i>	<i>Revestimento .....</i>	<i>23</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Base .....</i>	<i>23</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Sub-base .....</i>	<i>23</i>
<i>2.1.4</i>	<i>Reforço do subleito .....</i>	<i>24</i>
<i>2.1.5</i>	<i>Subleito .....</i>	<i>24</i>
<b>2.2</b>	<b>Estradas não pavimentadas.....</b>	<b>24</b>
<i>2.2.1</i>	<i>Aspectos das estradas de mina a céu aberto .....</i>	<i>26</i>
<b>2.3</b>	<b>Projetos de acessos de mina.....</b>	<b>26</b>
<i>2.3.1</i>	<i>Projeto geométrico .....</i>	<i>28</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Projeto estrutural.....</i>	<i>29</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Projeto de drenagem .....</i>	<i>29</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Manutenção .....</i>	<i>30</i>
<b>2.4</b>	<b>Mineração de ferro .....</b>	<b>30</b>
<i>2.4.1</i>	<i>Resíduos da mina de minério de ferro .....</i>	<i>32</i>
<b>2.5</b>	<b>Metodologias de disposição de rejeitos.....</b>	<b>33</b>
<i>2.5.1</i>	<i>Barragens de rejeito .....</i>	<i>34</i>
<i>2.5.2</i>	<i>Pilhas de rejeitos.....</i>	<i>36</i>
<b>2.6</b>	<b>Estudos geotécnicos para projeto de pavimentação.....</b>	<b>36</b>
<i>2.6.1</i>	<i>Estudo do subleito.....</i>	<i>37</i>
<i>2.6.2</i>	<i>Estudo das ocorrências de materiais para pavimentação .....</i>	<i>38</i>
<b>2.7</b>	<b>Método CBR .....</b>	<b>39</b>
<b>2.8</b>	<b>Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis .....</b>	<b>40</b>
<i>2.8.1</i>	<i>Capacidade de suporte .....</i>	<i>41</i>

2.8.2	<i>Número equivalente de operações de um eixo padrão (N)</i> .....	41
2.8.3	<i>Coefficiente de equivalência estrutural (K)</i> .....	43
2.8.4	<i>Determinação da espessura das camadas do pavimento</i> .....	44
2.9	<b>Método MEDINA</b> .....	47
2.10	<b>Conclusões em relação às referências bibliográficas</b> .....	49
3	<b>METODOLOGIA</b> .....	51
3.1	<b>Materiais</b> .....	51
3.2	<b>Procedimentos de laboratório</b> .....	52
3.3	<b>Coleta de amostras para ensaio laboratorial</b> .....	53
3.4	<b>Ensaio de laboratório</b> .....	53
3.4.1	<i>Análise granulométrica e densidade real</i> .....	53
3.4.2	<i>Índice de grupo</i> .....	55
3.4.3	<i>Limites de Atterberg</i> .....	56
3.4.4	<i>Compactação, CBR e expansão</i> .....	56
3.5	<b>Dimensionamento de pavimento pelo método DNIT (2006)</b> .....	57
3.6	<b>Influência da energia de compactação</b> .....	59
4	<b>RESULTADOS ENCONTRADOS E ANÁLISES</b> .....	61
4.1	<b>Rejeito de minério de ferro</b> .....	61
4.1.1	<i>Análise granulométrica e densidade real</i> .....	61
4.1.2	<i>Índice de grupo</i> .....	66
4.1.3	<i>Ensaio de limites de Atterberg</i> .....	67
4.1.4	<i>Classificação Transportation Research Board (TRB)</i> .....	68
4.1.5	<i>Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)</i> .....	69
4.1.6	<i>Compactação, expansão e CBR</i> .....	74
4.1.7	<i>Análise das classificações do material</i> .....	77
4.1.8	<i>Análise do CBR e das classificações do material</i> .....	78
4.1.9	<i>Análise em relação ao material</i> .....	80
5	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	81
5.1	<b>Conclusões</b> .....	81
5.2	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b> .....	83
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	84

## 1 INTRODUÇÃO

As primeiras estradas criadas no Brasil foram, basicamente, aberturas norteadas pelas características do próprio terreno e vinculado ao interesse de menor percurso ao destino final. Segundo Costa Filho (2011), essas estradas, designadas como não pavimentadas, ainda são encontradas em todo o território nacional, principalmente em zonas rurais e em áreas de mineração, mais especificamente em acessos de mina.

Apesar do aumento expressivo de materiais na área de pavimentação, assim como da evolução da engenharia rodoviária, nota-se uma parcela expressiva do uso de metodologias primárias – primeiras maneiras executivas para os acessos não pavimentados (Costa Filho, 2011).

De acordo com Costa Filho (2011), em estradas de mina a céu aberto, a utilização de superfícies que possam atender à demanda do uso contínuo com equipamento de grande porte é um fator de grande significância, tendo em vista a mudança diária devido à rotatividade das frentes de lavras e o comportamento dessas estradas em contato abundante com água, por causa da umidificação e ds intempéries, como chuva e neblina.

O aumento do fluxo e da carga de transporte, na maior parte das minas a céu aberto, faz com que as estradas de mina apresentem defeitos constantes em curtos intervalos de tempo, que impactam no aumento dos custos operacionais e na produtividade. Dentre esses custos, estão o consumo de combustível, a manutenção e reposição de peças, a utilização de pneus e a mão de obra (López Jimeno *et al.*, 2015).

O custo com superfícies disponibilizadas nos mercados se torna inviável para mineradoras, já que sofrem mudanças frequentes nas minas. Com o intuito de mitigar os problemas nos acessos de mina de forma eficaz e menos custosa, a ideia principal é a utilização de uma mistura de materiais oriundos da própria mineradora, como o rejeito, o estéril e o agregado granular.

Em uma estrada, o estado da superfície depende de vários fatores: do material, das intempéries condicionantes daquele local, o tráfego e a manutenção. Segundo Ferreira (2007), uma rodovia adequada deve ter uma largura de faixa de rolamento suficiente para acomodar o tráfego à qual está sendo destinado e uma resistência suficiente para suportar as cargas das rodas dos equipamentos para que não aconteçam deformações excessivas.

A manutenção de estradas tem a função de proteger a estrutura do pavimento e da sua superfície de rolamento, evitando sua destruição e prolongando sua vida útil. A execução de atividades de manutenção corretiva rotineira e a manutenção preventiva periódica são

essenciais para as estradas, a fim de manter todos os elementos dessas com o mínimo possível de alterações e de preservar suas características superficiais (Baesso; Gonçalves, 2003).

A maioria das estradas não pavimentadas, em condições climáticas variadas, apresenta problemas de trafegabilidade. Correções inadequadas e a deficiência de capacitação operacional perante as manutenções impossibilitam a boa conservação das estradas rurais, enfatizando que os principais agentes causadores dessa deterioração não são removidos. Quando esse acesso não é conformado de forma correta pode acarretar um grande potencial de degradação ambiental, principalmente processos erosivos, já que a maioria não possui dispositivos de drenagem. Os acessos de mina contam com técnicas de manutenção equivocadas e constantes, sistemas de drenagem deficientes e pouca atenção quanto à deformação contínua do pavimento (Ferreira, 2007).

Atualmente, nas estradas de minas não houve evolução tecnológica acerca de se praticar uma boa engenharia nesses acessos, sendo possível encontrar tecnologias de engenharia rodoviária que possam ser aplicadas à mineração, certamente adaptadas (Costa Filho, 2011).

A pergunta que a pesquisa objetiva responder é referente à possibilidade de remodelar o procedimento de recobrimento para vias de acessos de mina de minério de ferro utilizando materiais oriundos da própria mineração que são descartados no processo final.

A hipótese é que a utilização de outro tipo de pavimento para recobrir as vias de acessos de mina possibilitará uma menor deformação da estrada, uma melhor trafegabilidade de equipamentos nas vias, principalmente perante a presença de água. Diminuirá as manutenções corretivas, os custos operacionais da frota de transporte e manipulação (carregamento e espalhamento), assim como o consumo de óleo e pneus, além de proporcionar um descarte mais benéfico para o meio ambiente de alguns de seus resíduos.

Dessa forma, esta dissertação busca comprovar que o uso de outro tipo de pavimento para os acessos de mina pode melhorar o tráfego de equipamentos, minimizando custos socioeconômicos com a utilização de resíduos da mineradora como o rejeito, o estéril e o material granular.

## **1.1 Objetivos**

### ***1.1.1 Objetivo geral***

Diante do exposto, o objetivo geral desta dissertação é analisar, à luz da mecânica dos pavimentos, o comportamento geotécnico e estrutural do rejeito de minério de ferro, aplicado como material de infraestrutura de estradas de mina.

### ***1.1.2 Objetivos específicos***

Esta dissertação tem como objetivos específicos os seguintes aspectos:

- a) verificar a viabilidade técnica da aplicação de camadas de pavimento nas estradas de mina;
- b) caracterizar o rejeito de minério de ferro;
- c) estudar as condições da composição ideal do pavimento;
- d) estudar as condições da deflexão do pavimento.

## **1.2 Justificativa**

O presente trabalho justifica-se pela necessidade de analisar um tipo de revestimento substituto aos usados em mina, geralmente o próprio subleito ou somente o estéril, que venha mitigar a precariedade dos acessos, seja mais econômico do ponto de vista financeiro e técnico (na conservação da via e resistência mecânica) e que tenha uma melhoria quando exposto ao contato com água.

A utilização da filtragem do rejeito ocasionou um novo produto do qual se tornou necessária uma diligência, o que desperta o interesse da aplicabilidade da mistura nas vias das minas, já que o material é abundante em mineradoras e seria benéfico economicamente para uma companhia.

Os custos envolvidos na construção e manutenção das estradas de minas, intitulada como um dos itens principais do processo de lavra de uma jazida, fica mais evidente quando se percebe que a estrutura de uma estrada de mina está sujeita a uma deterioração progressiva de deterioração com o passar do tempo (Costa Filho, 2011).

Segundo Costa Filho (2011), os mecanismos são complexos e ocorrem constantemente, vão se acumulando deformações plásticas e trincas nas camadas, sendo essas oriundas da combinação entre a ação das cargas do tráfego e os efeitos do intemperismo.

Portanto, buscam-se estudos com a construção de pavimentos de menor custo, com solos da faixa de domínio nas proximidades e que tenham um desempenho estrutural satisfatório (Fernandes, 2005).

Esta dissertação tem como contribuição o estudo de um revestimento mais durável que ofereça uma melhor estabilidade nos acessos de mina, possibilitando uma diminuição da instabilidade na via e mantendo a qualidade e a duração de uso inicialmente projetado.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, sendo este primeiro introdutório, abrangendo os objetivos da pesquisa e a justificativa, além da contribuição científica e social. No segundo capítulo é apresentada a base teórica para elaboração da pesquisa, conceitos sobre os pavimentos, estradas de mina, resíduos da mineração, método *California Bearing Ratio* (CBR), método Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e método Medina. A revisão da literatura tem também por objetivos a análise e a sistematização de pesquisas anteriores, convenientemente selecionadas, as quais serviram de base para a realização deste trabalho.

No terceiro capítulo foram abordados os detalhes da metodologia para realização da pesquisa e de possível utilização em camadas do pavimento. Nesse capítulo foi explicado quais materiais e todos os ensaios laboratoriais para obtenção de resultados, posterior análise e aplicações de métodos de dimensionamento.

Em seguida, no quarto capítulo, temos os resultados encontrados e esperados do estudo com o material proposto, por meio de ensaios em laboratório. Foram apresentados os resultados obtidos com a caracterização do material, curva granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade, densidade seca máxima, umidade ótima, CBR e expansão. Ainda nesse capítulo serão apresentados os resultados esperados após a análise mais minuciosa do material, para encontrar uma combinação de materiais da própria mineração para utilizar como camada de um pavimento.

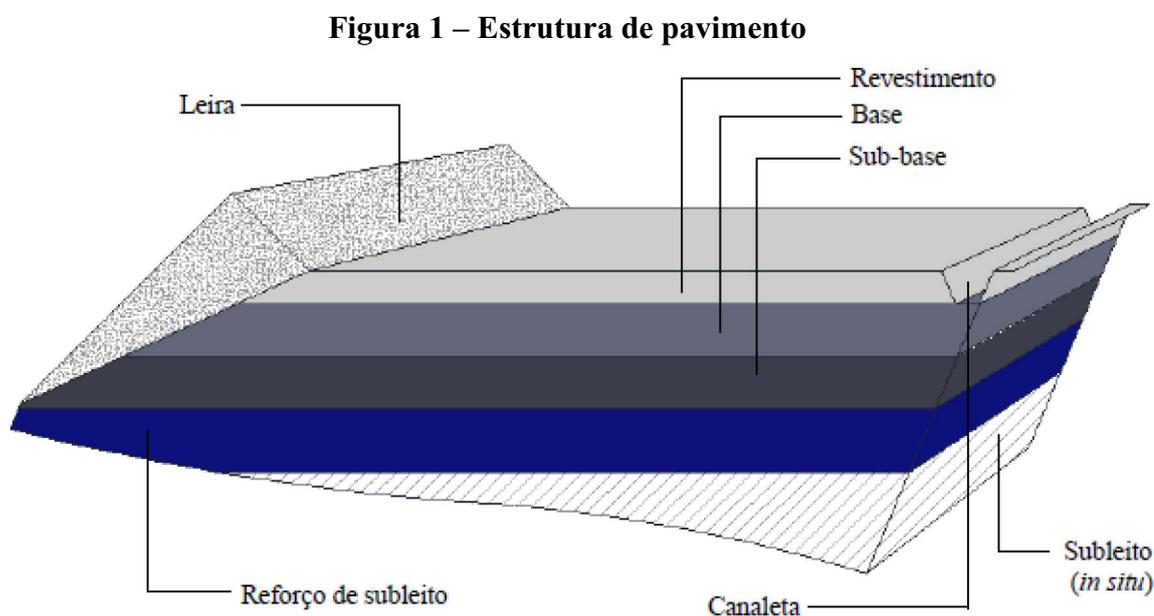
Por fim, o quinto capítulo retrata os próximos passos necessários para a finalização do estudo e aborda, em uma parcela do cronograma, o histórico da pesquisa desta dissertação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Pavimento

Para Senço (2008), o pavimento é uma estrutura executada sobre a terraplanagem, com o intuito de resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos do tráfego, melhorar as condições de rolamento da pista quanto à segurança e ao conforto dos usuários, também de resistir aos esforços horizontais que consistem no desgaste, proporcionando uma superfície de rolamento com maior durabilidade. Essa definição é agregada à visão de uma melhor solução técnica e economicamente mais viável.

De acordo com Bernucci *et al.* (2008) e Balbo (2007), a estrutura de um pavimento é constituída de quatro camadas principais, sendo elas: o revestimento, a base, a sub-base e o reforço do subleito, conforme ilustra a Figura 1. Entende-se que o subleito possui a função de uma fundação da estrutura, com exceção dos casos em que não possui as camadas intermediárias, como a base, a sub-base e o reforço.



Fonte: Sousa, 2011.

Na mineração, a classificação dos variados tipos de pavimento é de baixa disseminação e pouco utilizada, mas é relevante no entendimento dos métodos de dimensionamento de pavimentos. Para Costa (2008) e Menezes (2008), a definição de pavimentos flexíveis são aqueles que têm camadas superiores compostas por misturas betuminosas, como o asfalto, e na profundidade por camadas constituídas de material granular.

Os pavimentos rígidos são caracterizados por uma camada composta de placas de concreto de cimento Portland de alta resistência disposta sobre o solo de fundação ou sobre a sub-base intermediária (Medina; Motta, 2005). Já os pavimentos semirrígidos, segundo Reis (2009), são semelhantes aos pavimentos flexíveis, porém possuem camadas betuminosas como revestimento, e a camada de base é formada por agregado estabilizado por ligante hidráulico, como o cimento.

### **2.1.1 Revestimento**

O revestimento promove tração e resistência à ação abrasiva do tráfego e ao cisalhamento, além de transmitir o carregamento do pneu para a base, selando-a contra a penetração de água superficial (Oliveira Filho *et al.*, 2010).

Para a construção de uma estrada de mina, segundo Oliveira Filho *et al.* (2010), o revestimento ideal deve atender os seguintes quesitos:

- a) adequada trafegabilidade em condições climáticas variadas;
- b) diminuição de poeira excessiva no período seco;
- c) diminuição de piso escorregadio no período chuvoso;
- d) baixo custo e redução da necessidade de manutenção.

### **2.1.2 Base**

A base é a camada cuja principal função é a de resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos que transitam na via, distribuindo-os ao longo da camada de sub-base. Segundo Thompson e Visser (2014), essa camada deve apresentar como característica uma grande densidade e estabilidade. Além disso, a base é responsável por proteger a sub-base de grandes deformações. O dimensionamento ou execução incorreto da construção da base poderá provocar, entre outros problemas, defeitos estruturais graves, ocasionando deterioração prematura da estrada.

### **2.1.3 Sub-base**

A sub-base, quando considerada no dimensionamento, é geralmente projetada sobre subleitos de solos pouco competentes, sendo que a sub-base pode ou não existir no projeto da via (DNIT, 2006). Em geral, é constituída de material granular. A sub-base promove drenagem

e minimiza os efeitos de contração e expansão do subleito na estrutura do pavimento como um todo, além de aumentar a capacidade de suporte estrutural e de distribuir o carregamento.

#### **2.1.4 Reforço do subleito**

O reforço de subleito é uma camada de espessura constante posta por circunstâncias técnico-econômicas, acima da de regularização, com características geotécnicas inferiores ao material usado na camada que lhe for superior, porém melhores que o material do subleito (DNIT, 2006). Essa camada pode ou não existir, mas tem como finalidade distribuir mais adequadamente as tensões que atingem o subleito, em função do seu suporte.

#### **2.1.5 Subleito**

O subleito é a camada de terreno de fundação do pavimento (DNIT, 2006). Essa estrutura deve suportar todos os carregamentos aplicados nas camadas superiores. Pode ser constituído do próprio terreno natural (material *in situ*), de rocha ou de solo compactado.

### **2.2 Estradas não pavimentadas**

As estradas não pavimentadas são estruturas constituídas de terraplenagem ou do próprio relevo. Segundo Baesso e Gonçalves (2003), existem quatro categorias para a classificação de uma estrada não pavimentada:

- a) Categoria A: estradas cuja superfície de rodagem é composta de agregados naturais, tamanho remanescentes de jazidas, desde que esses atendam a parâmetros relacionados à granulometria;
- b) Categoria B: estradas cuja superfície de rodagem é composta de agregados artificiais;
- c) Categoria C: estradas cuja superfície de rodagem é constituída de materiais oriundos de jazidas de solos naturalmente estabilizados (saibros) ou de granulometria semelhante;
- d) Categoria D: estradas cuja superfície é composta de materiais provenientes de seu próprio leito natural.

De acordo com Medina e Motta (2015), as estradas de mina são caracterizadas como estradas não pavimentadas e não possuem resistência aos esforços horizontais devido à ação do tráfego, especialmente nas mudanças de velocidade. É possível considerar que são enquadradas na Categoria A. Na Figura 2 observa-se uma estrada de mina.

**Figura 2 – Estrada de mina**

Fonte: Acervo da autora, 2022.

De acordo com Demarchi *et al.* (2003), nos acessos de mina nota-se que os traçados geométricos são encaixados em taludes de corte ou em meia encosta, além de serem não pavimentados, características presentes também em estradas rurais. Portanto, o que diferencia as estradas rurais – também conhecidas como estradas de terra dos acessos de mina – é a intensidade de fluxo de tráfego. As estradas mineiras são submetidas aos esforços e solicitações, os quais são ocasionados pelo peso e porte de veículos, como os caminhões fora de estrada.

Segundo Sousa (2011), as estradas de mina são compostas de uma única camada de revestimento disposta sobre o subleito, quando esse é competente (constituído de materiais *in situ* resistentes), o que lhe confere boa capacidade de suporte. Esse método também é empregado em estradas mineiras com vida útil de curta duração. Caso contrário, projeta-se um sistema de duas ou três camadas, normalmente constituídas de revestimento, base e/ou sub-base.

### **2.2.1 Aspectos das estradas de mina a céu aberto**

A utilização de caminhões de grande porte em mina a céu aberto exige rigor no critério de projetos de estradas, demandando mais atenção na execução e monitoramento frequente dessas estradas, seguidos de manutenções, conforme avaliado por Silva (2019). Para construir uma estrada de mina, é necessário balizar a viabilização, garantir a segurança e a economia e potencializar a vida útil dos equipamentos. Já para a construção de estradas rodoviárias, existem manuais de seguimentos e estudos aplicados direcionados a um nível de desenvolvimento muito mais aperfeiçoado do que aqueles voltados para estradas de mina. São perceptíveis os poucos estudos e referenciais de panoramas de estradas de mina, apesar das similaridades com estradas vicinais de terra e florestal.

Os autores que iniciaram estudos com algumas diretrizes sobre o dimensionamento de estrada de mina foram Kaufman e Ault (1977), Thompson e Visser (1996), Tannant e Regensburg (2001) e López Jimeno *et al.* (2015). Os materiais produzidos por esses autores se tornaram referências em empresas mineradoras para a otimização de implementação de vias de tráfego, embora ainda haja cerimônia na aplicação das boas práticas.

### **2.3 Projetos de acessos de mina**

A concepção de uma estrada de mina é definida nas fases do projeto, que são estabelecidas pelos projetos geométrico, estrutural, de drenagem e de manutenção.

Segundo Ferreira (2007), as características geológico-geotécnicas variam de mina para mina e estão entrelaçadas à demanda de produção e à disponibilidade de materiais ocorrentes na própria mina. Diretrizes de projetos de estradas de mina, particularmente de minas a céu aberto, são:

- a) custo mínimo possível para se transportar o minério extraído e o estéril para fora da cava, ao longo de toda a vida útil da mina, acompanhando, para tanto, a dinâmica de *layout* que minas do gênero costumam implementar;
- b) minimização do tráfego característico da mina, em detrimento à maximização da segurança e da facilidade de acesso às operações mineiras;
- c) restrições às áreas de instabilidade de taludes;
- d) longevidade da vida útil da mina, implicando a redução dos custos de construção, operação e demanda de materiais de construção.

- e) localização da saída da cava dependerá da localização do britador primário, bem como dos locais favoráveis à disposição de estéril;
- f) maior número de vias de acessos ao corpo de minério tem impacto sensível na relação estéril/minério, embora proporcione maior flexibilidade de operação no interior da mina;
- g) melhor geometria e locação a serem conferidas à via de acesso: internas ou externas às paredes da cava de extração, temporárias ou semipermanentes, em formato espiral ou em ziguezague etc.;
- h) características de circulação das vias: duplo ou único sentido de direção, número de linhas (faixas) de tráfego, regras de preferência e de visibilidade etc.;
- i) inclinações transversais e longitudinais mais adequadas às estradas, de forma a permitirem o escoamento da produção em ocasiões de climas secos e chuvosos, atendendo à magnitude das cargas transportadas.

Os procedimentos de construção e manutenção seguidos por várias minas são baseados em experiências passadas e métodos experimentais com muitos erros embutidos, de acordo com Tannant e Regensburg (2001). Ao mapear os esforços compatíveis nas etapas de projeto e construção de estradas, outra tratativa que poderia diminuir os gastos com manutenção é a adoção de um método que indique quando a operação deverá ser feita.

Segundo Thompson e Visser (1999), os elementos geométricos de uma via são o *layout* e o alinhamento da rodovia em seus planos horizontais (raios de curva) e planos verticais (gradientes de rampa, superelevação), a distância de visão de parada e os cruzamentos e a previsão de modificações futuras na geometria.

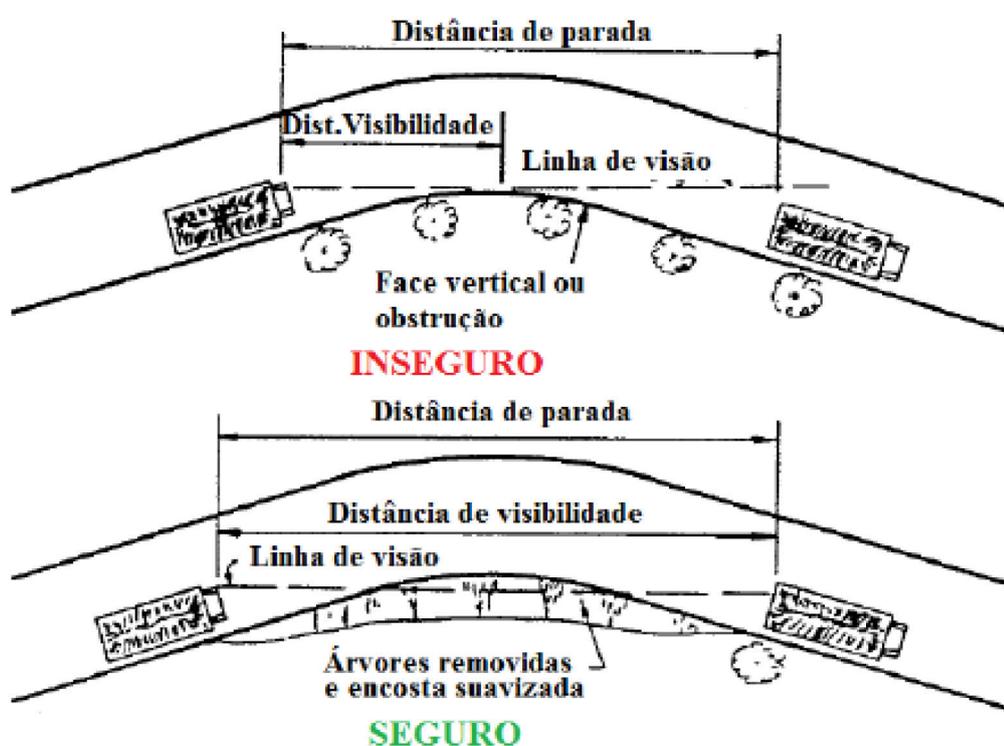
Dentre os componentes principais do projeto de um acesso de mina, Ferreira (2007) destaca:

- a) tráfego: dimensões dos veículos-tipos e as respectivas magnitudes de carregamento, velocidades diretrizes, etc.;
- b) geológico-geotécnicas dos materiais de infra e superestrutura viária: capacidade de suporte, permeabilidade, coesão, resiliência, rugosidade, aderência etc.;
- c) sistemas de drenagem: drenagens superficial e profunda, estruturas de dissipação etc.;
- d) medidas de mitigação da geração de material particulado e de contenção de sedimentos: aspersores automáticos, pontos de abastecimento d'água para caminhões-pipas, *sumps* etc.;
- e) aspectos vinculados à demanda de produção da mina: acessibilidade, segurança, funcionalidade etc.

- f) segurança: sinalizações e iluminação da via, vias de escape (rampas de emergência), “acostamentos”, entre outros.

De modo a favorecer a segurança dentro das minas, existe uma normatização para a execução das estradas, conforme mostra a Figura 3. Existem acessos que precisam ter largura que possibilite que dois veículos transitem paralelamente, o que ocasiona a necessidade de distância de segurança. Essa distância de parada é, geralmente, cerca de metade da largura máxima do veículo-tipo, enquanto a largura para estradas que transitam em dois sentidos é usualmente considerada 3,5 vezes a largura máxima do veículo-tipo (Monenco, 1989).

**Figura 3 – Distância de visibilidade em acessos de mina**



Fonte: Monenco, 1989.

Outra medida protetiva adotada como boa prática nas minas é a separação entre as vias, ou mesmo o isolamento de algum local, elemento conhecido como leiras ou bermas, que são compostos de materiais da mina, na maioria das vezes de estéril (Ferreira, 2007).

### **2.3.1 Projeto geométrico**

A idealização de uma estrada de mina, primeiramente, é abordada no projeto geométrico, no qual se define um traçado otimizado para a estrada. De acordo com Kaufman e

Ault (1977), os parâmetros condicionantes são: largura; distâncias de parada e de visibilidade; rampa máxima sustentável; superelevação; superlargura; gradiente; leiras de segurança; raio de curvatura; configuração de curvas verticais e horizontais; configurações entre os alinhamentos horizontal e vertical; e, por fim, inclinação para direcionamentos de drenagem.

A definição de projeto geométrico, para Pontes Filho (1998), consiste na correlação de elementos como frenagem e aceleração, que são considerados elementos físicos de uma estrada com os parâmetros operacionais.

Para Sousa (2011), o projeto geométrico de estradas de mina corresponde a recursos que proporcione mais segurança para operação dos equipamentos que transitam pela estrada, além de possibilitar maior rendimento dos equipamentos de transporte, visando um menor desgaste de pneus, do chassi e uma redução de manutenções dos mesmos.

### **2.3.2 Projeto estrutural**

O projeto estrutural é formado por um processo de composição do arranjo mais econômico das camadas do pavimento, considerando sua espessura e tipos de material disponível que seja compatível com o material *in situ* e com o volume de tráfego previsto para a vida útil das estradas (Thompson, 1996).

Um dos elementos mais importantes desse projeto é o dimensionamento de um pavimento que se baseia na definição das espessuras das camadas que o compõe. Essas camadas devem ter capacidade de suporte tal que resistam à ruptura e não apresentem deformações ou desgastes excessivos, quando submetidas a esforços de carga devidos ao tráfego dos equipamentos. Essa configuração minimiza, na medida do possível, a necessidade de manutenções excessivas (Hugo, 2005).

### **2.3.3 Projeto de drenagem**

A fase final é composta de projeto de drenagem que analisa o escoamento da água superficial das estradas e otimiza os dispositivos drenantes, de tal forma que possa melhorar a eficiência da operação dessas estradas. Para Oliveira Filho *et al.* (2010a *apud* Reis, 2014), os dispositivos implementados nessa drenagem são compostos de: valetas de proteção de corte e de aterro; sarjetas de corte e de aterro; descidas d'água; saídas d'água; caixas coletoras; bueiros de gradiente; dissipadores de energia, escalonamento de taludes e corta-rios.

### **2.3.4 Manutenção**

É de conhecimento que toda estrutura implantada carece de manutenções, visando minimizar as inconsistências na superfície de rolamento. Silva (2019) transmite a possibilidade de diminuir defeitos provenientes da estrutura do pavimento com base na detecção de irregularidades que impactam no tráfego e diminuem a vida útil dos veículos.

No caso das estradas de mina, segundo Vieira (2013), a manutenção deve conservar a superfície de rolamento isenta de irregularidades, sólido e livre de material solto, além de manter a declividade transversal do leito da estrada apropriada para garantir o escoamento de águas superficiais.

De acordo com Oliveira Filho *et al.* (2010a *apud* Reis, 2014), em estradas de mina alguns defeitos comumente encontrados são poeiras, seção transversal inadequada, caráter pedregoso, perda de agregados grossos, estrada escorregadia, afundamento por trilha de roda, corrugações, depressões, buracos e pontos frágeis devido à drenagem precária.

## **2.4 Mineração de ferro**

A mineração de ferro é um dos setores mais importantes para a economia brasileira. Conforme indicado no *Anuário mineral brasileiro* (Brasil, 2020), em 2019 cerca de 80,0% da mineração brasileira era de metais e cerca de 72,8% era de minério.

O mercado do minério de ferro está aumentando devido à expansão do mercado chinês, que está fortemente associada ao crescimento do preço do produto e à disponibilidade do material relacionada a uma exploração em grandes volumes com teores de ferro cada vez menores (Valadão; Araujo, 2007).

Aproximadamente 99% do minério de ferro produzido é utilizado na fabricação do aço e do ferro fundido (DNPM, 2011). Devido a esse resultado, é indutivo que o setor siderúrgico é o principal fomentador do seu beneficiamento.

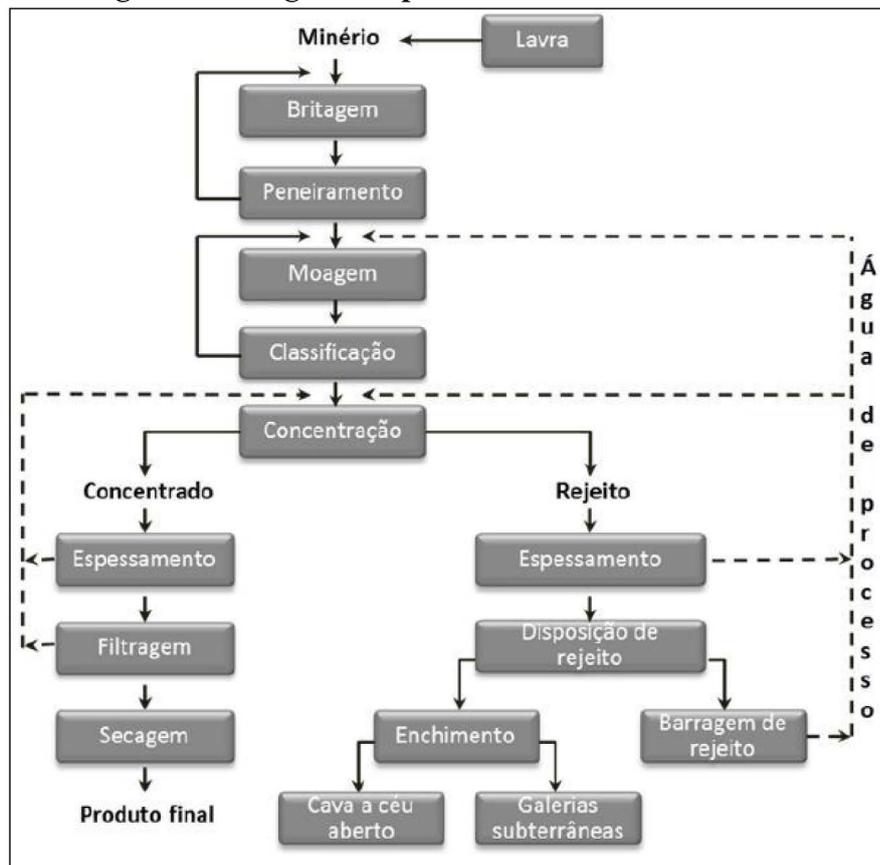
Os minérios, rochas ou minerais que se encontram na crosta terrestre necessitam, em sua grande maioria, de algum beneficiamento para melhorar as suas propriedades físicas e/ou químicas, possibilitando, assim, seu uso. O tratamento ou o beneficiamento de minérios são designados como um conjunto de operações aplicado ao minério com a finalidade de obter um produto requerido pelo mercado (minerais valiosos e/ou concentrado), sem alterarem a identidade física do mineral (Luz; Lins, 2018).

De acordo com Luz e Lins (2018), o minério bruto, ao ser explorado através da lavra de uma mina, também denominado de ROM (*run-of-mine*), sucede ao beneficiamento com as seguintes operações:

- britagem e moagem;
- peneiramento (separação por tamanhos) e classificação (hidrociclone, classificador espiral);
- concentração gravítica, magnética, eletrostática, flotação, floculação seletiva etc.;
- desaguamento do concentrado (decantação, espessamento e filtração);
- desaguamento do rejeito (espessamento), seguido de recuperação de água para o processo;
- secagem do concentrado em secador rotativo, *spray dryer*, secador de leito fluidizado;
- disposição de rejeito em cavas de mina a céu aberto, galeria subterrânea, barragem de rejeito.

Na Figura 4, é apresentado um diagrama com o processo típico do tratamento de minério.

**Figura 4 – Diagrama típico do tratamento de minério**



Fonte: Luz; Lins, 2018.

No tratamento do minério, grande parte das operações realizadas utilizam água antes da obtenção do produto adequado, tornando-se necessário o desaguamento do concentrado que são compreendidos pelo espessamento, filtragem e secagem (Luz; Lins, 2018). As operações executadas pela atividade minerária geram quantidades de rejeitos, que são compostos de partículas finas de rocha britada, produtos químicos e água (Li *et al.*, 2018; Kossoff *et al.*, 2014).

De acordo com Portes (2013), por se tratar de um processo de via úmida, esses rejeitos são geralmente encontrados sob a forma líquida e sólida. Para Milonas (2006), os rejeitos de mineração são subprodutos das atividades de beneficiamento de minerais derivadas de materiais de ganga que possuem pouco ou mesmo nenhum valor econômico agregado.

Conforme definido pela ABNT (2017), na NBR 13028, o rejeito é todo material descartável proveniente do processo de beneficiamento do mineral que tem sua destinação planejada, de forma a minimizar os riscos provenientes da disposição e reduzir os impactos ambientais.

A disposição de rejeitos pode ocorrer por algumas metodologias encontradas na literatura. Portes (2013) cita o aterro hidráulico, disposição em cava, codisposição de rejeitos e estéreis, disposição subaérea, empilhamento drenado e rejeitos espessados, além do método mais comum, que é a utilização de barragens.

#### ***2.4.1 Resíduos da mina de minério de ferro***

Os resíduos de uma mineração são os produtos sem valor econômico agregado à atividade mineradora, comumente são o estéril e o rejeito. Com a possibilidade de utilização desses, internamente ou externamente, ocasionam uma mitigação dos efeitos causados ao meio ambiente, já que teriam o destino final modificado.

O estéril é o material originário da lavra da mina que possui um baixo teor de minério. A separação do estéril do material de alto teor de minério é feita pelo processo de decapeamento do corpo do minério (Ferreira, 2007).

O rejeito é um subproduto restante do processo de beneficiamento e concentração de minérios, em que sua granulometria varia em função do tipo de minério bruto e do processo de beneficiamento (Gomes; Albuquerque Filho, 2002).

No Brasil, a maioria das mineradoras de minério de ferro utilizavam estruturas de contenção de rejeitos (barragens), dispendo sob a forma de polpa. Porém, após os eventos de rompimento de barragens em Minas Gerais, algumas normas foram publicadas diante do cenário legal previamente existente (Costa; Bravim, 2020).

O Decreto Estadual nº 46.993/2016, que vigora em Minas Gerais, institui a Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragem e dá outras providências, em que a auditoria deverá ser realizada em todos os empreendimentos que fazem a disposição final ou temporária de rejeitos de mineração em barragens que utilizem ou que tenham utilizado o método de alteamento para montante. O decreto ainda estabelece que o Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) irá definir critérios e procedimentos adicionais a serem adotados nos empreendimentos minerários após a apresentação da Declaração Extraordinária de Condição de Estabilidade – e até que ocorra essa definição ficam suspensas a formalização de processos de licenciamento ambiental de novas barragens de contenção de rejeitos ou a ampliação com a qual se pretenda utilizar o método de alteamento para montante.

Posteriormente, a Deliberação Normativa COPAM nº 228/2018 estabeleceu diretrizes específicas para licenciamento das atividades descritas na Deliberação Normativa COPAM nº 217/2017, como a “Disposição de estéril ou de rejeito inerte e não inerte da mineração (classe II-A e II-B, segundo a NBR 10.004) em cava de mina, em caráter temporário ou definitivo, sem necessidade de construção de barramento para contenção”, o “Reaproveitamento de bens minerais metálicos dispostos em pilha de estéril ou rejeito” e o “Reaproveitamento de bens minerais dispostos em barragem”. Essas diretrizes regulamentaram as atividades minerárias (de disposição de estéril e rejeito), as quais adquiriram maior representatividade, devido ao cenário.

No entanto, segundo Saraiva (2006), os rejeitos não se comportam em sua totalidade como solos. Portanto, para os estudos geotécnicos relacionados a projetos de infraestrutura rodoviária, é necessário estabelecer a caracterização dos resíduos. Isso se dá por meio de metodologias específicas, em termos de ensaios de laboratório ou de ensaios de campo, que devem abranger vários ensaios e não necessariamente somente os geotécnicos.

## **2.5 Metodologias de disposição de rejeitos**

De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2019), as empresas de mineração estão investindo na gestão de rejeitos, visando à garantia da sustentabilidade de suas operações. As estruturas de disposição de rejeitos devem abranger o gerenciamento de rejeitos e de sedimentos como um todo, isto é, desde sistemas de distribuição, de recuperação de água, de barragens, de diques, de cavas e de empilhamentos.

O *Guia de boas práticas: gestão de barragens e estruturas de disposição de rejeitos* fornecido pelo IBRAM (2019) expõe que a metodologia de disposição de rejeitos mais indicada está interligada a uma série de componentes. São abordadas algumas questões como a natureza

do processo de beneficiamento mineral, propriedades mecânicas dos rejeitos, condições topográficas e geológicas, impactos ambientais e as condições climáticas.

Em vista disso, a seguir serão apresentadas algumas das metodologias comumente utilizadas no território brasileiro, mais especificamente na região do Quadrilátero Ferrífero. São alternativas às quais as mineradoras recorrem para propiciar uma disposição de rejeitos mais adequada.

### 2.5.1 Barragens de rejeito

De acordo com Ribeiro (2019), as barragens de rejeito são estruturas de contenção de água e sólidos em suspensão provenientes do processo de beneficiamento do minério. Sua execução é composta de aterro compactado cuja a finalidade é barrar todo o material armazenado em seu reservatório. Os métodos construtivos usualmente utilizados para construir o aterro do maciço são: o método a montante, o método a jusante e o método de linhas de centro.

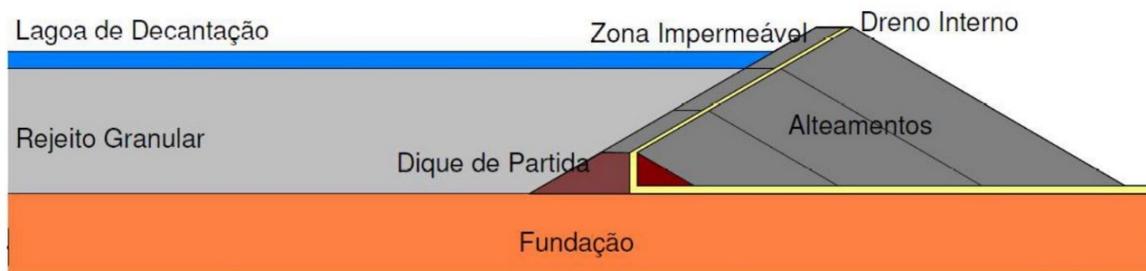
O método de alteamento a montante consiste no lançamento da linha de simetria do dique, logo depois da construção do dique de partida, onde há a formação da praia de deposição que se tornará a fundação e fornecerá o material para a construção do próximo alteamento, conforme pode ser visualizado na Figura 5 (Araújo, 2006).



**Fonte: Albuquerque Filho, 2004.**

O método de alteamento de barragens a jusante, segundo Albuquerque Filho (2004), é composto da construção de alteamentos realizados a jusante do dique de partida inicial, conforme apresentado na Figura 6.

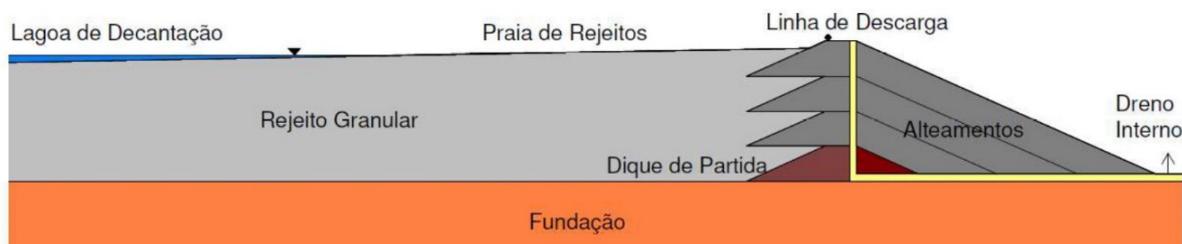
**Figura 6 – Barragem de alteamento a jusante**



Fonte: Albuquerque Filho, 2004.

Já o método de alteamento de barragens por linha de centro consiste na construção dos alteamentos sobre o rejeito depositado a montante e sobre o próprio dique de partida para o sentido a jusante, onde o eixo vertical do dique de partida é tomado como referência designado como linha de centro. A Figura 7 é uma ilustração desse tipo de barragem (Albuquerque Filho, 2004).

**Figura 7 – Barragem de alteamento por linha de centro**



Fonte: Albuquerque Filho, 2004.

De acordo com Araújo (2006), o método de alteamento a montante é o que apresenta uma situação mais crítica em relação à segurança geotécnica devido ao seu baixo controle construtivo, pois o alteamento é realizado sobre material saturado, fofo, com baixa resistência ao cisalhamento e com susceptibilidade à liquefação, enquanto o alteamento a jusante pode apresentar maior controle, por não estar assentado sobre rejeito pouco consolidado (Araújo, 2006).

Foram registradas cerca de 769 barragens de rejeito de mineração até o ano de 2020, no Brasil. A maioria foi identificada nos estados de Minas Gerais, Pará, São Paulo, Mato Grosso e Bahia (Leal *et al.*, 2022).

Por fim, cabe mencionar que as legislações e resoluções vigentes no Brasil a respeito da utilização das barragens para disposição de rejeitos estão sendo modificadas para um modo mais restritivo ou mesmo de proibição. Destaca-se o impedimento das barragens alteadas pelo

método de montante, considerando-se a Resolução nº 95/2022, da Agência Nacional de Mineração (ANM).

### ***2.5.2 Pilhas de rejeitos***

A metodologia de disposição de rejeito em pilhas carece de dispositivos que possibilitem a retirada da água realizando a separação de sólidos e líquidos. Surge, então, o processo de filtragem dos rejeitos, sendo feito por um filtro que inibe a passagem dos sólidos e expela a água. O material sólido é retido e pode ser transportado para as áreas de empilhamento por meio de correias ou mesmo por caminhões.

Apesar da submissão à filtragem, o material não se encontra totalmente seco, existe uma porcentagem de água, e isso influencia no processo de empilhamento do rejeito. Esse processo é análogo ao que ocorre nas obras de terraplenagem através de camadas compactadas e controladas realizadas pelos equipamentos de operação (Lara; Pornillos; Muñoz, 2013).

Conforme pontuado por Davies (2004), ao se compararem as metodologias de disposição de rejeitos, o método das pilhas apresenta-se ser mais vantajoso devido à fluência de recuperação e desativação da estrutura, pois é possível a execução de revegetações dos bancos concluídos desde o início da construção. Tais condições podem gerar menos impactos no quesito de processos erosivos, e até mesmo uma redução do acarretamento de poeira.

Contudo, Gomes, De Tomi e Assis (2016) observaram que as pilhas de rejeitos, dentre as soluções, são as mais seguras do ponto de vista geotécnico e, possivelmente, dos impactos ambientais e sociais também. Infere-se que pontos associados à possibilidade de reutilização da água e redução dos custos de monitoramento são de significância.

## **2.6 Estudos geotécnicos para projeto de pavimentação**

O projeto de pavimentação requer estudos geotécnicos. Segundo o DNIT (2006), são necessários estudos do subleito e das ocorrências de materiais para pavimentação. O estudo do subleito para estradas com terraplenagem concluída tem o objetivo de reconhecer o tipo de solo, buscando uma caracterização das camadas e o posterior traçado dos perfis para o projeto do pavimento. Já o estudo das ocorrências de materiais visa reconhecer e caracterizar os materiais de jazidas para serem utilizados como matéria-prima na construção das camadas do projeto, como reforço do subleito, sub-base, base e revestimento.

As medidas utilizadas para as definições dos estudos geotécnicos compreendem: a prospecção e a classificação expedida em campo, geralmente realizadas por sondagens e observação *in situ*; as camadas de solos, que são as massas de solos contínuas e designadas homogêneas do ponto de vista da classificação; e o perfil dos solos, que consiste no desenho em corte do subleito até a profundidade sondada baseado na classificação dos resultados do laboratório.

De acordo com o DNIT (2006), os estudos geotécnicos são executados através de ensaios laboratoriais, sendo eles:

- a) granulometria por peneiramento, com lavagem do material na peneira de 2,0 mm (nº 10) e de 0,075 mm (nº 200);
- b) limite de liquidez;
- c) limite de plasticidade;
- d) limite de construção, em casos especiais de materiais do subleito;
- e) compactação;
- f) massa específica aparente *in situ*;
- g) Índice Suporte Califórnia (ISC);
- h) expansibilidade, no caso de solos lateríticos.

### **2.6.1 Estudo do subleito**

Conforme indicado no *Manual de pavimentação*, do DNIT (2006), é necessário conhecer os solos do subleito, que deve ser realizado em duas etapas:

- a) sondagem no eixo e nos bordos da plataforma da rodovia, a fim de identificar os variados horizontes dos solos através de inspeção em campo e coleta de amostras;
- b) realizar os ensaios necessários nas amostras das diferentes camadas de solo para traçar os perfis de solos.

Para a realização das sondagens, existem condicionantes que norteiam uma boa campanha de identificação das camadas do solo. Nesse sentido, pode-se destacar a distância em relação ao eixo de execução de um furo, o espaçamento máximo entre dois furos e a profundidade dos furos. Todos os furos devem ser mapeados, numerados e identificados de acordo com o número da estaca da estrada e da posição quanto ao eixo.

A identificação das diversas camadas de solo é obtida por meio da inspeção em campo, caracterizada pela classificação de acordo com a textura dos materiais encontrados designados

como bloco de rocha, matacão, pedra de mão, pedregulho, areia, silte e argila. Também são utilizados alguns testes, como o teste visual, do tato, do corte, da dilatância, da resistência.

Ao executar as sondagens, além das inspeções preliminares em campo, são coletadas amostras de materiais para a realização de ensaios de laboratório. Após uma bateria de ensaios normatizados, como a análise granulométrica, densidade real, limites de Atterberg, compactação, CBR e expansão, obtêm-se parâmetros capacitados para a instrução de um projeto de pavimentação.

### ***2.6.2 Estudo das ocorrências de materiais para pavimentação***

O estudo das ocorrências de materiais para pavimentação é fornecido em dados de geologia e pedologia. Trata-se de prospecções que são realizadas para identificar se o material é passível de aproveitamento, caracterizando a sua qualidade e o seu estimado volume.

Em uma prospecção definitiva, os materiais são considerados satisfatório quando atendem à especificações vigentes quanto à granulometria por peneiramento com lavagem do material na peneira de 2,0 mm (nº 10) e na de 0,075 mm (nº 200), limite de liquidez, limite de plasticidade, equivalente de areia, compactação e o Índice Suporte Califórnia (ISC).

Para um material ser reconhecido como reforço de subleito, ele precisa ter características geotécnicas superiores às do subleito, obtidas nos ensaios de caracterização e ISC. Ao mesmo tempo, as exigências para a sub-base granulometricamente estabilizada deve ter um índice de grupo igual a zero, independentemente do tipo de tráfego, e o ISC deve ser igual ou maior que 20.

As exigências para a base estabilizadora são:

- a) limite de liquidez máximo;
- b) 25% de índice de plasticidade máximo: 6%;
- c) equivalente de areia mínimo: 30%.

No entanto, ainda para as bases, há algumas particularidades em que, se o limite de liquidez for maior que 25% e/ou o índice de plasticidade for maior que 6%, o solo pode vir a ser utilizado se apresentar um equivalente de areia maior que 30%, enquadrar nas faixas granulométricas da Figura 8, atender às condições do ISC, sendo maior ou igual a 80% para todo tipo de tráfego, e a expansão máxima deve ser maior que 0,5%.

Figura 8 – Granulometria dos materiais

TIPOS PENEIRA	I				II	
	A	B	C	D	E	F
	% em peso passando					
2"	100	100	—	—	—	—
1"		75-90	100	100	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	...	—
Nº4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
Nº10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
Nº40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
Nº200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25

Fonte: DNIT, 2006.

## 2.7 Método CBR

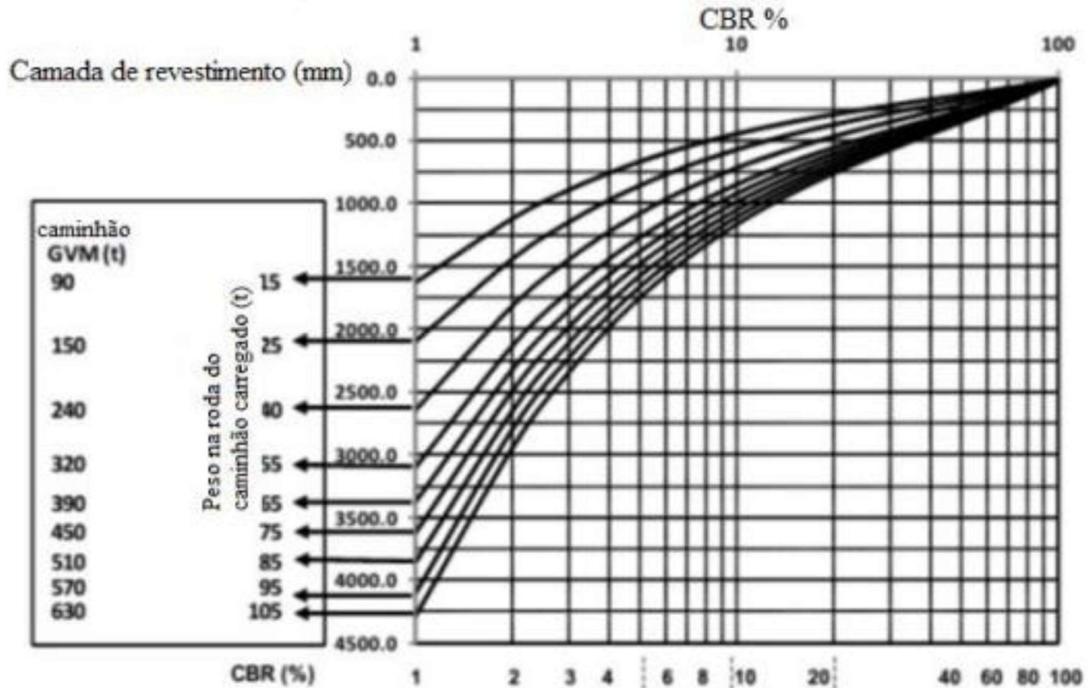
O método *California Bearing Ratio* (CBR), no português Índice de Suporte Califórnia (ISC), foi desenvolvido pelo Departamento de Estradas da Califórnia, logo depois dos estudos indicarem que a grande maioria das falhas identificadas nos pavimentos era devido à compactação inadequada dos materiais que compunham as camadas ou por camadas com espessura insuficiente sobre material *in situ* fraco.

O método refere-se à capacidade de suporte das camadas do pavimento, de forma a evitar a ruptura plástica do subleito sob carregamento estático. Segundo Hustrulid, Kuchta e Martin (2013), o CBR é um índice obtido a partir da razão percentual entre a pressão exercida por um pistão de compactação em uma amostra de solo e a pressão exercida pelo mesmo pistão em uma amostra de referência. A amostra de referência é brita, bem graduada de alta qualidade, que tem um CBR de 100%.

Através dos materiais ensaiados, são geradas curvas que correlacionam o CBR do material e a carga exercida sobre os pneus a uma dada espessura de camada, possibilitando a determinação das espessuras das camadas do revestimento, da base e da sub-base.

Na Figura 9, observa-se o ábaco com as curvas de CBR correlacionadas com a carga exercida sobre cada um dos pneus com a espessura da camada de revestimento. Segundo Thompson e Visser (2014), a carga exercida pelos pneus é a chamada *Gross Vehicle Weight* (GVW), sendo este o peso máximo do caminhão carregado dividido pelo número de pneus.

**Figura 9 – Valor de CBR em função do peso do caminhão**



Fonte: Pellissari, 2019.

## 2.8 Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis

O método de dimensionamento de pavimento utilizado, na maioria dos estudos da literatura, é o empírico. Essa metodologia é originária de observações, tentativas e experiências realizadas em campo.

O *Manual de pavimentação*, do DNIT (2006), utiliza o método do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), que se baseou no trabalho *Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*, de autoria de W. J. Turnbull, C. R. Foster e R. G. Ahlvin, do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, cujas conclusões foram obtidas na Pista Experimental da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) – isso explica o maior volume trabalhos na literatura. A metodologia fundamenta-se no método CBR original.

A pavimentação rodoviária no Brasil estimulou vários estudos e práticas de construção que deram origem a normas e procedimentos, as quais tiveram um grande desenvolvimento com o passar dos anos e já sofreram revisões e atualizações. Atualmente, a normativa de seguimento é a terceira edição do *Manual de pavimentação*, do DNIT, de 2006.

Para o dimensionamento da espessura total do pavimento, que é calculado para prevenir o subleito de ruptura e de acúmulos de deformações, observa-se a capacidade de suporte do

subleito e dos materiais do pavimento. Também se considera o número equivalente de operações de um eixo padrão (N) durante o período de projeto (PP), no coeficiente de equivalência estrutural (K) e na espessura total do pavimento.

### 2.8.1 Capacidade de suporte

A análise da capacidade de suporte do subleito e das camadas que são compostas pelo pavimento é feita através de ensaios de CBR (Sousa, 2011).

### 2.8.2 Número equivalente de operações de um eixo padrão (N)

O número equivalente de operações de um eixo padrão é correspondente à quantidade de solicitações que o pavimento sofre durante a sua vida útil pelo eixo padrão de 80 kN (8,2 tf). A padronização do tráfego é necessária devido à variação de veículos, às cargas aleatórias, às diversas configurações de eixo e às velocidades variáveis, entre outros aspectos (Silva *et al.*, 2011).

Portanto, o número N é em função do volume de tráfego, de fatores que dependem da composição do tráfego (fator de eixo e fator de equivalência de carga) e do fator climático regional, e é dado pela Equação 1 (Balbo, 2007):

$$N = V_t \times FE \times FEC \times FR \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$V_t$  = volume total de veículos no período de projeto;

FE = fator de eixo;

FEC = fator de equivalência de carga;

FR = fator climático regional.

Considera-se que a multiplicação entre FE e FEC é denominada fator de veículo (FV).

O volume total de veículos,  $V_t$ , é dado pela Equação 2:

$$V_t = 365 \times VM \times PP \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

VM = volume médio diário de tráfego;

PP = período de projeto (anos).

O volume médio diário de tráfego é dado pelas Equações 3 e 4, para taxas de crescimento anual em progressões aritmética e geométrica, respectivamente:

$$VM = \frac{V_1 \times \left[ 2 + (PP-1) \times \frac{tt}{100} \right]}{2} \quad (\text{Equação 3})$$

$$VM = \frac{365 \times V_1 \times \left[ \left( 1 + \frac{tt}{100} \right)^{PP} - 1 \right]}{\frac{tt}{100}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$V_1$  = volume médio diário de tráfego no ano de abertura, num sentido;

$tt$  = taxa de crescimento anual.

O fator de eixo transforma o tráfego em número de veículos padrão de passagens considerando eixos equivalentes, calculando o número de eixos dos tipos de veículos de transporte pela Equação 5:

$$FE = \left( \frac{p_2}{100} \right) \times 2 + \left( \frac{p_3}{100} \right) \times 3 + \dots + \left( \frac{p_n}{100} \right) \times n \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

$p_2$  = porcentagem de veículos de 2 eixos;

$p_3$  = porcentagem de veículos de 3 eixos;

$p_n$  = porcentagem de veículos de  $n$  eixos.

O fator de equivalência de carga relaciona o efeito de uma passagem de um veículo sobre o pavimento ao efeito causado pela passagem do veículo padrão e é dado pela Equação 6:

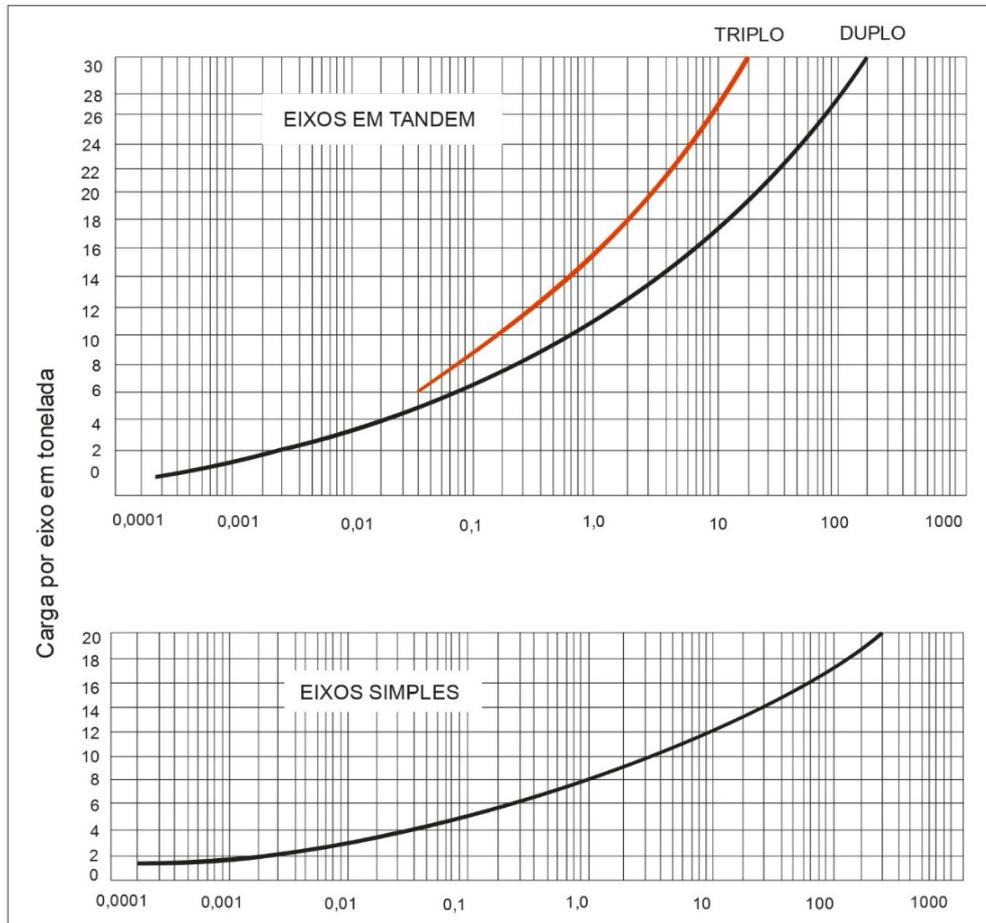
$$FEC = \frac{EQOP}{100} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

EQOP = equivalência de operações (produto da porcentagem de veículos/dia pelo fator de equivalência de operação – FEO).

Os valores de fator de equivalência de operação se relacionam à carga por eixo e podem ser calculados pelos ábacos da Figura 10.

**Figura 10 – Fatores de equivalência de operação**



Fonte: DNIT, 2006.

O fator climático regional é utilizado para considerar as variações de umidade dos materiais do pavimento de acordo com as estações do ano. O DNER (1981) *apud* Sales (2008) apresenta valores de fator climático regional relacionados à altura média de chuva, conforme a Tabela 1.

<b>Tabela 1 – Altura média de chuva x fator climático regional</b>	
<b>Altura anual média de chuva (mm)</b>	<b>Fator climático regional (FR)</b>
< 800	0,7
de 800 a 1500	1,4
> 1500	1,8

Fonte: DNER, 1981 *apud* Sales, 2008.

### 2.8.3 Coeficiente de equivalência estrutural (K)

O coeficiente de equivalência estrutural depende do tipo de material que é utilizado para construir a estrada. Ele relaciona a espessura que a camada deveria possuir de material padrão

(base granular) com a espessura equivalente do material que realmente irá compor a camada (Sousa, 2011)

A Tabela 2 mostra o valor de K dos materiais normalmente utilizados como revestimento em estradas rodoviárias. Esse valor é usado em inequações para se obter as espessuras finais da base (B), sub-base ( $h_{20}$ ) e reforço ( $h_n$ ).

**Tabela 2 – Coeficiente de equivalência estrutural dos materiais da engenharia rodoviária**

<b>Tipo de material</b>	<b>Coeficiente estrutural (K)</b>
Base ou revestimento de concreto asfáltico	2,0
Base ou revestimento pré-misturado a quente de graduação densa	1,7
Base ou revestimento pré-misturado a frio de graduação densa	1,4
Base ou revestimento asfáltico por penetração	1,2
Bases granulares	1,0
Sub-bases granulares	0,77 (1,00)
Reforço do subleito	0,77 (1,00)
Solo-cimento com resistência aos 7 dias superior a 4,5 MPa (compressão)	1,7
Solo-cimento com resistência aos 7 dias superior entre 2,8 e 4,5 MPa (compressão)	1,4
Solo-cimento com resistência aos 7 dias superior entre 2,1 e 4,5 MPa (compressão)	1,2
Bases de solo-cal	1,2

Fonte: Balbo, 2007.

#### 2.8.4 Determinação da espessura das camadas do pavimento

A espessura do revestimento é referenciada pelo valor do número N calculado e pode variar de 15 mm a 125 mm, conforme demonstrado na Tabela 3. Ressalta-se que é previsto que o revestimento seja asfáltico (Sousa, 2011).

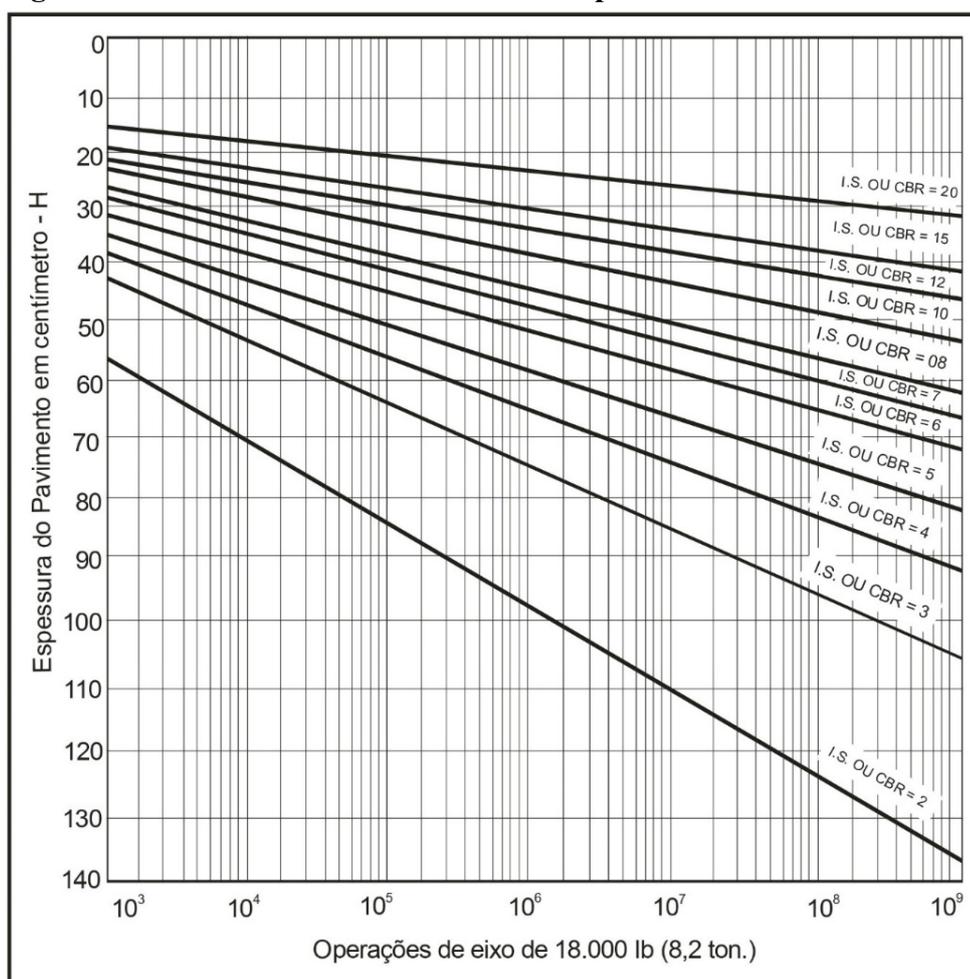
**Tabela 3 – Espessura mínima de revestimentos asfálticos**

<b>N (repetições) do ESRD de 80 kN</b>	<b>Tipo de revestimento</b>	<b>Espessura (mm)</b>
$\leq 10^6$	Tratamentos superficiais	15 a 30
$10^6 < N \leq 5 \cdot 10^6$	CA, PMQ, PMF	50
$5 \cdot 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto asfáltico	75
$10^7 < N \leq 5 \cdot 10^7$	Concreto asfáltico	100
$N \geq 5 \cdot 10^7$	Concreto asfáltico	125

Fonte: Balbo, 2007.

A espessura equivalente total do pavimento ( $H_m$ : reforço do subleito, sub-base, base e revestimento) é obtida através do ábaco da Figura 11, em função de  $N$  e CBR. Também é determinada a cobertura acima do reforço do subleito ( $H_n$ : sub-base, base e revestimento) e a cobertura acima da sub-base ( $H_{20}$ : base e revestimento). As coberturas das camadas que irão compor o pavimento são calculadas possuindo referência um material padrão de base granular com coeficiente de equivalência estrutural igual a 1.

**Figura 11 – Ábaco de dimensionamento de pavimentos flexíveis – DNER**



Fonte: DNIT, 2006.

De acordo com Sousa (2011), o valor de  $N$  máximo para o método do DNER aplicável é  $1 \cdot 10^9$ , operações de eixo de 80 kN (8,2 tf).

A Equação 7 foi apresentada por Suzuki *et al.* (2004), onde representou os gráficos de dimensionamentos de forma aproximada em modelos analíticos. Cabe destacar que considerou na equação abaixo diferentes valores de  $d$ ,  $e$  e  $f$ , variando de acordo com o método de dimensionamento utilizado, sendo eles: método do DNER (DNIT, 2006), método do

Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP) e método da Secretaria de Infraestrutura Urbana da Prefeitura Municipal de São Paulo.

$$H_t = d \times N^e \times \text{CBR}^f \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$H_t$  = espessura total do pavimento ou da cobertura (cm);

$d$  = constante;

$N$  = número de solicitações correspondentes ao eixo padrão de 80 kN (8,2 tf);

$\text{CBR}$  = Índice de Suporte Califórnia (%);

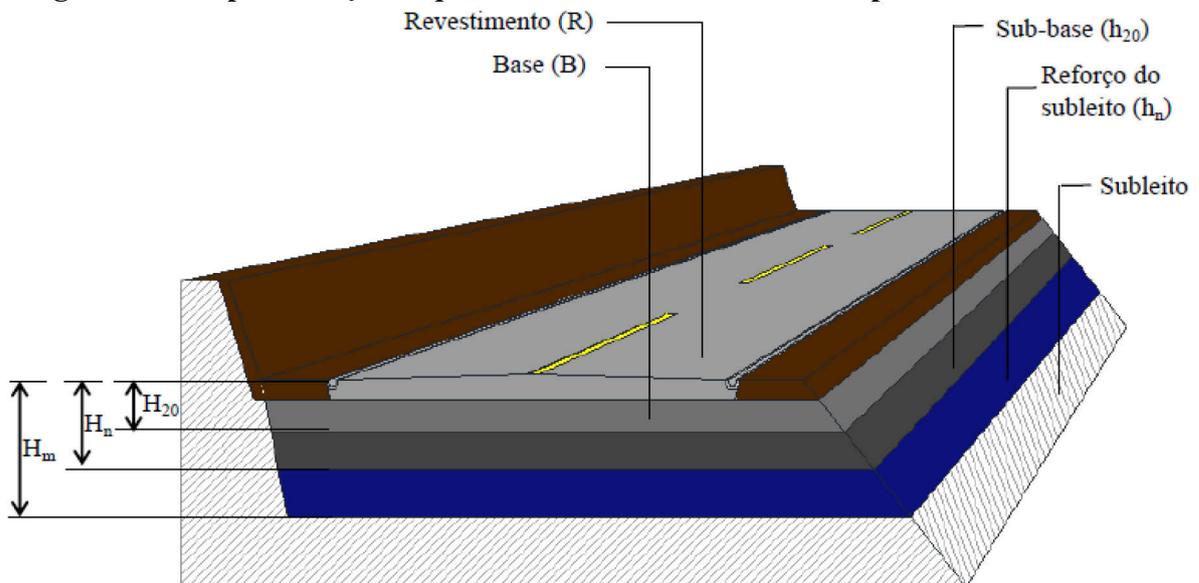
$e, f$  = expoentes de  $N$  e  $\text{CBR}$ .

No entanto, a Equação 8 pode ser utilizada como substituição do ábaco apresentado na Figura 11.

$$H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times \text{CBR}^{-0,598} \quad (\text{Equação 4})$$

Na Figura 12 são identificadas as espessuras finais da base (B), da sub-base ( $h_{20}$ ) e do reforço do subleito ( $h_n$ ), as quais podem ser obtidas por meio de inequações que consideram o produto das espessuras pelos coeficientes estruturais parciais relativos a cada tipo de material. O conjunto de inequações são apresentadas na Equação 9, na Equação 10 e na Equação 11.

**Figura 12 – Representação esquemática do dimensionamento pelo método do DNER**



Fonte: Sousa, 2011.

$$R K_R + B K_B \geq H_{20} \quad (\text{Equação 5})$$

$$R K_R + B K_B + h_{20} K_S \geq H_n \quad (\text{Equação 6})$$

$$R K_R + B K_B + h_{20} K_S + h_n K_{ref} \geq H_m \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

$R$  = espessura do revestimento;

$B$  = espessura da base;

$H_{20}$  = espessura acima da sub-base (base + revestimento);

$h_{20}$  = espessura da sub-base;

$H_n$  = espessura acima do reforço do subleito (sub-base + base + revestimento);

$h_n$  = espessura do reforço de subleito;

$H_m$  = espessura equivalente total do pavimento (reforço de subleito + sub-base + base + revestimento);

$K_R, K_B, K_S, K_{ref}$  = coeficiente de equivalência estrutural do revestimento, base, sub-base e reforço do subleito, respectivamente.

A metodologia de dimensionamento de pavimentos do DNIT (2006) oferece restrição em alguns aspectos relacionados à sua aplicação direta ao dimensionamento de estradas de mina. São necessárias adaptações de diversos parâmetros para uso em mineração, como os apresentados abaixo:

- a) o fator de veículo, resultante do produto entre o fator de eixo e o fator de equivalência de carga, é calculado tomando-se como base carros de passeio, utilitários, ônibus, caminhões, reboques e semirreboques rodoviários;
- b) as tabelas de coeficiente de equivalência estrutural são voltadas para materiais betuminosos, pré-misturados e solos-cimentos;
- c) as tabelas de espessura de revestimento, em função do número equivalente de operações do eixo padrão, são baseadas em revestimentos betuminosos.

## 2.9 Método MEDINA

Devido ao aumento do volume de tráfego, a mudança nas características dos veículos, a maior volume de carga transportada e também a maior pressão de pneus dos veículos, a atualização do dimensionamento de pavimentos tornou-se necessária (DNIT, 2020).

Segundo Medina e Motta (2015), a mecânica dos pavimentos estuda o pavimento como o conjunto em camadas que estão sujeitas às cargas dos veículos. Em uma análise mecânica, pode-se incluir o cálculo de tensões, de deformações e de deslocamentos no pavimento utilizando programas computacionais.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) iniciou a adoção, em 2021, de mudança no método de dimensionamento de pavimentos. O Método de

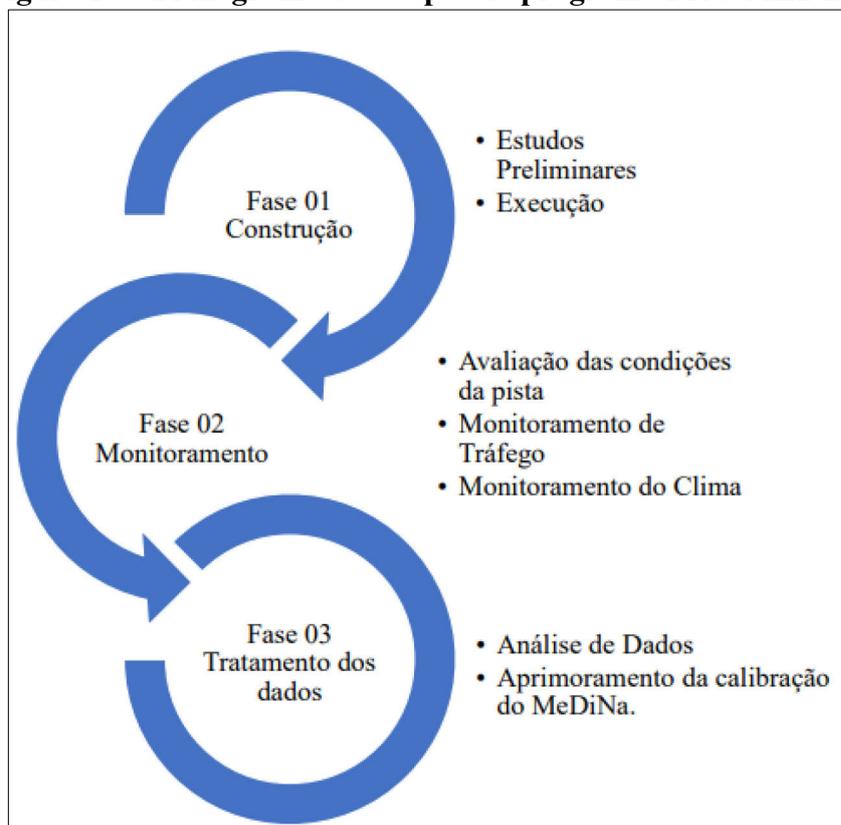
Dimensionamento Nacional (MEDINA) substitui o método empírico vigente. Com a implementação do novo método, espera-se maior vida útil do pavimento, possibilitando uma redução dos custos de manutenção (DNIT, 2020).

Os modelos estruturais precisam ser calibrados com a junção de dados, como as características dos materiais, as medições de deflexões, os deslocamentos, as pressões e a temperatura. O processamento da análise deve ser composto de parâmetros de comportamento e modelagem dos materiais, tais como o módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson (Medina; Motta, 2015).

Segundo o DNIT (2020), o sistema vigente se concentra no exame da deformação do subleito, enquanto o método MEDINA avalia toda a composição do pavimento, analisando tensões, deformações e deslocamentos, possibilitando, assim, um diagnóstico da deformação permanente das camadas e o dano por fadiga, tanto do revestimento quanto das camadas estabilizadas.

De acordo com o *Guia para execução de segmentos experimentais – PRO-MEDINA*, do DNIT (2020), o procedimento se divide em três fases: construção, monitoramento e tratamento de dados. A Figura 13 apresenta o fluxograma dessas fases.

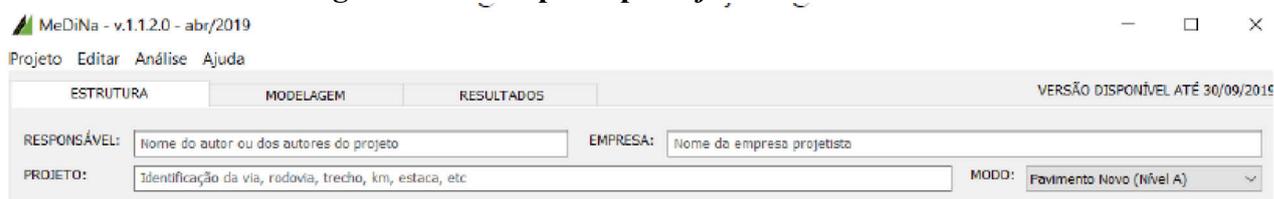
**Figura 13 – Fluxograma das etapas do programa PRO-MEDINA**



Fonte: DNIT, 2020.

Na fase de tratamentos dos dados, a calibração é feita no *software* MEDINA, conforme pode ser visto na Figura 14, que exhibe a tela principal programa.

**Figura 14 – Tela principal *software* MEDINA**



Fonte: Acervo da autora, 2022.

## 2.10 Conclusões em relação às referências bibliográficas

O comportamento mecânico do solo é relevante para o conhecimento do material. A granulometria, o limite de liquidez, o limite de plasticidade, o índice de grupo e o CBR são alguns dos parâmetros que podem ser analisados e que influenciam na capacidade de suporte do material.

Em relação ao material em estudo, que deverá ser utilizado em camadas de um pavimento, é um resíduo da mineração de minério de ferro. O Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais é um local onde encontram-se várias mineradoras que lidam com alguns aspectos em comum, como o armazenamento do rejeito.

Gentil (2020) estudou uma forma de reduzir o impacto ambiental das atividades mineradoras e o custo dos serviços de pavimentação de vias, considerando que a pavimentação de vias demanda grandes volumes de materiais de construções que podem onerar os serviços, dependendo principalmente da sua localidade. Nessa análise, utilizou o rejeito adicionando um estabilizante químico que apresentou resultados favoráveis, do ponto de vista técnico e com um custo atrativo, ao se comparar com materiais comumente encontrados no mercado e usados em obras de pavimentação.

Freire (2022) avaliou, em seu trabalho, a influência da adição de finos não plásticos no comportamento geomecânico e nos parâmetros últimos de um rejeito de minério de ferro. Essa análise é importante, já que, durante um empilhamento de rejeito filtrado, em que é recomendado manter um estado dilatante em condição drenada, o aumento no teor dos finos gera uma demanda nos estados de compactação que possibilite a obtenção de índices de vazios adequados e que possibilite um estado suficientemente denso em situações de tensão compatíveis com a estrutura final.

Já Faria (2022) estudou a abordagem integrada do comportamento do solo fornecida pela mecânica dos solos dos estados críticos. Ele comparou a capacidade preditiva de modelos constitutivos para a simulação do comportamento do rejeito de minério de ferro considerando o conceito de estado crítico em suas formulações. Conseqüentemente, a melhor aderência aos resultados experimentais evidenciou a importância da aplicação dos estados críticos nos estudos de tensão-deformação, a qual pode ser adotada na simulação do comportamento de estruturas submetidas a altas tensões.

Ainda considerando a ligação entre o setor da construção civil e a mineração, Fajardo (2023) estudou a produção de argamassas estruturais de alto desempenho com o uso de adição mineral de rejeito de minério de ferro *in natura*, adotando os conceitos de empacotamento de partículas e analisando os compostos hidratados, suas propriedades mecânicas e indicadores de durabilidade ao longo do tempo. Com os resultados obtidos, houve indicação de que, ao longo do tempo, a argamassa de rejeito de minério de ferro teve uma tendência de melhorias das propriedades e dos indicadores de durabilidade, tornando, assim, possível a utilização como adição mineral por meio do empacotamento de partículas para produzir argamassa de alto desempenho estrutural.

Em síntese, o material obtido como resíduo do beneficiamento de minério de ferro tem fomentado vários estudos, instigando a importância do setor minerário. Isso demonstra o interesse e a preocupação com a destinação final desse produto.

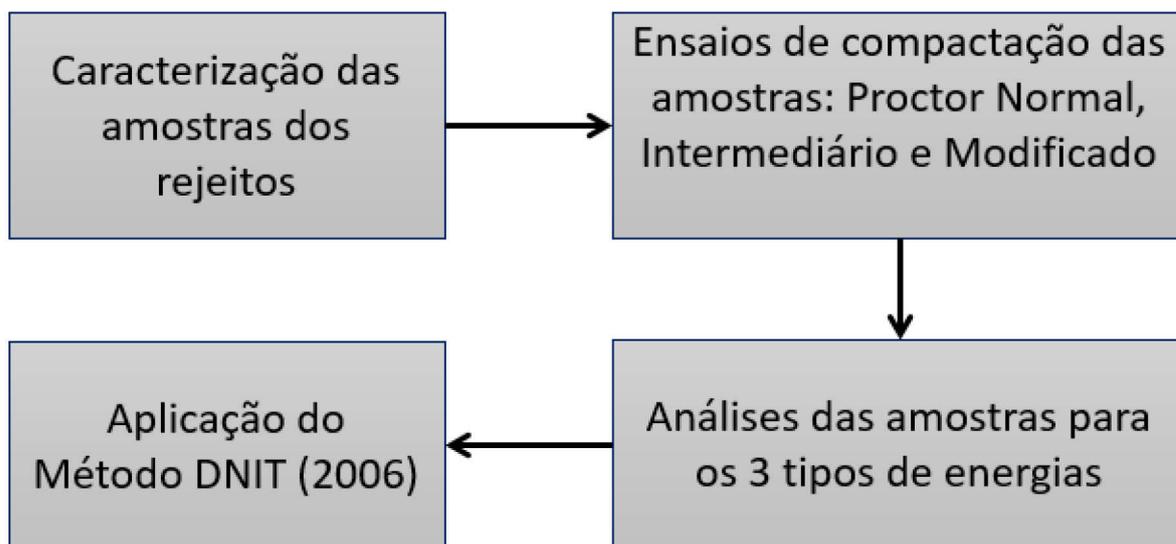
### 3 METODOLOGIA

Esta dissertação compreende o estudo do comportamento mecânico da infraestrutura das estradas de mina sob a utilização de resíduos da mineração a partir de análises laboratoriais. Além disso, observa o comportamento geotécnico e estrutural, à luz da mecânica dos pavimentos, do rejeito de minério de ferro aplicado como material de infraestrutura de estradas de mina.

Este capítulo apresenta os materiais e as etapas da metodologia, sendo elas: (i) análise laboratorial para a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, definindo os índices e características dos mesmos; (ii) análise de resultados da etapa anterior juntamente das normas para a verificação de camadas subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento de uma estrada de mina.

As etapas do trabalho de pesquisa estão evidenciadas no fluxograma da Figura 15.

**Figura 15 – Fluxograma de trabalho de pesquisa**

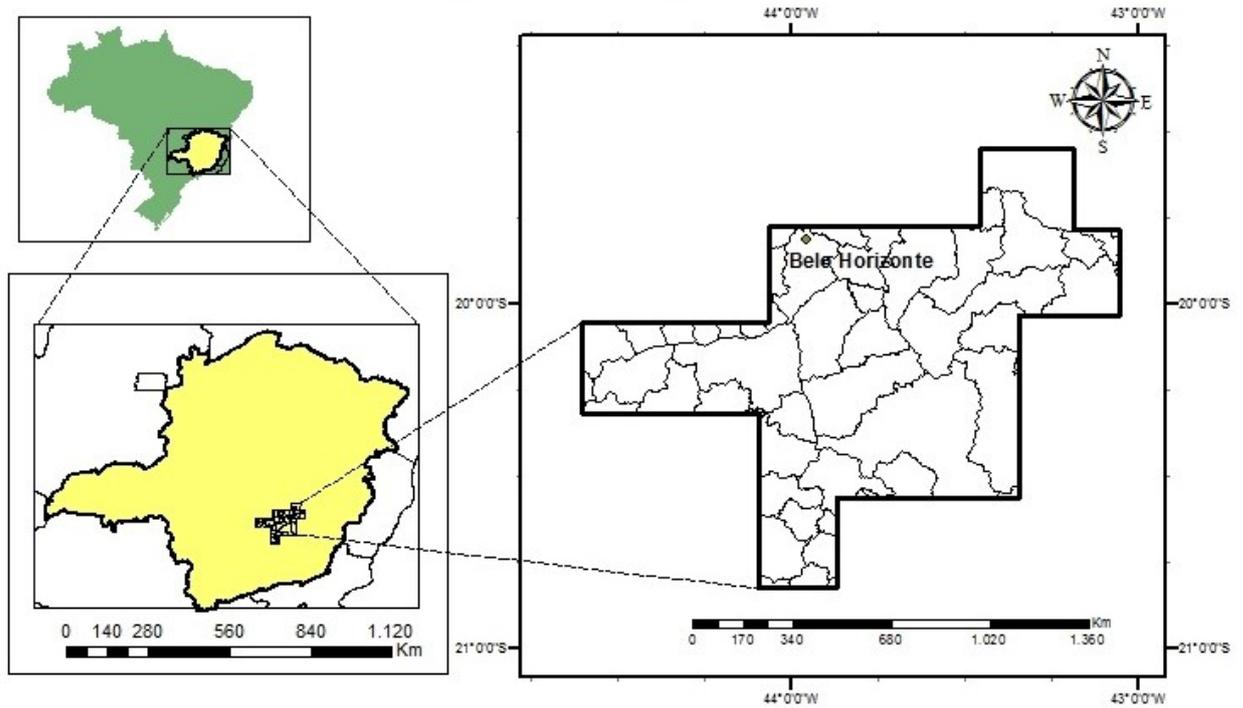


Fonte: Elaborada pela autora.

#### 3.1 Materiais

Com o intuito da utilização de resíduos da própria mineração para análise de camadas do pavimento, foram coletadas e analisadas amostras de rejeito de minério de ferro após o processo de filtragem. O produto utilizado para esta pesquisa, conhecido como rejeito de minério de ferro (*overflow* e *underflow*), foi fornecido por uma mineradora multinacional do Quadrilátero Ferrífero, conforme localização indicada na Figura 16.

**Figura 16 – Mapa do Quadrilátero Ferrífero**



Fonte: Cidades e Minerais, 2022.

### 3.2 Procedimentos de laboratório

A metodologia desenvolvida nesta pesquisa visou à identificação de uso do rejeito de minério de ferro como material a ser aplicado em camadas de um pavimento rodoviário. Primeiramente, houve a escolha do material a ser analisado. As amostras do rejeito estudado foram coletadas de uma pilha formada após o processo de filtragem ao qual é submetido. Esse resíduo é transportado por correias que o despejam em um pátio, formando várias pilhas – tal local pode ser visualizado na Figura 17.

Após a realização de coleta de seis amostras em pontos distintos na pilha, de forma organizada e etiquetada, estas foram preparadas para um ciclo de observações e análises laboratoriais.

**Figura 17 – Pilha de rejeito filtrado**



Fonte: Acervo da autora, 2022.

### **3.3 Coleta de amostras para ensaio laboratorial**

Foi realizada a coleta dos materiais, de forma organizada e etiquetada, os quais foram preparados para um ciclo de observações e análises laboratoriais. Cada componente foi submetido aos ensaios separadamente.

Foram determinadas, nos ensaios de laboratório, as seguintes especificações:

- a) espessuras e natureza granulométrica das camadas constituintes do pavimento;
- b) valores de densidade real dos grãos e aparente seca;
- c) umidades *in situ* e de laboratório;
- d) CBR, umidade ótima e expansão.

### **3.4 Ensaios de laboratório**

Com o intuito de avaliar os parâmetros fornecidos pelo rejeito de minério de ferro, foram feitos ensaios em laboratório especializado em controle de qualidade de materiais, atendendo às normas da ABNT, as quais estão descritas a seguir.

#### ***3.4.1 Análise granulométrica e densidade real***

A preparação das amostras foi feita de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a), intitulada como “Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização”. A Figura 18 apresenta o ensaio de caracterização do solo e a Figura 19

demonstra o ensaio de compactação do solo. Demais normativas utilizadas para a caracterização do rejeito são apresentadas a seguir:

- a) NBR 6458 (ABNT, 2016b): “Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água”; e
- b) NBR 7181 (ABNT, 2016e): “Solo – Análise granulométrica”.

**Figura 18 – Execução de ensaio de caracterização do solo**



Fonte: Acervo da autora, 2022.

**Figura 19 – Execução de ensaio de compactação de solos**



Fonte: Acervo da autora, 2022.

De acordo com Casagrande (1948), a classificação de solos preconiza dois coeficientes com a finalidade de definir a forma de graduação das partículas:

- $C_c$  – coeficiente de curvatura;
- CNU – coeficiente de não uniformidade.

A obtenção do cálculo desses coeficientes é demonstrada na Equação 12 e na Equação 13:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} \times D_{60})} \quad (\text{Equação 8})$$

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

$D_{10}$  = diâmetro correspondente ao valor de 10% das partículas passando na peneira x (10% das partículas são mais finas que o diâmetro efetivo), tomado na curva granulométrica;

$D_{30}$  = diâmetro correspondente a 30% das partículas passando na peneira x, tomado na curva granulométrica;

$D_{60}$  = diâmetro correspondente a 60% das partículas passando na peneira x, tomado na curva granulométrica.

De acordo com essa classificação, os agregados com o CNU, cujo valor é menor que 4, são materiais com graduação uniforme.

### 3.4.2 Índice de grupo

Segundo o DNIT (2006), o índice de grupo (IG) possui a finalidade de demonstrar os aspectos de plasticidade e a graduação do solo. A representação do IG é definida por um valor numérico inteiro, que pode variar de 0 a 20, e foi calculado pela Equação 14 a seguir:

$$IG = 0,2 a + 0,005 ac + 0,01 bd \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

a = porcentagem de material que passa na peneira nº 200, menos 35. Se a porcentagem obtida nessa diferença for maior que 75, adota-se 75; se for menor que 35, adota-se 35 (a varia de 0 a 40).

b = porcentagem de material que passa na peneira nº 200, menos 15. Se a porcentagem obtida nessa diferença for maior que 55, adota-se 55; se for menor que 15, adota-se 15 (b varia de 0 a 40).

$c$  = valor do limite de liquidez menos 40. Se o limite de liquidez for maior que 60, adota-se 60; se for menor que 40, adota-se 40 ( $c$  varia de 0 a 20).

$d$  = valor de índice de plasticidade menos 10. Se o índice de plasticidade for maior que 30, adota-se 30; se for menor que 10, adota-se 10 ( $d$  varia de 0 a 20).

### **3.4.3 Limites de Atterberg**

Os solos podem apresentar diferentes tipos de consistência, delimitando, assim, os possíveis estados em que se encontram, conforme a umidade identificada no solo. Esses estados são nomeados como limite de liquidez e limite de plasticidade. Os ensaios de limite de liquidez foram realizados de acordo com a norma NBR 6459 (ABNT, 2016c): “Solo – Determinação do limite de liquidez”. Os ensaios de limite de plasticidade estão de acordo com a norma NBR 7180 (ABNT, 2016d): “Solo – Determinação do limite de plasticidade”.

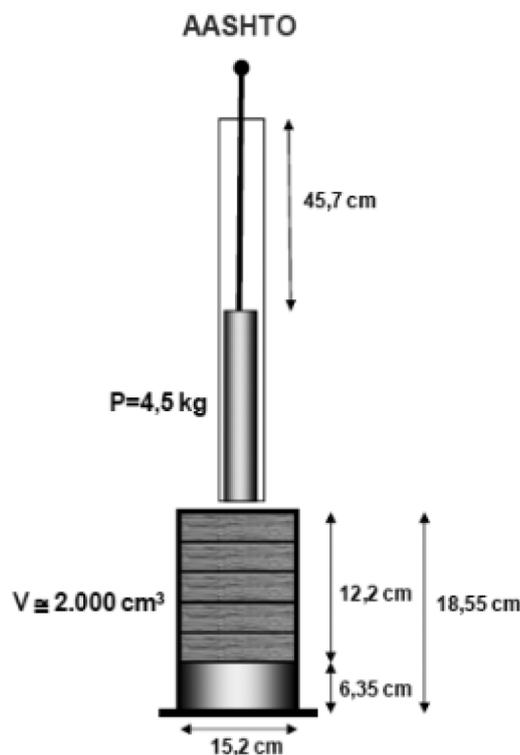
### **3.4.4 Compactação, CBR e expansão**

Os ensaios de compactação do rejeito foram realizados em conformidade com as normativas brasileiras, sendo elas NBR 6457 (ABNT, 2016a): “Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização”, e NBR 7182 (ABNT, 2016f): “Solo – Ensaio de compactação”. As energias de compactação utilizadas no material estudado foram normal, intermediária e modificada.

O método de ensaio mais adotado é aquele descrito pelo DNIT (2013) para amostras não trabalhadas, para o qual se usa o equipamento AASHTO, conforme pode ser visto na Figura 20. Utiliza-se esse equipamento para a realização dos três tipos de energias de compactação, sendo a energia normal compactando cinco camadas com 12 golpes. Para a energia intermediária, realizam-se 26 golpes e, ainda, para a energia modificada, um total de 55 golpes. Vale ressaltar que não há reaproveitamento do solo compactado, em que cada corpo de prova é compactado com amostra não utilizada.

Para os diferentes tipos de energia de compactação, se obtêm valores distintos para a umidade ótima e para a densidade máxima aparente seca, em que se nota que, ao crescer o esforço de compactação, a densidade máxima aumenta e a umidade ótima diminui. Quanto maior for o esforço de compactação, os grãos são forçados a ficarem mais próximos uns dos outros. No entanto, com baixas umidades existirá, um atrito grão a grão, que dificultará o esforço da compactação.

**Figura 20 – Representação esquemática das dimensões e peso do soquete AASHTO**



Fonte: DNIT, 2013.

Os ensaios de *California Bearing Ratio* (CBR) e expansão foram realizados com base na normativa NBR 9895 (ABNT, 2016g): “Solo – Índice de Suporte Califórnia”.

### 3.5 Dimensionamento de pavimento pelo método DNIT (2006)

O dimensionamento pelo método do DNIT (2006), no manual de pavimentação, consiste em ensaios geotécnicos de campo, baseando-se no controle de compactação AASHTO normal e no controle de umidade em um grau mínimo de 100%, que são correlacionados com os valores do peso específico seco máximo e de umidade ótima obtidos a partir de ensaios de compactação em laboratório. Para isso, utiliza-se o critério de CBR.

São usados coeficientes de equivalência estrutural baseados na pista experimental da AASHTO para os materiais integrantes do pavimento. A capacidade de suporte do subleito e dos materiais que compõem os pavimentos é obtida pelo método CBR, conforme diretrizes preconizadas pelo DNER.

A compactação do subleito e das demais camadas do pavimento deve ser feita de acordo com os valores apresentados nas especificações gerais dos materiais, não sendo recomendado que o grau de compactação estático seja inferior a 100% do que foi especificado.

Os materiais do subleito devem apresentar as seguintes características:

- $\text{CBR} \geq 2\%$ ;
- expansão  $\leq 2\%$ .

Para reforço do subleito, os materiais devem atender:

- $\text{CBR} >$  subleito;
- expansão  $< 1\%$  (medida com sobrecarga de 10 lb).

As classificações para os materiais da sub-base incluem uma exigência do índice de grupo:

- $\text{CBR} \geq 20\%$ ;
- expansão  $\leq 1\%$  (medida com sobrecarga de 10 lb);
- $\text{IG} = 0$ .

Já os materiais para a base devem apresentar a classificação abaixo:

- $\text{CBR} \geq 80\%$ ;
- expansão  $\leq 0,5\%$  (medida com sobrecarga de 10 lb);
- limite de liquidez  $\leq 25\%$ ;
- índice de plasticidade  $\leq 6\%$ .

Os materiais podem, ainda, ser designados como base em casos em que o limite de liquidez for maior que 25% e/ou o índice de plasticidade for maior que 6%, se o equivalente de areia for superior a 30, além, é claro, de atender as demais especificações, como o CBR e a expansão.

No entanto, existe mais uma particularidade para a aplicação de materiais da base que é citada para um número de repetições do eixo padrão que, durante o período do projeto  $N \leq 5 \times 10^6$ , podem ser utilizados materiais com  $\text{CBR} \geq 60\%$  e que estejam dentro das faixas granulométricas E e F da Figura 21.

Existem parâmetros de faixas granulométricas às quais as bases granulares devem se enquadrar, conforme pode ser visto na figura abaixo, em que a fração que passa na peneira nº 200 deve ser inferior a 2/3 da fração que passa na peneira nº 40. A fração graúda deve apresentar um desgaste de *Los Angeles* igual ou inferior a 50.

**Figura 21 – Granulometria para base granular**

Tipos	Para $N > 5 \times 10^6$			Para $N < 5 \times 10^6$			Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	$\pm 7$
1"	-	75-90	100	100	100	100	$\pm 7$
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	$\pm 7$
N° 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	$\pm 5$
N° 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	$\pm 5$
N° 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	$\pm 2$
N° 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	$\pm 2$

Fonte: DNIT, 2006.

### 3.6 Influência da energia de compactação

O Ensaio de Proctor Normal é utilizado para determinação da densidade seca máxima e da umidade ótima de um solo, não podendo ser considerados como índices físicos do solo. Na realidade, esses valores são dependentes da energia aplicada. A norma NBR 7182 (ABNT, 2016f), “Solo – Ensaio de compactação”, fornece as técnicas necessárias para aplicação em laboratório. As energias de compactação utilizadas no material estudado foram energia normal, intermediária e modificada.

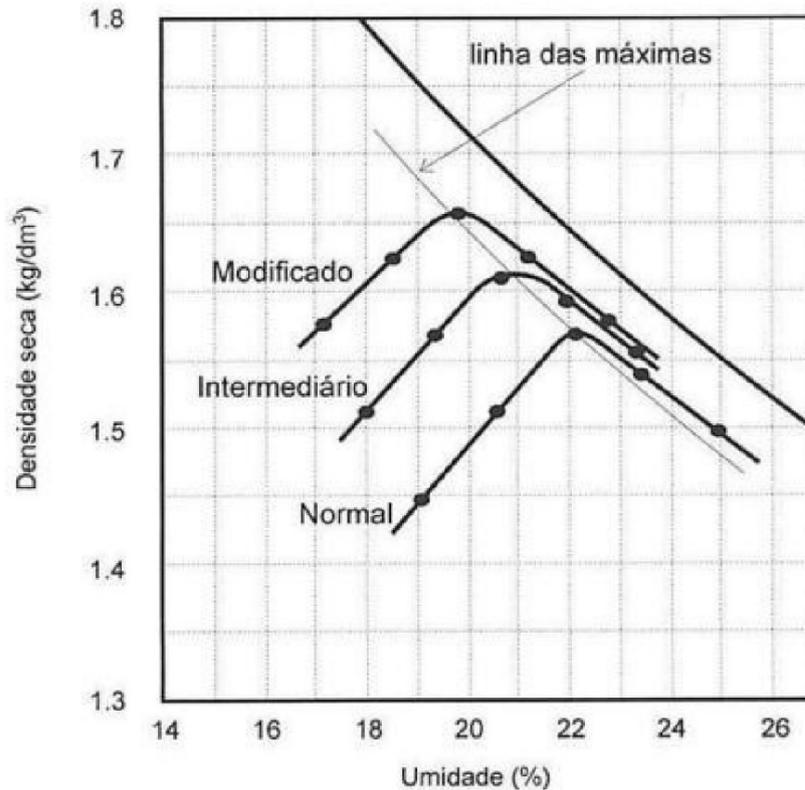
Segundo Pinto (2006), o Ensaio de Proctor Modificado é designado como um referencial para a compactação das camadas mais importantes dos pavimentos. Isso porque a melhoria das propriedades do solo é uma característica importante para o seu comportamento nas solicitações pelo tráfego. Dessa forma, é plausível a aplicação de uma maior energia de compactação, o que ocasiona, conseqüentemente, um custo maior.

A aplicação de uma maior energia de compactação em um solo com uma umidade abaixo da ótima gera aumento de densidade seca, mas, se a umidade for maior que a ótima, o maior esforço da compactação gera pouco ou nada de aumento da densidade, pois não se consegue expelir o ar dos vazios. Em campo, quando um equipamento compactador passa e o solo se encontra muito úmido, faz com que o solo se comprima na passagem do equipamento, para, logo em seguida, se dilatar, como se fosse uma borracha, por isso o fenômeno é conhecido na engenharia como borrachudo. Na realidade, o que se comprimem são as bolhas de ar ocluso (Pinto, 2006).

Portanto, conclui-se que uma maior energia de compactação, de acordo com Pinto (2006), provoca uma maior densidade seca máxima e uma menor umidade ótima, gerando um

deslocamento da curva obtida pelo ensaio para a esquerda e para cima, conforme pode ser visto na Figura 22. Essa curva tem uma semelhança com a curva de grau de saturação, em que ficam os pontos de máxima densidade seca e umidade ótima para várias energias de compactação com o mesmo solo.

**Figura 22 – Curvas de compactação de um solo com diferentes energias**



Fonte: Pinto, 2006.

## 4 RESULTADOS ENCONTRADOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios de laboratórios realizados para redigir esta dissertação. Eles serão discutidos de acordo com as normas de projeto e construção de um pavimento rodoviário.

### 4.1 Rejeito de minério de ferro

#### 4.1.1 Análise granulométrica e densidade real

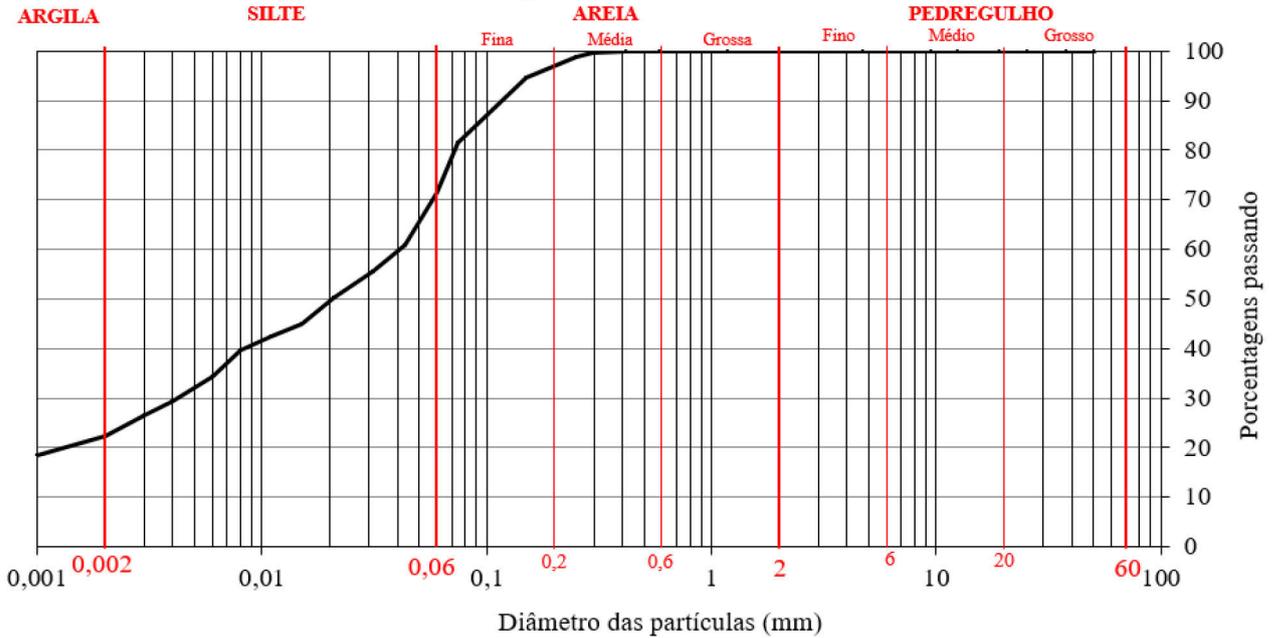
Na Tabela 4 são apresentadas as porcentagens passantes nas peneiras das amostras do material estudado na pesquisa. As curvas granulométricas podem ser vistas em Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27 e Figura 28, de acordo com a identificação das amostras, respectivamente. A nomenclatura utilizada nas amostras é apenas para fins de identificação.

**Tabela 4 – Porcentagem passante por peneira**

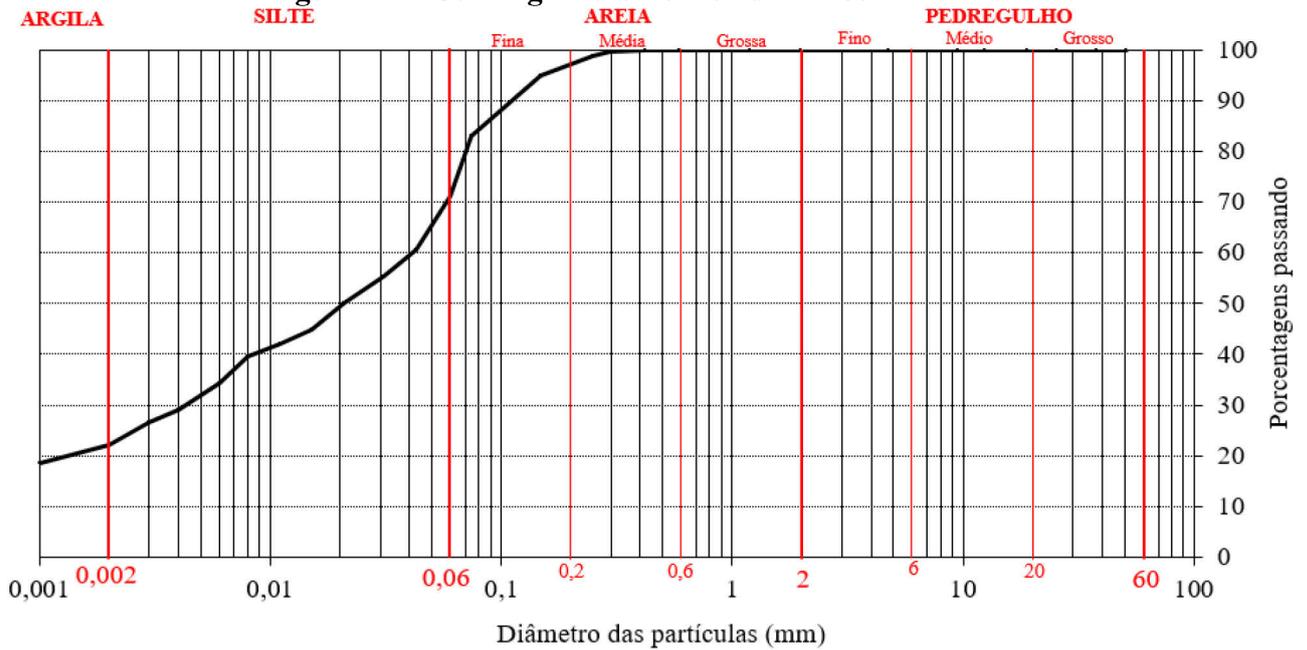
<b>Amostras</b>	<b>Peneiras</b>	<b>10</b>	<b>16</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>200</b>
Amostra 1-A		100	100	99,97	99,89	99,74	98,89	94,70	81,41
Amostra 1-B		100	100	99,99	99,93	99,77	98,94	94,85	83,00
Amostra 2-A	% Passante	100	99,97	99,91	99,81	99,61	98,69	94,51	81,63
Amostra 2-B		100	99,99	99,94	99,87	99,71	98,82	94,73	82,41
Amostra 3-A		100	99,99	99,94	99,83	99,55	98,38	94,04	81,89
Amostra 3-B		100	100	99,97	99,89	99,67	98,59	65,61	56,36

Fonte: Elaborada pela autora.

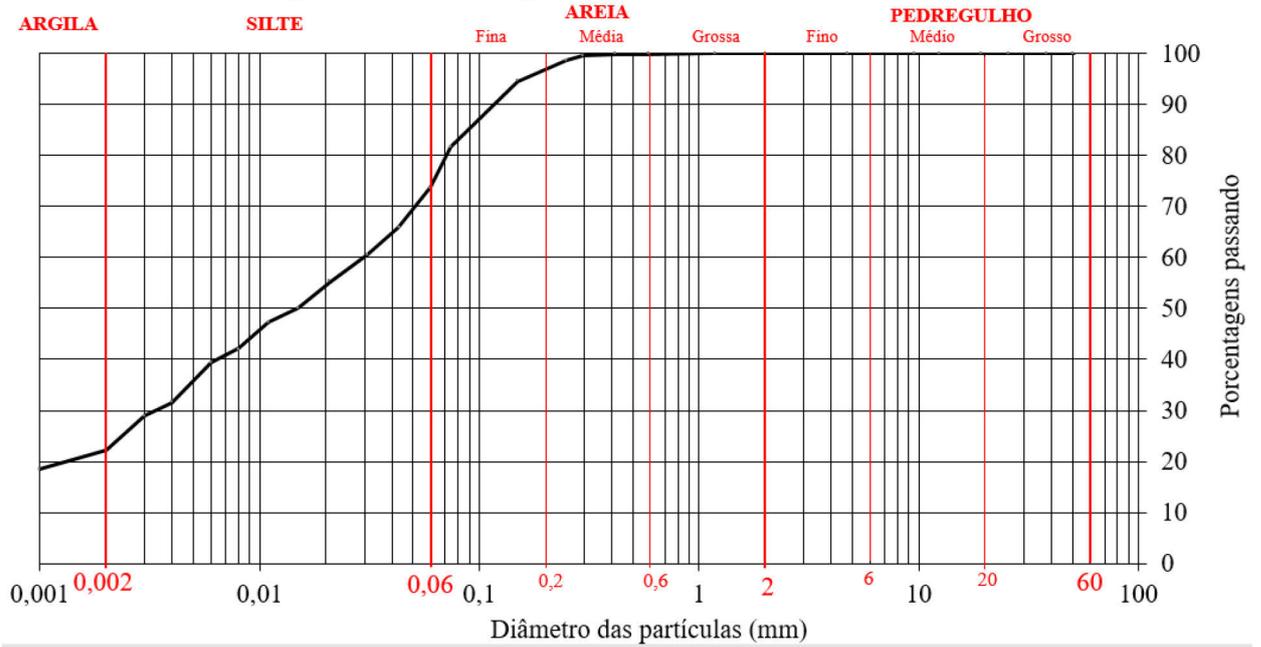
**Figura 23 – Curva granulométrica da Amostra 1-A**



**Figura 24 – Curva granulométrica da Amostra 1-B**

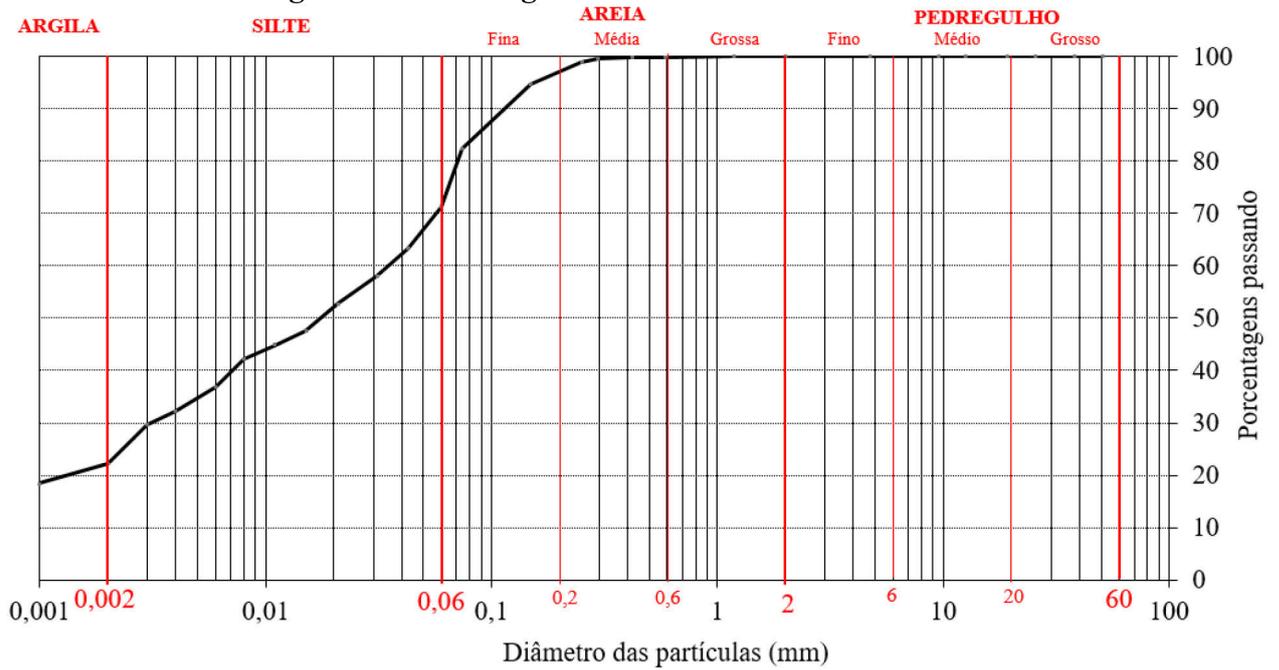


**Figura 25 – Curva granulométrica da Amostra 2-A**



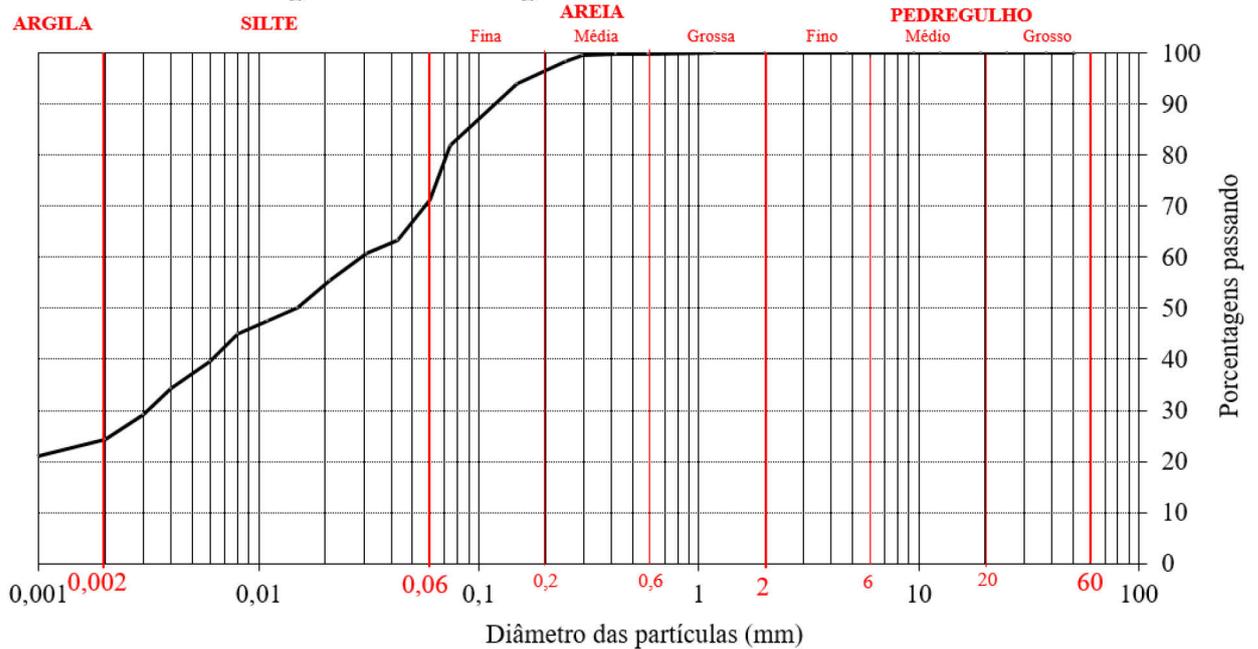
Fonte: Elaborada pela autora.

**Figura 26 – Curva granulométrica da Amostra 2-B**



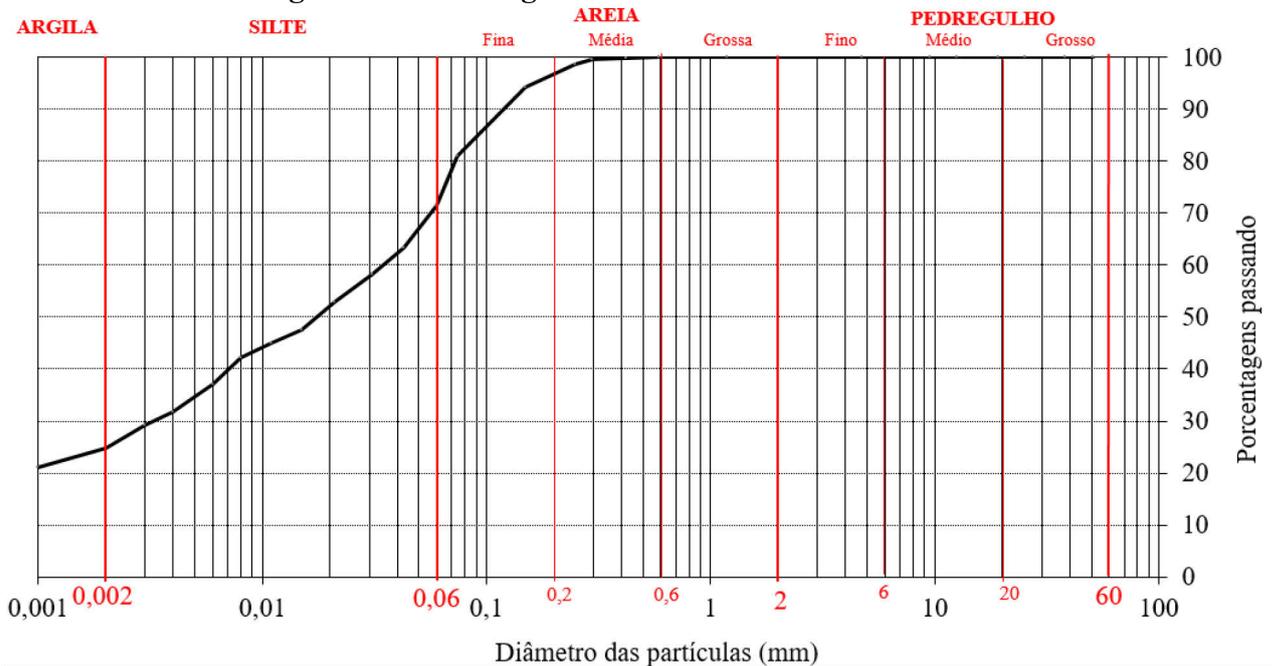
Fonte: Elaborada pela autora.

**Figura 27 – Curva granulométrica da Amostra 3-A**



Fonte: Elaborada pela autora.

**Figura 28 – Curva granulométrica da Amostra 3-B**



Fonte: Elaborada pela autora.

Ao analisar as curvas granulométricas das amostras, foi possível observar as porcentagens de argila, silte, areia e pedregulho. Na Tabela 5 são apresentadas as frações dos materiais ensaiados.

**Tabela 5 – Frações do material de acordo com a granulometria**

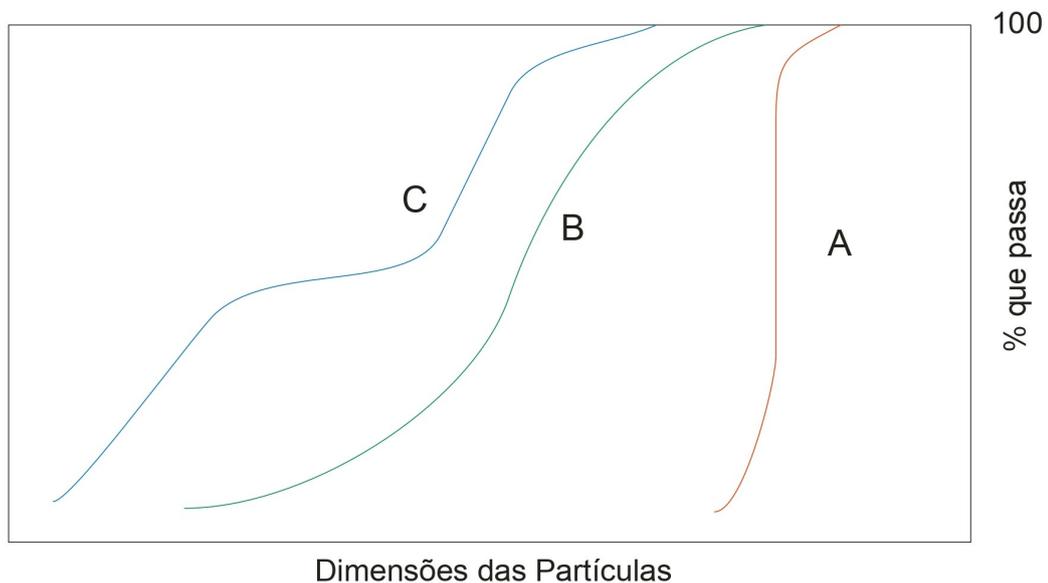
<b>Amostras</b>	<b>Argila(%)</b>	<b>Silte(%)</b>	<b>Areia(%)</b>	<b>Pedregulho(%)</b>
Amostra 1-A	20,40	61,01	18,59	0
Amostra 1-B	20,31	62,70	17,00	0
Amostra 2-A	20,28	61,35	18,37	0
Amostra 2-B	20,32	62,10	17,59	0
Amostra 3-A	22,75	59,17	18,11	0
Amostra 3-B	22,99	58,02	18,99	0

Fonte: Elaborada pela autora.

Pela análise das figuras das curvas granulométricas, da Tabela 4 e da Tabela 5, constata-se que o material possui maior porcentagem de silte, sendo classificado como silte argiloarenoso sem pedregulhos.

Para a análise dos parâmetros de uniformidade e curvatura do material, utilizam-se os valores de  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  e  $D_{60}$ , para o cálculo do CNU e  $C_c$ , conforme preconizado por Casagrande (1948). No entanto, ao analisarmos as curvas granulométricas obtidas nos ensaios das amostras, constata-se que o valor de  $D_{10}$  não foi obtido para esse tipo de material.

Com os resultados obtidos pelo ensaio de análise granulométrica, é possível traçar uma curva em um diagrama semilogarítmico com as dimensões das partículas e as porcentagens de materiais que passam. De acordo com o DNIT (2006), a curva granulométrica pode ser utilizada para classificar os tipos de granulometria, conforme a Figura 29. Nessa classificação a curva A é identificada como granulometria uniforme, a curva B, para bem graduada e, para a curva C, tem-se uma mal graduada.

**Figura 29 – Dimensões das partículas**

Fonte: DNIT, 2006.

Portanto, a classificação do solo de acordo com a granulometria foi realizada nesta pesquisa conforme o DNIT (2006). Com os resultantes obtidos no ensaio de granulometria, é possível observar, ao se fazer uma comparação com a curva de dimensões das partículas apresentada pelo DNIT, que a granulometria das amostras são caracterizadas como típicas de um material com granulometria mal graduada, pois a distribuição dos tamanhos das partículas do solo não acontece de forma equilibrada. O material observado nesta dissertação possui uma concentração elevada de partículas menores, não possuindo identificação de materiais granulares, portanto, é considerado como não uniforme.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados dos ensaios de densidade real dos grãos para o material em questão.

**Tabela 6 – Densidade real dos grãos**

<b>Material</b>	<b>Densidade real dos grãos (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Amostra 1-A	2,19
Amostra 1-B	2,18
Amostra 2-A	2,20
Amostra 2-B	2,19
Amostra 3-A	2,19
Amostra 3-B	2,19

**Fonte: Elaborado pela autora.**

Ainda de acordo com a norma do DNIT (2006), o material designado para suporte de camada de base de pavimento possui uma faixa de porcentagem passando na peneira nº 200, sendo ela variando de 2% a 25%, conforme pode ser visto na Figura 21. Portanto, o material estudado não atende ao requisito da norma para esse tipo de camada, pois, na maioria das amostras, foi observado mais de 80% passante na peneira nº 200.

#### **4.1.2 Índice de grupo**

Para o cálculo do índice de grupo do material ensaiado, utilizou-se o *Manual de pavimentação*, do DNIT (2006). O resultado das amostras é apresentado na Tabela 7 .

**Tabela 7 – Índice de grupo**

<b>Amostras</b>	<b>IG</b>
Rejeito de minério de ferro	8

**Fonte: Elaborado pela autora.**

O índice de grupo é um valor numérico que espelha as características de plasticidade e da graduação das partículas do solo. Segundo o DNIT (2006), esse valor varia de 0 a 20 e está relacionado com o índice de suporte que é utilizado na avaliação da qualidade do material. Quanto mais baixo o valor do índice de grupo, melhor será a competência do material para suporte da camada de pavimento.

Em geral, os solos granulares têm índice de grupo compreendidos entre 0 e 4, os siltosos entre 1 e 12 e os argilosos entre 1 e 20.

Pela análise do valor calculado de IG encontrado para o material representa uma granulometria não uniforme e uma baixa plasticidade. Segundo a norma do DNIT (2006), para as camadas de subleito e reforço de subleito, não se tem valores estabelecidos para o índice de grupo. No entanto, para a camada de sub-base, estima-se que  $IG = 0$  para qualquer tipo de tráfego. Logo, conclui-se que o material estudado não se enquadra no quesito de índice de grupo para a camada de sub-base.

#### **4.1.3 Ensaios de limites de Atterberg**

Os ensaios de limites de Atterberg para o material são apresentados na Tabela 8. De acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016f), “Solo – Ensaio de compactação”, esses limites são baseados na verificação de que um solo argiloso ocorre com aspectos bem distintos, a depender do seu teor de umidade. A consistência delimita os possíveis estados que o solo pode apresentar conforme a umidade, sendo eles o limite de liquidez e o limite de plasticidade. A diferença obtida desses limites é definida como o índice de plasticidade e caracterizada por uma faixa de valores em que o solo se apresenta plástico.

<b>Material</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP (%)</b>
Amostra 1-A	16,00	10,40	5,60
Amostra 1-B	16,30	10,28	6,02
Amostra 2-A	16,01	10,40	5,61
Amostra 2-B	15,30	11,40	3,90
Amostra 3-A	15,30	11,20	4,10
Amostra 3-B	16,10	11,40	4,70

**Fonte: Elaborada pela autora.**

O sistema da classificação unificada apresentado por Casagrande (1948) denomina secundariamente este caso como intermediário, classificando, assim, como silte de alta

compressibilidade e de baixa compressibilidade, em que as duas classificações podem ser apresentadas.

De acordo com os valores recomendados pelo *Manual de pavimentação*, do DNIT (2006), para ser utilizado em camadas de pavimento, são:

- $LL \leq 25$ ;
- $IP \leq 6$ .

Ao se analisarem os resultados apresentados na Tabela 8 e as orientações do manual do DNIT (2006), pode-se concluir que o material em estudo apresenta as características adequadas para o enquadramento nas especificações.

Para Pinto (2006), os índices de consistência possuem grande significância para a identificação dos solos e sua classificação. É possível prever o comportamento um solo através do seu conhecimento com base em experiências passadas.

#### ***4.1.4 Classificação Transportation Research Board (TRB)***

Ao se usar a tabela adotada pela AASHTO (Figura 30), encontra-se a classificação dos solos (TRB) a partir dos dados obtidos da análise granulométrica, dos limites de consistência e do índice de grupos. Para a utilização da tabela, determina-se o grupo do solo por processo de eliminação da esquerda para a direita, no quadro de classificação. O primeiro grupo, a partir da esquerda, com o qual os valores do solo ensaiado coincidirem, será a classificação correta.

Verifica-se na tabela que os solos grossos foram divididos em três grupos: A-1, A-2 e A-3; enquanto os solos finos foram divididos em quatro grupos: A-4, A-5, A-6 e A-7.

**Figura 30 – Classificação dos solos (TRB)**

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

\* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: DNIT, 2006.

A classificação em grupo do material é denominada A-4, que é um solo siltoso. Ao se analisar a classificação, o material é caracterizado com um comportamento de subleito de “sofrível a mau”. Essas classificações não enquadram os solos tropicais.

De acordo com o DNIT (2006), o solo típico do grupo A-4 é siltoso não plástico, ou moderadamente plástico, possuindo, geralmente, 5% ou mais, passando na peneira nº 200. Inclui também misturas de solo fino siltoso com até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº 200. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 8, as percentagens crescentes de material grosso, dando origem a valores decrescentes para os índices de grupo.

#### 4.1.5 Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)

O SUCS é oriundo do Airfield Classification System e foi idealizado por Arthur Casagrande. Inicialmente utilizado para classificação de solos para construção de aeroportos, foi expandido para outras aplicações e normalizado pela American Society for Testing and

Materials (ASTM). Ele se baseia na identificação dos solos de acordo com suas qualidades de textura e plasticidade, agrupando-os conforme seu comportamento, quando usados em estradas, aeroportos, aterros e fundações (DNIT, 2006). Nesse sistema, consideram-se as seguintes características dos solos:

- a) percentagens de pedregulhos, areia e finos (fração que passa na peneira nº 200: silte e argila);
- b) forma da curva granulométrica;
- c) plasticidade e compressibilidade.

Os solos, nesse sistema, são classificados em grossos, finos e altamente orgânicos. Para a fração grossa, foram mantidas as características granulométricas como parâmetros mais representativos para a sua classificação (mais de 50% em peso retido na peneira nº 200), enquanto, para a fração fina, optou-se por usar os limites de consistência, por serem parâmetros mais importantes do que o tamanho das partículas (mais de 50% em peso passando na peneira nº 200). Já os solos altamente orgânicos são facilmente identificáveis pelo seu aspecto. O critério granulométrico utilizado é divergente do correspondente à classificação do TRB e da AASHTO.

Para a aplicação do SUCS, são fornecidos, conforme descritos na Figura 31, a seguir, os métodos de identificação de campo e de laboratório e as características dos grupos de solos referentes a estradas e aeroportos. Cada tipo de solo terá um símbolo e um nome. Os nomes dos grupos serão simbolizados por um par de letras, em que o prefixo é uma das subdivisões ligada ao tipo de solo e o sufixo, às características granulométricas e à plasticidade. Nas duas últimas colunas da figura seguinte estão indicados os símbolos de cada grupo e seus respectivos nomes.

**Figura 31 – Sistema unificado de classificação de solos**

<b>SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA:</b> mais de 50% retido na peneira nº 200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº 4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped.com pouco ou nenhum fino.
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e ped.com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulho com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped.areia e silte.
			GC	Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped.areia e argila.
	Areias: 50% ou mais da fração graúda passando na peneira nº 4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte.
			SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila.
<b>SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA:</b> 50% ou mais passando pela peneira nº 200	SILTES e ARGILAS com $LL \leq 50$	ML	Siltes inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas.	
		CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.	
		OL	Siltes orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.	
	SILTES e ARGILAS com $LL > 50$	MH	Siltes - Areias finas ou siltes micáceos - Siltes elásticos.	
		CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.	
		OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade.	
	Solos Altamente Orgânicos		PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos.

Fonte: DNIT, 2006.

As vantagens do emprego do SUCS estão no exercício da identificação de campo, na adoção de uma simbologia que diz da natureza do solo e no valor prático das indicações que a classificação proporciona a vários ramos da engenharia de solos. No entanto, essas classificações não enquadram os solos tropicais.

O material analisado nesta pesquisa é caracterizado como solo fino. Nessa classificação foram colocados os solos que têm uma porcentagem maior ou igual a 50% de partículas com tamanho menor do que 0,075mm (passando na peneira nº 200). Esses solos, siltes e argilas, foram inicialmente separados em função do limite de liquidez: menor que 50% e maior ou igual a 50%. Cada uma dessas subdivisões leva em conta a origem inorgânica ou orgânica do solo. Para a definição de origem orgânica, foram realizados dois ensaios de limite de liquidez: um com o solo secado em estufa, (LL)<sub>s</sub>, e o outro nas condições naturais, (LL)<sub>n</sub>. Se a relação  $(LL)_s / (LL)_n < 0,75$ , o solo deverá ser considerado orgânico.

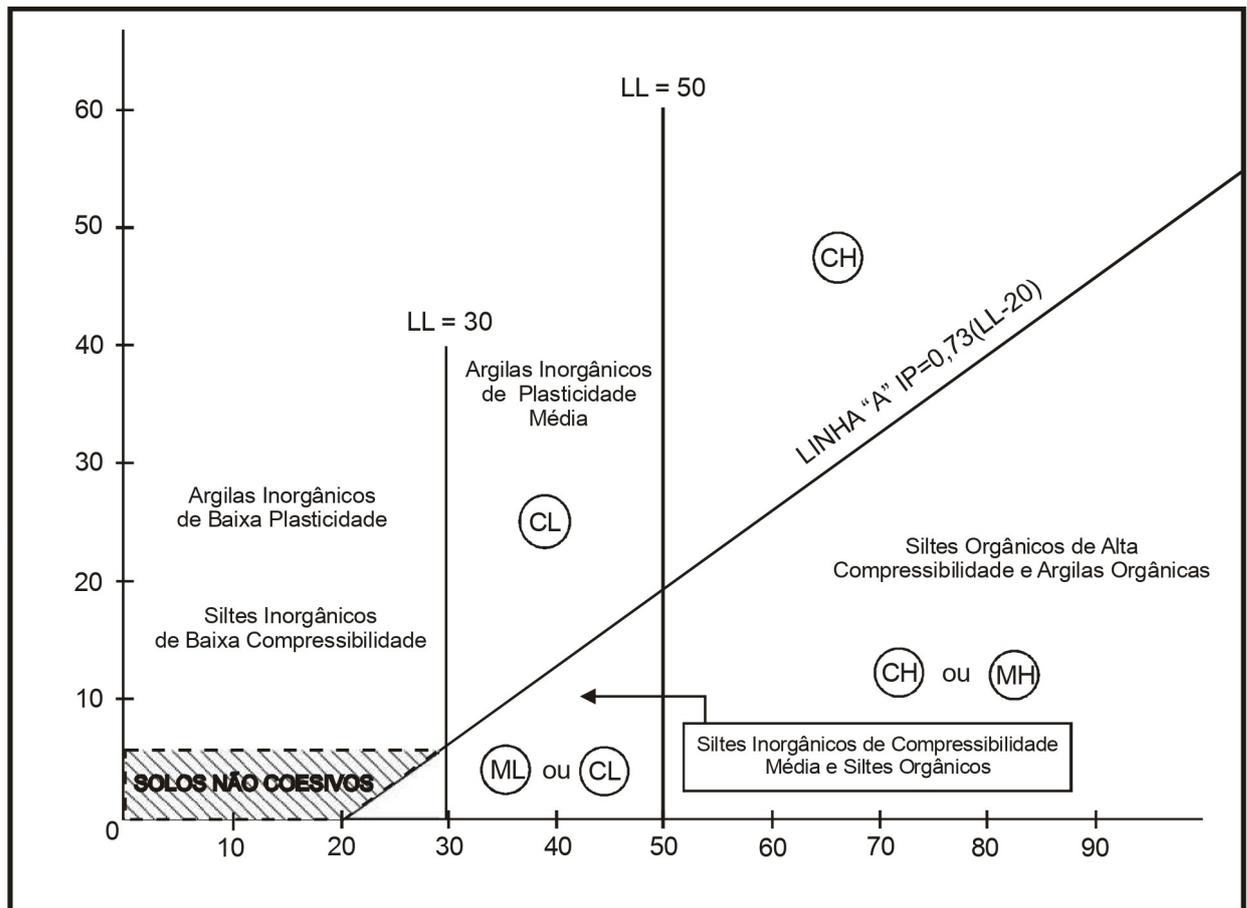
Quando da proposição inicial do sistema de classificação por Casagrande, foi introduzido o gráfico de plasticidade, montado a partir dos limites de consistência dos solos finos. Ele é basicamente um diagrama cartesiano com limite de liquidez (LL) em abcissas e o índice de plasticidade (IP) em ordenadas, em que são traçadas duas linhas: uma reta inclinada, chamada linha “A”, e outra vertical, com  $LL = 50$ . Conforme apresentado na Figura 32, a linha “A” representa uma importante fronteira empírica entre as argilas tipicamente sem matéria orgânica (CL e CH), em geral acima dessa linha; os solos plásticos contendo colóides orgânicos

(OL e OH) ou solos siltosos sem matéria orgânica (ML e MH). A linha vertical  $LL = 50$  separa os siltes e argilas com baixo  $LL$  (L) daqueles que têm  $LL$  alto (H).

Ainda de acordo com o DNIT (2006), na parte inferior do gráfico, abaixo de  $LL = 50$ , com  $IP$  entre 4 e 7, há considerável superposição nas propriedades dos solos argilosos e dos siltosos. Por esse motivo, a linha “A” nessa zona transforma-se numa área, e os solos situados ali são classificados como limítrofes. A experiência tem demonstrado que a compressibilidade é aproximadamente proporcional ao  $LL$  e que os solos com o mesmo  $LL$  têm, bem próximos, a mesma compressibilidade, supondo que os outros fatores sejam essencialmente os mesmos.

De acordo com a norma, verificou-se que, nos solos com o mesmo  $LL$ , quando aumenta o  $IP$ , as características coesivas crescem e a permeabilidade diminui.

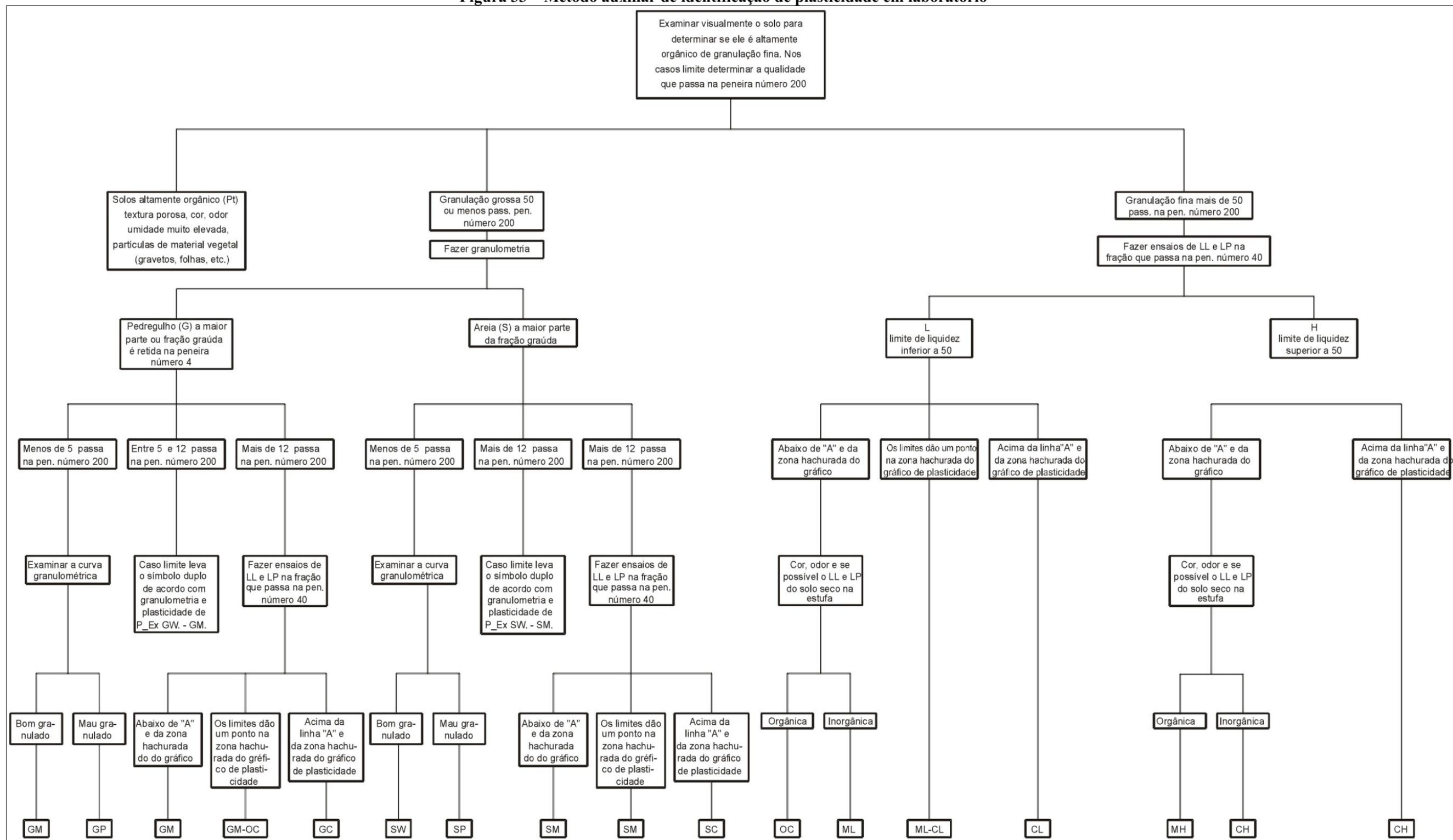
**Figura 32 – Gráfico de plasticidade**



Fonte: DNIT, 2006.

Para identificação da plasticidade em laboratório, utiliza-se o método auxiliar, conforme apresentado na Figura 33.

**Figura 33 – Método auxiliar de identificação de plasticidade em laboratório**



Fonte: DNIT, 2006.

Ao se analisar o material desta pesquisa para a classificação do SUCS, de acordo com a Figura 31, se enquadra como ML, que é considerado para material siltoso e areias muito finas, pó de pedra, areias finas siltosas ou argilosas, ou siltes argilosos com baixa plasticidade. O símbolo M serve para indicar solos com predominância de silte, solos micáceos e solos diatomáceos, e o símbolo L representa LL baixo. Existe uma linha divisória arbitrária no  $LL = 50$  para dividir dois grupos, esses solos são siltes arenosos ou argilosos, sem matéria orgânica, com plasticidade relativamente baixa. Incluem solos do tipo loess e o pó de pedra.

De forma similar, ao se analisar, com base no método auxiliar de identificação de plasticidade de laboratório, o material é caracterizado como ML-CL, em que ML são materiais siltosos e areias muito finas e CL são argilas de baixa plasticidade. Dentre essas possibilidades de grupos, conclui-se que a classificação é ML devido aos resultados da análise granulométrica, a qual indicou que o material possui maior porcentagem de silte.

#### 4.1.6 Compactação, expansão e CBR

Foram realizados ensaios de compactação para os três tipos de *proctor*, sendo eles: Proctor Normal, Proctor Intermediário e Proctor Modificado. Os resultados dos parâmetros dos ensaios de compactação, expansão e *California Bearing Ratio* (CBR) são apresentados na Tabela 9, na Tabela 10 e na Tabela 11, respectivamente.

**Tabela 9 – Resultados dos parâmetros do ensaio de compactação normal, expansão e CBR**

Amostras	Wót (%)	$\gamma_{s,máx}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Expansão (%)	CBR (%)
Amostra 1-A	13,7	2,245	1,0	11,8
Amostra 1-B	12,8	2,244	1,1	9,6
Amostra 2-A	12,8	2,251	1,2	11,6
Amostra 2-B	13,7	2,245	1,1	11,1
Amostra 3-A	12,9	2,233	1,2	11,6
Amostra 3-B	13,6	2,24	1,1	11,2

Fonte: Elaborada pela autora.

**Tabela 10 – Resultados dos parâmetros do ensaio de compactação intermediária, expansão e CBR**

Amostras	Wót (%)	$\gamma_{S,m\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Expansão (%)	CBR (%)
Amostra 1-A	11,7	2,338	0,8	13,8
Amostra 1-B	11,3	2,332	0,9	14,1
Amostra 2-A	12,2	2,329	0,9	13,1
Amostra 2-B	11,5	2,326	0,9	13,5
Amostra 3-A	11,1	2,331	1,0	13,7
Amostra 3-B	11,1	2,336	0,9	13,7

Fonte: Elaborada pela autora.

**Tabela 11 – Resultados dos parâmetros do ensaio de compactação modificada, expansão e CBR**

Amostras	Wót (%)	$\gamma_{S,m\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Expansão (%)	CBR (%)
Amostra 1-A	11,2	2,397	0,3	17,9
Amostra 1-B	11,1	2,393	0,3	18,3
Amostra 2-A	11,1	2,397	0,1	19,8
Amostra 2-B	11,2	2,404	0,2	17,4
Amostra 3-A	10,8	2,404	0,1	17,3
Amostra 3-B	10,4	2,388	0,2	18,0

Fonte: Elaborada pela autora.

Segundo Pinto (2006), os solos siltosos apresentam valores baixos de densidades secas e com curvas bem abatidas. O material em estudo foi representado por densidades altas, acima de 2,2 g/cm<sup>3</sup>. Conforme observado por Machado (2022), um dos principais constituintes do rejeito de minério de ferro é a hematita (Hm), o que justifica o elevado valor do peso específico dos sólidos do material. No entanto, é sabido que, para solos finos, incluindo solos arenosos, o CBR teve uma variação de 8 a 20%.

Em uma camada de subleito, a energia de compactação a ser utilizada é a do Proctor Normal, em que o valor da expansão deve ser menor ou igual a 2% e CBR deve ser maior ou igual a 2%, de acordo com o manual do DNIT (2006). Conforme os resultados apresentados, o material ensaiado é adequado para ser utilizado como subleito, pois a média das amostras para a expansão foi 1,12%, enquanto o CBR foi de 11,15%.

Ao se analisarem os resultados obtidos para os diferentes tipos de ensaios de *proctor*, observa-se que, à medida que se aumenta a energia de compactação, a porcentagem da expansão reduz, enquanto a do CBR aumenta. Isto se caracteriza como uma medida adotada para buscar melhorar o comportamento do solo, no quesito de capacidade estrutural. A energia de compactação empregada rearranja os sólidos do solo, buscando um maior contato e diminuindo os índices de vazios.

Nos resultados encontrados para os ensaios do Proctor Intermediário, observa-se a diferença dos valores para a expansão e o CBR, se comparados aos ensaios para o Proctor Normal, em que a média das amostras foram para a expansão de 0,9% e o CBR, 13,65%. É notoriamente observada também a diferença para o Proctor Modificado. Com esses valores obtidos, de diferentes energias de compactação, o material pode ser caracterizado como utilizável para reforço de subleito.

No ensaio do Proctor Modificado os resultados apresentaram uma queda de mais de 80% para a expansão e um aumento de aproximadamente 62% para o CBR, ao avaliar com o Proctor Normal. Os valores encontrados para a média das amostras foram, para a expansão, 0,2% e, para o CBR, 18,1%.

Fazendo uma análise quanto à umidade ótima das amostras em cada ensaio de compactação realizado, é possível notar uma pequena queda da umidade ótima à medida que se aumenta a energia de compactação. A variação observada da umidade ótima do ensaio de compactação do Proctor Normal para o Proctor Modificado foi de cerca de 2,3%. Nota-se ainda que a perda da umidade ótima ocorreu em uma grandeza maior do Proctor Normal para o Proctor Intermediário do que do Proctor Intermediário para o Modificado. Infere-se, portanto, que, apesar do aumento da energia, a umidade ótima tende a diminuir em uma menor variação.

Apesar do ganho representativo com as alterações de energias durante os ensaios, tais resultados não foram satisfatórios para atestar a utilização do material como camada de sub-base de pavimento. Analisando os requisitos do DNIT (2006), o material, para ser designado como competente para sub-base, necessita de uma expansão menor ou igual a 1%, parâmetro atendido com a utilização do aumento da energia, CBR maior ou igual a 20% e IG = 0, sendo estes dois últimos não atendidos.

Portanto, conclui-se que o material estudado possui características, de acordo com o DNIT (2006), que podem ser classificadas como um subleito e ainda como um reforço de subleito, dependendo das condições do subleito analisado. Na expectativa de adequabilidade para as demais camadas de pavimento, foram realizados ensaios com o aumento da energia de compactação, que, apesar de apresentar melhorias para o suporte estrutural, não foi possível considerar a sua utilização para camadas de sub-base e base de pavimentos.

#### 4.1.7 Análise das classificações do material

A classificação unificada dos solos é mais adequada para uma descrição de solos com finalidades gerais. Já a classificação TRB se adapta melhor para uma avaliação do suporte desses materiais (Liu, 1967).

De acordo com o DNIT (2006), é possível estabelecer inter-relações entre os sistemas de classificações do SUCS e do TRB. Na Figura 34 e na Figura 35, encontram-se essas inter-relações TRB-Unificada e Unificada-TRB, respectivamente.

Ao se analisarem as inter-relações de classificações do material objeto desta pesquisa, nota-se, realmente, uma aproximação de resultados. Assim, a classificação pelo TRB foi diagnosticada como A-4, e, diante de comparações em relação à classificação unificada, foi designada como mais provável para ML-OL. A semelhança se mantém ao se inverterm as classificações, e o material caracterizado pelo SUCS como ML apresentou a classificação mais provável para A-4 e A-5.

**Figura 34 – Inter-relações entre a classificação TRB e a unificada**

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	CL	ML - OL - SC	GC - SM - GC - SC
A-7-5	OH - MH	ML - OL - CH	GM - SM - GC - SC
A-7-6	CH - CL	ML - OL - SC	OH - MH - GC - GM - SM

Fonte: DNIT, 2006.

**Figura 35 – Inter-relações entre a classificação unificada e TRB**

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

Fonte: DNIT, 2006.

Portanto, é possível concluir que as classificações usadas nesta pesquisa possuem uma inter-relação bem assertiva em relação ao material analisado. Tal aproximação é relativa à utilização de metodologias oriundas de normas de países de clima temperado, não abrangendo os solos de clima tropical, lateríticos.

#### ***4.1.8 Análise do CBR e das classificações do material***

De acordo com o DNIT (2006), é possível se estabelecerem inter-relações entre os valores prováveis de CBR e os sistemas de classificações do SUCS e TRB. Na Figura 36 e na Figura 37, encontram-se as inter-relações CBR-SUCS e CBR-TRB, respectivamente.

**Figura 36 – Valores prováveis de CBR para os grupos de SUCS**

<b>Solos</b>	<b>CBR</b>
GW	40 a mais de 80
GP	30 a mais de 60
GM	20 a mais de 60
GC e SW	20 a 40
SP e SM	10 a 40
SC	5 a 20
ML, CL, CH	15 a menos de 2
MH	10 a menos de 2
OL, OH	5 a menos de 2

Fonte: DNIT, 2006.

**Figura 37 – Valores prováveis de CBR para os grupos da classificação TRB**

<b>Solos</b>	<b>CBR</b>
A-1-a	40 a mais de 80
A-1-b	20 a mais de 80
A-2-4 e A-2-5	25 a mais de 80
A-2-6 e A-2-7	12 a 30
A-3	15 a 40
A-4	4 a 25
A-5	menos de 2 a 10
A-6 e A-7	menos de 2 a 15

Fonte: DNIT, 2006.

Ao se analisarem os dados da Figura 36, observa-se que, mediante a classificação SUCS, o material da pesquisa se enquadra como ML e apresenta valores prováveis de CBR que variam de 15 a menos de 2. Ao se examinarem os dados da seção 4.1.6 – reforça-se que o material ensaiado nesta pesquisa foi submetido a três tipos distintos de ensaios de compactação –, conclui-se que os resultados apresentados para os ensaios de Proctor Normal e de Proctor Intermediário estão de acordo com a variação estabelecida na inter-relação. No entanto, para o ensaio de Proctor Modificado, não foi identificado o enquadramento, uma vez que a média do CBR, nesse cenário, foi de 18,1%.

De acordo com a Figura 37, a classificação TRB para solos A-4, conforme identificado para o material ensaiado, possui valores prováveis de CBR variando de 4 a 25. Ao se fazer uma comparação com os valores do CBR da seção 4.1.6 para os diferentes ensaios de compactação

realizados, conclui-se que o material se enquadra na inter-relação estabelecida para essa classificação.

Portanto, avalia-se que, apesar de ambos os tipos de classificações serem oriundos de normas de países de clima temperado, a classificação TRB demonstrou maior adequabilidade de acordo com os ensaios e as análises realizadas, além de ser uma metodologia usualmente empregada no manual do DNIT.

#### 4.1.9 Análise em relação ao material

Na Tabela 12 encontra-se uma compilação dos resultados obtidos nesta pesquisa e das análises efetuadas, como um todo, do trabalho.

<b>Tabela 12 – Compilado dos resultados da pesquisa</b>		
<b>Propriedades</b>	<b>Características</b>	
LL (%)	15,30 - 16,30	
IP (%)	3,90 - 6,02	
IG	8	
Classificação TRB	A-4 - Solos siltosos	
Classificação SUCS	ML - siltes inorgânicos - areias muito finas - areias finas siltosas e argilosas	
Compactação Normal	Wót (%)	12,8 - 13,7
	Expansão (%)	1,0 - 1,2
	CBR (%)	9,6 - 11,8
Compactação Intermediária	Wót (%)	11,1 - 12,2
	Expansão (%)	0,8 - 1,0
	CBR (%)	13,1 - 14,1
Utilização no dimensionamento	Subleito	Aplicável
	Reforço do subleito	Aplicável, dependendo do subleito
	Sub-base	Não aplicável
	Base	Não aplicável

**Fonte: Elaborada pela autora.**

De acordo com os resultados apresentados, conclui-se que o material estudado nesta pesquisa pode ser usado como camada de subleito de um pavimento, pois se enquadrava em todos os valores exigidos pelos parâmetros das normas brasileiras. Em relação ao uso do material para reforço de subleito, é possível atestar sua utilidade, que vai depender das características do subleito local. Ainda, itera-se que não é comum utilizar esse tipo de material para camadas de base nem mesmo de sub-base, de acordo com as normas vigentes brasileiras.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

A utilização de método empírico é contestável para um dimensionamento de camadas de pavimentos rodoviários, pois existem ensaios mais modernos que são capazes de aferirem com mais proximidade e que possam focar no dimensionamento mecânico.

Os materiais que são usualmente usados em camadas de pavimento necessitam de uma submissão a ensaios e parâmetros para apresentação de resultados coerentes para solos brasileiros. Portanto, é indispensável uma verificação da real capacidade de carga para solos tropicais com a interpelação dos parâmetros utilizados em outros países.

Algumas características importantes dos materiais para o uso em camadas de pavimento são o parâmetro de resistência, a baixa deformabilidade e a expansibilidade, que podem ser obtidos através de ensaios mineralógicos, tornando, assim, elementos essenciais para conhecimento do material como um todo.

Em relação aos resultados das curvas granulométricas do rejeito de minério de ferro, foi verificada a presença de muitos materiais finos. Não foi possível analisar os parâmetros de uniformidade e curvatura de Casagrande (1948), devido à ausência do diâmetro correspondente ao valor de 10% das partículas passando na peneira  $x$  (10% das partículas são mais finas que o diâmetro efetivo). No entanto, foi realizada a classificação conforme o manual do DNIT (2006), de acordo com as dimensões das partículas que apresentaram uma curva característica de material mal-graduado. A distribuição dos tamanhos das partículas do solo não acontece de forma equilibrada, que, de fato, é notória no material devido à grande presença de partículas finas.

Constatou-se que a norma apresentada pelo DNIT não impõe, especificamente, uma categorização sobre as curvas granulométricas dos materiais para serem utilizados no pavimento – a determinação é referenciada através de outros ensaios. Somente uma particularidade para a aplicação de materiais da base que estipula uma delimitação secundária, isto é, para um número de repetições do eixo-padrão que, durante o período do projeto  $N \leq 5 \cdot 10^6$ , podem ser utilizados materiais com  $\text{CBR} \geq 60\%$  e que estejam dentro das faixas granulométricas específicas.

Para o resultado do índice de grupo, verificou-se uma confirmação da característica do material como solo siltoso, representando uma granulometria não uniforme e uma baixa plasticidade. De acordo com a norma, os valores discriminados para esse índice fazem

referência somente à camada da sub-base, a qual necessita ser igual a zero. Portanto, para as camadas de subleito e de reforço de subleito, não se têm valores estabelecidos para o índice de grupo.

Ao se analisarem os resultados do material para os limites de Atterberg, esse se mostrou com baixa plasticidade. Isso sugere baixa capacidade de retenção de umidade e menor propensão à deformação plástica. Solos com essas características tendem a apresentar menos expansão e contração em resposta à variação da umidade. Pode-se, assim, concluir que o material estudado se enquadrou nas especificações da norma.

Em relação à classificação do material quanto ao TRB, é denominado A-4, que é um solo siltoso. Ao se analisar a classificação, o material é caracterizado com comportamento de subleito de “sofrível a mau”. Para a classificação do SUCS, se enquadra como ML, que é considerado siltoso. Essas classificações não enquadram os solos tropicais, pois são específicas de normas de países de clima temperado.

Ao se examinarem os resultados para os ensaios de compactação dos diferentes tipos de ensaios de Proctor, observa-se que, à medida que se aumenta a energia de compactação, a porcentagem da expansão reduz, enquanto a do CBR aumenta. O material estudado possui características para utilização como subleito, pois, no ensaio do Proctor Normal, atendeu às exigências normativas. Quanto ao uso do material como um reforço de subleito, dependendo das condições do subleito analisado, é possível tal aplicação.

Conforme os resultados observados, o material deste estudo possui características para ser utilizado como camada de subleito e como reforço de subleito de rodovias – este último deve atender à condição de possuir CBR acima do que o do subleito. A determinação da capacidade de um material destinado para pavimentação é definida pelo DNIT, em seu *Manual de pavimentação* (2006). De acordo com esse manual, para o material ser definido como adequado para a camada de subleito, deve ter CBR maior ou igual a 2% e apresentar uma expansão menor ou igual a 2% (valores considerados para ensaios de compactação normal).

As técnicas de pavimentação rodoviária do Brasil foram oriundas de um intercâmbio entre o Brasil e os Estados Unidos, devido a uma necessidade de uniformizar e normatizar as especificações de serviço e técnicas de construção. No entanto, os parâmetros utilizados no manual são valores recomendados para outros países, ou seja, por causa das características dos solos brasileiros, eles não são indicados.

Segundo os valores e métodos preconizados pelo DNIT, o material analisado neste estudo não poderia ser utilizado como base nem como sub-base de rodovias. Contudo, ao se analisarem os ensaios de compactações intermediária e modificada, notam-se uma elevação do

CBR e uma diminuição da expansão do material. Essa variação comportamental se deve à energia usada, que se aproxima notoriamente dos parâmetros estabelecidos na norma, apesar de ser um material considerado de categoria fina. Portanto, se houver um aumento da energia de compactação, é possível caracterizá-lo como útil para reforço de subleito.

Em relação à conclusão do material analisado para uso em camadas de um pavimento, de acordo com as normas vigentes no país, ele se enquadra como útil para subleito. Quanto à utilização para reforço de subleito, é necessário que a energia de compactação na aplicação seja maior, tornando-o, assim, com as características exigidas pelos padrões. No entanto, para seu uso como camada de sub-base e de base, não foi possível confirmar tal aplicação, por mais que seja possível melhoria das condições do material apenas com um aumento da energia.

É importante mencionar que o uso da classificação TRB em solos brasileiros pode gerar perdas e desperdícios de materiais de boa capacidade, justamente pelo fato de não ser uma classificação conforme os parâmetros dos solos do Brasil – mesmo fator se aplica à classificação SUCS. De acordo com Hilário (2020), são necessários ensaios e parâmetros que apresentem resultados coerentes para solos brasileiros. Assim, será possível uma verificação mais assertiva da capacidade de carga para solos tropicais.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Alguns aspectos relevantes não foram contemplados nesta dissertação. Portanto, seria interessante a realização de estudos complementares para melhor verificação do material quanto à aplicação em camadas de pavimento, visando maior vida útil do pavimento e possibilitando redução dos custos de manutenção. Destacam-se as seguintes sugestões de pesquisa:

- a) estudo por parâmetros de comportamento e modelagem dos materiais, tais como o módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson;
- b) análise mecânica que contemple o cálculo de tensões, de deformações e de deslocamentos no pavimento com o uso de programas computacionais;
- c) dimensionamento de camadas do pavimento com o material pela metodologia Miniatura Compactada Tropical (MCT);
- d) caracterização geotécnica de uma mistura de solos com resíduos de mineração – sugestões de: rejeito de minério de ferro com estéril, rejeito de minério de ferro com itabirito, refeito de minério de ferro com canga laterítica, por meio de ensaios de laboratórios.

## REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016b.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016c. Versão corrigida 2017.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio Janeiro, 2016d.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016e.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028**: Mineração – Elaboração e Apresentação de Projeto de Barragens para Disposição de Rejeitos, Contenção de Sedimentos e Reservação de Água. Rio de Janeiro, 2017.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016f.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 2016g.
- ALBUQUERQUE FILHO, L. H. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de *piezocone***. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.
- ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- BAESSO, D. P.; GONÇALVES, F. L. R. **Estradas rurais: técnicas adequadas de manutenção**. Florianópolis: DER, 2003.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.

BRASIL. **Anuário mineral brasileiro**: principais substâncias metálicas. Brasília: Agência Nacional da Mineração (ANM), 2020.

CASAGRANDE, A. Classification and Identification of Soil. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 113, n. 1, p. 901-930, 1948.

CIDADES E MINERAIS. **O que é quadrilátero ferrífero**. 2022. Disponível em: <https://cidadeseminerais.com.br/geral/o-que-e-o-quadrilatero-ferrifero/>. Acesso em: 21 mar. 2024.

COSTA FILHO, W. D. **Proposta de tecnologias construtivas de sistema viário aplicado a minerações de ferro**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

COSTA, A. S. V.; BRAVIM, T. C. Revisão das alternativas técnicas às barragens de rejeitos de minério de ferro aprovadas no âmbito do licenciamento ambiental em Minas Gerais (2015-2019) após a tragédia de Mariana/MG. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 30-46, 2020.

COSTA, H. B. C. B. M. **Análise de custos de ciclo de vida relativa a pavimentos rodoviários flexíveis**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2008.

DAVIES, M. Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals. **Proceedings Tailings and Mine Waste**, Vancouver, BC, 2011.

DEMARCHI, L. C.; RABELLO, L. R.; SANTOS, N. B.; FRANCO, O.; CORREA, R. O. **Adequação de estradas rurais**: manual técnico CATI. Campinas: Imprensa Oficial, 2003.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 667/22**: Método de projeto de pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro, 1981.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – IPR 614**: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – IPR 719**: Manual de pavimentação. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – IPR 749**: Guia para execução de segmentos experimentais – PRO-MEDINA. Brasília, 2020.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Ferro/Aço**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2011.

- FAJARDO, A. A. **Estudo da adição de rejeito de minério de ferro para produção de compósitos cimentícios de alto desempenho**. 2023. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.
- FARIA, A. de O. **Avaliação comparativa de modelos constitutivos para um rejeito de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero**. 2022. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.
- FERNANDES, G. **Comportamento de estruturas de pavimentos ferroviários com utilização de solos finos e/ou resíduos de mineração de ferro associados a geossintéticos**. 2005. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2005.
- FERREIRA, R. M. **Dimensionamento de um pavimento experimental para o tráfego de caminhões fora-de-estrada em planta de mina**. 2007. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.
- FREIRE, A. S. **Influência do teor de finos no comportamento geomecânico de um rejeito de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero**. 2022. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.
- GENTIL, G. A. **Avaliação da estabilização química de um rejeito de minério de ferro para aplicação em infraestrutura de pavimentos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.
- GOMES, R. B.; DE TOMI, G.; ASSIS, P. S. Iron Ore Tailings Dry Stacking in Pau Branco Mine. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 5, n. 4, p. 339-344, 2016.
- GOMES, R. C.; ALBUQUERQUE FILHO, L. H. Geotechnical Analysis of Eroded Sediments in an Exhausted Pit Mine Using CPTU Tests. *In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS*, 4., 2002, Rio de Janeiro. **Proceedings [...]**. Rio de Janeiro: Balkema, 2002. n. 1, p. 323-328.
- HILÁRIO, R. Q. **Estudo das faixas granulométricas no comportamento e vida útil do lastro ferroviário utilizando equipamento de ensaio dinâmico de lastro – EEDL**. 2020. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.
- HUGO, Daniel. **Haul Road Defect Identification and Condition Assessment Using Measured Truck Response**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade da Pretoria, Pretoria, 2005.
- HUSTRULID, W.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. K. **Open Pit Mine Planning and Design: Fundamentals**. Rotterdam: CRC Press, 2013.
- IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Guia de boas práticas: gestão de barragens e estruturas de disposição de rejeito**. Brasília: IBRAM, 2019.

KAUFMAN, W. W.; AULT, J. C. **Design of Surface Mining Haulage Roads – a Manual**. Pittsburgh: U. S. Department of Interior, Bureau of Mines, 1977. Information Circular 8758.

KOSSOFF, D.; DUBBIN, W.; ALFREDSSON, M.; EDWARDS, S.; MACKLIN, M.; HUDSON-EDWARDS, K. Mine Tailings Dams: Characteristics, Failure, Environmental Impacts, and Remediation. **Applied Geochemistry**, v. 51, p. 229-245, 2014.

LARA, J. L.; PORNILLOS, E. U.; MUÑOZ, H. E. Geotechnical-geochemical and Operational Considerations for the Application of Dry Stacking Tailings Deposits – State-of-the-Art. In: JEWELL, R.; FOURIE, A. B.; CALDWELL, J.; PIMENTA, J. (ed.). **Paste 2013: Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings**. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2013.

LEAL, F. C. A.; GOMES, W. V.; SILVA, P. J. L.; GONÇALVES, P. H. F.; NETO, O. F.; JÚNIOR, O. F. S. Uma revisão dos acidentes em barragens de rejeito de mineração da América do Sul e o cenário brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 8, n. 1, p. 10-27, 2022.

LI, W.; COOP, M.; SENETAKIS, K.; SCHNAID, F. The Mechanics of a Silt-sized Gold Tailing. **Engineering Geology**, v. 241, p. 97-108, 2018.

LIU, T. K. A Review of Engineering Soil Classification Systems. **Highway Research Record n° 156**. Washington, D. C.: National Academy of Sciences, 1967. p. 1-22.

LÓPEZ JIMENO, C.; LÓPEZ JIMENO, E.; GARCIA BERMÚDEZ, P.; HERNÁNDO DEGEA, A. **Manual de transporte con volquetes y diseño de pistas mineras**. Grupo de Proyectos de Ingeniería - E.T.S.I. Minas y Energía. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2015.

LUZ, A. B., LINS, F. A. **Introdução – Tratamento de Minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. p. 1-23.

MACHADO, L. S. **Estabilização de rejeitos de minério de ferro filtrados com uso de aditivos para disposição em pilhas compactadas (*dry stacking*)**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005.

MENEZES, M. V. P. **Estudo das características de superfície de pavimentos rodoviários para análise de segurança do tráfego**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

- MILONAS, J. G. **Análise do processo de reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de barragens de rejeito de minério de ferro em aterro hidráulico.** 2006. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- MONENCO. **Design Manual for Surface Mine Haul Roads.** Draft Report by Monenco Consultants Limited, Calgary, Alberta, 1989.
- OLIVEIRA FILHO, W. L.; FERNANDES G.; VAM HAM, G. H. J.; RODRIGUES, C. A.; MASETTI, L.; COSTA, W. **Manual de estradas de acesso de mina.** Ouro Preto, 2010.
- PELLISSARI, F. P. **Projeto de estradas para mineração: caracterização e análise de aplicações práticas.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- PONTES FILHO, G. **Estradas de rodagem: projeto geométrico.** São Carlos: BIDIM, 1998.
- PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta.** 2013. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- REIS, M. dos S. **Classificação e diagnóstico das estradas de mina de lavra a céu aberto de minério de ferro dentro do Quadrilátero Ferrífero.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.
- REIS, N. F. dos S. **Análise estrutural de pavimentos rodoviários: aplicação a um pavimento reforçado com malha de aço.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.
- RIBEIRO, A. I. A avaliação de impactos ambientais e as barragens de rejeitos. **Unesp Notícias**, 12 fev. 2019. Disponível em: <https://www2.unesp.br/sharer.php?noticia=34275>. Acesso em: 12 dez. 2022.
- SALES, E. P. **Análise do comportamento mecanístico do novo pavimento da BR-232/PE, trecho Caruaru–São Caetano.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.
- SARAIVA, S. L. C. **Metodologia e análise experimental do comportamento geotécnico da estrutura de pavimentos rodoviários.** 2006. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.
- SENÇO, W. **Manual de técnicas de projetos rodoviários.** São Paulo: PINI, 2008.

SILVA, P. G. C. **Análise da influência da rugosidade de estradas de mina nos parâmetros operacionais de transporte**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

SILVA, T. O. de; CARVALHO, C. A. B. de; LIMA, D. C. de; CALIJURI, M. L.; MACHADO, C. C. Influência do tráfego de veículos comerciais em rodovias vicinais não pavimentadas: estudo de caso aplicado à VCS 346, Viçosa, MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 539-545, 2011.

SOUSA, L. M. L. S. **Estudos de dimensionamento estrutural de estradas de mina a céu aberto**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

SUZUKI, C. Y.; KABBACH JUNIOR, F. I.; AZEVEDO, A. M.; PEREIRA, A. C. O.; VICENTE, P. R. F. Introdução do conceito de confiabilidade nos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizados no Brasil. *In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO*, 3., 2004, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, 2004.

TANNANT, D. D.; REGENSBURG, B. **Guidelines for Mine Haul Road Design**. Okanagan: University of British Columbia, 2001.

THOMPSON, R. J. **The Design and Management of Surface Mine Haul Roads**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade da Pretoria, Pretoria, 1996.

THOMPSON, R. J.; VISSER, A. **Mine Haul Road Design, Construction and Maintenance Management**. Course Notes Given on May 2014 at Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. An Overview of the Structural Design of Mine Haulage Roads. **The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy**, Pretoria, South Africa. p 29-37, 1996.

THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. **Designing and Managing Unpaved Opencast Mine Haul Roads for Optimum Performance**. American Society of Mining Engineers (SME), Annual Meeting and Exhibition, Denver, 1999.

VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

VIEIRA, J. C. **Determinação e quantificação dos elementos de relevância em infraestrutura de mina**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.