

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO,  
GEOQUÍMICO, MINERALÓGICO E GEOAMBIENTAL DE  
UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO INCORPORADO A  
UM SOLO LATERÍTICO PARA FINS RODOVIÁRIOS**

**ANDRÉ AUGUSTO NÓBREGA DANTAS**

**ORIENTADOR: LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO,  
DSc.**

**CO-ORIENTADORA: MARIA DEL PILAR DURANTE  
INGUNZA, DSc.**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.TD – 154/2019**

**BRASÍLIA – DF: SETEMBRO DE 2019**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO, GEOQUÍMICO,  
MINERALÓGICO E GEOAMBIENTAL DE UM REJEITO DE MINÉRIO DE  
FERRO INCORPORADO A UM SOLO LATERÍTICO PARA FINS  
RODOVIÁRIOS**

**ANDRÉ AUGUSTO NÓBREGA DANTAS**

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
GEOTECNIA.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof.º Luís Fernando Martins Ribeiro, DSc. (UnB)  
(Orientador)**

---

**Prof.ª Maria Del Pilar Durante Ingunza, DSc. (UFRN)  
(Co-orientadora)**

---

**Prof.º Lilian Ribeiro de Rezende, DSc. (UFG)  
(Examinador Externo)**

---

**Prof.º John Kennedy Guedes Rodrigues, DSc. (UFCG)  
(Examinador Externo)**

---

**Prof.º Michéle Dal Toé Casagrande, DSc. (UnB)  
(Examinador Interno)**

## FICHA CATALOGRÁFICA

NÓBREGA DANTAS, ANDRÉ AUGUSTO  
AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO, GEOQUÍMICO,  
MINERALÓGICO E GEOAMBIENTAL DE UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO  
INCORPORADO A UM SOLO LATERÍTICO PARA FINS RODOVIÁRIOS  
xvi, 226p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Engenharia Civil, 2019).  
Tese de Doutorado em Geotecnia – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Pavimentação	2. Mecânica dos Pavimentos
3. Materiais Alternativos	4. Rejeito de Minério de Ferro
5. Dimensionamento de Pavimentos	6. Retroanálise AEMC
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NÓBREGA DANTAS, A. A. (2019). *AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO, GEOQUÍMICO, MINERALÓGICO E GEOAMBIENTAL DE UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO INCORPORADO A UM SOLO LATERÍTICO PARA FINS RODOVIÁRIOS*. Tese de Doutorado em Geotecnia, Publicação G.TD – 154/2019, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 226 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: ANDRÉ AUGUSTO NÓBREGA DANTAS

TÍTULO: AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO, GEOQUÍMICO, MINERALÓGICO E GEOAMBIENTAL DE UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO INCORPORADO A UM SOLO LATERÍTICO PARA FINS RODOVIÁRIOS.

GRAU: DOUTOR EM GEOTECNIA ANO:2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Tese de Doutorado em Geotecnia e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de Doutorado em Geotecnia pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

ANDRÉ AUGUSTO NÓBREGA DANTAS

Depto. de Engenharia Civil e Ambiental (ENC) – FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 – Brasília – DF - Brasilia

## DEDICATÓRIA

À minha família.

“Percebe e entende que os melhores amigos são aqueles que estão em casa esperando por ti.” (Anjos do Resgate).

## AGRADECIMENTOS

- A Deus;
- Aos meus pais (Dantas e Adeilza) e aos meus irmãos (Thiago e Bel);
- À minha família Brasiliense, Jacob;
- Aos meus amigos/irmãos de Natal/Brasília/Goiânia/Venezuela/Colômbia, em especial Marcio, Weber, Luis Eduardo, Igor, Thiago Augusto, Victor, Thiago Arnaud, Alexandre Camozzi, Thaís, John Burgos;
- Aos meus amigos da Universidade de Brasília;
- Ao meu orientador, Prof.º Luís Fernando Martins Ribeiro;
- À minha co-orientadora, Prof.ª Maria Del Pilar;
- Ao Prof.º Enio Fernandes Amorim;
- Ao Prof.º Gregório Araújo;
- Ao Prof.º José Camapum de Carvalho;
- Ao Profº Fagner França;
- À Profª Lilian Rezende;
- À Profª Michéle Casagrande;
- Ao Prof.º John Kennedy Guedes Rodrigues;
- Aos alunos voluntários da UFRN;
- Ao Instituto Federal de Goiás – Campus Formosa.

## RESUMO

Uma forma alternativa de amenizar os impactos ambientais provocados pelas atividades de mineração diz respeito à utilização de rejeitos advindos das atividades de extração mineral em obras de Engenharia Civil, principalmente naquelas relacionadas à construção de aterros rodoviários, que na maioria das vezes empregam grandes volumes de material. A aplicação em camadas que compõem estruturas de pavimentos de rodovias está entre as opções de grande viabilidade para aplicação de rejeitos da mineração. Contudo, as propriedades geotécnicas desses materiais precisam ser investigadas, inclusive quando misturados com solos. A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a viabilidade mecânica, geoquímica, mineralógica e geoambiental de um rejeito de minério de ferro incorporado a um solo laterítico do estado do Rio Grande do Norte, para utilização em camadas de pavimentos por meio de ensaios laboratoriais, bem como elaborar e analisar o dimensionamento de um trecho de rodovia pelos métodos DNIT, MEDINA e AASTHO, com simulação por meio da retroanálise pelo *software* Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) a determinação da compatibilidade entre tensões e deslocamentos das camadas do pavimento. Os teores de rejeitos utilizadas nas misturas foram de 10%, 20% e 30%. Os métodos de investigação de laboratório foram realizados por meio dos ensaios de caracterização ambiental, morfológica, química, física, além dos ensaios geotécnicos aplicados à pavimentação, por meio de ensaios de compactação, determinação do Índice de Suporte Califórnia, resistência à compressão simples, módulo de resiliência e sucção. Após a realização de todos os ensaios, ficou comprovado que a grande quantidade de minério de ferro presente no próprio rejeito está associada diretamente com o processo de beneficiamento do minério da Mina do Bonito - RN. Dentre as misturas estudadas, a que apresentou a melhor viabilidade segundo os ensaios laboratoriais foi a de 20% de rejeito e 80% de solo, sendo indicada para compor camadas de base e sub-base de rodovias de tráfego leve. As demais misturas, o solo puro e o rejeito puro podem compor apenas camadas de sub-base. De acordo com o dimensionamento dos pavimentos segundo o DNIT os valores foram de 20 cm para a camada de base e 5 cm para a camada de revestimento, segundo o MEDINA foi de 22 cm para a camada de base e 5 cm para a camada de revestimento e segundo o AASTHO no mínimo 15 cm para a camada de base e no mínimo 9 cm para a camada de revestimento. E para a retroanálise do pavimento por meio do *software* AEMC, a deflexão máxima foi inferior as deflexões admissíveis estabelecidas pela PRO 011 (DNER, 1979) e PRO 269 (DNER, 1994). Portanto, o rejeito de minério de ferro em camadas de base de pavimentos, na proporção de 20% de rejeito e 80% de solo estudado, possui aplicabilidade mecânica para ser utilizado.

Palavras chaves: pavimentação, mecânica dos pavimentos, materiais alternativos, rejeito de minério de ferro, dimensionamento de pavimentos, retroanálise AEMC.

## ABSTRACT

An alternative way of mitigating the environmental impacts caused by mining activities is the use of tailings from mineral extraction activities in Civil Engineering works, especially those related to the construction of road embankment, which often employ large volumes of material. Application in layers that make up road pavement structures is among the most viable options for mining tailings application. However, the geotechnical properties of these materials need to be investigated, even when mixed with soils. This research aimed to evaluate the mechanical, geochemical, mineralogical and geoenvironmental viability of an iron ore tailings incorporated in a lateritic soil of the state of Rio Grande do Norte, for use in pavement layers through laboratory tests, as well as elaborate and analyze the dimensioning of a highway section by DNIT, MEDINA and AASTHO methods, with simulation through back analysis by the Multiple Layer Elastic Analysis (AEMC) software to determine the compatibility between stresses and displacements of the pavement layers. The tailings contents used in the mixtures were 10%, 20% and 30%. The laboratory investigation methods were carried out through environmental, morphological, chemical, physical characterization tests, as well as geotechnical tests applied to paving, through compaction tests, California Support Index determination, simple compressive strength, modulus of resilience and suction. After all the tests, it was proved that the large amount of iron ore presented in the tailing itself is directly associated with the ore beneficiation process of the Mina do Bonito - RN. Among the studied mixtures, the one that presented the best viability according to the laboratory tests was 20% of tailings and 80% of soil, being indicated to compose base layer and sub-layers of light traffic highways. Other mixtures, pure soil and pure tailings can only compose sub-base layers. According to the dimensioning of the floors according to DNIT the values were 20 cm for the base layer and 5 cm for the coating layer, according to MEDINA it was 22 cm for the base layer and 5 cm for the coating layer and according to AASHTO at least 15 cm for the base layer and at least 9 cm for the coating layer. And for the floor back analysis by AEMC software, the maximum deflection was lower than the allowable deflections established by PRO 011 (DNER, 1979) and PRO 269 (DNER, 1994). Therefore, the iron ore tailings in pavement base layers, in the proportion of 20% tailings and 80% of soil studied, have mechanical applicability to be used.

Keywords: paving, pavement mechanics, alternative materials, iron ore tailings, pavement sizing, AEMC retroanalysis.

# SUMÁRIO

## CAPÍTULO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>25</b>
1.1. CONTEXTO GERAL.....	26
1.2. RELEVÂNCIA.....	29
1.3. JUSTIFICATIVA.....	29
1.4. OBJETIVOS.....	31
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	31
1.6. ESCOPO DA TESE.....	32
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>34</b>
2.1. A MINERAÇÃO NO BRASIL.....	34
2.2. A MINERAÇÃO NO RIO GRANDE DO NORTE.....	38
2.2.1 ALGUNS DESTAQUES DO SETOR MINERAL DO RIO GRANDE DO NORTE.....	39
2.3. IMPACTOS AMBIENTAIS ORIUNDOS DA MINERAÇÃO.....	41
2.4. APLICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA PAVIMENTAÇÃO – PESQUISAS NACIONAIS.....	43
2.5. APLICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA PAVIMENTAÇÃO – PESQUISAS INTERNACIONAIS.....	46
2.6. APLICAÇÃO DE RESÍDUOS MINERAIS NA PAVIMENTAÇÃO – PESQUISAS NACIONAIS.....	48
2.7. APLICAÇÃO DE RESÍDUOS MINERAIS NA PAVIMENTAÇÃO – PESQUISAS INTERNACIONAIS.....	51
2.8. APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINÉRIO DE FERRO NA PAVIMENTAÇÃO – PESQUISAS NACIONAIS.....	54
2.9. APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINÉRIO DE FERRO NA PAVIMENTAÇÃO – PESQUISAS INTERNACIONAIS.....	56
2.10. SOLO LATERÍTICO.....	59
2.10.1. O PROCESSO DE LATERIZAÇÃO E OS FATORES DE INFLUÊNCIA.....	62
2.10.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MICRO-ESTRUTURAL DOS SOLOS LATERÍTICOS.....	63
2.10.3. MORFOLOGIA E AS DENOMINAÇÕES DOS SOLOS LATERÍTICOS.....	64
2.10.3.1. GRANULOMETRIA DOS SOLOS LATERÍTICOS.....	66

2.10.3.2. A PLASTICIDADE DOS SOLOS LATERÍTICOS.....	67
2.10.3.3. A DUREZA DOS SOLOS LATERÍTICOS.....	69
2.10.3.4. CARACTERÍSTICAS DE COMPACTAÇÃO DOS SOLOS LATERÍTICOS.....	70
2.10.3.5. CARACTERÍSTICAS DA CAPACIDADE DE SUPORTE DOS SOLOS LATERÍTICOS.....	71
2.10.3.6. COMPORTAMENTO ELÁSTOPLÁSTICO DOS SOLOS LATERÍTICOS.....	73
2.10.4. MELHORAMENTO DE SOLOS LATERÍTICOS.....	75
2.10.4.1. ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS SOLOS LATERÍTICOS.....	75
<b>3. MÉTODOS PARA DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....</b>	<b>77</b>
3.1. MÉTODO DNER/DNIT.....	77
3.1.1. MÉTODO TRADICIONAL.....	77
3.1.2. MÉTODO DA RESILIÊNCIA.....	79
3.2. MÉTODO MECANÍSTICO.....	82
3.3. MÉTODOS PARA PAVIMENTOS DE BAIXO CUSTO.....	83
3.3.1. MÉTODO AASHTO.....	83
3.3.2. EXPERIÊNCIA BRASILEIRA.....	91
3.4. MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO.....	92
3.4.1. METODOLOGIA SISPAV.....	94
3.4.2. MEDINA – Método de Dimensionamento Nacional.....	95
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>100</b>
4.1 MATERIAIS.....	100
4.1.1. SOLO TROPICAL DA REGIÃO.....	100
4.1.2. REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO.....	102
4.1.3. MISTURAS DE SOLO-REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO.....	104
4.2. MÉTODO DE TRABALHO.....	104
4.2.1. COMPORTAMENTO LATERÍTICO - CLASSIFICAÇÃO MCT.....	106
4.2.1.1 ENSAIO DA METODOLOGIA MCT.....	107
4.2.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA.....	107
4.2.2.1. DETERMINAÇÃO DE pH.....	109
4.2.2.2. ENSAIO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX) COM PERDA AO FOGO E ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) COM IDENTIFICAÇÃO DE FASES CRISTALINAS.....	110

4.2.2.3. ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	112
4.2.3. CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL.....	114
4.2.3.1. SOLUBILIZAÇÃO.....	114
4.2.4. ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS.....	116
4.2.4.1. MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS.....	116
4.2.4.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	117
4.2.4.3. LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE.....	118
4.2.4.4. PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE.....	119
4.2.4.5. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MAGNÉTICO.....	120
4.2.5. ENSAIOS GEOTÉCNICOS APLICADOS À PAVIMENTAÇÃO.....	121
4.2.5.2. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR.....	121
4.2.5.1. CURVA CARACTERÍSTICA.....	122
4.2.5.3. ENSAIO ISC.....	123
4.2.5.4. RESISTÊNCIA à COMPRESSÃO SIMPLES.....	124
4.2.5.5. MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	125
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	127
5.1. ENSAIOS DA METODOLOGIA MCT E CLASSIFICAÇÃO MCT.....	127
5.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA.....	130
5.2.1. RESULTADOS DE pH.....	130
5.2.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX) COM PERDA AO FOGO E ENSAIOS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) COM IDENTIFICAÇÃO DE FASES CRISTALINAS.....	132
5.2.3. ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	134
5.3. CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL.....	143
5.3.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SOLUBILIZAÇÃO.....	143
5.4. PROPRIEDADES FÍSICAS.....	145
5.4.1 MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS.....	145
5.4.2. GRANULOMETRIA.....	147
5.4.3. LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE.....	153
5.4.4. PERMEABILIDADE à CARGA CONSTANTE.....	155
5.4.5. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MAGNÉTICO.....	158
5.5. ENSAIOS GEOTÉCNICOS APLICADOS À PAVIMENTAÇÃO.....	159

5.5.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR.....	159
5.5.2. CURVA CARACTERÍSTICA.....	168
5.5.3. ENSAIO ISC.....	172
5.5.4. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES.....	174
5.5.5. MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	180
5.6. DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL COM OS MATERIAIS ESTUDADOS.....	192
5.6.1. DIMENSIONAMENTO POR MEIO DO MÉTODO EMPÍRICO.....	192
5.6.2. DIMENSIONAMENTO POR MEIO DO MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO.....	196
5.6.3. DIMENSIONAMENTO POR MEIO DO MÉTODO AASHTO.....	201
5.6.4. RETROANÁLISE UTILIZANDO O <i>SOFTWARE</i> AEMC.....	204
<b>6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>208</b>
6.1. CONCLUSÕES.....	208
6.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	212
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	214

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – IDH de municípios brasileiros com atividades mineradoras.....	37
Tabela 3.1 – Requisito das camadas do pavimento.....	78
Tabela 3.2 – Parâmetros de módulo de resiliência de solos lateríticos.....	80
Tabela 3.3 – Valores em (%) para $Z_r$ .....	84
Tabela 3.4 – Coeficientes de drenagem (mi).....	86
Tabela 3.5 – Espessuras mínimas.....	88
Tabela 3.6 – Ordem de grandeza dos critérios de ruptura.....	89
Tabela 3.7 – Modelos de previsão dos danos e fatores de calibração destes modelos da AASHTO....	89
Tabela 3.8 - Características das camadas de pavimentos de baixo custo.....	92
Tabela 3.9 – Critérios de parada e confiabilidade das análises realizadas pelo MEDINA.....	98
Tabela 4.1 - Procedimento do ensaio de solubilização.....	115
Tabela 4.2 - Intervalo aproximado do coeficiente de permeabilidade (k), para diversos tipos de solos.....	120
Tabela 5.1 – Resumo dos coeficientes obtidos através do ensaio de Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão.....	128
Tabela 5.2 - Valores de pH em $H_2O$ , pH em KCl e $\Delta pH$ .....	131
Tabela 5.3 – Resultado da análise química semiquantitativa da amostra de solo.....	133
Tabela 5.4 – Resultado da análise química semiquantitativa da amostra de rejeito de ferro.....	134
Tabela 5.5 – Ensaio de solubilização.....	144
Tabela 5.6 – Resumo das massas específicas dos sólidos.....	145
Tabela 5.7 – Quantidade de rejeito de minério de ferro encontradas nos rejeitos segundo os autores citados e a comparação com o rejeito de minério de ferro desta pesquisa.....	147
Tabela 5.8 – Resumo das curvas granulométricas.....	151
Tabela 5.9 – Resumo dos limites de Atterberg.....	155
Tabela 5.10 – Resumo dos coeficientes de permeabilidade e demais parâmetros relevantes.....	156
Tabela 5.11 – Resultados dos ensaios de compactação.....	160
Tabela 5.12 – Valores de Grau de Saturação ( $S_r$ ) e Sucção Total (pF) de todos os materiais estudados na energia intermediária.....	169
Tabela 5.13 – Resultados dos ensaios ISC's e da expansão.....	172
Tabela 5.14 – Resumo da RCS, umidade ótima, massa específica aparente seca máxima e índice de	

vazios.....	174
Tabela 5.15 – Constantes de regressão para os materiais estudados referentes ao modelo composto.....	191
Tabela 5.16 – Valores obtidos dos ensaios laboratoriais para o subleito.....	192
Tabela 5.17 – Resumo para o dimensionamento pelo Método AASHTO e valor de SN.....	202
Tabela 5.18 - Cálculo do pavimento utilizando o solo natural para a camada de base segundo o Método AASHTO.....	203
Tabela 5.19 - Cálculo do pavimento utilizando a mistura 20% de rejeito e 80% de solo para a camada de base segundo o Método AASHTO.....	203

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Vista geral da Mina do Bonito, Jucurutu – RN.....	27
Figura 1.2 - Vista geral do britador, Mina do Bonito, Jucurutu – RN.....	28
Figura 1.3 - Rejeito de minério de ferro armazenado ao ar livre na Mina do Bonito – RN.....	30
Figura 2.1 - Empresas mineradoras no Brasil – Ano Base 2015.....	35
Figura 2.2 - Principais regiões com depósitos minerais no Brasil – Ano Base 2015.....	36
Figura 2.3 – Principais investimentos no setor mineral por estados de 2014 a 2018.....	38
Figura 2.4 - Fissuras em rodovias construídas com Solos Lateríticos Finos.....	69
Figura 2.5 - Dureza dos elementos pedregulhosos em função de seus pesos específicos.....	70
Figura 2.6 - Estudos da forma de realizar o ensaio de ISC adaptado ao clima do Sahara.....	73
Figura 3.1 – Seção Transversal com Números estruturais.....	86
Figura 3.2 – Fluxograma Básico do Sistema MEPDG (2004).....	90
Figura 3.3 - Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos.....	91
Figura 3.4 – Tela inicial <i>software</i> MEDINA.....	97
Figura 3.5 – Eixo padrão rodoviário assumido no <i>software</i> MEDINA.....	98
Figura 4.1 – Local da retirada do solo, as margens da BR 226.....	101
Figura 4.2 – Vista aérea da cidade de Jucurutu e local da retirada do material – RN.....	101
Figura 4.3 - Rodovia de acesso à mina do Bonito.....	102
Figura 4.4 – Local de coleta do rejeito de minério de ferro. Mina do Bonito, Jucurutu – RN (1)...	103
Figura 4.5 – Local de coleta do rejeito de minério de ferro. Mina do Bonito, Jucurutu – RN (2)...	103
Figura 4.6 – Atividades Realizadas.....	106
Figura 4.7 – Ensaio de classificação MCT.....	107
Figura 4.8 – Procedimento do ensaio de pH.....	109
Figura 4.9 – Amostras analisadas nos ensaios FRX.....	111
Figura 4.10 – Equipamento JEOL Quantas 450.....	113
Figura 4.11 – Ensaio de massa específica dos sólidos.....	116
Figura 4.12 – Ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação (com e sem defloculante).....	117
Figura 4.13 – Equipamentos de Casagrande para ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade respectivamente e detalhes da realização do ensaio.....	118
Figura 4.14 – Ensaio de avaliação do comportamento magnético.....	120

Figura 4.15 – Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	125
Figura 4.16 – Ensaio de Módulo de Resiliência.....	126
Figura 5.1 – Família de curvas de compactação do rejeito de minério de ferro.....	127
Figura 5.2 – Família de curvas de compactação do solo puro.....	128
Figura 5.3 – Classificação MCT do solo estudado.....	129
Figura 5.4 – pH em água e pH em KCl em relação as porcentagens de rejeitos.....	132
Figura 5.5 – Difratoograma da amostra de solo.....	133
Figura 5.6 – Difratoograma da amostra de rejeito de ferro.....	134
Figura 5.7 – Microscopia eletrônica de varredura do rejeito puro.....	135
Figura 5.8 – EDS Ponto 01 do rejeito puro.....	135
Figura 5.9 – EDS Ponto 02 do rejeito puro.....	136
Figura 5.10 – Microscopia eletrônica de varredura do solo puro.....	137
Figura 5.11 – EDS Ponto 01 do solo puro.....	137
Figura 5.12 – EDS Ponto 02 do solo puro.....	138
Figura 5.13 – Microscopia eletrônica de varredura da mistura 10% rejeito e 90% solo.....	139
Figura 5.14 – Microscopia eletrônica de varredura da mistura 20% rejeito e 80% solo.....	139
Figura 5.15 – Microscopia eletrônica de varredura da mistura 30% rejeito e 70% solo.....	140
Figura 5.16 - Microscopia eletrônica de varredura da mistura 10% rejeito e 90% solo, para o material compactado com diferentes níveis de aproximação (100x, 200x, 500x, 1000x, 3000, e 5000x).....	141
Figura 5.17 - Microscopia eletrônica de varredura da mistura 20% rejeito e 80% solo, para o material compactado com diferentes níveis de aproximação (100x, 200x, 500x, 1000x, 3000, e 5000x).....	142
Figura 5.18 - Microscopia eletrônica de varredura da mistura 30% rejeito e 70% solo, para o material compactado com diferentes níveis de aproximação (100x, 200x, 500x, 1000x, 3000, e 5000x).....	143
Figura 5.19 – Curva granulométrica para o rejeito puro.....	147
Figura 5.20 – Curva granulométrica para o solo tropical puro.....	148
Figura 5.21 – Curva granulométrica para a mistura com 30% de rejeito e 70% de solo.....	148
Figura 5.22 – Curva granulométrica para a mistura com 20% de rejeito e 80% de solo.....	149
Figura 5.23 – Curva granulométrica para a mistura com 10% de rejeito e 90% de solo.....	149
Figura 5.24 – Curvas granulométricas estudadas e Faixa “F” ES 141 (DNIT, 2010).....	153
Figura 5.25 - Curva de coeficiente de permeabilidade versus índice de vazios para os materiais estudados.....	157
Figura 5.26 – Ensaio de potencial metálico do rejeito de minério de ferro.....	158

Figura 5.27 – Ensaio de potencial metálico do solo tropical.....	159
Figura 5.28 – Curvas de compactação obtidas para três energias para o rejeito puro.....	161
Figura 5.29 – Curvas de compactação obtidas nas três energias para o solo puro.....	161
Figura 5.30 – Curvas de compactação obtidas nas três energias para 10% de rejeito e 90% de solo.....	162
Figura 5.31 – Curvas de compactação obtidas nas três energias para 20% de rejeito e 80% de solo.....	162
Figura 5.32 – Curvas de compactação obtidas nas três energias para 30% de rejeito 70% de solo.....	163
Figura 5.33 – Massa específica aparente seca em função do teor de umidade levando em consideração as mesmas energias de compactação aplicada.....	165
Figura 5.34 – Curvas de variação do índice de vazios e teor de umidade para o rejeito puro.....	165
Figura 5.35 - Curvas de variação do índice de vazios e teor de umidade para o solo puro.....	166
Figura 5.36 – Curvas de variação do índice de vazios e teor de umidade para o 10% de rejeito e 90% de solo.....	166
Figura 5.37 – Curvas de variação do índice de vazios e teor de umidade para o 20% de rejeito e 80% de solo.....	167
Figura 5.38 – Curvas de variação do índice de vazios e teor de umidade para o 30% de rejeito e 70% de solo.....	167
Figura 5.39 – Curvas características dos materiais estudados pF (logaritmo da sucção total em cm de coluna d'água) em função do grau de saturação.....	170
Figura 5.40 – Curvas características dos materiais estudados pF x e (logaritmo da sucção total em cm de coluna d'água x índice de vazios) em função do grau de saturação.....	171
Figura 5.41 – RCS Rejeito puro.....	175
Figura 5.42 – RCS 10% de rejeito e 90% de solo.....	175
Figura 5.43 – RCS 20% de rejeito e 80% de solo.....	176
Figura 5.44 – RCS 30% de rejeito e 70% de solo.....	176
Figura 5.45 – RCS Solo puro.....	177
Figura 5.46 – RCS dos materiais estudados na energia normal.....	178
Figura 5.47 – RCS dos materiais estudados na energia intermediária.....	178
Figura 5.48 – RCS dos materiais estudados na energia modificada.....	179
Figura 5.49 – Módulo de Resiliência em função da tensão confinante para o rejeito de ferro puro.....	183

Figura 5.50 – Módulo de Resiliência em função da tensão confinante para a amostra de 10% de rejeito de ferro e 90% de solo.....	184
Figura 5.51 – Módulo de Resiliência em função da tensão confinante para a amostra de 20% de rejeito de ferro e 80% de solo.....	185
Figura 5.52 – Módulo de Resiliência em função da tensão confinante para a amostra de 30% de rejeito de ferro e 70% de solo.....	186
Figura 5.53 – Módulo de Resiliência em função da tensão confinante para o solo puro.....	187
Figura 5.54 – Módulo de Resiliência em função da tensão desvio para o rejeito de ferro puro.....	188
Figura 5.55 – Módulo de Resiliência em função da tensão desvio para a amostra de 10% de rejeito de ferro e 90% de solo.....	188
Figura 5.56 – Módulo de Resiliência em função da tensão desvio para a amostra de 20% de rejeito de ferro e 80% de solo.....	189
Figura 5.57 – Módulo de Resiliência em função da tensão desvio para a amostra de 30% de rejeito de ferro e 70% de solo.....	189
Figura 5.58 – Módulo de Resiliência em função da tensão desvio para o solo puro.....	190
Figura 5.59 – Pavimento flexível por meio do Método Empírico para a pesquisa em questão.....	194
Figura 5.60 – Pavimento flexível genérico – utilizando valores de ISC.....	195
Figura 5.61 – Pavimento flexível considerando apenas o solo natural da região.....	196
Figura 5.62 – Pavimento flexível considerando a mistura escolhida (20% de rejeito e 80% de solo).....	196
Figura 5.63 – Dados do tráfego (Amorim, 2013).....	196
Figura 5.64 – Dados da camada de revestimento para o pavimento flexível utilizando apenas o solo natural da região.....	197
Figura 5.65 – Dados da camada de base para o pavimento flexível utilizando apenas o solo natural da região.....	197
Figura 5.66 – Dados do subleito para o pavimento flexível utilizando apenas o solo natural.....	198
Figura 5.67 – Pavimento dimensionado por meio do <i>software</i> MEDINA utilizando o solo natural.....	198
Figura 5.68 – Pavimento flexível considerando na camada de base o solo misturado com outros materiais.....	199
Figura 5.69 – Pavimento flexível genérico – utilizando valores de MR.....	200
Figura 5.70 – Dados da camada de base para o pavimento flexível utilizando a mistura escolhida...	200

Figura 5.71 – Pavimento flexível considerando na camada de base a mistura de 20% de rejeito de ferro + 80% de solo.....	201
Figura 5.72 - Análise Elástica de Múltiplas Camadas por meio do <i>software</i> AEMC.....	205
Figura 5.73 - Bacias deflectométricas obtidas pelo método indireto através do <i>software</i> AEMC.....	206

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 – Módulo de resiliência em função da tensão confinante.....	74
Equação 2.2 – Módulo de resiliência em função da tensão desvio.....	74
Equação 2.3 – Módulo de resiliência em função da tensão confinante e tensão desvio.....	74
Equação 3.1 – Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis.....	78
Equação 3.2 – Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis.....	78
Equação 3.3 – Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis.....	78
Equação 3.4 – Espessura Equivalente.....	80
Equação 3.5 – Deflexão Prevista na Superfície do Revestimento.....	80
Equação 3.6 – Deflexão Prevista na Superfície do Revestimento.....	80
Equação 3.7 – Espessura Mínima do Revestimento Betuminoso.....	80
Equação 3.8 – Espessura da Camada Granular.....	81
Equação 3.9 – Redimensionamento de Pavimento.....	81
Equação 3.10 – Módulo de Resiliência relacionado com o ISC.....	84
Equação 3.11 – Variação de Serventia.....	85
Equação 3.12 – Equação Geral do Número Estrutural.....	85
Equação 3.13 – Espessura do Revestimento.....	87
Equação 3.14 – Espessura da Base.....	87
Equação 3.15 – Espessura da Sub-base.....	87
Equação 3.16 – Equação do Método da AASHTO.....	87
Equação 5.1 – Módulo de Resiliência.....	180
Equação 5.2 – Módulo de Resiliência em Função da Tensão Confinante.....	180
Equação 5.3 – Módulo de Resiliência em Função da Tensão Desvio.....	180
Equação 5.4 – Módulo de Resiliência em Função do Modelo Composto.....	181
Equação 5.5 – $H_{20}$ Espessura Mínima.....	193
Equação 5.6 – $H_{20}$ com Valores.....	193
Equação 5.7 – $H_T$ com Valores.....	194
Equação 5.8 – $H_T$ com valores.....	194
Equação 5.9 - $D_{adm}$ (Deflexao admissível) .....	206

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMECLATURA E ABREVIACÕES

- A – Área da Seção Transversal da Amostra (ensaio de permeabilidade)
- A – Areia (Classificação MCT)
- A' – Arenoso (Classificação MCT)
- AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation officials*
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AEMC – Análise Elástica de Múltiplas Camadas
- AL – Alagoas
- Al – Alumínio
- Al(OH)<sub>3</sub> – Hidróxido de Alumínio
- AM – Amazonas
- ANP – Agência Nacional do Petróleo
- AP – Amapá
- As - Arsênio
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*
- Au – Ouro
- Ba - Bário
- BA – Bahia
- BR – Rodovia federal
- BRICs – Brasil, Rússia, Índia, China (Países em desenvolvimento)
- BSH – *British Standard Heavy*
- BSL – *British Standard Light*
- C – Argila (Classificação SUCS)
- Ca<sup>+</sup> - Cálcio
- CBR – *California Bearing Ratio*
- Cc – Coeficiente de Curvatura
- Cd - Cádmió
- CE – Ceará
- CFN – Companhia Ferroviária d Nordeste
- cm – Centímetros
- cm/s – Centímetros por Segundo

COV – Coeficiente de Variação  
Cr - Cromo  
Cu – Cobre  
Cu – Coeficiente de Não Uniformidade  
DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (Atual DNIT)  
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte  
DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral  
DRX – Difração de Raios-x  
e – Índice de Vazios  
EDS – *Energy Dispersive X-Ray Detector*  
EGF – Escória Granulada de Fundição  
ES – Espírito Santo  
Fe – Ferro  
Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Hematita  
FRX – Fluorescência de Raios-x  
g – Gramas  
G – Pedregulho (Classificação SUCS)  
G' – Argiloso (Classificação MCT)  
GO – Goiás  
H – Alta Plasticidade (Classificação SUCS)  
h – Carga Hidráulica (ensaio de permeabilidade)  
H<sup>+</sup> - Hidrogênio  
HRB – *Highway Research Board*  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração  
IDH – Índice de Desenvolvimento Humano  
IG – Índice de Grupo  
IP – Índice de Plasticidade  
ISC – Índice de Suporte Califórnia  
K – Coeficiente de Permeabilidade (ensaio de permeabilidade)  
K<sup>+</sup> - Potássio  
KCl – Cloreto de Potássio

Km – Quilômetros  
Km<sup>2</sup> - Quilômetros quadrados  
KPa – Quilopascal  
L – Baixa Plasticidade (Classificação SUCS)  
L – Comprimento da Amostra (ensaio de permeabilidade)  
L – Laterítico (Classificação MCT)  
LL – Limite de Liquidez  
LP – Limite de Plasticidade  
LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*  
m - Metros  
M – Silte (Classificação SUCS)  
m<sup>3</sup> - Metros Cúbicos  
MA – Maranhão  
MCT – Miniatura, Compactado, Tropical  
MCV – *Moisture Condition Value*  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura  
MG – Minas Gerais  
mL – mililitros  
mm – Milímetros  
Mn – Manganês  
MnO<sub>2</sub> – Pirolusita  
MPa – Megapascal  
MR – Módulo de Resiliência  
MS – Mato Grosso do Sul  
MT – Mato Grosso  
N – Não laterítico (Classificação MCT)  
Na - Sódio  
Nb – Nióbio  
NBR – Norma Brasileira  
Ni – Níquel  
nº - Número  
O – Solos orgânicos (Classificação SUCS)

°C – Graus Celsius  
OH – Hidróxidos  
P.E. – Ponto de Ebulição  
P.F. – Ponto de Fusão  
PA – Pará  
Pb - Chumbo  
PB – Paraíba  
PE – Pernambuco  
pH – Potencial hidrogeniônico  
PI – Piauí  
PIB – Produto Interno Bruto  
Q – Vazão (Ensaio de Permeabilidade)  
R\$ - Real  
RCS – Resistência à Compressão Simples  
RN – Rio Grande do Norte  
RO – Rondônia  
S – Areia (Classificação SUCS)  
S' – Silty (Classificação MCT)  
SC – Areia Argilosa (Classificação SUCS)  
SC – Santa Catarina  
Se - Selênio  
Sn – Estanho  
SUCS – Sistema unificado de classificação dos solos  
t – Tempo de Escoamento  
ton - Toneladas  
TO – Tocantins  
TRB – *Transportation Research Board*  
US\$ - Dólar  
UU – Ensaio Triaxial Não Consolidado e Não Drenado  
W – Bem graduado (Classificação SUCS)  
WAS – *West African Standard*  
wL – Liquidez

wP – Índice de Plasticidade

Z – Número Atômico

Zn - Zinco

$\epsilon_r$  - Deformação Axial

$\mu\text{m}$  – micrometro

$\rho_s$  – Massa Específica dos Sólidos

$\Sigma d$  - Tensão Desvio

### 1. INTRODUÇÃO

A cada ano a produção de resíduos sólidos gerados pela indústria mundial da mineração tem causado um impacto ambiental negativo em todo planeta. A consequente reciclagem desses materiais tem se tornado tema de pesquisas com o objetivo de encontrar uma destinação adequada para reduzir os danos causados ao meio ambiente. Dentre esses materiais, destacam-se os resíduos gerados diretamente no processo de beneficiamento, denominados rejeitos da mineração.

Os rejeitos gerados e a consequente dificuldade para a sua estocagem, além da complexidade de obtenção de materiais nobres têm justificado estudos voltados para o aproveitamento destes materiais, principalmente na construção civil em obras rodoviárias (Rezende, 1999).

Ahmed & Lovell (1992) recomendaram, ainda, que problemas técnicos, econômicos e ambientais associados às várias aplicações de rejeitos, sejam estudados e identificados para cada tipo de material e discutidos brevemente antes do seu uso extensivo na construção de estradas.

O aproveitamento de rejeitos de minério de ferro como material de infraestrutura viária é tecnicamente viável, quando adequadamente estabilizado e apresenta uma grande vantagem do ponto de vista ambiental e econômico, pois reduz as áreas de descarte, minimizando a degradação do meio ambiente, diminuindo a exploração de agregados naturais e, conseqüentemente, reduzindo os custos relacionados (Bastos *et al.*, 2016).

Mahmood & Mulligan (2010) investigaram o potencial uso do rejeito de minério de ferro como base de estradas não pavimentadas e concluíram que a maioria dos rejeitos estudados poderiam ser utilizados adequadamente como materiais de base para estradas não pavimentadas.

Dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA (2012), para o período de 1996-2005, mostraram que a geração de rejeitos aumentou 1,4 vezes, passando de 202.000.000 ton. em 1996 para 290.000.000 ton. em 2005. O minério que mais contribuiu para a geração de rejeitos no período foi o de ferro (35,08%). No ano de 2010 a geração de rejeito foi de 348.000.000 ton. e estima-se que em 2030 a geração de rejeitos dobre para 684.000.000 ton.

A disposição destes materiais normalmente necessita de grandes áreas de armazenamento (Pereira, 2005). Para o armazenamento destes materiais, na maioria dos casos, se utilizam de sistemas de contenção denominados barragens ou pilhas de rejeitos.

No entanto, devido às diferentes condições climáticas encontradas no Brasil, e que na região nordeste é caracterizada pela escassez de água, a insuficiência desta dificulta o processo de beneficiamento dos minerais e conseqüentemente o armazenamento dos rejeitos em barragens de rejeitos. Portanto, os rejeitos da mineração são armazenados em forma de pilhas, na maioria das minas do nordeste, no intuito de moderar o uso da água. As pilhas de rejeitos ainda representam problemas pela necessidade de grandes áreas para acomodação desses materiais.

Nesse contexto, a iniciativa de utilizar os rejeitos minerais como materiais de construção em obras civis representa uma importante medida para amenizar os impactos negativos da atividade mineradora. Destaca-se, no entanto, que o complexo comportamento geotécnico destes materiais acentua a necessidade de um amplo programa de investigação. A presente pesquisa apresenta uma contribuição voltada para o aproveitamento de um rejeito de minério de ferro em obras rodoviárias, sendo aplicado de forma conjunta com um solo tropical da região nordeste brasileira, em diferentes teores para camadas de pavimentos.

Os materiais estudados são provenientes do município de Jucurutu, estado do Rio Grande do Norte. No município está localizada a Mina do Bonito, local de onde foi retirado o rejeito de minério de ferro, além do solo tropical estudado, que também foi coletado na região. No Item 1.1, foram apresentadas as características mais pertinentes do município, além das informações relevantes da Mina do Bonito.

## **1.1. CONTEXTO GERAL**

Em 11 de outubro de 1935, pela Lei Nº 932, São Miguel de Jucurutu teve suas terras desmembradas de Campo Grande, Santana dos Matos e Caicó para ser elevado à condição de município. Três anos depois, em 31 de outubro de 1938, o Decreto Nº 603 alterou o nome do município para Jucurutu (IBGE, 2018).

Jucurutu é um município brasileiro pertencente ao estado do Rio Grande do Norte. Segunda maior cidade da microrregião do Vale do Açu, porém culturalmente pertence ao Seridó, região centro-sul do estado, distante 233 km da capital do estado, Natal. Seu território ocupa uma área de 934 km<sup>2</sup>, posicionando-o como o nono município com maior extensão do Rio Grande do Norte.

Com a descoberta da Mina do Bonito, localizada no município de Jucurutu no Seridó, o estado do Rio Grande do Norte passou a fazer parte dos estados exportadores de minério ferro.

A extração de ferro da Mina Bonito teve início em outubro de 2010 e a primeira exportação

foi feita em janeiro de 2011. As jazidas estão divididas em 19 blocos que se estendem por uma área de 105 mil hectares, conforme apresentado na Figura 1.1. A excelente localização geográfica das jazidas, próximas entre si, distante 125 km da costa brasileira, com topografia plana, facilita a implantação de unidades industriais para o processamento do minério de ferro e de futuras expansões a custos logísticos reduzidos (MHAG MINERAÇÃO, 2016).



Figura 1.1 - Vista geral da Mina do Bonito, Jucurutu – RN.

Fonte: MHAG MINERAÇÃO (2016).

A Mina do Bonito, produziu em 2015, um milhão de toneladas de *sínter feed*. O *sínter feed* corresponde à fração fina do minério de ferro. O Brasil é referência em qualidade do *sínter feed*, com destaque para a região de Carajás no estado do Pará. O minério de ferro da Mina do Bonito é transportado por caminhão até Juazeirinho – PB e por trem, pela Companhia Ferroviária do Nordeste (CFN) até o Porto de Suape, em Pernambuco (PE). A exportação é direcionada para o Oriente Médio. A meta da empresa era produzir 12 milhões de toneladas a partir de 2018, com a retomada das atividades. Entretanto, devido à falta de investimentos em infraestrutura no estado do Rio Grande do Norte para o escoamento da produção e a escassez de água na região para o beneficiamento do minério, a meta não foi alcançada.

Os resultados das pesquisas realizadas em diversos blocos da Mina do Bonito, inseridos num raio de 150 km, indicaram a existência da rocha do tipo Itabirito, essencialmente magnético que, depois de beneficiado, pode apresentar teores entre 60% e 70% de ferro. Além dos elevados teores

de ferro, apresentam baixos teores de impurezas, sendo os de fósforo oscilando entre 0,03% a 0,05%, sílica entre 1,5% a 2,0%, além de perda ao fogo inferior a 1,5%.

O processo de lavra é realizado com equipamento de escavação – escavadeiras e pás mecânicas, que carregam o produto, em caminhões de grande porte que vão alimentar a usina de beneficiamento. As operações de lavra incluem a remoção e armazenagem do solo para futura reabilitação do local da mineração.

O minério proveniente da mina é alimentado em uma moega, equipamento que realiza a dosagem dos materiais, de onde segue para uma peneira, que separa as partículas maiores e envia para a britagem. A britagem é feita em dois ou três estágios, com britadores de mandíbulas (primárias); cônicos ou de impacto. Esses britadores operam em circuito fechado com peneiras, resultando em um produto menor que 32 mm. São apresentados na Figura 1.2 os britadores da Mina do Bonito. Apesar dos grandes índices de minério, o processo de beneficiamento mineral da Mina do Bonito gera uma elevada quantidade de rejeitos.



Figura 1.2 - Vista geral do britador, Mina do Bonito, Jucurutu – RN.

Fonte: Autor próprio (2015).

Os rejeitos oriundos do beneficiamento do minério de ferro gerado pela indústria da mineração no estado do Rio Grande do Norte tem sido um problema do ponto de vista ambiental, haja vista que a disposição desse material requer a disponibilidade de grandes áreas para o seu acondicionamento.

Associado a esse problema, a teoria do desenvolvimento sustentável reforça a ideia de usufruir do meio ambiente de forma a garantir condições adequadas para que as futuras gerações também possam viver em harmonia dentro desse espaço. Segundo Campanha (2011), uma forma alternativa para o rejeito do minério de ferro é a utilização em obras de Engenharia Civil, principalmente naquelas relacionadas à construção de aterros rodoviários, por empregarem grandes volumes de material. A aplicação em camadas que irão compor estruturas de pavimentos das rodovias encontra-se, portanto, entre as opções de viabilidade para aplicação de resíduos de mineração.

## **1.2. RELEVÂNCIA**

A relevância da presente pesquisa está relacionada com a diminuição da exploração indiscriminada de novas jazidas de materiais convencionais utilizados em camadas de pavimentos na região nordeste brasileira quando os materiais são incorporados a um rejeito de minério de ferro em diferentes proporções. Desta forma o meio ambiente é preservado por meio da redução da exploração das jazidas e também o rejeito de minério de ferro, que se encontra armazenado em forma de montes recebe uma destinação adequada.

A pesquisa desenvolvida no estado do Rio Grande do Norte refere-se a algo inédito na região, no qual o rejeito foi incorporado a um solo laterítico a fim de compor as camadas do pavimento. Com todos os ensaios de laboratório, dados de dimensionamento de pavimentos e informações da retroanálise desenvolvidos nessa pesquisa, num futuro próximo os materiais poderão ser utilizados na execução de pavimentos alternativos na região.

## **1.3. JUSTIFICATIVA**

Como justificativa para a realização desta pesquisa, infere-se a importância de uma destinação mais adequada para os rejeitos oriundos do beneficiamento de minério de ferro. No estudo, busca-se gerar soluções alternativas em lugares que produzem uma grande quantidade de rejeito de minério de ferro, visando a reutilização em camadas de pavimentos.

Desta maneira proporcionar uma aplicação mais conveniente ao rejeito de minério de ferro, de modo que venha a diminuir o impacto negativo causado na sociedade, na fauna e na flora da região de Jucurutu – RN, além de preservar os corpos d'águas, o lençol freático e o solo da região.

Na Mina do Bonito, o rejeito de minério de ferro é armazenado ao ar livre em forma de montes

conforme indicado na Figura 1.3, os quais proporcionam um grande impacto visual negativo, além da dispersão e condução do pó causada pelo vento que prejudica a saúde da população local e dos trabalhadores envolvidos nas atividades de mineração causando doenças respiratórias (Ghio *et al.*, 1990). Estima-se que no local o volume de rejeitos de minério de ferro gerado por ano seja equivalente a uma área circular de 200 metros de diâmetro por 3 metros de altura, que corresponde a 125 mil toneladas.

Com a utilização do rejeito de minério de ferro em camadas de pavimentos e a consequente substituição de materiais convencionais como solos e rochas, haverá uma diminuição nas alterações ambientais da região, diminuição na subsidência do terreno, além da diminuição na geração de áreas degradadas, devido à redução do uso excessivo das jazidas locais.

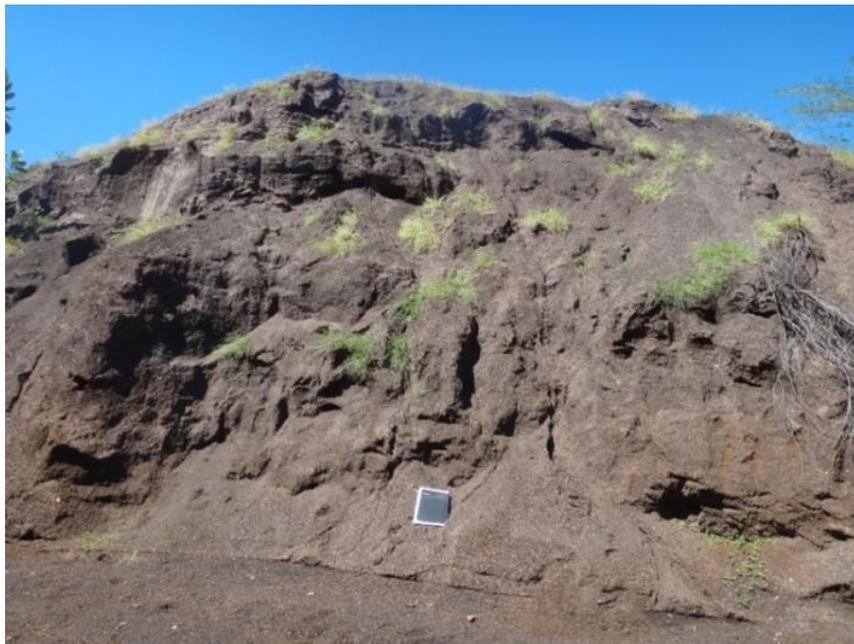


Figura 1.3 - Rejeito de minério de ferro armazenado ao ar livre na Mina do Bonito – RN.

Fonte: Autor próprio (2015).

## **1.4. OBJETIVOS**

A presente pesquisa tem como objetivo avaliar a viabilidade mecânica, geoquímica, mineralógica e geoambiental de um rejeito de minério de ferro incorporado a um solo laterítico do estado do Rio Grande do Norte para utilização em camadas de pavimentos por meio de ensaios laboratoriais. Com os resultados alcançados, elaborar e analisar o dimensionamento de um trecho de rodovia pelos métodos DNIT, MEDINA e AASTHO, bem como, simular por meio da retroanálise a determinação da compatibilidade entre tensões e deslocamentos das camadas do pavimento por meio do *software* AEMC.

## **1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

A fim de alcançar o objetivo geral, faz-se necessário alcançar os objetivos específicos mencionados:

- Realizar os ensaios da metodologia MCT para classificar os materiais segundo o seu comportamento laterítico;
- Realizar os ensaios de determinação de pH, fluorescência de raios-X, difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura para avaliar o comportamento químico, mineralógico e a estrutura interna dos materiais e como estes comportamentos influenciam nos resultados dos ensaios geotécnicos aplicados a pavimentação;
- Realizar os ensaios de solubilização para estimar/avaliar o comportamento geoambiental do rejeito de minério de ferro e conseqüentemente fazer um levantamento preliminar se o rejeito tende a contaminar o solo num pequeno período de tempo;
- Realizar os ensaios de caracterização física de massa específica dos sólidos, granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, permeabilidade e comportamento magnético dos materiais a fim de avaliar as suas características;
- Realizar os ensaios de compactação Proctor, sucção para elaboração das curvas características,

ensaios de ISC, resistência a compressão simples e módulo de resiliência a fim de avaliar as características mecânicas aplicadas à pavimentação;

- Dimensionar um trecho de rodovia pelos métodos da AASHTO, DNIT e MEDINA com os resultados dos ensaios laboratoriais;

- Simular, por meio da retroanálise, a compatibilidade entre tensões e deslocamentos das camadas do pavimento que foram dimensionadas por meio do *software* AEMC.

## **1.6. ESCOPO DA TESE**

A estrutura básica desta tese encontra-se dividida em seis capítulos, conforme descrições apresentadas abaixo.

No Capítulo 1 é apresentado um contexto geral sobre o aproveitamento de rejeitos e em seguida descreve-se sobre o município de Jucurutu no estado do Rio Grande do Norte e a sua importância para a mineração do estado e do nordeste depois da descoberta da Mina do Bonito. Destaca-se a preocupação com o grande volume de resíduos gerados na indústria mineradora local e retrata a ideia do desenvolvimento sustentável para preservar o meio ambiente de forma a garantir as condições necessárias para as futuras gerações. Num segundo momento, é exposta a relevância, a justificativa para a realização deste estudo e são descritos os objetivos pleiteados nessa tese.

No Capítulo 2 é apresentado uma revisão bibliográfica a cerca da mineração no Brasil, no estado do Rio Grande do Norte e os destaques do setor mineral do estado. Destaca-se também as pesquisas que expõem os impactos ambientais oriundos da mineração. Por último, referencia-se uma síntese de diversos trabalhos científicos desenvolvidos no âmbito nacional e internacional, onde foram feitas análises a cerca da aplicação de resíduos sólidos na pavimentação, a aplicação de resíduos minerais na pavimentação e a aplicação de resíduos de minério de ferro na pavimentação.

No Capítulo 3 são apresentados os métodos DNIT, MEDINA e AASTHO que são utilizados para o dimensionamento de pavimentos no Brasil e no exterior.

No Capítulo 4 são descritos os materiais utilizados e os métodos propostos para o desenvolvimento desta tese.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados de todos os ensaios realizados e uma análise minuciosa de todos os valores encontrados, comparando-os com outras pesquisas semelhantes. Além

disso é feito o dimensionamento de um pavimento flexível típico usando os métodos DNIT, MEDINA e AASTHO. E posteriormente, é feita uma retroanálise por meio do *software* AEMC.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões obtidas nesta pesquisa e propostas sugestões para pesquisas futuras.

### 2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é feita uma abordagem dos aspectos gerais associados às atividades de mineração no Brasil, no estado do Rio Grande do Norte e são apresentados os minerais que se destacam no setor mineral do estado. Em seguida é apresentado um panorama relacionado aos impactos ambientais causados pela mineração. Por último, são apresentados estudos científicos nacionais e internacionais sobre a aplicação de resíduos sólidos na pavimentação, a aplicação de resíduos minerais na pavimentação, além da aplicação de resíduos de minério de ferro nas camadas dos pavimentos.

#### 2.1. A MINERAÇÃO NO BRASIL

O desenvolvimento de uma nação e o bem-estar de sua população não existem sem o uso intensivo, porém racional, dos bens minerais. Qualquer um que olhar à sua volta dificilmente conseguirá identificar objetos do dia a dia que não contenham minérios em sua produção ou composição.

Pode-se observar que a biodiversidade é dependente da geodiversidade, ou seja, são as rochas que determinam a natureza dos meios físico e biótico nos quais interage a vida; também a exploração e o aproveitamento dos recursos minerais são indispensáveis para a qualidade de vida das populações. Entretanto, para alcançar um desenvolvimento sustentável, socialmente justo e com mais qualidade de vida para toda a população, as mineradoras precisam trabalhar e gerir o setor mineral de forma eficiente.

Para dar um importante passo nesse caminho, é preciso compreender tanto as dimensões da mineração brasileira, suas características, seu envolvimento com as pequenas comunidades e os grandes centros, sua importância para a indústria de transformação e para a agropecuária.

De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2016), existiam 7626 mineradoras em atividade no país no ano de 2015, compreendendo esta totalidade tanto o Regime de Concessão de Lavra (exploração mineral), quanto o regime de Licenciamento (em processo de regularização). Elas estão divididas por região, como é mostrada na Figura 2.1.

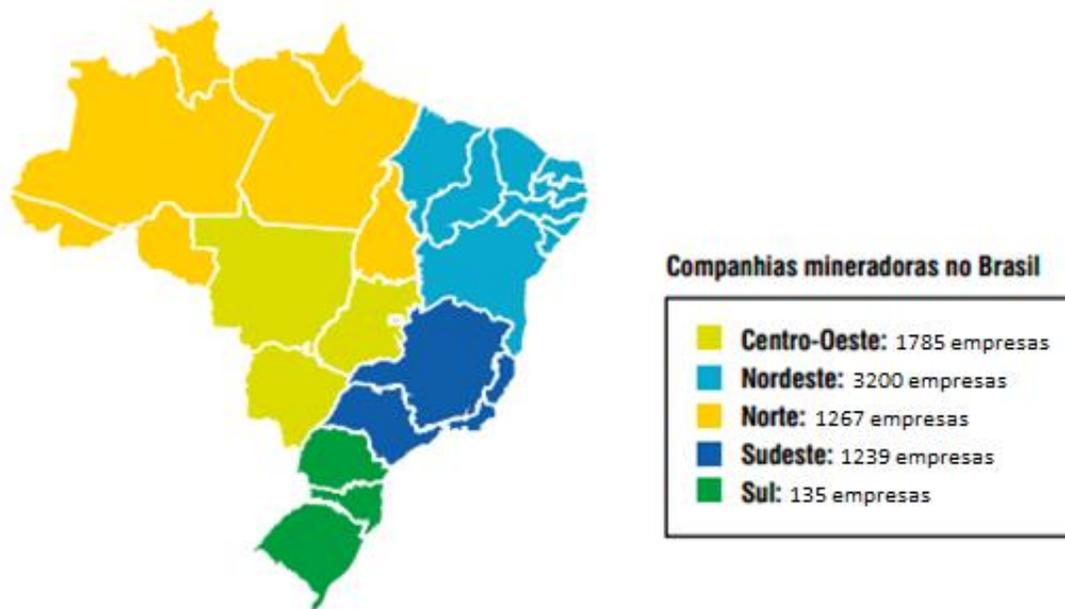


Figura 2.1 - Empresas mineradoras no Brasil – Ano Base 2015.

Fonte: ANM (2016).

Nota-se que de acordo com a Figura 2.1 a região nordeste possui 3.200 mineradoras no país, entretanto as mineradoras que atuam no nordeste brasileiro possuem uma produção mineral da ordem de 4.882.345 toneladas, menor do que as mineradoras existentes na região norte 387.670.719 toneladas, centro-oeste 54.453.222 toneladas e sudeste 450.355.036 toneladas (ANM, 2017), levando em consideração a produção bruta do alumínio, cobre, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel e ouro. Os principais produtores de minério são os estados de Minas Gerais 444.578.855 toneladas e Pará 362.290.156 toneladas (ANM, 2017). Estes estados além de possuírem as maiores reservas minerais do Brasil possuem a tecnologia mais avançada para a exploração dos minerais devido as grandes mineradoras nacionais e estrangeiras que atuam em seus territórios, alavancando a produção mineral nacional. As mineradoras existentes na região sul do país, possuem uma produção de 73.314 toneladas (ANM, 2017), menor comparada com as outras regiões do Brasil.

Segundo a ANM (2016) a Indústria Mineral Brasileira registrou ao longo da última década crescimento vigoroso decorrente das profundas mudanças socioeconômicas e de infraestrutura que o Brasil tem vivenciado. Mesmo com a crise nacional e as consequências negativas do acidente ambiental ocorrido em Minas Gerais no município de Mariana no ano de 2015, que casou a diminuição dos investimentos no setor.

O Brasil por ser um país em desenvolvimento tem aumentado de forma significativa nos últimos anos sua exploração mineral. Os principais minerais encontrados são alumínio, cobre, estanho, ferro,

manganês, nióbio, níquel e ouro. Estão distribuídos praticamente por todo o território brasileiro, com destaque maior para os estados de Minas Gerais (MG), Pará (PA) e Goiás (GO). São apresentadas na Figura 2.2 as principais regiões com depósitos minerais do Brasil.

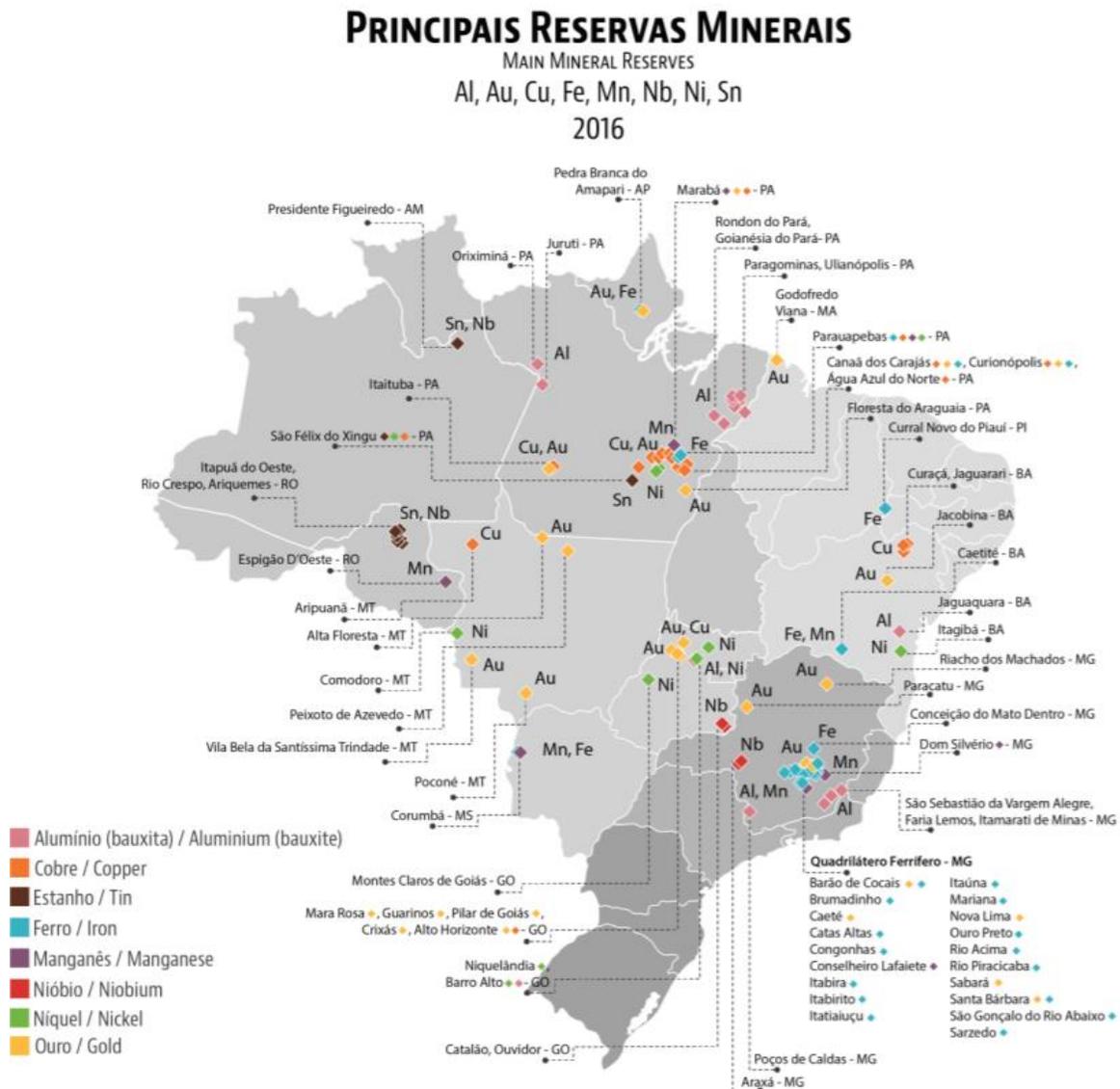


Figura 2.2 - Principais regiões com depósitos minerais no Brasil – Ano Base 2015.

Fonte: ANM (2016).

A atividade de mineração reflete positivamente na qualidade de vida dos cidadãos. O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) das cidades mineradoras é maior do que o dos respectivos estados, na maioria das vezes. Mesmo quando são instalados longe de grandes centros urbanos ou mesmo em áreas com baixos níveis sociais, os empreendimentos de mineração se tornam uma possibilidade real para o desenvolvimento sustentável regional. O IDH é calculado pelo Programa de Desenvolvimento

das Nações Unidas. É apresentado na Tabela 2.1 o IDH de alguns municípios brasileiros que possuem atividades mineradoras.

O município de Jucurutu-RN possui um IDH da ordem de 0,601 e o estado do Rio Grande do Norte possui um IDH da ordem de 0,684 (IBGE, 2018). Entretanto, essas informações são referentes ao Censo Brasileiro de 2010. Nessa época a Mina do Bonito ainda não estava em operação no município. A prefeitura municipal de Jucurutu-RN estima que já no próximo Censo Brasileiro, o IDH do município será mais alto do que o IDH do estado devido as atividades da mineração na Mina do Bonito.

Promover a ascensão socioeconômica da população é o cerne de qualquer política adotada pela administração pública, e a mineração é um dos itens fundamentais a ser levado em conta no planejamento e na execução dos projetos voltados para o progresso do País.

Tabela 2.1 - IDH de municípios brasileiros com atividades mineradoras.

Município	IDH Município	IDH Estado
Nova Lima (MG)	0.813	0.731
Parauapebas (PA)	0.715	0.646
Barro Alto (GO)	0.742	0.735
Ariquemes (RO)	0.702	0.690
Criciúma (SC)	0.788	0.774

Fonte: IBRAM (2015).

O governo brasileiro tem feito investimentos maciços para aumentar à competitividade dos produtos minerais exportados. Os principais investimentos são apresentados na Figura 2.3. Os investimentos estão relacionados às obras de infraestrutura para o escoamento da produção. Entretanto, os valores apresentados na Figura 2.3 foram recalculados devido à crise econômica enfrentada nos últimos anos pelo Brasil. Estima-se que para o estado do Rio Grande do Norte, apenas 20% do valor apresentado na Figura 2.3 foi investido entre os anos de 2014 e 2017 pelo poder público, correspondendo a cerca de 64 milhões de dólares. Os principais investimentos aconteceram na melhoria do Porto de Areia Branca para aumentar o escoamento do sal marinho, na duplicação da BR-101 que dá acesso ao Porto de Suape no estado de Pernambuco para a exportação do minério de ferro e da schelita provenientes da região Seridó do Rio Grande do Norte, além de investimentos na região de Mossoró voltados para a produção de petróleo em terra.

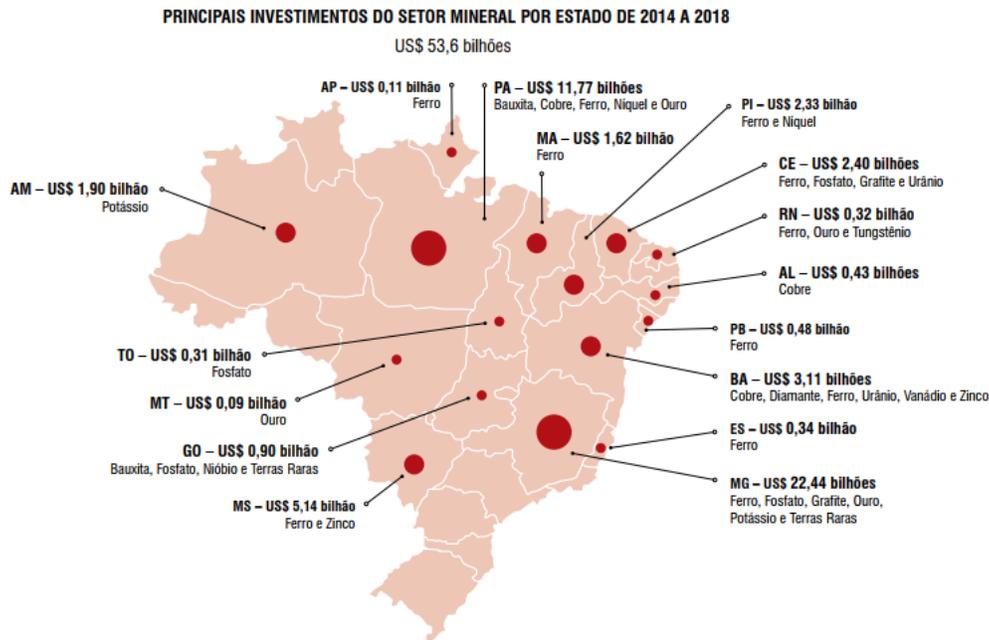


Figura 2.3 – Principais investimentos no setor mineral por estados de 2014 a 2018.

Fonte: IBRAM (2015).

## 2.2. A MINERAÇÃO NO RIO GRANDE DO NORTE

O Rio Grande do Norte é referência no setor mineral do Brasil. De acordo com dados do Departamento Nacional de Produção Mineral (ANM, 2015), o estado possui a ocorrência de mais de 2.000 jazimentos minerais, o que faz da mineração potiguar destaque no país. Esse número garante também à economia local um desempenho positivo e bastante representativo na geração de emprego e renda, com a presença de exploração mineral em todas as regiões do estado.

Atualmente cerca de 60 recursos minerais são explorados economicamente no Rio Grande do Norte e existem áreas requeridas em pelo menos 150 dos 167 municípios do estado. Empreendimentos privados no setor mineral da ordem de R\$ 1,5 bilhão nos últimos quatro anos colocam as cidades do interior do estado no mapa nacional da exploração mineral com a produção de cimento, cal siderúrgico, ferro, rochas ornamentais, ouro, scheelita, feldspato, caulim, entre tantos outros minérios.

Responsável pelo emprego de cerca de 12.000 trabalhadores com carteira assinada somente na extração mineral, o setor se consolida a cada ano como um dos mais fortes pilares da economia local.

### 2.2.1. ALGUNS DESTAQUES DO SETOR MINERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

Dentre os vários minerais extraídos no estado do Rio Grande do Norte. Os minerais apresentados abaixo possuem uma exploração mais relevante. São eles:

- **Minério de Ferro** - Exploração de minério de ferro na região Seridó com exportação da produção para o Oriente Médio;
- **Cimento** - Polo Cimenteiro no município de Baraúna, localizado na região oeste, e em outras cidades do estado como Mossoró e Currais Novos. 2009 foram produzidos 461 milhões de toneladas/ano, 2013 foram produzidos 1544 milhões de toneladas/ano (Viana, 2014);
- **Cal** - O RN tem calcário de altíssima qualidade para produzir cal e grandes empresas estão investindo na área;
- **Ouro** – Existem pelo menos 10 municípios com ocorrências de ouro no RN, entretanto, apenas dois municípios aparecem como destaque: Lajes e Currais Novos.
- **Scheelita** - Reativação das minas na região Seridó, com destaque para o município de Currais Novos;
- **Rochas Ornamentais** – Existem 26 concessões de lavra de rochas ornamentais e a retomada de investimentos no segmento merece destaque com a implantação de grandes grupos no estado;
- **Sal marinho** - Maior produtor de sal do país abastece todo o mercado nacional. A produção de 6,050 milhões de toneladas (produção em 2015) garante um faturamento medido de R\$ 1,5 bilhões de reais/ano (ANM, 2015).
- **Petróleo e Gás Natural** – O estado produz petróleo e gás natural desde o início da década de 80. A produção atual é da ordem de 50.327 barris/dia, estabilizada, e 1,187 milhões de m<sup>3</sup> de gás natural/dia. A Refinaria de Petróleo Clara Camarão, em Guamaré, já tem capacidade para processar 50.000 barris de petróleo/dia, enquanto o gás natural é processado, e distribuído através de gasoduto para abastecer o RN, Ceará, Paraíba e Pernambuco (ANP, 2016).
- **Cerâmica vermelha** - 186 empresas, produção de 111 milhões de peças/mês e faturamento de 210 milhões de reais/ano (PEREIRA, 2016).
- **Cerâmica Branca** - O RN é um tradicional fornecedor de matérias-primas de ótima qualidade, tais como feldspato e caulim para todo o Brasil. A existência de matéria-prima de qualidade e grandes

fornecedores somados aos incentivos concedidos pelo Governo do Estado e a localização estratégica do RN na região Nordeste garantem competitividade para atrair outros grupos empresariais.

Com a extração e o beneficiamento desses minerais há uma geração de resíduos, e alguns deles foram quantificados por Medeiros *et al.* (2016), os pesquisadores fizeram um levantamento quantitativo de resíduos oriundos da mineração no estado do Rio Grande do Norte para potencial uso em obras rodoviárias.

Para o cimento Portland nota-se que a produção de cimento vem crescendo no Estado e que, com isso, a geração de resíduos também tende a aumentar. Entretanto, os resíduos gerados na produção do cimento já têm utilização na própria indústria, através de duas formas: como substituição dos insumos incorporados à produção do cimento ou incinerados como combustíveis alternativos na produção do cimento.

Para o feldspato, o processo de beneficiamento se dá via seca devido à escassez de recursos hídricos, os quais são necessários para o processo de beneficiamento via úmida. Os resíduos produzidos nesse processo são vendidos como materiais de menor valor comercial, de modo que não são despejados diretamente no ambiente. Desta maneira, a geração resíduos se dá, sobretudo, do rejeito da lavra, intrusões graníticas no pegmatito, que são separadas e depositadas no próprio garimpo. O Estado do Rio Grande do Norte é responsável por 6,2% e 4,3% da produção bruta e beneficiada do feldspato no Brasil respectivamente, detendo de uma reserva de 31,66 milhões de toneladas (10,2%), distribuídas nos municípios de Alexandria, Currais Novos, Equador e Parelhas (ANM, 2009).

Para a scheelita, de acordo com o ANM (2009), a província scheelitífera do Seridó incluída nos estados da Paraíba (PB) e Rio Grande do Norte (RN) é o mais importante depósito de minério de tungstênio do Brasil. O tungstênio é um material estratégico, pois possui uma ampla aplicação cotidiana, especialmente nas indústrias elétricas, bélica e espacial. Ainda, o maior depósito, situado no município de Currais Novos, inclui as quatro principais minas da província scheelitífera: a mina Brejuí, Barra Verde, Boca de Laje e Zangarelhas. Desde a sua descoberta, ocorrida em 1943, esse depósito foi o responsável por 65% da produção nacional e detém cerca de 70% das reservas da província, atualmente avaliadas em 9.130 t de tungstênio (Mineração Tomaz Salustino S.A., 2013). Segundo dados do grupo de mineração, aproximadamente 99,2% do material que é extraído e tratado na indústria de beneficiamento da scheelita são desperdiçados, sendo apenas 0,8 % do total extraído representativo da scheelita. Estima-se que exista um acúmulo de resíduo do beneficiamento da scheelita na ordem 4,5 milhões de toneladas do resíduo grosso e 2,5 milhões do resíduo fino.

Para o caulim, o método de beneficiamento utilizado no Estado do Rio Grande do Norte é realizado por via úmida, com considerável uso de água. Esse processo é acompanhado da geração de um significativo volume de resíduos sólidos, os quais são separados do produto de interesse no processo de desareamento e peneiramento. Estes resíduos são classificados granulometricamente como grossos e finos, sendo denominados localmente de “sarrabulho” e “siri” respectivamente. Segundo Costa (2006), cerca de 70% do caulim extraído é desperdiçado, por não ser aproveitado pela indústria ou qualquer outro segmento. Tais resíduos são simplesmente amontoados em terrenos das empresas de beneficiamento, ocupando assim, uma grande área e causando impacto na flora existente. Quando secos, os resíduos transformam-se em pó e pela ação do vento, se espalham, poluindo o ar, podendo provocar danos à saúde dos trabalhadores, bem como da população local.

Para o minério de ferro, o percentual médio de geração de resíduos na exploração e beneficiamento do minério nas mineradoras norte-rio-grandenses alcança valores da ordem de 70% do que é produzido, um valor ainda muito alto de geração de resíduo. Além disso, não há uma destinação dos resíduos na maioria das minas, de modo que estes vão se acumulando na área das próprias mineradoras.

A partir dos resultados, é possível notar que o resíduo de minério de ferro ainda é o que apresenta maior volume gerado no estado e, mesmo assim, não apresenta um uso especial relacionado.

### **2.3. IMPACTOS AMBIENTAIS ORIUNDOS DA MINERAÇÃO**

Os recursos minerais têm extrema importância para a manutenção da atividade industrial, uma vez que a matéria-prima utilizada na fabricação de automóveis, máquinas tratoras, cimento etc. é proveniente dessa extração. Foi a partir da Primeira Revolução Industrial, entre os séculos XVIII e XIX, que a exploração mineral ganhou evidência, quando a extração de minérios se intensificou, sendo responsável pelo abastecimento da crescente indústria. Com o avanço da indústria e o crescimento da população mundial, houve cada vez mais a necessidade de extração de volumes cada vez maiores desses recursos.

No Brasil, os principais problemas relacionados à atividade de mineração são agrupados nas seguintes categorias: poluição da água, poluição do ar, poluição sonora, subsidência do terreno, contaminação do solo, além do próprio impacto visual. De maneira geral, essa atividade provoca um conjunto de efeitos não desejados, denominados de externalidades. Pode-se destacar como algumas

externalidades: alterações ambientais, conflitos do uso do solo, depreciação de imóveis circunvizinhos, geração de áreas degradadas e transtorno ao tráfego urbano. Além disso, essas externalidades geram conflitos com a comunidade, cuja origem, normalmente, já se dá na implantação do empreendimento, uma vez que o empreendedor não busca se informar a respeito das expectativas, anseios e preocupações das comunidades próximas ao local de em que acontecem as atividades de mineração.

A exploração de minérios gera profundas alterações ambientais, desde a modificação da estrutura física e social do local em que se encontra a mina até a região circunvizinha. Inicialmente, essas alterações afetam a cobertura vegetal, em diversos níveis, desde a supressão total ou parcial na área da mina, até a utilização de grandes volumes de água, captada muitas vezes do próprio lençol freático, através de poços perfurados para estudos preliminares.

O método mais utilizado na exploração de substâncias minerais é o método da lavra, que é um dos principais fatores que determinam o nível de impacto ambiental, exercendo grande influência na alteração da paisagem e escassez de recursos naturais. O método de lavra a céu aberto ainda é utilizado na maioria dos bens minerais, comprometendo o ambiente de forma significativa.

O aumento do aproveitamento de minério nesse método de extração acaba gerando maior quantidade de estéril, poeira em suspensão, vibração e eleva os riscos de poluição dos mananciais subterrâneos e superficiais. As minas a céu aberto provocam um aumento gradativo na geração de resíduos, os subprodutos da mineração, que são resultados da escavação e extração, geralmente esses materiais não têm valor para a mineradora e são descartados.

Uma vez que o objetivo da mineradora é dar destino ao resíduo da forma menos onerosa possível, esse descarte acaba acontecendo em uma área adjacente à área de lavra, provocando ainda mais danos na fauna, na flora e nos corpos d'águas em torno da mina.

O mau uso da água por parte das mineradoras tem provocados conflitos, em virtude da inversão de prioridade no uso da água e por políticas públicas que suprimem as comunidades locais. As políticas públicas por vezes beneficiam as grandes empresas em detrimento das populações menos favorecidas. Muitas vezes as indústrias mineradoras consomem grandes volumes de água através da perfuração de poços, canalização de rios etc., que em regiões mais remotas que sofrem com problemas relacionados a falta de água pode prejudicar o abastecimento animal e humano.

## **2.4. APLICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA PAVIMENTAÇÃO – PESQUISAS NACIONAIS**

A Lei nº 12305/2010, a qual institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, define resíduos sólidos como: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Segundo Carvalho (2019), entre os principais objetivos desta lei está a não geração, redução, reciclagem e tratamento de resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. A classificação dos resíduos, segundo esta lei, é feita de duas formas:

- Quanto à origem: se domiciliar, urbano, industrial, de serviços da saúde, da construção civil, etc.
- Quanto à periculosidade: se perigosos, quando apresentam significativo risco à saúde pública ou a qualidade ambiental, ou não perigosos.

A Norma NBR 10004 (2004), que também trata de resíduos sólidos divide ainda os resíduos não perigosos em:

- Inertes: Quaisquer resíduos que, quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água;
- Não Inertes.

A busca constante por um meio ambiente menos degradado vem acarretando uma procura por alternativas que visem a sua preservação, amenizando o impacto provocado pelas atividades extrativistas. Diversos estudos nacionais das mais variadas origens já foram elaborados a fim de proporcionar uma alternativa à destinação dos resíduos sólidos, conforme são apresentados.

Fadanelli e Wiecheteck (2010) estudaram a viabilidade da utilização de lodos gerados nas estações de tratamento de água em solo-cimento para a pavimentação rodoviária. Foram feitas caracterizações físicas, químicas e mineralógicas, além de ensaios de compactação Proctor normal em corpos de prova com diferentes concentrações de lodo. Os autores concluíram que, à medida que se aumentam os teores de lodo na mistura de solo-cimento, havia uma queda da massa específica seca máxima e um aumento do teor da umidade ótimo da mistura. Segundo os dados oriundos das análises granulométricas, verifica-se a grande quantidade de areia no lodo, tal qual no solo, sendo dessa forma classificado como arenoso, mostrando-se aptos a ser utilizados como mistura em solo-cimento. Por fim, verificaram que com o aumento do teor de lodo, a mistura apresentou queda da massa específica seca máxima, por consequência do maior índice de vazios do lado devido a sua alta umidade higroscópica, acarretando uma queda na qualidade da mistura aumentando-se assim o índice de retração volumétrica, afetando a durabilidade do conjunto.

Conceição Leite *et al.* (2011) avaliaram a viabilidade do uso de resíduos de demolição e construção civil (RDC) aplicados em pavimentação. Um programa de ensaios de laboratório foi conduzido, incluindo caracterização geotécnica, capacidade de carga e flexão em viga sob carga repetida. Os resultados demonstraram que o agregado reciclado a partir do RDC pode ser empregado com sucesso como base granular ou sub-base em estradas de baixo volume de tráfego.

Casagrande *et al.* (2013) estudaram a aplicabilidade de cinzas de incineração de resíduo sólido urbano (RSU) em camadas de base de pavimentos. Este estudo apresenta a caracterização de cinzas obtidas nas usinas geradoras de energia elétrica, tendo como objetivo avaliar sua aplicabilidade em camadas de base de pavimentos rodoviários, através da mistura destas cinzas a um solo argiloso não-laterítico do estado do Rio de Janeiro. Foram realizados ensaios de caracterização química, física e mecânica, para o solo puro e para o mesmo com a adição de diferentes teores de cinzas (20 e 40%), bem como o dimensionamento mecanístico-empírico para uma estrutura típica de pavimento. Os resultados obtidos atingiram os valores estabelecidos pelo DNIT, sendo dependentes do teor e do tipo de cinza utilizado, ressaltando o emprego positivo da cinza volante de RSU para aplicação em camadas de base de pavimentos rodoviários, minimizando problemas atuais de disposição de resíduos em lixões e aterros sanitários, dando um fim mais nobre a este material.

Fujii e Camapum de Carvalho (2013) analisaram as características físicas e o comportamento mecânico de misturas de um solo típico da região de Brasília - DF associado a um resíduo da construção e demolição (RCD) constituído de restos de concreto, cal virgem e cal hidratada. A proposta de trabalho adotada por esses autores baseou-se em ensaios de caracterização e classificação

segundo as metodologias TRB e MCT, além de ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão. Segundo os autores, o incremento da fração de concreto oriunda do RCD estudado, quando associado ao solo melhorou as propriedades geotécnicas avaliadas, produzindo um material estabilizado granulometricamente para uso em camadas estruturais em obras de pavimentação.

Silva *et al.* (2017) estudaram o desempenho mecânico de misturas de asfalto utilizando aglutinante modificado com tereftalato de polietileno micronizado (PET). O polímero foi misturado em quantidades de 4%, 5% e 6% em peso com uma base aglutinante de asfalto e testes mecânicos foram realizados. Dois métodos de projeto de mixagem SUPERPAVE foram realizados. O primeiro foi feito com ligante puro e o teor ótimo de ligantes foi determinado e os espécimes foram analisados de acordo com os seguintes parâmetros: módulo de resiliência (RM), Lottman e resistência à tração indireta (ITS). Um segundo procedimento de projeto de mistura foi realizado com o teor ótimo de PET de acordo com os melhores resultados obtidos no primeiro, e analisados de acordo com RM, ITS, Lottman, Fadiga e testes de número de fluxo. Os resultados mostraram melhorias significativas nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas com PET micronizado em comparação com as misturas asfálticas sem aditivo.

Amorim e Lima (2018) estudaram o emprego de resíduos de borracha em pavimentação incorporados aos revestimentos asfálticos. O uso desta metodologia traz consigo algumas vantagens como, por exemplo, a diminuição do envelhecimento por oxidação, aumento da flexibilidade e da vida útil em até 30%, além da aderência e do conforto do usuário. A tecnologia empregada na modificação de ligantes asfálticos pela adição de borracha advinda de pneus em desuso surge como algo extremamente interessante, pois, além de proporcionar um importante desempenho ao ligante, este método incorpora em seu objetivo um recurso ecológico de grande valia, ou seja, ele diminui o descarte inadequado de pneus inservíveis. Em outras palavras, a adição de borracha de pneus, quando aplicados em obras de pavimentação, pode elevar a durabilidade das estradas e ruas, bem como proporcionar maior viscosidade, elasticidade, resistência à luz solar e conforto para o usuário.

Carvalho (2019) estudou a avaliação do comportamento resiliente de solo argiloso com inserção de politereftalato de etileno (PET) para aplicação em base de pavimentos. A presente pesquisa propõe o uso do resíduo de garrafas PET, sob a forma de pó, triturado e fibras, como material alternativo para camadas de base em pavimentos. Misturas de Solo-PET, utilizando um solo argiloso com inserção de pó de PET nas porcentagens de 10, 20 e 30 %, inserção de PET triturado nas porcentagens de 3, 5 e 7 %, e inserção de fibras de PET nas porcentagens de 0,25 e 0,50 %, foram analisadas geotecnicamente por meio de ensaios de caracterização física, ensaios de compactação e ensaios de

módulo de resiliência. Os ensaios mecânicos foram realizados nas amostras recém-compactadas e em corpos de prova aquecidos, avaliando ainda a influência do aquecimento no módulo de resiliência. Também foi utilizado o programa computacional SisPav para simular o dimensionamento de um pavimento típico composto pelos materiais estudados. A autora conclui que a utilização de um solo argiloso adicionado com PET como material alternativo em base de pavimentos é tecnicamente viável e representa uma boa solução para a destinação deste resíduo bem como para a mitigação de seu potencial agressivo ao meio ambiente.

## **2.5. APLICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA PAVIMENTAÇÃO – PESQUISAS INTERNACIONAIS**

Assim como as pesquisas desenvolvidas em âmbito nacional, diversas pesquisas internacionais já foram desenvolvidas nos últimos anos a fim de proporcionar uma alternativa à destinação dos resíduos sólidos.

Huang *et al.* (2007) avaliaram o uso de resíduos de vidro, escória de aço, pneus e plásticos para uso em pavimentos asfálticos a partir de revisão de normas de requisitos técnicos e estudo do desempenho de pavimentos construídos utilizando esses materiais reciclados. Os estudos mostraram grande potencial para o fornecimento desses materiais e discutiram algumas das possíveis barreiras que podem diminuir o desempenho da aplicação. Os resíduos de vidros devem ser finamente moídos para não apresentar nenhum risco a segurança quando for incorporado a camada de revestimento e ficarem expostos na superfície do pavimento. A escória de aço deve ser usada no lugar de agregados grossos no asfalto de superfície, para fazer melhor uso de sua resistência mecânica e resistência à derrapagem. O uso de misturas de pedra com escória de aciaria aumentará a densidade total da mistura, mas implica em um aumento no custo de transporte. Outra barreira importante está relacionada com o processo de lixiviação dos resíduos que pode vir a contaminar o solo.

Dubois *et al.* (2008) propuseram a utilização dos sedimentos marinhos oriundos da dragagem para a utilização em construção de rodovias. Foram elaborados estudos que visavam à determinação das características físicas e mecânicas dos sedimentos finos dragados de um porto, localizado no norte da França, além dos possíveis impactos que esses sedimentos causariam no meio ambiente. Em seguida, foram propostas análises desses sedimentos em conjunto com materiais próprios de execução de rodovias, materiais variando de rochas a argilas. Por fim, foram elaborados estudos a fim de analisar o comportamento da mistura com adição de ligantes (cimento e/ou cal). Os autores

concluíram que as características mecânicas medidas nas misturas são compatíveis com a sua utilização como um material de camada de base. Além disso, os resultados obtidos demonstram a eficácia da cal nas misturas. Em termos de impactos ambientais, com base em ensaios de lixiviação e de acordo com os limites disponíveis da legislação francesa para a construção de estradas, as misturas com utilização de sedimentos dragados satisfazem os limites prescritos.

Imteaz (2012) estudou a utilização de vidros reciclados para execução de pavimentos no estado de Vitória, na Austrália. Através de ensaios ambientais, analisaram possíveis impactos ambientais devido a presumíveis presenças de contaminantes por meio de medições de pH, condutividade (estimativa grosseira da solubilidade dos sais), presença de metais pesados, presença de matéria orgânica e inorgânica. Seus estudos geotécnicos mostraram que a utilização de vidro reciclado, do ponto de vista econômico, é muito eficaz para execução de sub-bases de pavimentos. O autor concluiu que os contaminantes existentes nos vidros reciclados estão dentro dos limites aceitáveis nas normas ambientais australianas, à exceção dos teores de ferro que estavam acima dos limites aceitáveis, havendo, portanto uma necessidade de monitoramento da utilização do vidro. Por fim, concluiu que, apesar dos elevados teores de ferro, utilização de vidro reciclado é viável ambientalmente para execução de sub-base de pavimentos como material agregado.

Herrador *et al.* (2012) avaliaram a viabilidade técnica do uso de resíduos de construção e demolição (RDC) como material para camada de base de pavimentos. Para tanto, foi realizado um estudo de campo, que incluiu ensaios de desempenho de pavimentos em concreto de cimento Portland, mistura asfáltica e agregado de resíduos cerâmicos. Isso foi feito analisando as características do material reciclado em uma seção de uma estrada real sob condições reais de tráfego de veículos. No estudo, observou-se que a capacidade de carga do agregado de RDC foi satisfatória.

Chavan (2013) estudou a utilização de sacos plásticos triturados com dimensões entre 2,36 mm e 4,75 mm incorporados a misturas betuminosas até 10%. O autor comprovou que além da melhora das propriedades do ligante que contribuiu para o aumento da vida útil das estradas na Índia, também resolveu problemas de descarte do material. Ainda segundo o autor, usando resíduos de plástico incorporados a mistura, houve uma redução da necessidade de betume em cerca de 10%.

Gabr *et al.* (2013) analisaram o comportamento mecânico dos agregados reciclados de concreto provenientes de usinas recicladoras da cidade de Adelaide na Austrália e de um agregado natural obtido na região, o agregado da região era constituído de cascalhos e areias bem graduadas com presença de siltes. Os materiais foram investigados e comparados de forma independentes. Na pesquisa, os autores utilizaram o ensaio triaxial de cargas repetidas para avaliar as deformações das

amostras e o comportamento resiliente dos materiais em diferentes condições de tensões e diferentes teores de umidade. A partir dos resultados obtidos, pelo comportamento apresentado nos ensaios, foi constatado que os agregados de RCD utilizados na pesquisa podiam ser utilizados como material de base e, para determinados teores de umidade, eles foram considerados adequados ao tráfego pesado, segundo os requisitos apresentados pelas normas rodoviárias Australianas mencionados por Vuong e Arnold (2006).

## **2.6. APLICAÇÃO DE RESÍDUOS MINERAIS NA PAVIMENTAÇÃO – PESQUISAS NACIONAIS**

Abaixo são apresentadas pesquisas desenvolvidas em âmbito nacional com resíduos minerais aplicados a pavimentação.

Pagnussat (2004) estudou a utilização de escória granulada de fundição (EGF) em blocos de concreto para pavimentação, na substituição parcial do cimento ou do agregado miúdo, por meio de ensaios de resistência à compressão, desgaste por abrasão e absorção de água em concreto com diferentes teores de substituição (10%, 30% ou 50%). O autor concluiu que, não há diferenças significativas na substituição de até 50% de cimento por EGF em relação ao desgaste por abrasão e absorção de água, tanto em relação à substituição do cimento, quanto a substituição do agregado miúdo. Contudo, verificou que houve um decréscimo da resistência à compressão, à medida que se aumenta o teor de escória, não sendo significativo, porém, para teores de até 10% de EGF em relação ao cimento.

Alecrim e Fabbri (2005) estudaram as potencialidades do uso de rejeito granular da mineração de quartzito em camadas sub-base e base de pavimentos flexíveis. Utilizando diferentes dosagens entre solos lateríticos da região sudoeste de Minas Gerais e um rejeito granular de quartzitos, os pesquisadores comprovaram que a proporção de 60% de rejeito e 40% de solo apresentou o melhor desempenho relativo aos ensaios de Índice Suporte Califórnia e de módulo de resiliência com respectivos valores de 84% e de 700 MPa. Posteriormente Alecrim (2009) analisou o uso do rejeito da mineração de quartzito após a britagem em camadas de sub-base, concluindo que este ao ser misturado com o solo laterítico da região apresentou valores que indicavam bom comportamento quanto à resistência e deformabilidade, comparáveis aos materiais granulares e misturas solo-agregado convencionais.

Martins e Santos (2012) estudaram o comportamento de misturas de resíduos do

beneficiamento de feldspato e quartzo com adições de cimento em teores de 2% e 4%, visando sua aplicação na pavimentação. Esse estudo apontou o resíduo como um material não perigoso e não inerte (Classe II-A), contudo apresentando teores de alumínio, ferro, fluoreto e manganês acima dos permitidos em norma, fato este que podem levá-los a solubilizar em água, contaminando os corpos hídricos. Foi detectado que o resíduo em seu estado natural apresenta valores de ISC e expansão melhores em seu ramo seco, em umidade 2% abaixo da umidade ótima. O ISC para esta umidade é, em média, 84% maior que o ISC para a umidade ótima. Ademais, evidenciou-se que, quando misturado com cimento, com teores de 2% a 4% abaixo da umidade ótima, a mistura apresentou valores de resistência à compressão simples, em média, 151% maior quando comparado ao material em seu estado natural.

Rezende *et al.* (2013) estudaram a reutilização de resíduos finos de pedreira (micaxisto) em camadas de pavimento para tráfegos leves. Os autores realizaram a construção de um pavimento experimental com materiais convencionais e uma mistura de resíduos de pedreira com solo-fino e revestimento asfáltico. A mistura ideal para ser utilizada na pista experimental foi definida por Araújo (2008). Testes de campo foram realizados para avaliar o comportamento desses materiais. Após 2 anos de funcionamento da pista, com os dados obtidos no teste de viga Benkelman e subsequente retro análise, as camadas do pavimento apresentaram comportamento semelhante e desempenho satisfatório. Estes resultados mostram o potencial uso dos resíduos de pedreira em pavimentação.

Ingunza *et al.* (2014) estudou o rejeito de mineração de feldspato, oriundo de rochas pegmatíticas situadas na região Seridó do estado do Rio Grande do Norte, em vista a sua aplicabilidade na construção civil, substituindo o mesmo pelo cimento em argamassas, e avaliando seu comportamento como material de pavimentação. Para isso, procedeu-se uma caracterização físico-química do resíduo a qual detectou que o mesmo é um material inerte com alto percentual de sílica e alumínio e menor proporção de ferro, potássio e cálcio. Para avaliação do uso do resíduo em substituição do cimento para produção de argamassa foram moldados corpos-de-prova com substituições de 5% e 10% do cimento em massa, utilizando para tal, amostras de resíduo passante da peneira n° 200. Observou-se que para misturas de 5%, os valores de resistência à compressão e à tração aos 7 e 28 dias são muito semelhantes, e que para teores superiores de cimento existe a tendência de diminuição dos valores de resistência à compressão e tração. Quanto ao uso do rejeito como agregado, foi realizado uma mistura composta por 77% de brita (resíduo), 20% de areia de dunas retida na peneira n° 200, e 3% de pó de britagem do rejeito. A amostra apresentou valor de massa específica na ordem de 2,3 g/cm<sup>3</sup>, com expansão de 0,09% e ISC<sub>méd</sub> de 41,8%, satisfazendo

os pré-requisitos para seu uso como material de sub-base em pavimentação.

Lopes *et al.* (2015) analisaram o comportamento de um solo estabilizado com cinzas de carvão mineral para aplicação em camadas de base de pavimentos. Este estudo apresenta a caracterização de dois tipos de cinzas (de fundo e volante) obtidas da queima de carvão mineral em usinas termelétricas, tendo como objetivo avaliar sua aplicabilidade em camadas de base de pavimentos rodoviários. As avaliações foram feitas com base no estudo do comportamento das misturas destas cinzas com um solo areno-siltoso não-laterítico característico do estado do Rio de Janeiro. Foram realizados ensaios de caracterização física, química, mecânica (compactação, módulo de resiliência e deformação permanente) e, por se tratar da utilização de resíduos industriais, foram realizados também ensaios ambientais de solubilização e lixiviação. Os resultados obtidos apresentaram valores satisfatórios que são condizentes com os valores estabelecidos pelas normas brasileiras, sendo dependentes do teor e do tipo de cinza utilizado, além do tempo de cura. Tais fatos, juntamente com os resultados dos ensaios ambientais ressaltam o emprego positivo de ambos os tipos de cinzas (de fundo e volante) de carvão mineral para aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, minimizando problemas atuais de disposição destes resíduos em lixões e aterros sanitários, dando um fim mais nobre a esse material.

Buitrago *et al.* (2016) estudaram os mecanismos de expansão do subproduto da produção de aço (Açobrita) e os métodos de estabilização volumétrica, que foram realizados por meio de uma cura para controlar a expansão do agregado. Estes autores identificaram vários campos aplicáveis para a utilização das escórias, destacando-se sua utilização como agregado nas estruturas de base de rodovias. Na pesquisa realizada, foram determinadas as propriedades físicas e mecânicas do aço-brita, do solo que foi classificado segundo a ASTM como uma argila laterítica e de misturas com diferentes proporções entre o solo e o aço-brita por meio de ensaios de caracterização física e ensaios mecânicos aplicados a geotecnia seguindo os procedimentos recomendados por normas nacionais e internacionais. O programa experimental relativo aos ensaios geotécnicos de laboratório foi definido: 70% agregado siderúrgico + 30% solo (M7030), 80% agregado siderúrgico + 20% solo (M8020) e 90% agregado siderúrgico + 10% solo (M9010). Os resultados dos ensaios mostraram que o agregado siderúrgico aço-brita proporciona características adequadas segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006) para ser empregado como material de pavimentação, principalmente por obter valores de ISC mais elevados do que os estabelecidos pelo DNIT, tendo conformidade granulométrica, expansão controlada e altos valores de Índice de Suporte de Califórnia, sendo aplicáveis como material de base de pavimentos rodoviários.

Almeida *et al.* (2017) estudaram uma mistura de solo com escória de cobre e cimento Portland para aplicação em camadas de pavimentos. A pesquisa apresenta um estudo experimental da mistura de um solo de características areno-argiloso do Estado de Sergipe, 10% de escória de cobre pós-jateada e cimento Portland numa proporção de 0, 3, 5, 7 e 9% de teor de cimento, com o objetivo de avaliar as melhorias na matriz do solo natural atribuídas àquela porcentagem da escória para esses diferentes teores do aditivo. Comparando as misturas sem e com escória, nota-se uma redução na umidade ótima; adicionando-se cimento Portland ao solo aumenta-se a resistência à compressão simples, porém, não é diretamente proporcional para todos os teores, verificando-se que o crescimento é mais acentuado para teores acima de 5% de cimento. O mesmo comportamento pode ser verificado quando adicionado 10% da escória. No geral, o crescimento da resistência é bem mais acentuado quando adiciona os 10% da escória de cobre, para teores acima de 5% de cimento; com a adição de 10% de escória de cobre é possível reduzir o teor de cimento. Adicionando-se cimento Portland e 10% de escória de cobre ao solo observam-se as alterações devido à ação modificadora do cimento, para teores mais baixos de cimento e aglutinadora, para teores mais altos de cimento, as mesmas propriedades também foram verificadas para o solo puro.

## **2.7. APLICAÇÃO DE RESÍDUOS MINERAIS NA PAVIMENTAÇÃO – PESQUISAS INTERNACIONAIS**

Abaixo são apresentadas pesquisas desenvolvidas em âmbito internacional com resíduos minerais aplicados a pavimentação.

Mahmood e Mulligan (2010) avaliaram o uso de rejeitos de cobre e ouro, além do rejeito de ferro como materiais para a construção de estradas não pavimentadas (acesso temporário). Em seu estudo, foram analisados diferentes tipos de rejeitos de cobre, ouro e ferro, para os quais se realizou ensaios de caracterização física e de compressão não confinados. Os resultados iniciais indicam que os rejeitos avaliados atendem os valores estabelecidos por dez departamentos estaduais de transporte rodoviário dos Estados Unidos conforme os valores de resistência a compressão não confinada e segundo os critérios de caracterização física. E portanto, podem ser utilizados em obras de pavimentação.

Liu e Xu (2011) avaliaram a viabilidade do uso de rejeitos de amianto como agregados em misturas asfálticas comuns e as propriedades dessas misturas. Foram conduzidos ensaios de caracterização mineralógica do rejeito para determinar o conteúdo de resíduos sólidos de cobre,

zinco, chumbo e cádmio. As propriedades de desempenho da mistura asfáltica com rejeitos de amianto foram avaliadas em comparação com misturas utilizando agregados de basalto. Os resultados de DR-X e FR-X permitiram inferir que o rejeito de amianto é um excelente material rodoviário e que as propriedades da mistura satisfizeram as especificações relacionadas com as normas Alemãs. Não foram detectados metais pesados e poluição tóxica no rejeito e o valor do pH foi de 8,23, o que contribui para a adesão com asfalto no concreto asfáltico. Quando comparado com o basalto, a propriedade de alta temperatura e a resistência à quebra em baixa temperatura da mistura asfáltica foi melhorada usando rejeitos de amianto como agregados.

Wang e Thompson (2011) desenvolveram uma metodologia para o uso de escórias ferrosas e não-ferrosas para utilização em obras rodoviárias. Os materiais estudados foram testados para camadas de base e sub-base, misturas asfálticas a quente, concreto e cimentos. Segundo estes autores, para utilização correta das escórias na construção de rodovias e garantir que o uso seja tecnicamente seguro e durável, os seguintes passos devem ser seguidos: (i) selecionar o critério correto para um uso específico; (ii) realizar testes laboratoriais relevantes para quantificar a amostra dada; (iii) determinar a usabilidade com base em critério relevante; (iv) realizar controle de qualidade no campo; e (v) monitorar o desempenho a longo prazo, que é o mesmo que o uso de materiais naturais normais.

Kumar e Sharma (2013) pesquisaram os fatores de equivalência para vários materiais usados em camadas de sub-base e os avaliaram experimentalmente. Os materiais utilizados na pesquisa foram: a areia grossa, o pó de pedra, material do leito do rio e escória de alto-forno. Para o estudo, várias misturas estabilizadas e diferentes combinações com macadame hidráulico foram realizadas. As propriedades estudadas foram o módulo de resiliência, a deformação permanente, resistência à compressão, resistência ao cisalhamento e a carga de falha. Os materiais estabilizados com cimento podem compor camadas 36% menos espessas em comparação com materiais estabilizados com macadame hidráulico. Uma combinação de macadame/solo com mistura úmida acarretou 18% menos em espessura em comparação com o macadame hidráulico puro. Portanto, há um melhor escopo para o uso de misturas estabilizadas e combinações de macadame no lugar do macadame puro. Em materiais de sub-base, o material de leito de rio apresenta quase a mesma espessura (3% a mais) em comparação com a sub-base granular. Os resíduos industriais como a escória de alto forno também fornecem espessura compatível com a sub-base granular, isto é 21,5% a mais em ao agregado natural. Assim, foi observado que estas escórias podem ser usadas onde quer que estejam disponíveis localmente e substituindo assim, a exploração de novas jazidas por materiais alternativos.

Sas *et al.* (2015) reportam um estudo com objetivo investigar as características químicas e

selecionar parâmetros geotécnicos significativos da escória de aço como material alternativo para ser utilizado na construção de estradas. As propriedades estudadas foram o ISC, o módulo de elasticidade e o módulo de resiliência nas camadas de base e na superfície de revestimento, além de ensaios de placa com carga estática. A escória de aço bem classificada granulometricamente atingiu o valor de ISC superior a 60% em cada dos 25 corpos de prova que foram ensaiados. Por outro lado, amostras saturadas em água mal classificadas na maioria das vezes não ultrapassaram 40% do valor de ISC. Ao comparar o impacto das propriedades mencionadas anteriormente na graduação da capacidade de suporte e nas condições de saturação, a escória de aço é mais sensível a graduações abertas ou simplesmente à falta de grãos finos. Além disso, o carregamento cíclico mostra um bom desempenho da escória de aço e o deslocamento de plástico foi 1 mm maior após a 50ª repetição de carga do que após a primeira carga. O teste de campo de carga de placa estática provou que a mistura de escória de aço satisfaz os requisitos para a base e para camadas de revestimento. A utilização de escória de aço nas camadas do pavimento rodoviário seria desejável do ponto de vista econômico e ambiental: grandes quantidades de resíduos seriam, assim, utilizadas, reduzindo a quantidade de escória depositada em aterros sanitários.

Sharma & Sivapullaiiah (2016) investigaram o efeito da ativação conjunta de cinzas volantes, um subproduto de usinas térmicas, e escória granulada de alto forno moída, um subproduto da fabricação de aço, sobre a resistência à compressão não confinada. A compactação laboratorial e os testes de resistência foram realizados em misturas de cinzas e escórias em diferentes proporções. Entretanto, as misturas constituídas de 30 e 40% de escória e curadas após 28 dias apresentaram maior resistência que os materiais individuais. Adicionalmente, o efeito de diferentes percentagens de cal na resistência das misturas de cinzas volantes, gerou um aumento na resistência, com a adição de até 2% de cal. A microscopia eletrônica de varredura e difratometria de raios-X mostraram as alterações morfológicas e mineralógicas associadas à melhoria da resistência. Este estudo sugere que as combinações de cinza-escória-calcária podem ser usadas como materiais de construção para projetos de infraestrutura, tais como preenchimentos estruturais ou camadas de sub-base e base de pavimentos, sem a necessidade de grandes percentagens de cal.

## 2.8. APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINÉRIO DE FERRO NA PAVIMENTAÇÃO – PESQUISAS NACIONAIS

Abaixo são apresentadas pesquisas desenvolvidas em âmbito nacional com resíduos de minério de ferro aplicados na pavimentação.

Gratão *et al.* (2006) realizaram ensaios experimentais em misturas entre um latossolo vermelho, proveniente da região centro-oeste do Brasil, e diferentes teores de rejeito de minério de ferro granular, oriundos do beneficiamento realizado em uma usina localizada no município de Rio Piracicaba, Minas Gerais, Brasil. Foram testadas misturas com teores de 25% e 50% de resíduo em massa, apresentando baixa plasticidade, devido às características granulares e não plásticas do resíduo de minério. O acréscimo do resíduo resultou em maior peso específico seco máximo para e uma diminuição do teor de umidade ótima, constatando-se através de ensaios de compressão simples que, para teores de 25% de resíduo, a resistência aumentou cerca de 70%, enquanto que, para teores de 50%, a resistência quase dobrou.

Campanha (2011) estudou as características químicas, mineralógicas e geotécnicas dos rejeitos da flotação e concentração de minério de ferro, tendo como objetivo a utilização de materiais de construção para pavimentação. O rejeito de flotação foi classificado no sistema TRB como A4 e o da concentração como A3, sua granulometria é compatível para utilização em sub-base ou base em solo cimento conforme o manual de pavimentação do DNIT (DNIT, 2006). Os resultados de ISC e expansão foram compatíveis com os parâmetros normativos para sub-base de pavimentos flexíveis. As análises de difratometria identificaram a presença de argilominerais não expansivos. Os rejeitos de minério de ferro apresentaram potencial para uso em pavimentação, especialmente quando melhorados com cimento na proporção de 2%, 3%, 4% e 5%. Comparando-se os dois materiais e com base nos ensaios que foram empregados na pesquisa realizada, observou-se um comportamento melhor do rejeito de flotação, sob o ponto de vista mecânico. Considera-se a maior presença da fração fina na composição granulométrica desse rejeito com maior coesão, conseqüentemente a maior coesão contribui para um melhor desempenho.

Toffolo *et al.* (2014) avaliaram os resíduos da mineração de ferro na produção de elementos de concreto para pavimentação. O estudo comparativo das características físicas e mecânicas de blocos de concreto para pavimentação fabricados com substituição dos agregados naturais pelos agregados artificiais. Foram avaliadas dosagens até que o bloco atingisse uma resistência a compressão simples de 50MPa, valor este utilizado no Brasil para pisos intertravados de estacionamentos, assim, as

composições que atingiram o valor de resistência a compressão simples de 50MPa indica bons resultados de resistência à compressão, expansibilidade, absorção de água e aponta a viabilidade do emprego de agregados artificiais provenientes de barragens de rejeitos da mineração para a fabricação destes blocos aplicados em pavimentação.

Dantas (2015) analisou o comportamento geotécnico do rejeito de minério de ferro estabilizado com solo granular proveniente do município de Macaíba/RN visando sua aplicação em pavimentos rodoviários. Para tanto realizou ensaios de caracterização química, física, mecânica e mineralógica para cinco traços distintos, sendo eles: o solo puro, o rejeito puro, 15% de rejeito de minério de ferro e 85% de solo tropical, 25% de rejeito de minério de ferro e 75% de solo granular, 50% de rejeito de minério de ferro e 50% de solo granular. Constatou altos teores de minérios de ferro presentes no rejeito acarretando em elevados valores de massa específica dos sólidos da ordem de 4,00 g/cm<sup>3</sup>. Todas as amostras apresentaram-se fora das faixas granulométricas recomendadas para uso em camadas de base estabelecidas pelo DNIT. As misturas com até 25% de rejeito apresentaram aumento do ISC em relação ao solo siltoso local, atingindo valores na ordem de 60% para a energia modificada, podendo ser utilizada em camadas de base conforme o Manual de pavimentação do DNIT (DNIT, 2006) para rodovias com baixo volume de tráfego.

Sanchez (2015) estudou a efetividade da aplicação da canga de minério de ferro, rejeito da mineração, em camadas de pavimento como um destino mais nobre e lucrativo do que o seu descarte. Para isto testou a mistura da canga com dois solos finos. A autora realizou ensaios físicos e mecânicos e analisou os solos do município de Caeté - MG, a canga de minério e as misturas de canga de minério (50% de canga) e solo. As misturas de solo e canga apresentaram comportamento mecânico melhorado ou semelhante ao do solo puro, atuando como melhoria granulométrica. A inserção de canga de minério puro ou na mistura foi visto como positivo e tornou o material apto a compor camadas de sub-base de pavimentos para baixo volume de tráfego.

Andrade *et al.* (2017) avaliaram as perspectivas para o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro como materiais de construção alternativos. Para tanto, apresentou a caracterização granulométrica e química de rejeitos da mineração de ferro do Quadrilátero Ferrífero, coletadas em três barragens, estabelecendo-se um paralelo com as características normalmente exigidas para alguns materiais na construção civil conforme as normas brasileiras, segundo a granulometria, a composição química e mineralógica, além da forma das partículas. Os resultados apontaram que os rejeitos exibem características e propriedades semelhantes às requeridas para diferentes materiais de construção no Brasil. Os principais usos avaliados foram à incorporação no cimento, fabricação de

concretos, argamassas e cerâmicas e utilização em obras de pavimentação, tendo sido constatado um cenário bastante propício para aplicação dos rejeitos da mineração de ferro como materiais da construção civil.

Santos (2018) avaliou a viabilidade de reaproveitamento de rejeito de mineração de ferro e ouro sob o aspecto ambiental. Os rejeitos foram submetidos a caracterização física, mineralógica, química e geoquímica. Com os resultados, a autora verificou a presença de elementos químicos apenas no rejeito de ouro potencialmente tóxicos ao meio ambiente, sendo necessário a realização de estudos geoambientais mais específicos como forma de compreender a mobilidade e disponibilidade dos metais para o meio ambiente. Entretanto, os estudos geoquímicos e geoambientais revelaram a baixa tendência de mobilidade e disponibilidade desses metais. Posteriormente, a autora utilizou um solo laterítico de Brasília-DF, o qual também foi caracterizado, em misturas de 5%, 10% e 15% em massa de rejeitos. As misturas foram submetidas a ensaios químicos e mecânicos como forma de simular a reutilização. Foi verificado o aumento de resistência das misturas em relação ao solo e também a baixa capacidade de retenção de metais. Por fim, foi verificado o potencial de aproveitamento dos rejeitos estudados em obras civis, especialmente pela baixa tendência destes de contaminar o meio ambiente.

De Oliveira *et al.* (2019) mostraram também um estudo relacionado à utilização de rejeitos de minério de ferro na construção de pavimentos e aterros rodoviários. Para tanto, foram investigadas as propriedades geomecânicas de misturas de dois rejeitos de minério de ferro, melhorados com cimento nas proporções de 3%, 4% e 5%, cujos resultados são importantes para caracterizar o comportamento de misturas quanto às ações mecânicas impostas à camada estrutural de estradas pavimentadas. Os resultados indicaram que os rejeitos e as misturas estudadas sem adição de cimento apesar de possuir um valor de ISC que permite sua aplicação em camadas sub-base, haveria o risco de situações que comprometessem o comportamento mecânico, por se tratar de um material com granulometria uniforme e alta perda de massa por imersão, além da perda de massa total no teste de durabilidade acima de 10%, valor máximo aceitável para este tipo de material, de acordo com a NBR 12253 (ABNT, 2012c). A adição de 5% de cimento melhorou as propriedades mecânicas e hidráulicas, levando a uma capacidade de suporte média, determinada por ISC, para cerca de 140%, e a resistência à compressão não-confinada para cerca de 0,89 MPa. Apesar da adição de cimento não alterar a uniformidade do tamanho das partículas, as propriedades cimentantes diminuem a perda de massa por imersão e a perda de massa total no teste de durabilidade.

## 2.9. APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINÉRIO DE FERRO NA PAVIMENTAÇÃO – PESQUISAS INTERNACIONAIS

Abaixo são apresentadas pesquisas desenvolvidas em âmbito internacional com resíduos de minério de ferro aplicados na pavimentação.

Zhang *et al.* (2010) avaliou o uso de rejeitos de minério de ferro estabilizado com cimento e fibras de polipropileno como materiais de base em pavimentos semi-rígidos. As fibras foram utilizadas no intuito de reduzir o consumo de cimento necessário para estabilização do rejeito. Os resultados mostram que a mistura atende as exigências de sub-base de estradas de alto volume de tráfego com dosagem nas seguintes proporções: de 3% de cimento e 0,3% de fibras de polipropileno.

Xu (2013) avaliou as propriedades mecânicas, por meio de ensaios de compressão simples de diferentes proporções de resíduos de ferro estabilizado com cimento (5%, 10% e 15) para aplicação em base e sub-base de pavimentos. Os resultados mostraram que quando estabilizado com 15% de cimento, o resíduo de minério de ferro atende as exigências legais chinesas para o uso em camadas de base e sub-base de pavimentos de baixo volume de tráfego (Cai Xia, 2000).

Widojoko (2013) estudou o uso de rejeitos de ferro para a construção de revestimentos de pavimentos rodoviários avaliando três aspectos fundamentais: a diversificação de materiais de pavimentação, o uso de rejeitos de forma otimizada como material para pavimentação de rodovias, e a possibilidade de reduzir o potencial de contaminação ambiental. O autor realizou ensaios de caracterização dos rejeitos e de misturas com porcentagem de rejeitos de 15%, 20% e 25% adicionadas ao concreto asfáltico, projetado pelo Método de Marshall. A mistura de melhor desempenho como componente da mistura asfáltica foi de 20% de rejeitos. O ensaio de trilho de roda mostrou que essa mistura tem a menor deformação permanente, que foi de 2 mm. Este estudo mostrou que os rejeitos poderiam ser usados como material de pavimentação asfáltica, substituindo agregados fino da mistura.

Li (2014) analisou as propriedades mecânicas e o desempenho da camada de base do pavimento com a mistura de um rejeito de minério de ferro granular estabilizado com cimento com 2%, 3%, 4% e 5%. Após os ensaios de módulo de resiliência e ISC ficou comprovado que a adição do rejeito granular de minério contribui para a melhoria das propriedades mecânicas, aumentando a rigidez da base que passa a ser classificada como um pavimento semi-rígido.

Yisa & Sani (2014) estudaram a estimativa de confiabilidade de valores característicos da resistência de um solo laterítico estabilizado com resíduo de minério de ferro em camadas de sub-

base de pavimento rodoviário. As análises realizadas foram baseadas nos resultados laboratoriais de resistência à compressão simples não confinada e ISC, para amostras compactadas nos níveis de energia estabelecidas pela agência Nigeriana de rodovias (*Nigerian General Specifications, 1997*). Os resultados foram incorporados em um programa de confiabilidade de primeira ordem baseado em FORTRAN e valores de índice de segurança obtidos. Geralmente, o índice de segurança produziu um valor beta satisfatório de 1,0, conforme especificado para o projeto do estado limite de serviço no esforço de compactação da empresa Nigeriana de Rodovias. Os resultados indicam que a umidade ótima, módulo hidráulico, resíduo de minério de ferro e densidade seca atingiram valores de fatores de segurança aceitáveis (1,0) e coeficientes de variação (COV) em torno de 10 a 80% para o teste de resistência à compressão enquanto que para o ISC produziu índice de segurança também de 1,0 e faixas de COV de 10 a 20%.

Bastos *et al.* (2016) avaliaram a viabilidade dos rejeitos de minério de ferro oriundo das barragens de rejeitos como material alternativo para a infraestrutura rodoviária na camada de base de pavimentos. Os rejeitos de minério de ferro foram quimicamente estabilizados utilizando cimento, cal e escória de aciaria. As misturas de cimento, cal e escória de aciaria foram constituídas de 1%, 2%, 5% e 10%. Foram realizados ensaios de caracterização química, caracterização física além de ensaios de ISC. Os resultados indicaram que o uso de rejeitos de minério de ferro como material de infraestrutura viária é tecnicamente viável, quando adequadamente estabilizado. Além disso, representa uma grande vantagem do ponto de vista ambiental e econômico, reduzindo as áreas de disposição de rejeitos, minimizando a degradação do meio ambiente, diminuindo a exploração de agregados naturais e, conseqüentemente, reduzindo os custos relacionados a essas atividades. O cimento foi o estabilizador mais eficiente entre os materiais estudados, podendo ser utilizado para qualquer tráfego.

Filho *et al.* (2017) avaliaram a viabilidade técnica e ambiental do uso de rejeitos de minério de ferro como agregados finos na produção de blocos de concreto intertravados. A proposta do estudo foi substituir o agregado natural pelo rejeito em proporções de 10 a 80% e submeter estas associações a análises físicas (expansão, porosidade e absorção de água), análises ambientais (lixiviação e dissolução), além de ensaios mecânicos (resistência à compressão e abrasão). O rejeito estudado é um material fino, não perigoso e inerte. Os blocos com adição de rejeitos mostraram propriedades físicas e mecânicas significativamente similares, ou superiores, aos blocos convencionais, e todas dentro dos requisitos para tráfego leve segundo o Manual de pavimentação do DNIT (2006). Em relação à resistência mecânica, todas as misturas propostas, com até 80% de rejeito, atingiram uma

resistência à compressão acima de 35 MPa. A resistência à compressão das misturas com 10 e 20% de rejeito de ferro ultrapassou o limite normativo mínimo de 50 MPa. Desta forma, elas podem ser usadas até em estradas de tráfego moderado ou expostas a forte abrasão. Os resultados dos testes dos pavimentos que incorporaram os rejeitos de ferro foram comparados aos convencionais e aos limites padrão. Portanto, os blocos com adição de rejeitos é tecnicamente e ambientalmente viável para ser usado. Essa reutilização também contribui para a redução dos impactos sociais e ambientais associados às barragens de rejeitos.

## 2.10. SOLO LATERÍTICO

Segundo Maignein (1966) a paternidade do termo “Laterita” é controversa, o autor cita Prescott assinalando que Babington (1821) o utiliza pela primeira vez na acepção científica, e que o emprego dessa palavra foi utilizado especificamente (Laterita e pedra de Brique) entre 1807 e 1814 por Buchanan para designar materiais com características analíticas mal conhecidas. Para o autor a originalidade da formação descrita pela primeira vez por ele, reside na sua consistência mole quando ela utilizada e na sua facilidade de endurecer rapidamente quando exposta ao ar.

Bourgeon (2005) descreve em detalhes precisos a experiência do Médico Francis Buchanan que criou o termo “Laterita”. Ele relata suas observações realizadas entre 20 e 21 de dezembro de 1800 em Angadipuram, sul da Índia. Para os autores, após sua criação, o emprego do nome “Laterita” (e das palavras que dela se derivaram) se internacionalizou e foi estendido a outros domínios: prospecção mineral, geoquímica, pedologia, geomorfologia etc. Esse sucesso se auto afirma ao longo de todo o século XX, e é acompanhado de uma multiplicação de definições de empregos variados.

O autor, para responder esta questão em vigor, escolheu ilustrar a situação atual sobre a taxonomia de perspectivas atuais relacionadas à palavra “Laterita” sob a importância das ciências dos solos, onde o termo “Plinthite”, criado pelo *United States Department of Agriculture, Soil Taxonomy* para designar os horizontes, potencialmente em via de endurecimento, e representando um papel menos evoluído de objetos denominados de “Laterita”.

O termo “Plinthite”, citado pela *Soil Taxonomy* em 1956, foi criado para distinguir as diferentes formas de “Laterita” entre as formações susceptíveis de endurecer e as quais de pronto fortemente cimentadas. Bourgeon (2005) se refere aos textos de Wanbeke de 1992, que afirma: “...*this definition Plinthite was written to cover the original concept of Laterite...that was first described by Buchanan.*”

Bourgeon (2005) conclui que: "... a laterita tanto como um objeto de investigação científica seguiu depois de dois séculos uma trajetória por sua vez polisêmica e multidisciplinar". Para o autor, o estudo da Laterita, tanto como instrumento de análise estatigráfica, tanto como marco paleoclimático, tanto como pretexto a decifrar as trajetórias geoquímicas das rochas sob os efeitos de alterações da supergêne, revelados por disciplinas científicas que abordam mais por uma problemática quer por um objeto com contornos definidos. As formas iniciais de Laterita são atualmente denominadas de Plinthite em Ciências dos Solos, mas esta não dispensa aos pedólogos de se interessar por outras formas mais frequentemente utilizadas para compreender os meios pelos quais se desenvolveram os Solos Tropicais.

Solos lateríticos são aqueles que ocorrem predominantemente entre os trópicos e apresentam propriedades de engenharia particulares, diferentes daquelas características dos solos de regiões temperadas (Camapum de Carvalho, 2015). Algumas das características típicas dos solos lateríticos são:

- Grau de alteração (elevado);
- Sua gênese (pouco dependente);
- Propriedades químicas e mineralógicas (fruto de grande alteração);
- Características estruturais (presença de cimentações e de micro e macroporos);
- Umidade / Grau de saturação (geralmente não saturado).

Os solos lateríticos são resultantes do intemperismo e suas características típicas são influenciadas pelo modo de formação da rocha mãe, características morfológicas e grau de intemperização, sendo a composição química e mineralógica influenciada pelas condições topográficas e de drenagem (Gidigas, 1976).

Gidigas (1976) ainda define a laterita como sendo acumulações superficiais ou subsuperficiais de produtos provenientes do intenso intemperismo de rochas, desenvolvidos sob condições favoráveis a uma maior mobilidade dos elementos alcalinos, alcalino-terrosos e sílica, além de imobilização de ferro e alumínio.

Nogami & Villibor (1995) afirmam que também são características típicas dos solos lateríticos a coloração vermelha, amarela ou marrom, camadas de grande espessura, elevada porosidade aparente e permeabilidade, além de apresentarem uma granulometria que varia desde uma argila até areia argilosa. Os autores ainda afirmam que os solos lateríticos sofrem pequena diminuição do índice de suporte pela imersão em água nas condições ótimas de compactação, onde é possível observar que

o valor da expansão é relativamente pequeno. Entretanto, nas amostras compactadas no ramo seco poderá ser apreciável a expansão e quando o solo é compactado no ramo úmido pode apresentar expansão de até 1% ou mais.

Rezende (1999) afirma que a importância dos solos lateríticos como material de construção rodoviária no Brasil foi reconhecida no fim da década 30, e desde então foram realizadas muitas pesquisas visando à obtenção de metodologias que permitam a melhor utilização desses solos.

Gidigas (1976) afirma ainda que muitos estudos realizados para determinar as características de compactação dos solos lateríticos, levaram à conclusão que são determinantes o conteúdo de finos, sua graduação e as características de plasticidade, assim, como o conteúdo de argila.

Para Gidigas (1976), os solos lateríticos são apropriados para compor sub-base, mas não para base, pois esses têm mostrado que sob condições adversas de tráfego e umidade não apresentam uma boa resposta mecânica. No entanto, de forma geral, os solos lateríticos têm um bom comportamento em trechos com um nível de tráfego leve até médio mesmo em camadas de base como mostram vários estudos realizados por Nogami e Villibor (1995).

Outra utilização dos solos lateríticos que vem sendo estudada, é a mistura desses com outros materiais para fins rodoviários, tais como: resíduos da mineração, cal, cimento, betume, brita descontínua, material fresado e fibras sintéticas e orgânicas.

Aproximadamente 75% do território brasileiro apresenta-se coberto por um manto de solo laterítico com composição rica em Fe, Mn, Al, Ni, Nb e fosfatos (Teixeira *et al.*, 2000). Devido a este fato e ao desenvolvimento de procedimentos de caracterização apropriados para estes tipos de solos, tem sido possível a utilização dos solos tropicais como fonte de matéria prima para a construção rodoviária, pois se observou que esses são de baixo custo e apresentam bom comportamento estrutural na constituição de reforço do subleito, sub-base e base (Delgado, 2002).

Segundo Lima (2013) é possível verificar que os parâmetros relativos às propriedades físicas e mecânicas dos Solos Lateríticos de países de clima tropical e subtropical tais como a granulometria, a plasticidade, a dureza e a capacidade de suporte devem ser medidas por técnicas e por instrumentos que considerem em sua concepção sua formação geológica, assim como a influência do pré-tratamento realizado sobre as amostras trabalhadas em laboratório e durante a execução em campo.

### 2.10.1. O PROCESSO DE LATERIZAÇÃO E OS FATORES DE INFLUÊNCIA

Segundo Lima (2013), na qual a autora cita Tardy (1993) e Rodrigues *et al.* (2010), afirma que a alteração supergene, processo natural da superfície, resulta de interações atuais e passadas entre a litosfera e os envelopes fluídos que circundaram nosso planeta. Segundo a autora, o motor principal desta alteração é a água que, sob uma ação dinâmica interviu na dissolução química das rochas da litosfera e sob uma ação estática agiu como regulador na estabilidade dos minerais e de estruturas e sua ação mecânica quando dos eventos variados que teriam preponderado no processo de erosão superficial. As condições climáticas particularmente favoráveis nas regiões tropicais conduziram ao desenvolvimento dos Sistemas Lateríticos que se originaram da crosta continental essencialmente ácida (graníticas/magnetita) das Guianas, da Amazônia, do Oeste Africano, do Congo-São Francisco, da Índia e do Oeste Australiano.

O “Processo de Laterização” engloba um conjunto de fenômenos que deram origem a uma alteração extremamente forte da rocha mãe, e de uma individualização dos elementos tais que a sílica e óxidos ou hidróxidos e hidratos metálicos, em particular de ferro, de alumínio, de manganês e de titânio (Aubert, 1964; Maignein, 1966).

Esse processo pode ter sido seguido por outros processos pedogenéticos tais como o emaranhado de hidróxidos da superfície versus um horizonte semi-profundo duramente concrecionado ou em carapaças de hidróxidos metálicos previamente individualizados e por vezes acumulados; segregações de elementos de um horizonte hidromórfico (Autret, 1983; Schellmann, 2009).

Para Vallerga (1960), os fatores que exercem uma influência preponderante sobre o Processo de Laterização são: o clima (pluviometria); a topografia (erosão e drenagem); a vegetação (matéria orgânica, bactéria, ácidos húmicos); a Rocha mãe e o período de formação.

Segundo Rodrigues *et al.* (2010), as temperaturas observadas nos países tropicais são favoráveis a uma alteração das rochas do tipo Laterização, pela formação dos óxidos de ferro e de alumínio e da lavagem da sílica. À umidade constante, a relação  $K_i = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  aumenta com a temperatura; ela mesma serve de catalisador das reações químicas que podem ter seus efeitos multiplicados por 2 ou por 3 para cada aumento de 10°C de temperatura. A pluviosidade e o balanço hídrico da água em abundância são necessários para a alteração química (hidrólise). Segundo o autor, o Processo de Laterização consiste em trocas iônicas em meio aquoso, necessita, portanto, de água e do tempo. A topografia influi sobre esse processo na medida em que favorece ou impede a

acumulação de água.

Segundo Lima (2013), a vegetação influi sobre o teor de elementos grosseiros dos horizontes superficiais dos Solos Lateríticos limitando a erosão (os fragmentos de quartzo e agregados miúdos se concentram pela mistura de materiais finos por ação da água). O conjunto de Laterita sob a forma de “carapaças” é mais frequente em zonas de savanas enquanto que o inverso, as concreções lateríticas (Pedregulhos Lateríticos ou Concreções Lateríticas com elementos mais grosseiros são constituídos de materiais menos alterados ou não completamente alterados, ao contrário do pedregulho pisolítico nos quais não se encontram traços da rocha mãe) são observadas onde há presença de lençóis d’água.

Ainda segundo a autora, a natureza da rocha mãe não parece ter incidência sobre a existência do Processo de Laterização, apresenta, porém, influência clara sobre as rochas básicas ígneas do tipo basalto, sobre rochas ácidas do tipo granito, gnaisses ou sobre outras rochas sedimentares do tipo feldspáticas, xistos e calcários. Ela exerce um papel sobre o tipo de reação e a natureza dos constituintes argilosos; as rochas cristalinas básicas como as basálticas são menos ricas em sílica e compostas em parte de “Olivina” que se altera em montmorilonita; as rochas cristalinas ácidas (tais como as graníticas e as gnaisses) se alteram principalmente em Caulinita ou Mica e as rochas sedimentares argilosas (tais como os xistos e as feldspáticas) em Ilita e Mica.

Atualmente se admite que o Processo de Laterização consista em um fenômeno lento que ocorre em períodos de milhares de anos (época geológica). Um levantamento mundial realizado pela *Food and Agriculture Organization of United Nation* - FAO (2006) mostra que o Processo de Laterização está situado em regiões Intertropicais (América do Sul, África, Índia, Austrália e o Sudoeste Asiático).

## **2.10.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MICROESTRUTURA DOS SOLOS LATERÍTICOS**

Maignein (1966) classificou os materiais constituídos de Solos Lateríticos em função de dois elementos principais, que tem um papel essencial na formação dos horizontes endurecidos, e em elementos secundários, indiferentes ao processo propriamente dito. Os primeiros são representados por óxidos e hidróxidos de alumínio, de ferro, por vezes de manganês e de titânio, de sílica e frequentemente também por argilas. Os segundos são constituídos de elementos texturais dos solos “in situ”, produtos residuais.

Segundo Lima (2013), as porcentagens de óxidos e de hidróxidos de Ferro e de Alumínio

(sesquióxidos) podem chegar, para alguns Solos Lateríticos Concrecionados ou Pedregulhosos, até 80% do produto da laterização.

O argilomineral presente, geralmente, na fração fina dos Solos Lateríticos é a Caulinita, que é coloidalmente menos ativa. Esta atividade se reduz ainda quando ela está associada aos óxidos e aos hidróxidos de Ferro ou de Alumínio, que recobrem geralmente a Caulinita.

Esses constituintes apresentam geralmente, nos Solos Lateríticos, poucos comportamentos particulares, próprios aos minerais argilosos convencionais. Assim, possuidores de uma superfície específica elevada e de pequenas dimensões, eles não são expansivos, tem uma capacidade de troca catiônica negligenciável, nas condições de pH preponderante nos solos, e possuidores de um excesso de carga positivas e não negativas, como no caso dos argilominerais (Nogami *et al.*, 1995; Villibor *et al.*, 2009).

É possível observar a microestrutura dos Solos Lateríticos Finos, com o auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Segundo Nogami *et al.* (1995), devido ao processo de laterização, a fração argila dos solos lateríticos é constituída essencialmente de argilominerais do grupo das caulinitas e de óxidos e hidróxidos hidratados de ferro e/ou alumínio (Quintans, 2008).

As observações obtidas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e pelo Departamento de Química da Universidade de São Paulo (UNESP – SP/Brasil), a microestrutura dos Solos Lateríticos (VILLIBOR *et al.*, 2009) demonstram em evidência que:

- As partículas individuais de argilas não são geralmente visíveis, e quando elas são, não aparecem nitidamente;

- Os flocos relativamente grandes se aglutinam as partículas argilosas presentes num aspecto de “nuvens” ou de “pipocas” e medindo 1 a 2 até 50 à 100 mm, nas suas dimensões maiores;

- Os flocos se apresentam como agregados em forma de granulados ou como matéria intersticial entre grãos de areia.

Os aspectos citados aparecem em todos os solos analisados independentemente de suas cores ou da granulometria. O aspecto de flocos é mais ou menos visível em função do grau de laterização. Quando a intensidade do Processo de Laterização sobre o solo é fraco, menos se vê, distintamente, as partículas individuais dos minerais argilosos.

### 2.10.3. MORFOLOGIA E AS DENOMINAÇÕES DOS SOLOS LATERÍTICOS

Segundo Rodrigues *et al.* (2010) a presença de concreções e coesão das amostras dos Solos Lateríticos depende de fatores como: o grau de cristalinização dos componentes, o conjunto de diferentes constituintes e do grau de envelhecimento do solo.

A estrutura extremamente variada pode ser reduzida a três elementos: os elementos endurecidos formando um esqueleto coeso e contínuo, os elementos endurecidos são de concreções ou de nódulos (torrões) livres ao meio de um material terroso e os elementos endurecidos cimentados dos materiais pré-existentes.

Moh *et al.* (1969) afirma que um grau crescente de laterização se traduz por um aumento de espessura de revestimentos em óxidos de ferro das partículas do solo. Estas partículas se coagulam mais tarde em grandes agregados e sem uma diminuição da sua área específica. Essas diferenças entre os solos de zonas temperadas e os Solos Lateríticos podem ser explicadas a partir destes revestimentos e da coagulação das partículas do solo.

A cor dos solos é variada, mas geralmente de intensidade viva. Os pigmentos mais frequentes são: rosas, vermelhos, amarelos e marrons. Geralmente admite-se que a cor do solo é devida à presença do ferro como no caso de alguns sedimentos. As cores vivas, rosas e amarelas, são devidas aos óxidos ou hidróxidos de ferro. A cor vermelha é provocada pela presença da hematita, a cor amarela pode ser atribuída à presença de goetita (Segalen, 1964).

A densidade real varia em grandes proporções (2,5 a 3,6) e dependem da composição química do Solo Laterítico. Ela aumenta com os teores de ferro e diminuem com os teores de alumínio. As formas oxidadas são mais densas que as formas hidratadas. Os resultados disponíveis indicam que a densidade não varia somente por meio dos grupos de solos baseados sobre a textura, mais igualmente de uma fração a outra (Lyon Associates Inc., 1971). O autor encontrou, para um mesmo solo, uma fração de agregados que teria uma densidade mais elevada que a fração de finos, por causa da concentração de óxidos de ferro em primeiro lugar, apesar de que o alumínio está concentrado na fração fina e de argila.

A evolução da rocha mãe em direção a superfície de diferentes conjuntos concrecionados permitem distinguir geralmente: um conjunto de alteração; um conjunto mediano de acumulação de hidróxidos metálicos e fases argilosas; e um conjunto móvel superior lixiviado constituído de minerais residuais primários resistentes.

Entretanto, segundo Rodrigues *et al.* (2010) estes três conjuntos podem apresentar entre eles discordâncias e alguns podem por vezes estar ausentes. Outros podem apresentar sucessões complexas de diferentes facetas.

Os Solos Lateríticos podem ser classificados de maneira sintética ou analítica. A primeira é baseada em fatores genéticos e em propriedades de fatores ou de processos pedogenéticos. A segunda considera características, sobretudo morfológicas, com considerações pedogenéticas (Maignein, 1966).

As principais denominações utilizadas são: Laterita, Solos Tropicais, Solos Lateríticos, Solos Ferruginosos, Solos Ferralíticos, Solos Fersealíticos, Ferrisolos, Ferrasolos, Andosolos, Oxisolos, Podzolos, Latossolos, e Plinthosolos (Lima, 2013).

### **2.10.3.1. GRANULOMETRIA DOS SOLOS LATERÍTICOS**

Para Lecomte-nana (2008), Lyon Associates Inc. (1971), ISTED (1990), Nogami et al. (1995), Villibor et al. (2009) e Lima (2013) a estrutura granulométrica dos Solos Lateríticos apresenta geralmente:

- uma forte proporção de elementos finos (inferiores ao tamanho de 80  $\mu\text{m}$ ) chegando a 10 à 40%;
- uma retenção de diâmetro de 2 mm de 20 à 60%;
- uma dureza relativa dos agregados para uma mesma jazida e esta em função da maturidade das partículas lateríticas concrecionadas e da quantidade dos sesquióxidos, que predominam na fração grossa;
- as curvas granulométricas têm uma queda ou uma descontinuidade denotando uma ausência de certas frações granulares. Este por sua vez se situa entre os diâmetros de 80 $\mu\text{m}$  e 0,2 mm;
- os materiais com agregados pétreos, ricos em ferro, têm geralmente comportamentos mecânico estáveis;
- na fração granular, a constituição mineralógica da fração silte é geralmente simples, há uma

predominância de quartzo com a presença nítida de porções de argila;

- os principais constituintes da fração argilosa (diâmetro inferior à 0,002 mm) podem ser classificados como minerais: óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio e constituintes orgânicos.

A estrutura metaestável dos Solos Lateríticos é sensível às variações dos níveis de energia térmica e/ou mecânica, com consequências sobre as propriedades físicas e mecânicas. Em termos de granulometria, a secagem induz a um aumento do tamanho das partículas, fazendo se aglomerar a fração argilosa e a fração siltosa até chegar ao tamanho da fração arenosa em função da coagulação do óxido de ferro durante a secagem (Terzaghi, 1958; Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1959; Newill, 1961; Moh *et al.*, 1969; Townsend, 1969; Lyon Associates Inc., 1971; Gidigasú *et al.*, 1974).

Os Solos Lateríticos Pedregulhosos secos em estufa têm a fração de argila menor que as amostras intactas (com teor de água natural) ou secas ao ar (Moh *et al.*, 1969). A diminuição do teor de argila é acompanhada de um aumento da fração fina e arenosa produzida pela cimentação e pela coagulação por óxido de ferro livre das partículas argilosas em pequenos agregados (Terzaghi, 1958).

Para Lyon Associates Inc. (1971), as mudanças de propriedades com a secagem podem ter uma importância não desprezível durante a construção. Se ensaios realizados em laboratórios não são executados com amostras secas ao ar, seus resultados podem corresponder à de solos alterados.

Para os Solos Lateríticos, o incremento de energia mecânica tem por consequência aumentar sua vulnerabilidade. O aumento da massa específica aparente seca máxima e do teor de água em areias finas, sobretudo com a fração superior ao material que passa na peneira de diâmetro de 80  $\mu\text{m}$  e onde a fração menos argilosa tem um teor maior em  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Novais, 1972).

### **2.10.3.2. A PLASTICIDADE DOS SOLOS LATERÍTICOS**

A influência dos sesquióxidos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) faz com que os Solos Lateríticos tenham um comportamento plástico diferenciado dos solos de clima temperado. Pode se observar durante os ensaios que o aumento da área específica, devida à desintegração das partículas e/ou a quebra da estrutura granular do solo como consequência do aumento da absorção de água pelas amostras (Winterkom, 1951; Newill, 1961; Coleman *et al.*, 1964; Moh *et al.*, 1969; Vargas, 1982; Nogami *et al.*, 1995; Villibor *et al.*, 2009).

Newill (1961) e Villibor *et al.* (2009) afirmaram que quando ensaios de limite de liquidez são

efetuados, as uniões de partículas de argilas são quebradas pelas manipulações inerentes do ensaio; isto conduz a uma difícil obtenção de valores reprodutíveis pelo ensaio de limite de liquidez. O tratamento aplicado ao solo gera também problemas de discrepância entre os resultados dos ensaios realizados em laboratório e o comportamento mecânico do solo em campo onde ele não recebe necessariamente um tratamento equivalente.

Em função das inconsistências de resultados obtidos com os ensaios de limite de liquidez, Autret (1983) e Fabbri (1994) realizaram estudos da plasticidade de Solos Lateríticos com o ensaio de Azul de Metileno. Segundo Autret (1983) os estudos das atividades das argilas com esses ensaios, aplicados aos Solos Lateríticos Pedregulhosos, mostraram que em geral existe uma relação entre o valor do Azul de Metileno e a relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  (R). Entretanto, o significado desta relação é contestado e o valor para o qual se admite que um solo seja Laterítico ( $R \leq 1,33$ ) não é verdadeiramente considerado como característico. Os estudos de Autret (1983) demonstram que faltaria, para os Solos Lateríticos, adaptar a forma de operação e de manipulação a um pH dado.

Fabbri (1994) em estudos sobre a influência do pH sobre o valor de Azul de Metileno, conclui que “... em geral é claro que os testes de adsorção do Azul de Metileno devem ser realizados com o pH natural da suspensão solo/água, enquanto dado que essa variação não introduz mudanças significativas nos resultados dos ensaios”. Segundo o autor, esta é ainda a condição mais favorável a essa realização, porém ela não é necessariamente ligada a outro produto em suspensão, não sendo necessário medir nem controlar o pH, nestes casos, acarretaria um aumento no tempo de execução do ensaio.

Os estudos de Fabbri (1994) indicam que o ensaio de adsorção de Azul de Metileno pelo método da mancha é capaz de identificar o tipo de argilomineral presente na fração fina dos Solos Lateríticos. O autor apresenta um ábaco de caracterização da atividade dos argilominerais da fração fina dos Solos Lateríticos, com graus de atividades (muito ativo, ativos e pouco ativos), relacionando com a porcentagem de argila contida na amostra do solo.

O fenômeno de perda de água conduz geralmente nos solos uma evolução marcada da porosidade. Esta evolução se traduz essencialmente por uma diminuição progressiva dela mesma, até certo nível de desidratação ou perda de água a partir do qual o volume aparente medido deveria ser constante: tem-se então o limite volumétrico inferior no qual é denominado normalmente sob o nome de “Limite de Contração (LC)”.

O conhecimento do Limite de Contração é importante para prever se os Solos Lateríticos Arenosos ou Finos não correm o risco de ficarem sujeitos, principalmente em países com estações

secas bem marcadas, à diminuição acentuada de volume. Podendo ocorrer, neste caso, sua fissuração. Seria necessário então manter livre de variações do teor de água ou eventualmente não utilizar as amostras de solos sem estabilização química ou mecânica (Figura 2.4) (Autret, 1983; Nogami *et al.*, 1995; VILLIBOR *et al.*, 2009).



Figura 2.4 - Fissuras em rodovias construídas com Solos Lateríticos Finos.

Fonte: Quintans (2008).

### 2.10.3.3. A DUREZA DOS SOLOS LATERÍTICOS

A resistência e a dureza das frações pedregulhosas e arenosas é função da composição química, de sua idade e de sua homogeneidade nos Solos Lateríticos. As lateritas ricas em ferro são mais duras ou resistentes que as ricas em alumínio (Laboratório Nacional de Engenharia Civil *et al.*, 1959; Ackroyd, 1967; Lyon Associates Inc., 1971; De Graft-Johnson *et al.*, 1972; Gidigasú *et al.*, 1973,1974; Enuvie, 1992; Nwaiwu, 2006; Lima, 2013).

Segundo Rodrigues *et al.* (2010), os resultados de ensaios de pesos específicos e de absorção indicam uma relação com a dureza dos elementos grossos. A dureza dos elementos grossos cresce com o peso específico. Os elementos finos não mostram relação com a absorção e com a densidade. A dureza dos elementos finos e grossos aumenta quando a absorção de água diminui (Figura 2.5).

Portanto, segundo o autor, a resistência e a dureza das frações pedregulhosas e arenosas está diretamente relacionada com o elemento químico que a compõe, e os elementos químicos presentes na fração alteram o peso específico. Além disso, quando a absorção de água diminui, a dureza dos elementos seja qual for a fração tende a aumentar.

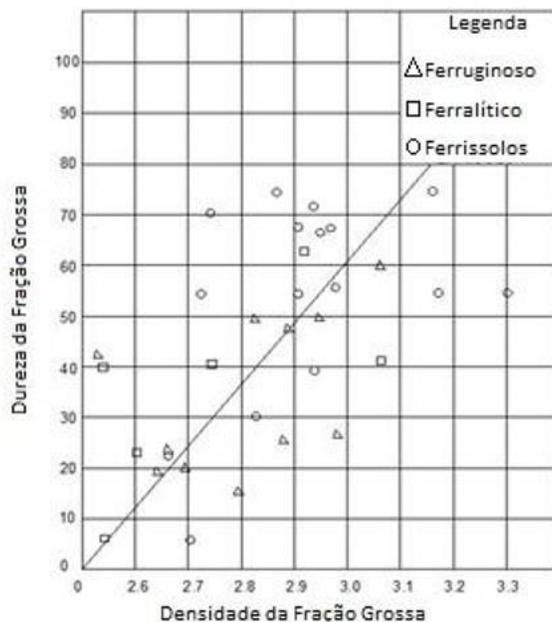


Figura 2.5 - Dureza dos elementos pedregulhosos em função de seus pesos específicos.

Fonte: Lyon Associates Inc. (1971).

#### 2.10.3.4. CARACTERÍSTICAS DE COMPACTAÇÃO DOS SOLOS LATERÍTICOS

Segundo Lyon Associates Inc (1971), os fatores que influenciam as propriedades de compactação dos Solos Lateríticos podem ser divididos em dois grupos: o primeiro é ligado à gênese dos solos; o segundo se relaciona aos métodos de pré-tratamento antes dos ensaios. Os fatores são:

- a textura: o fator genético é mais importante (está diretamente relacionada com a origem e formação. Os fenômenos físicos e químicos que aconteceram ao longo do tempo geraram progressivas transformações nas suas características morfológicas, químicas, mineralógicas e físicas)
- a transformação da halloysita hidratada em metahalloysita devido à secagem em estufas;
- a localização das amostras no perfil do solo (profundidade das amostras);
- e o atrito dos pedregulhos lateríticos concrecionados durante a compactação e do grau de maturidade do processo de laterização.

Rodrigues *et al.* (2010) ao analisar estudos e experiências da Universidade Federal de Campina Grande sobre Solos Lateríticos da Região Norte e Nordeste do Brasil infere que para uma determinada energia é observado mais para os Solos Lateríticos Finos que para os Solos Lateríticos Pedregulhosos, que a secagem em estufas resultam sempre em massas específicas secas aparentes mais elevadas e teores de água ótimos mais baixos, enquanto os solos com o teor de água natural ocorrem massas específicas secas máximas mais baixas e os teores ótimos de água mais elevados.

Segundo os autores, a compactação dos Solos Lateríticos Pedregulhosos pode ser nociva em caso de fragilidade dos torrões. Ela provoca um incremento do teor de finos por destruição da estrutura do solo sem aumentar, no entanto, a massa específica seca nem a capacidade de suporte de maneira significativa. Ela pode mesmo tornar o material sensível ao efeito da sucção. Entretanto, quando os nódulos ou torrões são friáveis, um estudo do efeito da compactação em função da energia aplicada é necessário para obtenção da compactação ótima que pode ser aplicada e que, às vezes, pode ser inferior a energia do Proctor Modificado (DEGN, 1984).

Isted (1990) distingue para os Solos Lateríticos Pedregulhosos compactados dois níveis de estruturas: a natureza da estrutura do solo consistindo em partículas e em poros onde a associação depende das condições de compactação (teor de água, energia de compactação); e a estrutura interna das partículas, conjunto de elementos menores e dependentes das condições genéticas do solo.

#### **2.10.3.5. CARACTERÍSTICAS DA CAPACIDADE DE SUPORTE DOS SOLOS LATERÍTICOS**

Segundo Rodrigues *et al.* (2010), a capacidade de suporte dos Solos Lateríticos depende dos parâmetros naturais e de estado:

Parâmetros naturais:

Abaixo são descritos, segundo Isted (1990), os parâmetros naturais que exercem uma influência sobre a capacidade de suporte dos Solos Lateríticos:

- o diâmetro máximo dos agregados ( $D_{MAX}$ );
- o material que passa na peneira de 80  $\mu m$ ;

- o material retido na peneira de diâmetro de 20 mm;
- a descontinuidade da curva granulométrica entre 80  $\mu\text{m}$  e 2 mm;
- a argilosidade da fração fina;
- a fragilidade dos nódulos (evolução em função da compactação);
- e a natureza mineralógica das partículas finas.

#### Parâmetros de estado:

Em que concerne os climas secos, o teor de água constitui um dos principais parâmetros que podem influenciar o comportamento mecânico dos Solos Lateríticos após a execução ou a construção de camadas de rodovias.

Estudos realizados sobre redes de rodovias africanas, citadas por Isted & Lcpc (1983), indicaram que os teores de água das camadas de rodovias in situ são inferiores a 6% (em Mali) e mesmo à 2% (na Nigéria). Portanto, o valor de ISC após quatro dias de embebição poderia conduzir a rejeição da quase totalidade dos materiais e teria como consequência tornar inviável a busca de soluções com Solos Lateríticos em harmonia com a excelente quantidade de materiais disponíveis nestas regiões.

Um estudo efetuado no LCPC (Lawal, 1981) indica que a ideia de escolher, em caso de ensaios realizados de imediato, ou seja, o teor ótimo de água de compactação ser determinado durante o ensaio Proctor, sem a saturação do corpo de prova, não é mais inteiramente rejeitado. Alcock (1950) demonstra que o ISC de um Solo Laterítico Pedregulhoso aumenta com a perda de água como diminui com o fator embebição (Figura 2.6). Isso significa que a medida que o teor de umidade do Solo Laterítico Pedregulhoso diminui, há um aumento de ISC. Enquanto que, à medida que o solo tende a ficar saturado, os valores de ISC tendem a diminuir devido aos vazios ficarem preenchidos por água.

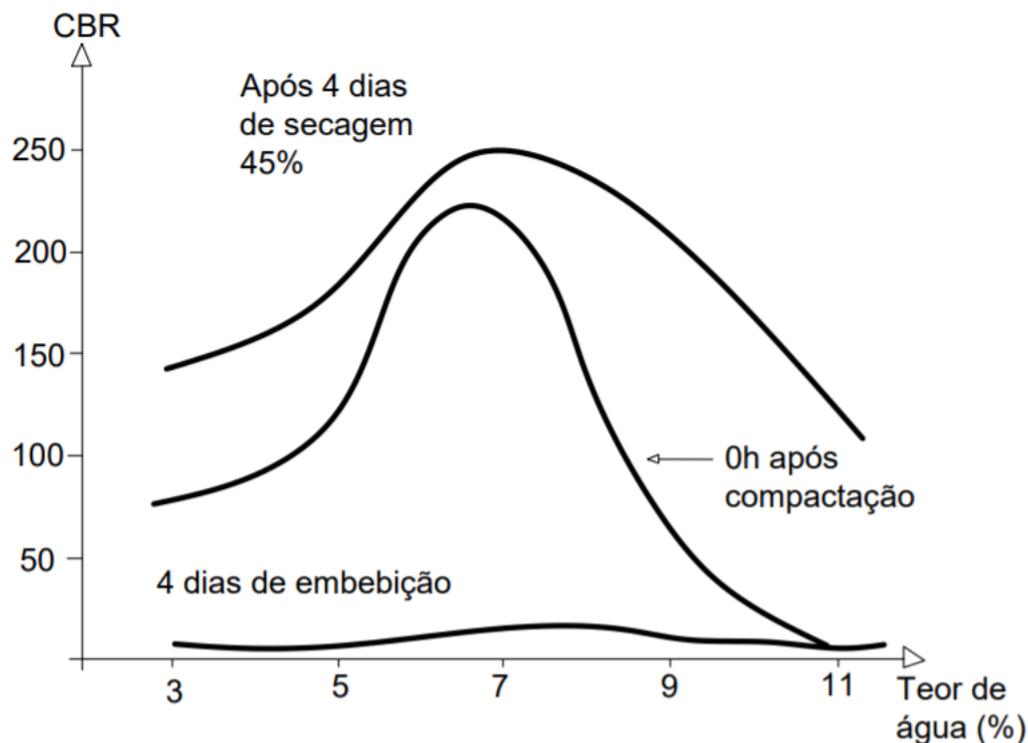


Figura 2.6 - Estudos da forma de realizar o ensaio de ISC adaptado ao clima do Sahara.

Fonte: Adaptado de Alcock (1950).

Isted & Lcpc (1983) concluíram que a introdução de um critério de capacidade de suporte em termos de ISC na classificação dos Solos Lateríticos Pedregulhosos constitui um progresso. Resta, entretanto, definir sua forma de operação ou de execução para adaptá-lo às condições climáticas próprias das regiões tropicais secas a fim de inserir em sistemas de classificação e formas de sua utilização.

### 2.10.3.6. COMPORTAMENTO ELASTOPLÁSTICO DOS SOLOS LATERÍTICOS

Sobre o comportamento elastoplástico dos Solos Lateríticos Sikali (1979) afirma:

- a resistência à ruptura e o Módulo de Young aumentam com a intensidade de compactação inicial e de sua compressão lateral;
- a coesão e o ângulo de atrito interno são também função crescente desses mesmos parâmetros (ou seja, aumentam com a intensidade de compactação inicial e da sua compressão lateral) próximos a

valores de 98% do teor ótimo de umidade;

- os valores obtidos para amostras de solo submetidas ao cisalhamento direto são diferentes daqueles obtidos com o auxílio do ensaio triaxial sendo mais elevados para os solos com ângulos de atrito interno maiores e mais baixos para solos com coesão;

- as curvas de tensão e de deformação indicam que para as tensões normais inferiores a 0,5 bar, foram obtidas um pico correspondente as deformações relativas inferiores a 3%. Para tensões normais superiores, as curvas não apresentaram picos significativos, as deformações continuam a aumentar com a aplicação das tensões. No primeiro caso, o comportamento é compatível a uma areia densa e no segundo caso a uma areia solta compressível.

Medina *et al.* (2006) em estudos de Solos Lateríticos Pedregulhosos e Finos do Sudeste e do Norte do Brasil, aplicaram os modelos descritos abaixo pelas Fórmulas 2.1, 2.2 e 2.3. Os autores concluíram, para o caso em específico, que a Formulação 2.3 é mais apropriada para explicar a relação do Módulo de Resiliência em função das tensões que são aplicadas sobre o corpo de prova para o respectivo ensaio. Pois, é a única fórmula que leva em consideração a tensão confinante e ao mesmo tempo a tensão desvio.

$$MR = k_1 \cdot \delta_3^{k_2} \quad (2.1)$$

$$MR = k_1 \cdot \delta_d^{k_2} \quad (2.2)$$

$$MR = K_1 \cdot \delta_3^{k_2} \cdot \delta_d^{k_3} \quad (2.3)$$

Onde:

- K1 e K2 são constantes do material;
- $\delta_3$  é a tensão de confinamento;
- $\delta_d$  é a tensão desvio.

#### **2.10.4. MELHORAMENTO DE SOLOS LATERÍTICOS**

Segundo Rodrigues *et al.*(2010), os solos utilizados na construção de rodovias devem possuir propriedades físicas e mecânicas conforme as normatizações. O engenheiro tem então a escolha entre duas soluções: primeiramente, substituir os materiais que não correspondem às exigências contidas nas normas por outros mais qualificados ou adaptados, e/ou, de outra forma, os modificar de maneira a fornecer, por métodos adequados de estabilização granulométrica ou com auxílio de adição de Ligantes Hidráulicos (tratamentos), um comportamento mecânico compatível com as solicitações do tráfego para o qual a estrutura da rodovia foi projetada.

Para o autor, em geral, a estabilização granulométrica dos Solos Lateríticos Arenosos ou Finos tem por finalidade a diminuição das atividades da fração argilosa relacionada à plasticidade, as quais estão associadas às propriedades mecânicas de contração e de expansão ou de dilatação.

A estabilização dos solos por adição de Ligantes Hidráulicos (cal ou cimento) confere às misturas propriedades físicas e mecânicas particulares. Em função disto, se distinguem para o engenheiro de rodovias, aquelas que tem uma incidência sobre a plasticidade, a granulometria, as variações volumétricas por absorção de água, a pressão de expansão, as características de compactação, as quais estão associadas à capacidade de suporte (resistência ao cisalhamento e as deformações plásticas e as elásticas), a dureza, a permeabilidade, a sucção e a adsorção. O grau no qual as modificações acontecem é dependente da natureza, do tipo de método (tempo e forma de cura, compactação da mistura, etc.) assim como da quantidade do ligante.

Com relação aos tratamentos, geralmente a cal é utilizada para estabilizar os Solos Lateríticos Finos ou Arenosos Siltosos e o cimento para estabilizar os Solos Lateríticos Pedregulhosos ou Arenosos. Uma combinação dos dois ligantes é possível.

##### **2.10.4.1. ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS SOLOS LATERÍTICOS**

Estudos realizados por Quintans (2008) indicam que o efeito de retração dos Solos Lateríticos Arenosos pode ser minimizado por incremento de quantidade de areia ou de materiais arenosos até o limite de 30% do peso da mistura.

Villibor *et al.* (2009) consideraram que o bom comportamento dos Solos Lateríticos Pedregulhosos, Arenosos e Finos, estabilizados granulometricamente, é devido a sua alta estabilidade e resistência durante sua vida útil, assim que as condições do meio ambiente tropical que fazem com

que o teor de umidade das camadas das rodovias seja inferior ao teor de umidade de compactação. Segundo o autor, este comportamento está associado aos estudos geotécnicos dos materiais que precedem a execução das camadas e que devem se basear sobre os seguintes critérios:

- estudos da plasticidade da fração fina do solo;
- estudo da dureza da resistência da fração dos agregados retidos pela peneira de diâmetro 2 mm;
- e o estudo da mistura estável em função dos parâmetros de granulometria, de expansão e da capacidade de suporte.

### **3. MÉTODOS PARA DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Segundo Medina (1997) os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis são divididos em dois grupos: os métodos empíricos e os mecanísticos. Os métodos empíricos são aqueles que levam em consideração os resultados da determinação da capacidade de suporte com base no ISC e das propriedades físicas dos materiais. Já os métodos mecanísticos consistem em modelos da estrutura do pavimento capazes de determinar analiticamente as tensões e deformações em qualquer ponto, em função das cargas do tráfego ou de fatores ambientais, sendo que eles devem ser calibrados com observações do desempenho.

Ambos os métodos são complementares. Os métodos empíricos necessitam da compreensão teórica para ajudar a entendê-los nas diferentes condições, no entanto os métodos mecanísticos requerem informações empíricas para sua calibração. Nenhum método é ideal por si só, sendo necessária uma combinação dos dois métodos para proporcionar uma base competente de dimensionamento, chamado de método empírico-mecanístico (BEHAK, 2013).

#### **3.1. – MÉTODO DNER/DNIT**

##### **3.1.1. – MÉTODO TRADICIONAL**

O DNER 22342 (DNER, 1979) é um método empírico que foi adaptado por Souza (1979) baseado no método do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos e com base em algumas conclusões obtidas numa pista experimental desenvolvida pela AASHTO (AASHTO, 1986). O dimensionamento é feito em função dos valores de ISC do subleito e dos materiais granulares. Os materiais selecionados para serem usados nas camadas são classificados atualmente conforme o Manual de pavimentação do DNIT (DNIT, 2006) em função do ISC, expansão, índice de grupo (IG) e são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Requisito das camadas do pavimento.

Camada	Expansão (%)	C.B.R. (%) e IG
Subleito	$\leq 2$	C.B.R. $\geq 2$
Reforço de subleito	$\leq 2$ (com sobrecarga de 10lb)	C.B.R. $\geq 2$ Maior ou igual a do Subleito
Sub-base	$\leq 1$ (com sobrecarga de 10lb)	C.B.R. $\geq 20$ , IG=0
Base	$\leq 0,5$ (com sobrecarga de 10lb)	C.B.R. $\geq 60$ , para $N \leq 5.10^6$ C.B.R. $\geq 80$ , para $N > 5.10^6$

Fonte: Manual de pavimentação do DNIT (DNIT, 2006).

O método apresenta ainda como determinar o número equivalente N em função do tráfego da via a ser dimensionada. É recomendado considerar o fator climático regional que leva em conta as variações de umidade dos materiais do pavimento durante as diversas estações do ano. Na Pista Experimental da AASHTO (AASHTO, 1986) este valor variou de 0,2 (para baixas umidades) até 5,0 (para os materiais saturados). No entanto, o método considera aceitável adotar o valor 1,0 pelo fato de não se dispor no Brasil de elementos experimentais para a fixação da umidade de equilíbrio e por ser adotado o processo de imersão em água dos corpos de prova para a realização do ensaio de ISC em laboratório (Rezende, 2003).

São apresentados valores dos coeficientes de equivalência estrutural (k) em função dos materiais componentes e a espessura mínima de revestimento betuminoso em função de N. O dimensionamento é feito por meio das Equações 3.1, 3.2 e 3.3 e do ábaco de dimensionamento da AASHTO (AASHTO, 1986), sendo que as espessuras do pavimento são determinadas em um gráfico que relaciona N, ISC e a espessura, traçado em termos de material com  $k = 1$  (base granular). A espessura mínima para as camadas de solo é de 15 cm.

$$Rk_R + Bk_B \geq H_{20} \quad (3.1)$$

$$Rk_R + Bk_B + h_{20}k_S \geq H_n \quad (3.2)$$

$$Rk_R + Bk_B + h_{20}k_S + h_n k_{Ref} \geq H_m \quad (3.3)$$

Onde:

- R = espessura do revestimento (cm);
- B = espessura da base (cm);
- $h_{20}$  = espessura da sub-base (cm);
- $h_n$  = espessura do reforço do subleito (cm);
- $H_m$  = espessura total do pavimento (cm);
- $H_n$  = espessura do pavimento sem a camada de reforço (cm);
- $H_{20}$  = espessura do revestimento e da base (cm);
- $k_R$  = coeficiente estrutural do revestimento (cm);
- $k_B$  = coeficiente estrutural da base (cm);
- $k_S$  = coeficiente estrutural da sub-base (cm);
- $k_{Ref}$  = coeficiente estrutural do reforço do subleito (cm).

### **3.1.2. – MÉTODO DA RESILIÊNCIA**

O método considera os deslocamentos resilientes no dimensionamento do pavimento através da realização de análises tensão x deformação de sistemas de múltiplas camadas, aplicando-se a teoria da elasticidade e métodos de elementos finitos. Foi publicado pelo DNER/DNIT (DNER, 1996b) com base em pesquisas desenvolvidas na área de mecânica dos pavimentos, onde se analisa a compatibilidade de deformações das camadas do pavimento e do subleito. Através dos ensaios triaxiais cíclicos nos solos e da tração indireta por compressão diametral de carga repetida para materiais asfálticos e cimentados, são determinadas as características resilientes e o comportamento à fadiga dos materiais. O procedimento do método segue os seguintes passos:

- Estabelecer o número N para um determinado período de projeto;
- Determinar o valor do ISC de projeto do subleito e classificá-lo quanto à resiliência (Tipo I, II ou III) em função da porcentagem de silte e dos valores ISC, conforme a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros de módulo de resiliência de solos lateríticos

ISC (%)	% de Silte			
	<35	35 a 65	>65	
> 10	I	II	III	
6 a 9	II	II	III	
2 a 5	III	III	III	
Tipo de Solo	k <sub>1</sub> (MPa)	k <sub>2</sub> (MPa)	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>
I	0,080	500	22100	-2530
II	0,070	120	260	-160
III	-	50	-	-

Fonte: Modificado – Preussler & Pinto (1981), citados por Medina (1997).

- Determinar a espessura equivalente ( $H_t$ ), em cm:

$$H_t = 77,67 \cdot N^{(0,0482)} \cdot ISC^{(-0,598)} \quad (3.4)$$

- Calcular a deflexão prevista na superfície do revestimento ( $D_p$ ):

$$D_p = D \quad (3.5)$$

$$\text{Log } D = 3,148 - 0,188 \cdot \text{log} N \quad (3.6)$$

Onde:

$D_p$  = deflexão de projeto (0,01 mm);

$D$  = deflexão admissível (0,01 mm).

- Determinar a espessura mínima do revestimento betuminoso ( $H_{CB}$ ), em cm:

$$H_{CB} = -5737 + 807,961/D_p + 0,972 \cdot I_1 + 4,101 \cdot I_2 \quad (3.7)$$

Onde:

$I_1, I_2$  = constantes relacionadas com as características resilientes do subleito.

- Determinar o valor estrutural do revestimento betuminoso ( $V_E$ ) em função de  $N$  e do tipo de solo do subleito;
- Calcular a espessura da camada granular ( $H_{CG}$ ), em cm:

$$H_{CB} \times V_E + H_{CG} = H_T \quad (3.8)$$

$$H_{CG} \leq 35\text{cm}$$

- Escolher uma das três situações:

1ª - considerar  $H_{CG}$  como sendo a espessura da base;

2ª - dividir  $H_{CG}$  igualmente em duas camadas (base e sub-base), sendo que o material da sub-base deve ter  $ISC > 20\%$  e expansão inferior a 1% e a base deve ter espessura mínima de 10 cm;

3ª - quando o subleito for do Tipo III, é adequado utilizar sub-base ou reforço do subleito constituído de solo fino do Tipo I ou II com  $ISC < 20\%$ . Neste caso, deve-se redimensionar o pavimento, considerando o tipo de solo e o valor do  $ISC$  correspondentes à sub-base ou ao reforço e utilizar a Equação 3.9.

$$H_R = (H_{t1} - H_{t2})/0,70 \quad (3.9)$$

$$H_R \geq 30\text{cm}$$

Onde:

- $H_R$  = espessura da camada de sub-base ou reforço;
- $H_{t1}$  = espessura equivalente correspondente ao  $ISC$  do subleito;
- $H_{t2}$  = espessura equivalente do  $ISC$  da camada de sub-base ou reforço do subleito.

### 3.2. – MÉTODO MECANÍSTICO

Segundo Medina (1997) nesses métodos as tensões e deformações geradas pelos carregamentos causados pelo tráfego na estrutura e no subleito são analisadas por meio de um modelo matemático. As espessuras das camadas são estabelecidas em função das propriedades dos materiais e, geralmente, o modelo matemático é definido pela Teoria da Elasticidade (Coutinho Neto, 2000). Segundo Mahler e Motta (1982), para que esses métodos de dimensionamento forneçam bons resultados alguns fatores devem ser observados:

- Selecionar adequadamente o modelo tensão-deformação para representar a estrutura do pavimento;
- Escolher um método eficiente de resolução do sistema de equações, representando o meio e o fenômeno em si;
- Caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais das camadas sob condições apropriadas de clima e carregamento;
- Definir o critério de projeto e de desempenho em termos de tensão-deformação (fadiga, ruptura, etc.);
- Apresentar o sistema de projetos em uma forma que seja vantajosa para o uso rodoviário.

A literatura indica um grande número de programas destinados à análise mecânica de pavimentos, sendo que os mais utilizados no Brasil são o Elsym5 (Kopperman *et al.*, 1985) e o Fepave (Duncan *et al.*, 1968). Motta (1991) definiu um método mecânico de dimensionamento de pavimentos. Neste caso, considerou-se mecanismos de degradação como fadiga das camadas de maior rigidez, afundamento da trilha de roda e ruptura plástica. Segundo essa autora, deve-se conhecer os fatores ambientais que interferem na rigidez das misturas asfálticas (temperatura) e na deformabilidade e resistência do subleito (teor de umidade). Para evitar a ruptura plástica deve-se também calcular a tensão vertical no subleito devido a uma carga específica e compará-la com o valor admissível.

Para analisar a deformabilidade elástica, Motta (1991) apresentou 32 gráficos que relacionam deflexão, deformação de tração na parte inferior do revestimento, diferença de tensões também na parte inferior do revestimento e a tensão normal vertical no topo do subleito com a espessura do revestimento e parâmetros de resiliência. Para o afundamento na trilha de roda (deformação plástica)

Medina (1997) apresenta valores admissíveis entre 10 mm e 20 mm e é determinado em função de modelos simples que relacionam deformação com número de repetições de carga. Motta (1991) recomenda ainda a aplicação de um critério de confiabilidade que depende da resistência oferecida aos esforços e da tensão. O valor da espessura de projeto depende do grau de confiabilidade adotado em função do maior ou menor risco de degradação do pavimento ao longo da sua vida útil.

### **3.3. – MÉTODOS PARA PAVIMENTOS DE BAIXO CUSTO**

#### **3.3.1. – MÉTODO AASHTO**

Segundo Medina (1997) a AASHTO definiu um método de dimensionamento para rodovias de baixo volume de tráfego (AASHTO, 1986). Neste método, os ábacos e catálogos foram desenvolvidos para condições específicas dos solos, materiais, estrutura do pavimento, clima, solicitação da sua pista de teste e extrapolados para outras regiões dos Estados Unidos. Para cada tipo de solo, tem-se uma faixa de variação do módulo de resiliência em função da estação do ano, sendo recomendado o cálculo do módulo de resiliência efetivo do subleito ponderando a influência do clima. É apresentado um catálogo de estruturas de pavimento para até 106 passagens de um eixo simples de 18.000 lb, com níveis de confiança de 50% e 75%.

Segundo Fernandes (2016), em 1993 a AASHTO apresentou o seu método de dimensionamento de pavimentos flexíveis, como uma atualização ao método anteriormente proposto, no qual era baseado nos resultados da pista experimental da AASTHO (AASHTO, 1986). Esse método apresenta como principais parâmetros de análise os seguintes itens:

- $W_{18} = N$  = Número de Solicitações equivalentes ao eixo padrão de 80 kN (8,2 tf);
- $R$  = Nível de confiabilidade do projeto;
- $Z_r$  = Desvio padrão normal;
- $S_0$  = Desvio padrão combinado;
- $M_r$  = Módulo de Resiliência (MPa) das camadas;
- $\Delta PSI$  = Diferença entre índices de serventia.

Onde:

- O número de repetições do eixo padrão (N) é calculado com base em fatores de equivalência de carga, os quais por sua vez depende de alguns parâmetros dos veículos como o tipo de eixo. Além disso, são aplicáveis o número estrutural e o valor de serventia do pavimento;

- O fator de confiabilidade (R) é a probabilidade do pavimento dimensionado ter o comportamento real igual ou superior a aquele previsto para a vida útil adotada, que acaba culminando no fator Zr.

Segundo a AASTHO (1993) é recomendado que os valores variem de 99,9 para rodovias que apresentam elevado volume de tráfego à 50 para rodovias de baixo volume. Ou seja, o valor adotado para a probabilidade é função de uma classificação de vias. Na Tabela 3.3 são apresentados os níveis de confiança.

Tabela 3.3 – Valores em (%) para Zr.

Classificação	Urbana (%)	Rural (%)
Autoestradas	85 à 99,9	80 à 99,9
Arteriais	80 à 99	75 à 95
Coletoras	80 à 95	75 à 95
Locais	50 à 80	50 à 80

Fonte: BALBO (2007).

O desvio padrão combinado ( $S_0$ ) tomado como base nas pistas experimentais da AASTHO varia de 0,35 a 0,5. Sendo que para considerações de tráfego futuro é adotado algo próximo a 0,49 e quando não é 0,44.

O Módulo Resiliente, ou Módulo de Resiliência, o qual é semelhante ao modulo de elasticidade, pode ser adotada a correlação de Heukelom & Klomp (1962) para o caso de solos de granulação fina com ISC menor ou igual a 10%. A Equação 3.10 apresenta a correlação.

$$M_R = 10.ISC(\%) \quad (3.10)$$

O mais indicado para definir o Módulo de Resiliência dos materiais é o emprego de ensaios como, por exemplo, o Triaxial de cargas repetidas.

A variação do PSI, *Present Serviceability Index*, mede a diferença entre o valor de serventia no início das atividades do pavimento ( $p_i$ ) e no final do período ( $p_t$ ). O valor de “ $p_i$ ” igual a 5 corresponde a um pavimento perfeito, onde não existem irregularidades. Mas, como sempre ocorrem imprevistos a AASHTO (AASHTO, 1986) adota como valor inicial da serventia, utilizado na Pista Experimental, o valor de 4,2. O valor terminal ( $p_t$ ) varia para diferentes vias, sendo considerado como 2,5 para volumes elevados de tráfego, e 2 para volume baixo. A Equação 3.11 apresenta a variação de serventia.

$$\Delta PSI = p_i - p_t \quad (3.11)$$

Outro parâmetro intrínseco ao dimensionamento é o Número Estrutural do Pavimento (SN) o qual tem por objetivo indicar a resistência estrutural do pavimento completo ou das suas camadas. A Equação 3.12 apresenta a equação geral do número estrutural, o qual depende dos coeficientes estruturais ( $a_i$ ), espessura de camadas ( $D_i$ ) e coeficientes de drenagem ( $m_i$ ).

$$SN = a_1.D_1 + a_2.D_2.m_2 + a_3.D_3.m_3 \quad (3.12)$$

Os valores estruturais ( $a_i$ ) adotados na pista experimental da AASHO é de 0,44 para  $a_1$ , 0,14 para  $a_2$  e 0,11 para  $a_3$ . Já os coeficientes de drenagem, variam com base no tempo em que a água deixa a estrutura analisada, chamada de qualidade de drenagem. Segundo Balbo (2007) a qualidade de drenagem pode ser dividida em:

- Excelente = Até 2 horas para drenar
- Boa = 1 dia para drenar
- Regular = 1 semana para drenar
- Pobre = 1 mês
- Muito pobre = não é drenada

Dessa forma, com base nas categorias a Tabela 3.4 apresenta os fatores de drenagem relacionando qualidade com a porcentagem de tempo que o pavimento está sujeito a condições de umidade próximas a saturação.

Tabela 3.4 – Coeficientes de drenagem (mi).

Qualidade de drenagem	Porcentagem de tempo a que o pavimento estará sujeito a condições de umidade próxima a saturação			
	<1%	1% à 5%	5% à 25%	>25%
Excelente	1,40-1,35	1,35-1,30	1,30-1,20	1,20
Boa	1,35-1,25	1,25-1,15	1,15-1,00	1,00
Regular	1,25-1,15	1,15-1,05	1,00-0,80	0,80
Pobre	1,15-1,05	1,05-0,80	0,80-0,60	0,60
Muito Pobre	1,05-0,95	0,95-0,75	0,75-0,40	0,40

Fonte: BALBO (2007).

O número estrutural (SN) pode ser também subdividido em função das camadas de apoio, chamando de  $SN_1$  para número estrutural apoiado na base,  $SN_2$  para a apoio em sub-base e  $SN_3$  para apoio no subleito, que no caso é o SN completo. A Figura 3.1 ilustra os números estruturais nas camadas. As Equações 3.13, Equação 3.14 e Equação 3.15 apresentam a subdivisão de números estruturais para dimensionamento das espessuras.

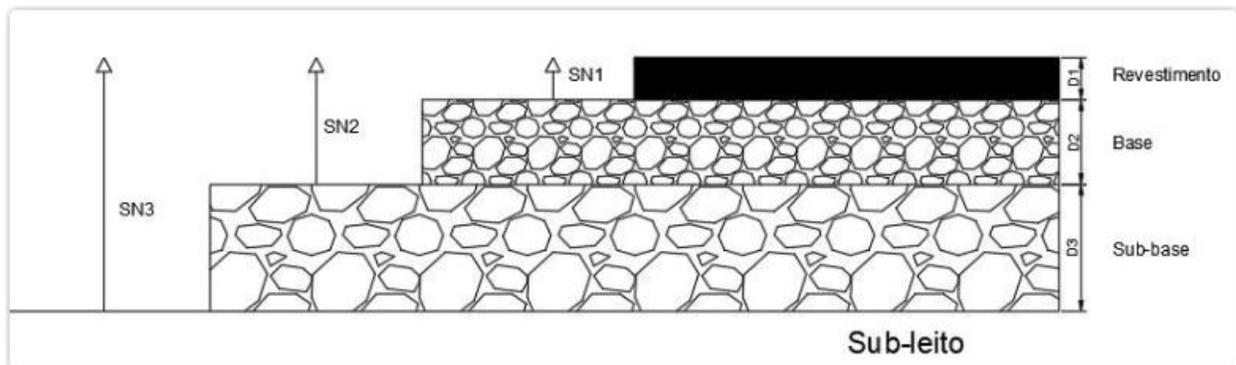


Figura 3.1 – Seção Transversal com Números estruturais.

Fonte: Balbo (2007).

Espessura do revestimento:

$$D1 \geq \frac{SN1}{a1} \quad (3.13)$$

Espessura da base:

$$D2 \geq \frac{SN2-SN1}{a2.m2} \quad (3.14)$$

Espessura da sub-base:

$$D3 \geq \frac{SN3-(SN1-SN2)}{a3.m3} \quad (3.15)$$

Os valores dos números estruturais de cada camada ( $SN_1$ ,  $SN_2$  e  $SN_3$ ) são encontrados com base na Equação 3.16 (AASHTO, 1993). Para encontrar o valor de  $SN_1$  (base), utiliza-se o Modulo de Resiliência do material de base. O mesmo ocorre para  $SN_2$  com MR de Sub-base e  $SN_3$  com modulo de resiliência do Subleito.

$$\log N = Z_r \cdot S_0 + 9,36 \cdot \log(SN+1) - 0,2 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{p_o - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{((SN+1))^{5,19}}} + \mathbf{2,32 \cdot \log Mr - 8,07}$$

(3.16)

Por fim, o método considera algumas espessuras mínimas de camada com material betuminoso e de camada de material granular, conforme Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Espessuras mínimas.

Tráfego (N)	Concreto Asfáltico	Base Granular (cm)
< 50.000	2,5	10
50.001 à 150.000	5	10
150.001 à 500.000	6,5	10
500.001 à 2.000.000	7,5	15
2.000.001 à 7.000.000	9	15
> 7.000.000	10	10

Fonte: BALBO (2007)

A partir de 2002, vários estados americanos deram início as atividades de implantação de um guia de dimensionamento. Compreendendo as atividades, treinamento de pessoal, coleta de dados de entrada, tráfego e os materiais, aquisição de equipamentos para testes, bem como a seleção e preparação de seções teste para calibração total (Kaloush & Rodezno, 2011).

A AASHTO evoluiu para uma concepção mecanística-empírica, onde o projetista deve ter uma abordagem interativa, dando a possibilidade ao projetista de após escolher a estrutura inicial, efetuar análise detalhada se os critérios de desempenho estão sendo atendidos, onde o método em questão avalia os critérios de deformação permanente (ATR), trincas por fadiga de baixo para cima (*bottom-up*) e de cima para baixo (*top-down*), trincas térmicas e irregularidades superficiais (IRI) (Medina & Motta, 2015).

As Tabelas 3.6 e 3.7 descrevem a ordem de grandeza dos critérios de ruptura recomendados e os fatores de calibração dos modelos de previsão da AASHTO de 2008 (AASHTO, 2008), respectivamente.

Tabela 3.6 – Ordem de grandeza dos critérios de ruptura.

Defeito	Valor limite em cada nível de confiabilidade
Irregularidade – IRI final (pol/milha ou m/km)	Interestadual: 160 in/mi (2,7 m/km) Primária e secundária: 200 in/mi (3,3 m/km)
Trincamento interligado (Couro de jacaré - % da área da faixa)	Rodovia Interestadual: 10% Rodovia Primária: 20% Rodovia Secundária: 35%
Fratura térmica (trincamento transversal) (pé/milha ou m/km)	Interestadual: 500 ft/mi (100 m/km) Primária e secundária: 700 ft/mi (140 m/km)
Deformação permanente ou afundamento total de trilha de roda (pol/mm)	Interestadual: 0,40 pol (10 mm) Primária: 0,50 pol (13 mm) Outras < 45 mph (75 km/h): 0,65 pol (17 mm)

Fonte: Medina & Motta (2015).

Tabela 3.7 – Modelos de previsão dos danos e fatores de calibração destes modelos da AASHTO (2008).

Parâmetro	Fórmula	Fator de calibração	Valor <i>default</i>	Valores de calibração trecho
Fadiga	$N_f = \beta f 1 k_1 (\epsilon_t)^{\beta f 2 k_2} (E)^{-\beta f 3 k_3}$	$\beta f 1$	1.0	1.0
		$\beta f 2$	1.0	0.8
		$\beta f 3$	1.0	1.5
Trinca Longitudinal	$F.C = \left( \frac{6000}{1 + e^{C_1 + C_2 * \log D}} \right) * 10,56$	C1	7.0	Padrão
		C2	3.5	Padrão
Trinca Couro Jacaré	$F.C = \left( \frac{6000}{1 + e^{C_1 + C_2 * \log D}} \right) * \frac{1}{60}$	C1	1.0	Padrão
		C2	1.0	Padrão
Padrão: Valor básico disponível no programa				

Fonte: Medina & Motta (2015).

Os parâmetros de análise (critério) por desempenho da AASHTO (2008) asseguram uma avaliação mais adequada do pavimento durante sua vida de serviço (Kaloush & Rodezno, 2011).

O fluxograma mostrado na Figura 3.2, demonstra a estrutura básica de análise do

AASHTOWare (AASHTO, 2008).

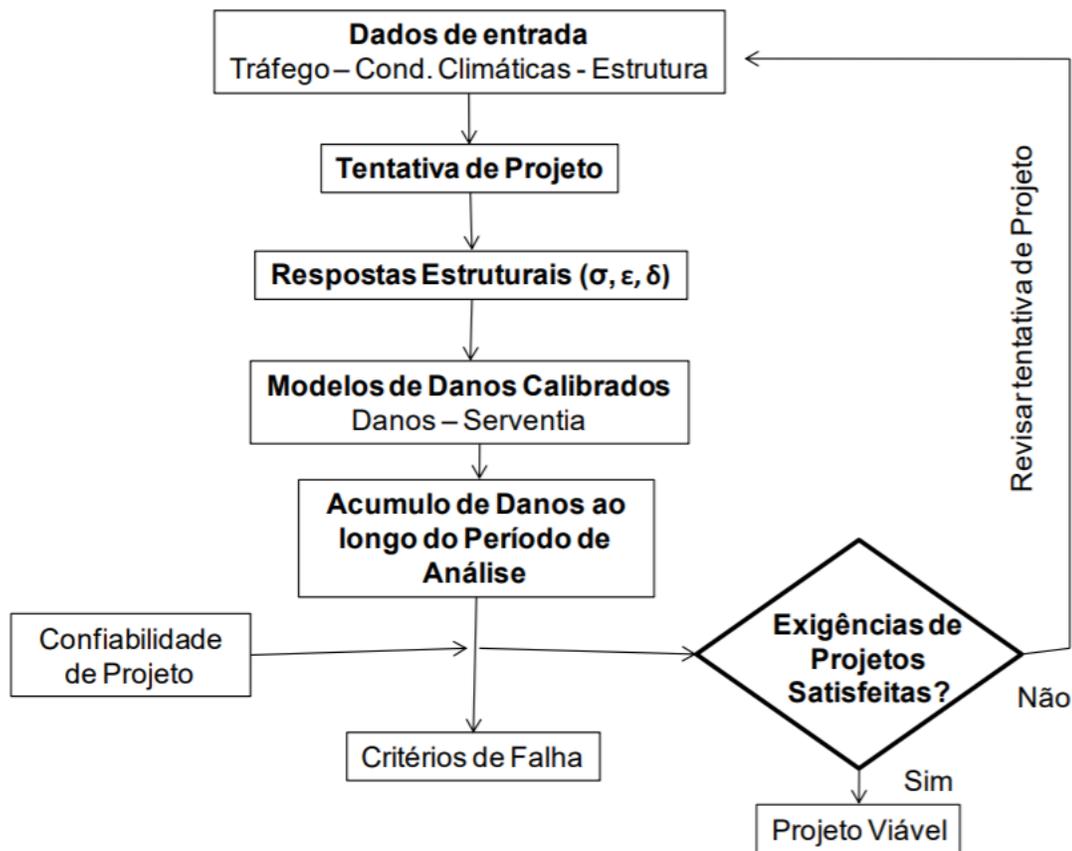


Figura 3.2 – Fluxograma Básico do Sistema MEPDG (2004).

AASHTOWare Pavement ME Design é um *software* de dimensionamento de pavimentos, que se baseia no GUIA AASHTO em uma metodologia mecânica-empírica. Os engenheiros podem prever com precisão o desempenho do pavimento, pois o *software* incorpora propriedades dos materiais, dados climáticos, espectros de carga por eixo e outros avanços (AASHTO, 2014).

O programa MEPDG analisa o desempenho da estrutura de um pavimento mediante critérios pré-estabelecidos. O *software* utiliza uma aproximação hierárquica na incorporação das variáveis de entrada, em função da importância do projeto e da disponibilidade dos dados. Tal aproximação se refere aos dados de entrada de tráfego, materiais e meio ambiente. A partir dos resultados obtidos no MEPDG, é possível conduzir uma análise de sensibilidade para verificar os efeitos da variação dos parâmetros de projeto no comportamento dos pavimentos ao longo da sua vida útil (Pelisson *et al.*, 2015)

### 3.3.2. – EXPERIÊNCIA BRASILEIRA

Medina e Motta (1997) apresentaram uma avaliação de alguns procedimentos de dimensionamento de pavimentos de baixo volume de tráfego. Dentre os métodos analisados, têm-se:

- Horonjeff (1962): baseado em ISC de amostras embebidas e destinado à execução de pistas experimentais de aeroportos;
- Guia da AASHTO (1993): considera os valores de ISC e o MR de materiais utilizados na pista experimental da AASHTO e incorpora um fator de confiabilidade no dimensionamento;
- DNER (1996): baseado na experiência de Horonjeff (1962) e nos coeficientes estruturais da AASHTO, sendo a capacidade de suporte do subleito e dos materiais constituintes do pavimento é feita pelo ISC. Esse método considera como parâmetro de carregamento o número equivalente de repetições (N) de um eixo padrão (equivalente a uma carga de 82 kN);
- Nogami e Villibor (1995): considera as peculiaridades relacionadas as condições e os solos mais frequentes no Brasil a partir de observações de trechos executados com solo arenoso fino laterítico e utilizando da metodologia MCT;
- Prefeitura do Município de São Paulo (1992): semelhante ao método tradicional do DNER, sendo que neste caso a avaliação do subleito é executada com ensaios da metodologia MCT;
- Jones (1977): utilizado nas regiões tropicais e subtropicais de influência inglesa. A avaliação dos materiais é feita com parâmetros de caracterização e com o ISC. Sua particularidade está na consideração de três posições no nível d'água em relação ao subleito, sendo sugerida a análise da sucção do solo para aqueles com até 7 m de profundidade.

Os autores observam que há uma tendência de adaptação dos procedimentos desenvolvidos no exterior em condições de clima e solos diferentes do Brasil, o que não soluciona de forma definitiva e satisfatória a aplicação dos solos tropicais em pavimentação.

Villibor *et al.* (2000) indicam a utilização do Método de Dimensionamento da Prefeitura Municipal de São Paulo PMSP-MD-01 (Prefeitura Municipal de São Paulo, 2004) para vias secundárias e locais. Neste método, definem-se dois tipos de tráfego: muito leve ( $N = 2 \times 10^4$ ) e leve ( $N = 10^5$ ). Segundo estes autores, o dimensionamento é semelhante ao método tradicional de Souza (1979) sendo que na Tabela 3.8 são apresentadas algumas características recomendadas.

Tabela 3.8 - Características das camadas de pavimentos de baixo custo.

Camadas	Tipo	Características		
		CBR (%)	Expansão (%)	Espessura (cm)
Reforço do subleito	Solos	$CBR_{REF} > CBR_{SL}$	$\leq 2,0$	$\geq 15,0$
	Selecionados			
Sb-bases	Estabilizados	$\geq 30$	$\leq 1,0$	$\geq 15,0$
	Granulometricamente			
	Solos Lateríticos	$\geq 20$	$\leq 1,0$	$\geq 15,0$
Bases	Estabilizados	$\geq 80$	$\leq 0,5$	$\geq 10,0$
	Granulometricamente			
	Argila	$\geq 12$	$\leq 0,5$	$\geq 15,0$
	Laterítica			
Bases	Solos Lateríticos	$\geq 40$	$\leq 0,3$	$\geq 15,0$
	“in natura”			
	Solo Laterita Agregado (tráfego leve)	$\geq 50$	$\leq 0,5$	$\geq 15,0$
	Solo Latetira Agregado (tráfego médio)	$\geq 80$	$\leq 0,5$	$\geq 15,0$

Fonte: Villibor et al (2000).

### 3.4 – MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO

Por um longo período de tempo, desde os anos 1950, o critério de deflexão máxima que atua sob a carga das rodas foi o principal parâmetro para a avaliação estrutural e o dimensionamento de reforço dos pavimentos (Medida e Motta, 2015).

Motta (1991) demonstrou em sua pesquisa de doutorado um método mecanístico de dimensionamento de pavimentos flexíveis, com o seguinte procedimento: adota-se uma estrutura inicial, define-se a variabilidade dos dados e o nível de confiabilidade a ser utilizado no projeto. A análise mecanística é efetuada utilizando-se um programa computacional, usando um modelo elástico linear para o revestimento asfáltico e elástico não-linear para as camadas subjacentes, verificando-se as tensões e deformações e comparando-as com critérios de aceitação pré-estabelecidos. Caso algum

critério não seja satisfeito, as espessuras e/ou camadas são alteradas e os cálculos refeitos. Os critérios que podem ser adotados são os seguintes: deflexão máxima admissível na superfície; diferença de tensões no revestimento; tensão vertical admissível no topo do subleito; tensão e deformação de tração na fibra inferior do revestimento.

Na Figura 3.3 são apresentados os passos do dimensionamento mecanístico-empírico apresentado por Motta (1991), sendo comum a vários métodos.

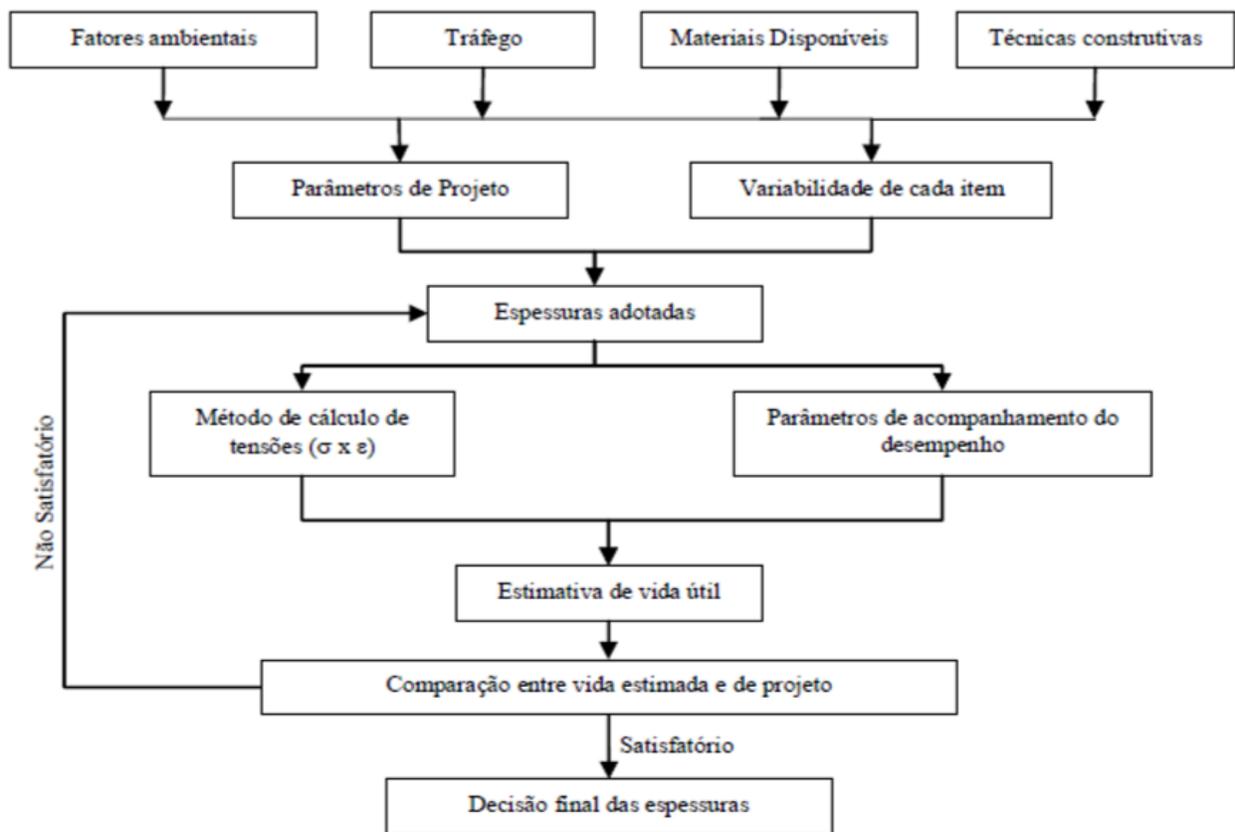


Figura 3.3 - Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos (Motta, 1991).

Segundo Souza Júnior (2018), o fluxograma mostra os dados de entrada (fatores ambientais, tráfego, materiais e técnicas construtivas). O processamento por via mecanística e os critérios de decisão que são as formas de se evitar que a degradação por qualquer um dos mecanismos de ruptura atinja valores maiores que os estabelecidos para determinado trecho da rodovia. Antes que o número “N” de projeto seja alcançado. No dimensionamento parte-se de espessuras admitidas e calcula-se o estado de tensões e deformações que se comparam a valores limites estabelecidos.

Como dado de entrada para os *softwares* de dimensionamento mecanístico-empírico, é

necessário obter o módulo de elasticidade de cada camada do pavimento, que governa a característica elástica dos materiais. O módulo pode ser obtido por ensaios ou por programas de retroanálise de bacias deflectométricas (Fonseca, 2013).

De acordo com Medina e Motta (2015), um método mecanístico completo para realizar a retroanálise, segue os seguintes passos:

- determinar no trecho a ser restaurado, as bacias de deflexão, com frequência adequada para representar convenientemente a situação estrutural do segmento homogêneo, usando medidas com precisão adequada, por *Falling Weight Deflectometer* (FWD) ou viga Benkelman automatizada;
- utilizar um programa confiável para retroanálise das bacias deflectométrica, do qual se conheçam os princípios e métodos de cálculo, para inferir os módulos de trabalho das camadas e do subleito;
- utilizar um programa de cálculo de tensões e deformações no qual serão usados os módulos retroanalizados e as espessuras das camadas para calcular as tensões e deformações críticas na camada de reforço;
- comparar as tensões e deformações calculadas com valores admissíveis em função do tráfego de projeto, e estabelecer a espessura de reforço necessária;
- pode-se simular também processos de reciclagem, com ou sem adição de novos materiais e espessura adicional.

### **3.4.1 – MÉTODOLOGIA SISPAV**

O método mecanístico-empírico adotado pelo SisPav utiliza os valores de módulo de resiliência, de clima, de materiais de pavimentação e de tráfego. Além disso, faz as seguintes considerações: análise do tráfego para os diversos eixos existentes com variação lateral, variação sazonal do tráfego ao longo do período de projeto, modelos de previsão de danos, materiais com comportamento elástico linear e não linear e análise de confiabilidade. O método é baseado na Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), que utiliza como referência a teoria da elasticidade, com a possibilidade de análise não linear simplificada (apenas no plano vertical). Com isso, é possível

fazer a análise em relação à vida útil do projeto, avaliando assim diferentes cenários relativos à estrutura do pavimento (Fernandes, 2017).

A respeito da estrutura do pavimento o programa SisPav possui uma aba relacionada a estrutura do pavimento, em que são necessárias algumas informações sobre as camadas e seus respectivos materiais para que sejam possíveis as análises e verificações contidas no *software*. Com relação às características e propriedades dos materiais, deve-se ter conhecimento sobre o coeficiente de Poisson e do módulo de resiliência (MR). Além disso, o programa também possibilita ao usuário a definição do modelo de cálculo, que leva em consideração a tensão confinante, ou a tensão desvio ou a tensão confinante e a tensão desvio.

Os coeficientes de Poisson para base, sub-base e subleito são adotados com base nos modelos e faixas de variação propostos na norma IP – 08 (PMSP, 2004), e todos com valores de  $\mu = 0,45$  (coeficiente de Poisson). Para o módulo de resiliência das camadas de base, sub-base e para o subleito são obtidos de resultados de ensaios realizados para cada projeto estudado.

Com os dados obtidos nos ensaios de módulo de resiliência são determinados os parâmetros da estrutura para as camadas abaixo do revestimento, todas de acordo com modelos constitutivos do comportamento resiliente de materiais de pavimentação observados no Brasil propostos por Motta (1991).

Franco (2007) descreve de forma detalhada todos os passos para a correta utilização do *software* SISPAV.

### **3.4.2 – MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional**

O Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) é uma merecida homenagem ao professor titular aposentado da COPPE/UFRN Jacques Medina que foi homenageado em vida, mas partiu para morada eterna no dia 11 de janeiro de 2019. O Método é uma versão atualizada do SisPav, que através do Termo de Execução Descentralizada celebrado de 2015 a 2018 entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, foi denominado Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa).

O MeDiNa é um *software* que realiza a verificação e o dimensionamento mecânico-empírico de estruturas de pavimentos, por meio da rotina AEMC “Análise Elástica de Múltiplas Camadas”. Esta rotina calcula tensões e deformações em estruturas de pavimentos sob carregamento de rodas do

tipo eixo padrão rodoviário e aplica modelos de fadiga e deformação permanente para ajustar as espessuras das camadas (FRANCO, 2018).

A análise de uma estrutura de pavimento ou mesmo o seu dimensionamento requer um conjunto amplo de informações para que os resultados obtidos sejam confiáveis. As informações passam pelo conhecimento do subleito, como seu módulo e curva de deformação permanente. Outra informação que é chave para o correto funcionamento do *software* MeDiNa é a definição do Número Equivalente de Eixos, o número N. Os modelos utilizados no programa MeDiNa mostram-se sensíveis a pequenas variações do Número N, e, portanto, uma estimativa apurada é de grande importância para o sucesso do projeto (FRANCO, 2018)

Segundo Souza Júnior (2018), o *software* MeDiNa tem sua interface dividida em abas, sendo denominadas: estrutura; modelagem e resultados. Ao iniciar o *software*, o mesmo sempre se apresenta na aba estrutura, onde são inseridas as informações de identificação do projeto; estrutura do pavimento; tráfego e painel onde o *software* registra o resumo dos resultados das análises ou dos dimensionamentos. Antes de preencher os dados do projeto, define-se em qual modo o programa irá tratar os dados. Na versão apresentada abaixo apenas dois modos estão disponíveis:

- Pavimento Novo (Nível 1): Modo para elaboração de projetos de pavimentos novos no nível de projeto 1, onde as propriedades das camadas são obtidas por ensaios de laboratório.
- Projeto de Reforço: Modo para elaboração de projeto de reforço, onde as propriedades das camadas existentes são obtidas por meio de retroanálise de bacias deflectométricas.

Ainda segundo Souza Júnior (2018), o modo reforço exige do projetista a entrada dos valores retroanalisados de bacias de campo obtidas com equipamento tipo FWD, pode-se importar as bacias retro analisadas do AEMC na opção Importar Retroanálise ou preencher os dados manualmente. Após a importação, o projetista deverá concluir o preenchimento dos dados da camada asfáltica existente, com os dados de percentual de área trincada, IRI, e idade do pavimento, para permitir o programa processa as análises ou o dimensionamento. A tela inicial do *software* pode ser visualizada na Figura 3.4, apresentando uma estrutura inicial composta por quatro camadas, incluído o subleito, podendo ser adicionadas ou retiradas camadas da estrutura (são permitidas, no mínimo três e, no máximo, oito camadas, contando com o subleito), bem como alterar o tipo de material que a camada é constituída. Na tabela que exhibe a estrutura do pavimento são apresentadas informações resumidas

das propriedades de cada uma das camadas da estrutura do pavimento, como: material constituinte e o tipo selecionado, espessura, módulo de resiliência (se linear ou sigmoidal), e coeficiente de Poisson.

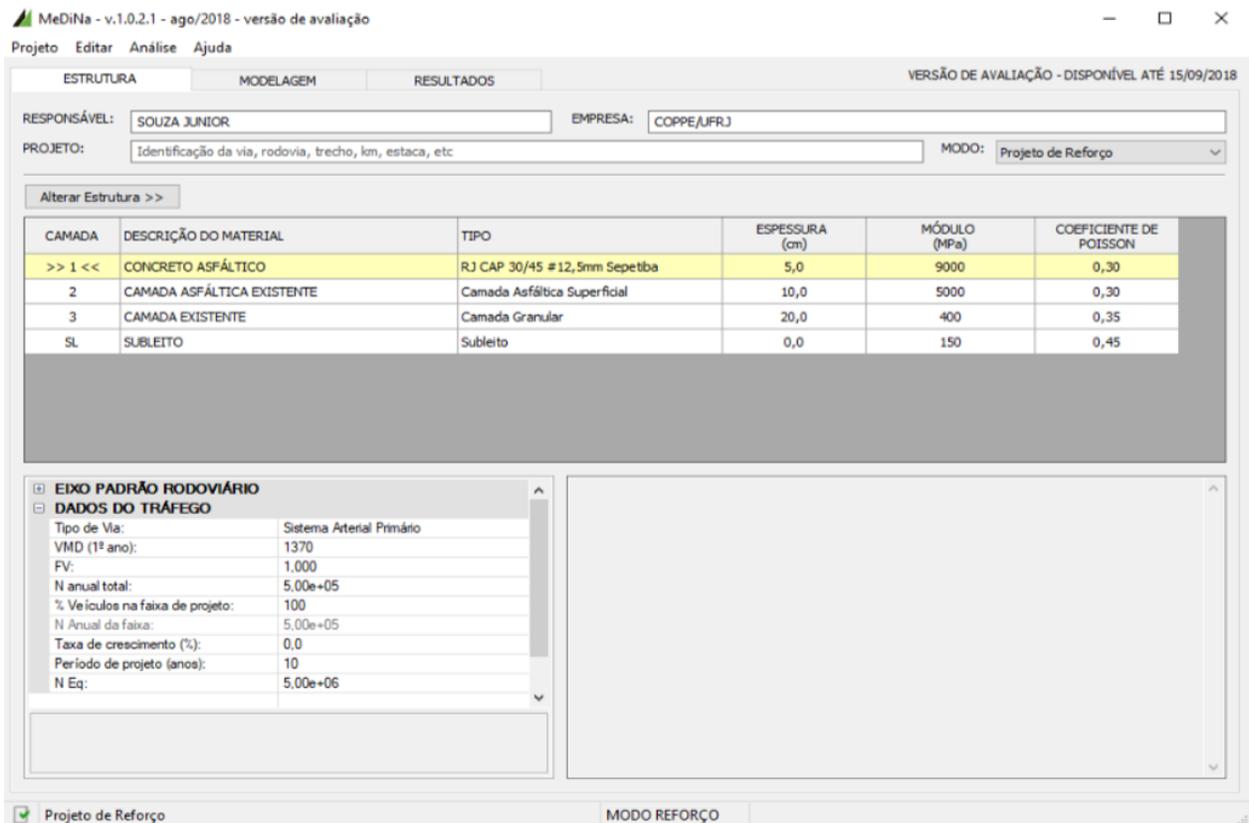


Figura 3.4 – Tela inicial *software* MEDINA, (FRANCO, 2018).

Segundo Franco (2018), o eixo padrão rodoviário (Figura 3.5) é o eixo utilizado nas análises e no dimensionamento das estruturas de pavimento. Essa consideração foi definida em função da calibração dos modelos de fadiga, que se baseou na comparação da evolução da área trincada com o número estimado de passagens do eixo padrão. O *software* pode ser utilizado para calcular automaticamente o número equivalente de passagens do eixo padrão rodoviário. Este pode ser obtido a partir do volume médio diário (VMD) em conjunto com o fator de veículo (FV). A partir destes dois valores, o *software* MeDiNa calcula o número anual equivalente de eixos (N anual) automaticamente. Caso o projetista já tenha o N anual, ele pode entrar direto com o valor no local correspondente.



**Dados do eixo padrão**  
 Carga de Eixo: 8,2 tf  
 Pressão de Pneus: 0,56 MPa  
 Raio da área de contato: 10,79 cm  
 Distância entre rodas: 16,2cm

Figura 3.5 – Eixo padrão rodoviário assumido no *software* MEDINA, (FRANCO, 2018).

De acordo com Franco (2018), há a necessidade de se informar o tipo de via a ser analisado ou dimensionado. A cada tipo incide um critério de parada do dimensionamento, bem como os graus de confiabilidade das análises realizadas pelo MeDiNa. Os diferentes tipos de vias foram definidos em conformidade com a hierarquia dos sistemas funcionais publicada pelo Manual de pavimentação do DNIT (DNIT, 2006). Na Tabela 3.9 é apresentado um resumo dos critérios e a confiabilidade de cada tipo de via.

Tabela 3.9 – Critérios de parada e confiabilidade das análises realizadas pelo MeDiNa, (FRANCO, 2018).

Tipo de Via	Confiabilidade	Área Trincada	Deformação Permanente
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Local	65%	30%	20mm

De acordo com Souza Júnior (2018), a análise ou dimensionamento dos pavimentos pode ser realizada após inserir todos os dados da estrutura e do tráfego. Para se realizar uma análise pura do comportamento da estrutura com o tráfego, basta clicar a tecla de atalho F3, ou ir ao menu Análise e clicar na função Analisar Estrutura. A análise realiza os cálculos e verifica os critérios para área trincada e/ou deformação permanente, sem alterar a espessura da camada selecionada. No final,

apresenta um resumo que pode ser avaliado pelo projetista. Para realizar o dimensionamento da estrutura, basta clicar a tecla de atalho F2, ou ir ao menu Análise e clicar na função Dimensionar, após selecionar a camada que se deseja dimensionar.

### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa bem como a metodologia adotada para a realização de todos os ensaios estão descritos nos subitens abaixo.

#### 4.1. MATERIAIS

A pesquisa em questão avalia o potencial uso de rejeitos oriundos do beneficiamento do minério de ferro agregado a um solo tropical do município de Jucurutu – RN, para aplicação em camadas de pavimentos por meio do estudo da sua viabilidade mecânica, geoquímica, geoambiental e mineralógica. As características do solo tropical e do rejeito de minério de ferro são apresentadas abaixo.

##### 4.1.1. SOLO TROPICAL DA REGIÃO

O solo utilizado na pesquisa foi retirado das margens da rodovia que fica a cerca de 3 km do centro urbano do município de Jucurutu – RN, situado a uma latitude de 6°01'22.2" sul e uma longitude de 37°01'44,4" oeste. Segundo a Secretaria de Obras do Município de Jucurutu – RN, o material utilizado nas camadas de base e sub-base dos pavimentos construídos no município é retirado das imediações da BR 226, rodovia federal que dá acesso ao município. Ainda segundo a Secretaria de Obras do município, o solo da região é classificado com um solo tropical, rico em óxidos de ferro e alumínio que apresenta uma elevada capacidade de suporte, sendo considerado um material excelente para obras de pavimentação. Nas Figuras 4.1 e 4.2 são apresentadas imagens do local da retirada do material e uma foto aérea da cidade de Jucurutu e a proximidade com o local de retirada do material, respectivamente. Por meio das imagens fica evidenciado o clima seco, a caatinga como a vegetação predominante e a escassez de água na região que refletem diretamente no teor de umidade do solo coletado.



Figura 4.1 – Local da retirada do solo, as margens da BR 226.



Figura 4.2 – Vista aérea da cidade de Jucurutu e local da retirada do material – RN.

O solo tropical estudado segundo a caracterização física possui  $2,65 \text{ g/cm}^3$  de massa específica dos sólidos; permeabilidade de  $1.10^{-4} \text{ (cm/s)}$ ; índice de vazios de 0,34; porosidade de 0,25; é classificado como uma areia argilosa segundo o SUCS, como A-1-b de acordo com a classificação TRB e como uma areia laterítica quartzosa segundo a classificação MCT. De acordo com a caracterização química e mineralógica o pH do solo em KCl é de 7,86 e na água de 8,16 com  $\Delta\text{pH}$  de -0,30; segundo o FRX e o DRX destacam-se  $\text{SiO}_2$  (50,75%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (26,39%) e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (9,11%) que é evidenciado por meio das imagens do MEV com EDS. De acordo com os ensaios geotécnicos

aplicados a pavimentação levando em consideração a energia Proctor intermediária, o solo apresenta Resistência à Compressão Simples inicial da ordem de 645kPa; teor de umidade de 10,32%; massa específica aparente seca máxima de 2,06 g/cm<sup>3</sup>; ISC de 37% expansão de 0,12% e Módulo de Resiliência de 130 MPa tanto para a tensão confinante como para a tensão desvio. Mais detalhes referentes aos resultados dos ensaios do solo estudado são apresentados no capítulo seguinte.

#### 4.1.2. REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

O rejeito de minério de ferro utilizado nesse estudo foi coletado na Mina do Bonito em Jucurutu – RN, situada uma latitude 5°87'74.1'' sul e uma longitude de 36°98'31,5'' oeste. É indicado na Figura 4.3 a principal rodovia de acesso à mina do Bonito partindo de Natal, a capital do estado do Rio Grande do Norte, essa rodovia além de dar acesso a mina é a principal rota de escoamento do minério de ferro produzido na região.

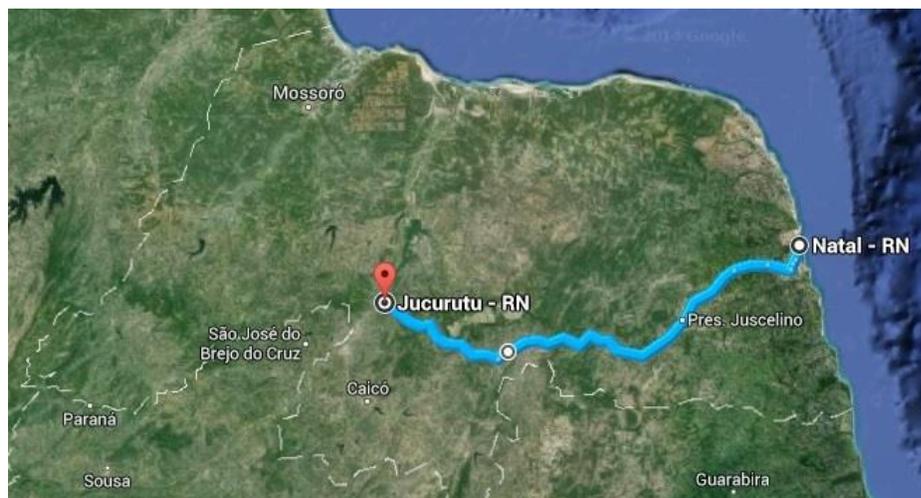


Figura 4.3 - Rodovia de acesso à mina do Bonito.

O local foi escolhido por ser a maior mina de minério de ferro do estado do Rio Grande do Norte, no qual durante o beneficiamento do minério tem gerado uma quantidade de rejeito da ordem de 30.000 m<sup>3</sup> por ano que é equivalente a 125mil toneladas de rejeito. Além disso, a própria mineradora tem incentivado pesquisas em parceria com as universidades brasileiras a fim de melhorar o desempenho e a eficiência das suas atividades.

Devido à escassez de água na região, o rejeito é armazenado a céu aberto na mina em forma de montes. O rejeito é uniforme e bastante fino. Mais informações serão apresentadas no Capítulo 5, no

item que trata sobre a análise granulométrica desse material. Nas Figuras 4.4 e 4.5 são apresentados os detalhes da coleta dos rejeitos que foram avaliados nesse estudo.



Figura 4.4 – Local de coleta do rejeito de minério de ferro. Mina do Bonito, Jucurutu – RN (1).



Figura 4.5 – Local de coleta do rejeito de minério de ferro. Mina do Bonito, Jucurutu – RN (2).

O rejeito de minério de ferro estudado segundo a caracterização física possui  $4,01 \text{ g/cm}^3$  de massa específica dos sólidos; permeabilidade de  $1.10^{-6} \text{ (cm/s)}$ ; índice de vazios de 0,55; porosidade de 0,35 (%); é classificado como uma argila segundo o SUCS, como A-7 não plástico de acordo com a classificação TRB e como um material que não tem comportamento laterítico segundo a classificação MCT. De acordo com a caracterização química e mineralógica o pH do rejeito em KCl é de 6,09 e na água de 7,04 com  $\Delta\text{pH}$  de -0,95; segundo o FRX e o DRX destacam-se  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (80%),  $\text{SiO}_2$  (12,32%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (11,20%) que é evidenciado por meio das imagens do MEV com EDS. De

acordo com os ensaios geotécnicos aplicados a pavimentação levando em consideração a energia Proctor intermediária, o rejeito apresenta Resistência à Compressão Simples inicial da ordem de 419kPa; teor de umidade de 9,3%; massa específica aparente seca máxima de 2,64 g/cm<sup>3</sup>; ISC de 19% expansão de 0,076% e Módulo de Resiliência de 125 MPa tanto para a tensão confinante como para a tensão desvio. Além disso, o rejeito de minério de ferro mesmo depois do processo de beneficiamento ainda apresenta comportamento magnético e segundo a caracterização ambiental é classificado como um resíduo de classe IIB material não perigoso. Mais detalhes referentes aos resultados dos ensaios do rejeito estudado são apresentados no capítulo seguinte.

#### **4.1.3. MISTURAS DE SOLO-REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**

Para efeito desta pesquisa utilizou-se, três variações de misturas do solo tropical com o rejeito de minério de ferro nas porcentagens de 10%, 20% e 30%, em volume, de rejeito de minério de ferro em relação à porcentagem total das misturas. As porcentagens em volumes foram determinadas levando em consideração o volume solto do material. Pois, o rejeito de minério ferro estudado se encontra na condição de material solto e o solo retirado da jazida da região passou pelo processo de empolamento depois da retirada e também se encontra na condição de material solto.

Essas porcentagens foram adotadas com base em outras pesquisas envolvendo misturas de rejeitos com solos (Gratão *et al.*, 2006), (Dantas, 2015), (Buitrago *et al.*, 2016), (Santos, 2018). As misturas foram preparadas em volume devido à variação da densidade dos grãos do rejeito do minério de ferro e do solo tropical.

Para a realização das misturas envolvendo os materiais foi utilizado um recipiente cilíndrico graduado de 10 litros onde as marcações de 1 litro, 2 litros e 3 litros representavam 10%, 20% e 30% respectivamente. E, portanto, para a mistura de 10% de rejeito e 90% de solo, o recipiente cilíndrico era cheio até a marcação de 1 litro com rejeito e os 9 litros seguintes com o solo. O mesmo procedimento foi realizado para as outras misturas.

#### **4.2. MÉTODO DE TRABALHO**

As atividades desse estudo foram realizadas no Laboratório do Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis – CTGás Natal; no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte; no Laboratório de Mecânica dos Solos do Instituto Federal de Goiás; nos Laboratórios de Geotecnia, Geoquímica, Geocronologia e Infraestrutura Rodoviária (INFRALAB)

da Universidade de Brasília.

O procedimento experimental foi desenvolvido em cinco etapas: a primeira etapa compreendeu a classificação MCT. A segunda etapa à caracterização química e mineralógica. A terceira abrangeu a caracterização geoambiental. A quarta representou os ensaios de caracterização física. E a quinta compreendeu os ensaios geotécnicos aplicados à pavimentação. Todas as etapas foram realizadas para o rejeito de minério de ferro e para o solo laterítico, além das diferentes misturas: 10% de rejeito de minério de ferro e 90% de solo, 20% de rejeito de minério de ferro e 80% de solo, 30% de rejeito de minério de ferro e 70% de solo. A Figura 4.6 resume as etapas e os ensaios realizados neste estudo.

Com os resultados alcançados foi dimensionado um trecho de rodovia pelos métodos do DNIT, MEDINA e AASHTO e posteriormente foram realizadas simulações de retroanálise para a determinação da compatibilidade entre as tensões, os deslocamentos e as camadas de base e sub-base.

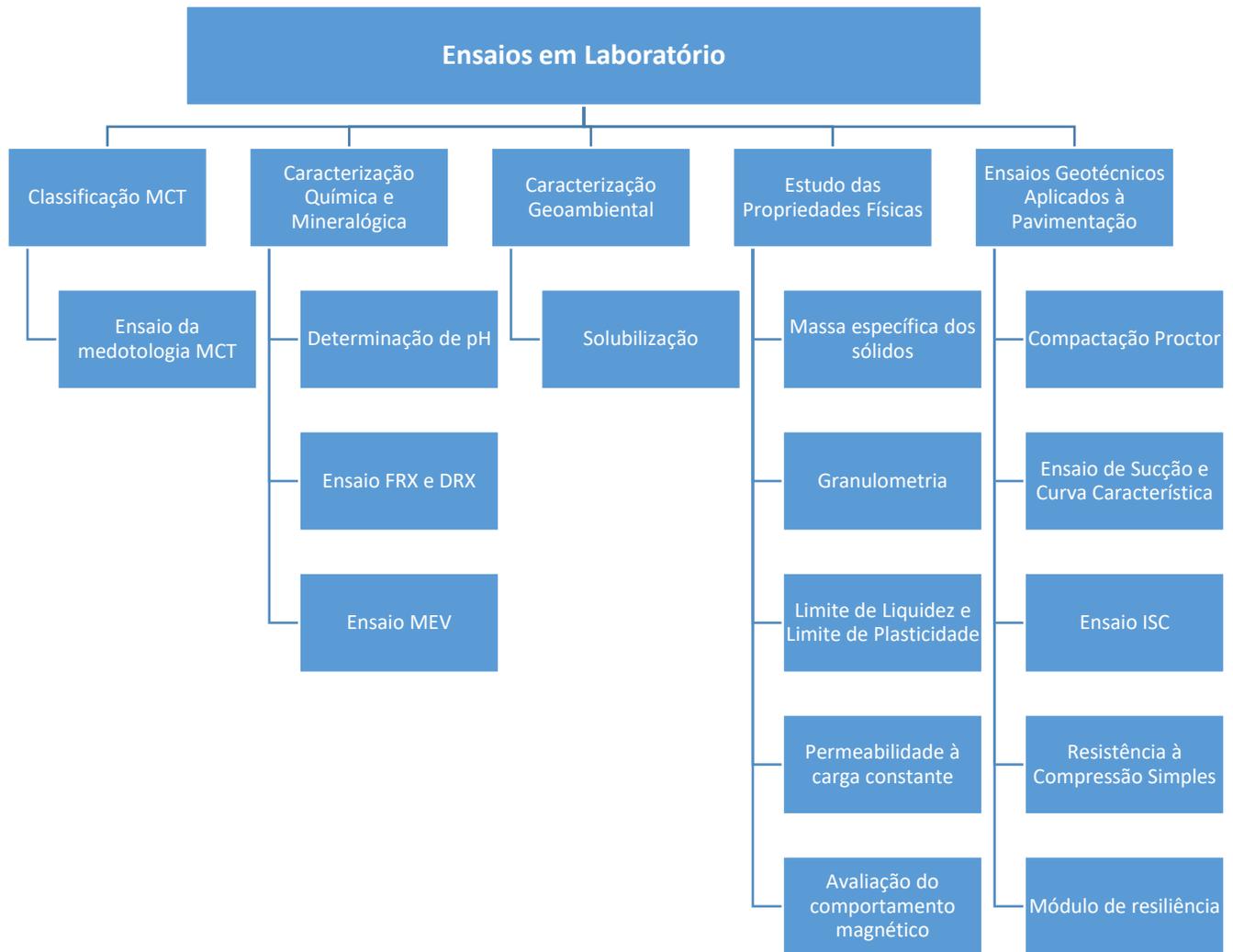


Figura 4.6 - Atividades realizadas.

#### 4.2.1. COMPORTAMENTO LATERÍTICO - CLASSIFICAÇÃO MCT

Com os ensaios de compactação Mini-MCV e perda de massa por imersão da metodologia MCT, é possível obter as curvas de deformabilidade do solo, a família de curvas de compactação assim como a curva de perda de massa por imersão. Com base nesses ensaios é possível determinar os parâmetros necessários para a classificação MCT, coeficientes  $c'$ ,  $d'$ , a perda de massa por imersão  $P_i$  (%) e o índice de laterização  $e'$ .

#### 4.2.1.1 ENSAIO DA METODOLOGIA MCT

No intuito de classificar o solo da presente pesquisa de acordo com a metodologia MCT, foram realizados os ensaios de compactação Mini-MCV e perda de massa por imersão de acordo com as normas ME 258 (DNER, 1994) e ME 256 (DNER, 1994). Segundo Nogami e Villibor (1995), essa metodologia permite classificar os materiais em função do seu desempenho tecnológico, diferentemente das classificações tradicionais que, por sua vez são baseadas na granulometria e nos limites de consistências dos materiais. Na Figura 4.7 são ilustrados alguns detalhes dos ensaios da metodologia MCT para fins classificatórios. O ensaio foi realizado em triplicata para o solo puro e para o rejeito de minério de ferro puro. Os corpos de prova foram moldados na energia intermediária.



Figura 4.7 – Ensaio da classificação MCT.

#### 4.2.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

Esta etapa teve por objetivo a determinação das características químicas e mineralógicas do rejeito de minério de ferro e do solo tropical, além das misturas. Foram realizados ensaios de pH, fluorescência de raios-x, difração de raios-x e ensaios de microscopia eletrônica de varredura com EDS. Os ensaios realizados permitem a classificação dos materiais em solos lateríticos ou solos não

lateríticos.

Segundo Campanha (2011) através dos ensaios de caracterização química e mineralógica são conhecidas as unidades que constituem as rochas definidas como sólidos homogêneos naturais com arranjo atômico ordenado e composição química definida. O arranjo cristalino característico de cada espécie mineral se apresenta em quantidade definidas e proporcionais de determinados elementos químicos. Quanto a classificação química, as espécies minerais subdividem-se em conjuntos de acordo com a ordem de interesse, tais como:

- Elementos nativos: ocorrência de elementos sob forma não combinada (Ouro – Au);
- Sulfetos: combinação de elementos metálicos e enxofre (Pirita –  $\text{FeS}_2$ );
- Óxidos: contém um ou mais elementos metálicos em combinação com oxigênio, hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), pirolusita ( $\text{MnO}_2$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ );
- Hidróxidos: são óxidos combinados com água ou hidróxido (OH), neste grupo encontram-se: goethita [ $\text{FeO(OH)}$ ], gibsitita [ $\text{Al(OH)}_3$ ];
- Carbonatos: contém em sua formulação o radical carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita [ $\text{Ca, Mg(CO}_3)_2$ ];
- Silicatos: representam 95% dos minerais petrográficos, cuja composição química combina sílica (Si) e oxigênio (O) dentre outros elementos. O quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) é um dos minerais silicatados mais comuns nas rochas e por sua resistência ao intemperismo, está contido na fração areia do solo, na maioria das vezes, caracteriza-se pela falta de capacidade de absorção de bases, má retenção de água e pobreza em elementos nutrientes.

Os minerais sintetizados por intemperismo são denominados secundários e fazem parte do grupo de minerais de argila que se dividem em argilominerais (caulinita, montmorilonita, illita – de coloração branca) e óxidos-hidróxidos de ferro (hematita – cor vermelha, goethita – cor amarela) e óxidos-hidróxidos de alumínio (gibsitita – cor branca). A estrutura da caulinita possui ligações tipo ponte de hidrogênio (argilominerais não expansivos) ligações estas inexistentes na montmorilonita (argilominerais expansivos). Os óxidos-hidróxidos de ferro têm origem na oxidação do ferro presente na estrutura dos silicatos (olivinas, piroxênios, biotita) das rochas ou podem ser herdados das rochas sedimentares ou metamórficas, como é o caso da hematita do itabirito. Quanto aos óxidos-hidróxidos de alumínio destaca-se a gibsitita. As argilas silicatas possuem forma laminar, os óxidos de ferro e de alumínio apresentam forma relativamente granular e equidimensional. Resulta que estes últimos

atuam como agentes desorganizadores do arranjo paralelo e de máximo contato mútuo das partículas laminares dos solos. A presença dos hidróxidos de ferro e alumínio como agentes desorganizados no solo provocam a diminuição das forças de coesão e adesão diminuindo o encrostamento, a plasticidade, a pegajosidade e a dureza do solo e acarretam aumento da capacidade de drenagem.

#### 4.2.2.1. DETERMINAÇÃO DE pH

O pH em água destilada das amostras de rejeitos de minério de ferro, solo laterítico e das três diferentes misturas foi obtido com o emprego de um pHmetro Hanna modelo HI 2216 e eletrodo combinado de vidro (modelo HI 1131B). Para os ensaios foram empregados 4 g da amostra e 10 mL de água deionizada, mantendo a proporção de 1:2,5 (peso/volume). As amostras ficaram em agitação por meia hora a baixa velocidade, num agitador horizontal IKA-Werke Modelo KS-501D, seguido de 30 min de repouso e separação do extrato líquido por centrifugação até concluir com a medição do pH. Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

O mesmo procedimento foi realizado para a determinação do pH em KCl, substituindo os 10mL de água deionizada por uma solução de 10 mL de 0,1 M de KCl. O procedimento adotado é apresentado na Figura 4.8.

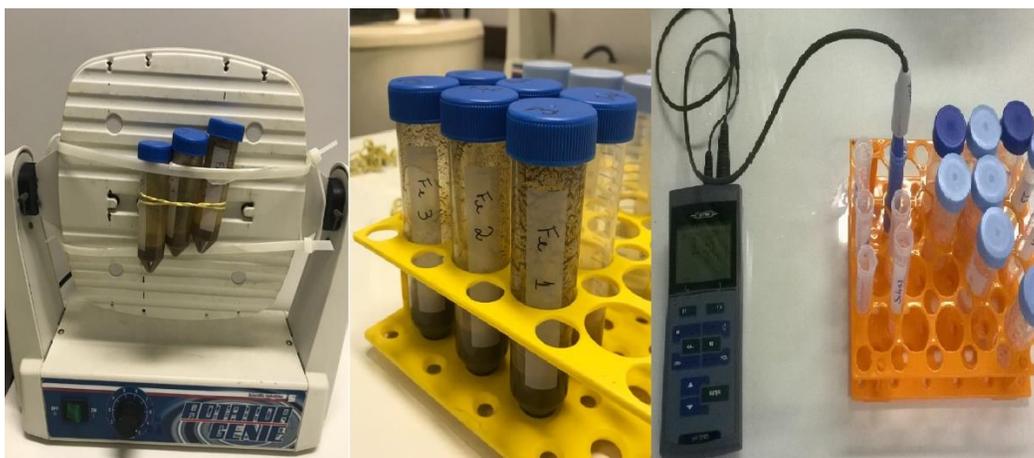


Figura 4.8 – Procedimento do ensaio de pH.

O pH do solo pode ser determinado experimentalmente agitando-se uma porção do material escolhido em água e utilizando-se de calorimetria ou de um potenciômetro. É possível também que soluções salinas, de KCl por exemplo, sejam utilizadas para este processo e, neste caso, os cátions  $K^+$  da solução permutam-se com o hidrogênio e o alumínio substituíveis da superfície dos coloides,

diluindo-se na solução.

Com a solução de KCl, o hidrogênio e os íons hidróxido de alumínio, remanescentes dos coloides orgânicos ou inorgânicos, tornam-se ionizados e substituíveis, formando o  $\text{Al}(\text{OH})_3$  e liberando, dessa forma, locais adicionais de permuta nos coloides minerais. O resultado é o aumento na capacidade de permuta de cátions e, portanto, do pH do solo nessa solução.

O valor do pH obtido nos ensaios varia consideravelmente com a técnica utilizada, dependendo do teor de solo ou de água utilizados e, na determinação potenciométrica, varia conforme os eletrodos são mergulhados durante o processo no sedimento, na suspensão de partículas ou na solução.

O pH de um solo influencia consideravelmente na solubilidade de vários elementos, como o ferro e o alumínio. A carga elétrica das partículas coloidais varia com o pH, interferindo nos fenômenos de absorção e trocas iônicas, além de também influenciar na dispersão e floculação.

É importante ressaltar que, independente da reação inicial do solo no ensaio, a circulação da água utilizada produz uma redução do pH, ou aumento de acidez, uma vez que as bases solúveis são retiradas e o íon de hidrogênio toma seus lugares nas estruturas cristalinas ou nas micelas coloidais.

O clima e a umidade também influenciam nos resultados, de forma que em ambientes mais quentes e úmidos, o processo de acidificação natural do solo é mais rápido. Os cátions  $\text{Ca}^{++}$  ou  $\text{Mg}^{++}$ , usualmente encontrados nesses solos, tendem a ser substituídos rapidamente pelo íon  $\text{H}^+$ , oriundo do ácido carbônico, extremamente ativo e produto da dissolução do  $\text{CO}_2$  atmosférico na água das chuvas que chegam ao solo por infiltração.

#### **4.2.2.2. ENSAIO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX) COM PERDA AO FOGO E ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) COM IDENTIFICAÇÃO DE FASES CRISTALINAS**

Para esta análise, 10g de cada material foi passado na peneira #200 e quarteado. Em seguida foi analisado pela técnica de Fluorescência de Raios-X utilizando o equipamento EDX-720 da marca Shimadzu. Para a avaliação de perda ao fogo, o material primeiramente foi seco em estufa por 24h em temperatura de  $110^\circ\text{C}$ , posteriormente o mesmo material foi aquecido até  $1000^\circ\text{C}$  por 60 minutos.

Para identificação da mineralogia das amostras, parte do material foi submetida à análise de Difração de Raios-X (DRX) utilizando o equipamento XRD-6000 da Shimadzu. A amplitude angular usada foi de  $2\theta$  com um intervalo de medida entre  $2-100^\circ$ , uma velocidade de  $0,05^\circ/\text{min}$  e sob voltagem de 35 kV e 15 mA. A identificação mineralógica foi com os padrões de referência do banco

de dados do *software* JADE 9.0. A Figura 4.9 corresponde às amostras analisadas.



Figura 4.9 – Amostras analisadas nos ensaios FRX.

A análise por fluorescência de raios-X pode objetivar tanto resultados qualitativos como quantitativos, embasados na medição da intensidade dos raios-X característicos emitidos pelos elementos químicos da amostra estudada, quando excitada por partículas como elétrons, prótons ou íons através de aceleradores de partículas ou de ondas eletromagnéticas, ou através de tubos de raios-X (Melo Júnior, 2007).

Segundo Skoog *et al.* (2009), elementos de baixo número atômico apresentam baixa sensibilidade analítica e baixo valor de energia de emissão e, portanto, são mais difíceis de serem determinados por FRX. No entanto, Bortoleto (2007) explica que, em 1912, o físico britânico Henry Moseley instituiu pela primeira vez uma relação matemática entre a frequência e o número atômico de cada elemento químico, aspecto indispensável a uma análise por espectrometria de fluorescência de raios-X.

Dessa forma, no contexto atual, pode-se afirmar que a espectrometria de fluorescência de raios-X progrediu bastante, sendo uma técnica bastante disseminada no meio técnico, por sua habilidade de determinar elementos químicos de forma rápida, com baixo custo operacional, mínima necessidade de preparo da amostra analisada antes do experimento e sem destruição do material estudado após o ensaio. É uma técnica utilizada em vários ramos da ciência, como engenharias, medicina, geologia, biologia, arqueologia, etc. (Borjesson *et al.*, 2003). Segundo Nagata *et al.* (2001), estima-se hoje que a análise por FRX é uma das técnicas mais utilizadas em todo o mundo, ocupando uma posição de destaque, principalmente naquelas áreas científicas onde a obtenção rápida do perfil

de constituintes metálicos e não-metálicos é indispensável.

Assim, de modo resumido, a análise por fluorescência de raios-X consiste de três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios-X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios-X (IAEA, 1999). Segundo Skoog *et al.* (2009), a análise por FRX mostra-se uma técnica versátil, podendo ser aplicada para o estudo de diversos materiais, tanto no estado sólido como líquido, sem necessitar de tratamento exaustivo para a preparação da amostra e oferecendo, também, a vantagem de ser uma técnica analítica não destrutiva.

Já para o método da Difratomia por Raios-X, ou DRX, é uma ferramenta bastante utilizada para a análise mineralógica do solo, especialmente a relacionada à fração argilosa do material. Esse método consiste na identificação da estrutura cristalina da amostra de solo através da incidência de feixes de Raios-X difratados sobre uma placa fotográfica, utilizando-se das propriedades das ondas eletromagnéticas de se inclinarem e atravessarem os espaços entre as partículas. O ajuste entre as dimensões físicas desses espaços e o comprimento de onda, ou a composição mineralógica, revelam a posição dos cristais, sua estrutura e intensidade. Através da correlação com os padrões constituídos, conclui-se a presença, ou não, de determinados minerais na amostra em estudo.

Segundo Callister Jr. (2002), os Raios-X possuem uma grande importância no desenvolvimento de novos materiais. Constituem uma forma de radiação eletromagnética de elevada energia e pequeno comprimento de onda, usualmente utilizada em técnicas de difração, através do uso de uma amostra pulverizada do material a ser analisado, composta por partículas finas e aleatoriamente orientadas que são expostas à radiação.

Da Silva (2011) explica que, em qualquer estudo sobre as propriedades de determinado material, o primeiro passo, e talvez o mais importante, é a determinação das suas estruturas cristalinas, já que grande parte de suas propriedades estão intimamente ligadas ao arranjo dos átomos. Albers *et al.* (2002) concluíram que a análise de argilominerais pelo DRX permite a identificação rápida e confiável dos minerais comumente presentes nos materiais argilosos.

#### **4.2.2.3. ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA**

Para a realização do procedimento de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com EDS, cerca de 10 g das amostras foram secas na estufa a temperatura de 60 ° C por 12 horas. Para fixar as amostras ao suporte metálico a ser levado para o MEV foram utilizadas fitas dupla-face de carbono. Em seguida as amostras foram submetidas ao recobrimento com carbono e encaminhadas para

análise.

As análises morfológicas foram realizadas no Laboratório de Geocronologia, do Instituto de Geociências, na Universidade de Brasília utilizando um Microscópio Electrónico de Varredura (MEV) JEOL Quantas 450. O método analítico utilizado foi o de imageamento com elétrons secundários. O equipamento utilizado é apresentado na Figura 4.10.

As análises foram realizadas para o rejeito de minério de ferro puro, para o solo puro e para as três diferentes misturas para o material solto. E para as três misturas compactadas na energia Proctor intermediária.

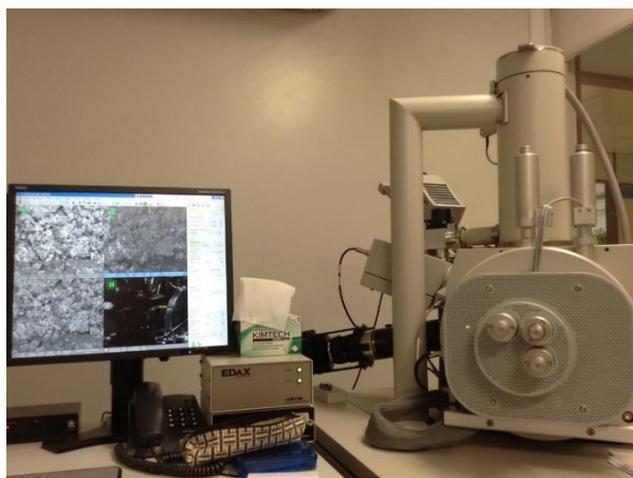


Figura 4.10 – Equipamento JEOL Quantas 450.

O ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma ferramenta de investigação moderna, recente e extremamente importante na caracterização dos materiais. Por meio de um feixe de elétrons a superfície da amostra é analisada, e o feixe de elétrons refletido é coletado, e então mostrado em uma tela de computador. A imagem gerada na tela do computador, representa as características da superfície da amostra.

O MEV foi acompanhado da técnica *energy dispersive x-ray detector* (EDS), que é um acessório essencial no estudo da caracterização microscópica de materiais. Enquanto o MEV proporciona nítidas imagens, o EDS permite sua imediata identificação da composição química.

Segundo Degeo (2013), quando o feixe de elétrons incide sobre um mineral, os elétrons mais externos dos átomos e os íons constituintes são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, liberam a energia adquirida a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raio-X. Um detector instalado na câmara de vácuo do Microscópio Eletrônico por Varredura (MEV) mede a energia associada a esse elétron. Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar quais os

elementos químicos estão presentes naquele local e assim identificar em instantes que mineral está sendo observado. Por último, é importante ressaltar que o ensaio MEV é uma técnica não destrutiva e as amostras podem ser arquivadas para estudos posteriores ou direcionadas para outras análises complementares. A facilidade de preparação das amostras para análise e a rapidez na aquisição de dados conferem ainda um baixo custo a este método de análise.

### **4.2.3. CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL**

Esta etapa tem por objetivo a determinação das características geoambientais do rejeito de minério de ferro que foram misturados ao solo tropical utilizado na pesquisa. Foram realizados ensaios de solubilização apenas para o rejeito puro conforme descritos nos itens abaixo.

Em síntese, a classificação dos rejeitos perante a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004a) abrange a identificação da fonte geradora do rejeito e/ou qualificação e quantificação dos constituintes, para que seja possível a comparação destas concentrações com listagens de substâncias fornecidas na norma cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido (Motter & Kenttl, 2015). Entretanto, a solubilização conforme NBR 10.006 (ABNT, 2004d) fornece uma estimativa sobre a solubilização em água de alguns constituintes dos rejeitos num curto prazo. Tal procedimento avalia a liberação de metais e de metaloides com base na solubilidade dos compostos em solução por simples dissolução. Desta forma, o procedimento de solubilização da NBR 10.006 (ABNT, 2004d) tem aplicabilidade para rejeitos de mineração de bens metálicos, podendo ser utilizado para avaliar a liberação de metais e metaloides (Bissacot, 2014).

#### **4.2.3.1. SOLUBILIZAÇÃO**

O ensaio de solubilização foi realizado conforme a norma a NBR 10.006 (ABNT, 2004d). O procedimento do ensaio está descrito na Tabela 4.1. Foi feita a separação do extrato líquido solubilizado por centrifugação e filtragem por uma membrana filtrante de 0,45 µm. O extrato obtido foi armazenado com pH 2 a 4°C até que fossem analisadas pelo ICP-OES. Os compostos orgânicos não foram analisados devido a origem dos rejeitos. As concentrações dos constituintes analisados foram comparadas com os limites máximos estipulados pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a).

Tabela 4.1 – Procedimento do Ensaio de Solubilização.

Passo	Condições Experimentais
1	Adicionar 1.000 mL de água destilada a 250g de rejeito (base seca).
2	Agitação em baixa velocidade, por 5 min. Cobrir o frasco com filme de PVC e deixar em repouso por 7 dias.
3	Filtração da solução com membrane filtrante de 0,45 µm de porosidade.
4	Medição do pH e acidificação, se necessário.
5	Determinação dos metais (ICP-OES).

De acordo com a norma NBR 10.004 (2004a), os rejeitos classificados como perigosos são rejeitos que apresentam propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas possíveis de causarem risco à saúde pública e ao meio ambiente. Já os rejeitos não perigosos, podem ser subclassificados como inertes e não inertes. Os rejeitos inertes são aqueles que não interagem com o meio ambiente, pois não sofrem transformações físicas, químicas ou biológicas significativas, isto é, não se degradam de forma rápida. Já os rejeitos classificados como não inertes, apesar de não apresentarem periculosidade, apresentam propriedades potencialmente para solubilização de compostos químicos quando em contato com a água.

Segundo Santos (2018), a classificação dos rejeitos pode ser baseada exclusivamente na identificação do processo produtivo, caso o rejeito se enquadre nas listagens dos anexos da NBR 10.004 (ABNT, 2004a) ou possua características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Caso os rejeitos não se enquadrem no descrito, então para ser classificado, o rejeito deve ser amostrado de acordo com a norma NBR 10.007 (ABNT, 2004b), submetido a ensaios de lixiviação de acordo com a norma NBR 10.005 (ABNT, 2004c) e ensaios de dissolução conforme a norma NBR 10.006 (ABNT, 2004d). No extrato solubilizado, quando algum dos compostos analisados apresenta valores acima do limite da norma, o rejeito é classificado como Classe IIA (Não Inerte) e concentrações inferiores ao estabelecido por norma classificam os rejeitos como Classe IIB (Inerte).

#### 4.2.4. ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

Essa etapa teve por objetivo a determinação das características físicas do rejeito de minério de ferro e do solo laterítico e das suas três diferentes misturas. A finalidade da caracterização física é obter valores de densidade real dos materiais, detalhes da textura, do tamanho das partículas e da indicação de um grande número de propriedades geotécnicas como permeabilidade, características de compactação e umidade ótima, além do comportamento magnético dos rejeitos. Com os resultados alcançados é possível classificar os materiais conforme o SUCS, TRB e avalia-los segundo os critérios estabelecidos pelo DNIT.

##### 4.2.4.1. MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

Foram executados ensaios de massa específica dos sólidos, conforme a norma NBR 6508 (ABNT, 2016), para o rejeito de minério de ferro, para o solo tropical e para as três diferentes misturas. Todos os ensaios foram realizados em triplicata. O equipamento utilizado foi um picnômetro DiogoLab com um auxílio de uma bomba de vácuo da marca Primatec. O ensaio é apresentado na Figura 4.11.



Figura 4.11 – Ensaio de massa específica dos sólidos.

O ensaio de determinação da massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ), conforme a NBR 6508 (ABNT, 2016), visa determinar a densidade real dos grãos das partículas sólidas, ou seja, isenta de vazios. É a relação entre a massa das partículas sólidas e o seu volume.

#### 4.2.4.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Foram realizados ensaios de granulometria baseados na norma NBR 7181 (ABNT, 2016) compreendendo tanto a parte do peneiramento, como a parte da sedimentação, devida à grande quantidade de finos encontrada em todas as amostras. Obtendo assim uma melhor representatividade dos resultados, além de possibilitar uma melhor identificação da heterogeneidade do material. Também foi realizada para todas as amostras a sedimentação sem adição de defloculante. Todos os ensaios foram realizados em triplicata. São apresentados na Figura 4.12 os equipamentos utilizados no ensaio de granulometria.



Figura 4.12 – Ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação (com e sem defloculante).

O ensaio de granulometria possibilita o conhecimento das porcentagens das partículas em uma amostra em função de suas dimensões. O ensaio se baseia em duas etapas: o peneiramento e a sedimentação. O ensaio de sedimentação se faz necessário quando existe uma porcentagem de finos (material passando na peneira n° 200, e abertura 0,075 mm) representativa maior que 5%, que influencia no comportamento do material (PINTO, 2006).

Na etapa de peneiramento, o material atravessou uma série de peneiras colocadas de forma de

abertura de malhas, no sentido de maior diâmetro para o menor diâmetro, sendo a última peneira que foi atravessada a de número #200, que possui abertura de 0,075 mm, na qual evidenciou a presença ou não de porcentagens significativas de finos. De acordo com o material passante nesta peneira, faz-se necessária a utilização do procedimento de sedimentação.

Na etapa de sedimentação, que é baseada no princípio da sedimentação dos grãos de solo em uma mistura de defloculante de hexametáfosfato de sódio e água destilada, uma amostra de material foi dispersa na mistura, de forma que as partículas sedimentaram em velocidades diferentes, de acordo com a sua forma, tamanho, peso e viscosidade da mistura.

Essencialmente o ensaio de granulometria fornece três coeficientes. O diâmetro efetivo  $D_{10}$ , que é abertura da peneira que deixa passar apenas 10% do material. Fornece também o coeficiente de curvatura ( $C_C$ ), que permite detectar, de forma mais clara, o formato da curva granulométrica além de evidenciar possíveis descontinuidades ou concentração mais alta de grãos grossos no conjunto. Ainda, revela o coeficiente de não-uniformidade ( $C_U$ ), que indica a amplitude do tamanho dos grãos. Considera-se que o material é bem graduado quando o  $C_C$  está dentro do intervalo de 1 a 3 (PINTO, 2006). Verifica-se que, o SUCS considera que pedregulhos, para serem classificados como bem-graduado quando o CNU precisam ser maiores que 4, e uma areia bem graduada, acima de 6 (PINTO, 2006).

#### **4.2.4.3. LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE**

Foram realizados ensaios de limite de liquidez e ensaios de limite de plasticidade respectivamente conforme as normas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), para o rejeito de minério de ferro, para o solo laterítico e para as três diferentes misturas. Todos os ensaios foram realizados em triplicata. São apresentados na Figura 4.13 os equipamentos que foram utilizados e detalhes da realização do ensaio.



Figura 4.13 – Equipamentos de Casagrande para ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade respectivamente e detalhes da realização do ensaio.

O ensaio para determinação do limite de liquidez é definido como o teor de umidade do solo com o qual uma ranhura padrão nele feita requer 25 golpes para se fechar (PINTO, 2006). O procedimento de ensaio é padronizado no Brasil pela NBR 6459 (ABNT, 2016).

Por sua vez, o limite de plasticidade é definido como o menor teor de umidade com o qual se consegue moldar um cilindro com três milímetros de diâmetro, rolando-o com a palma das mãos sobre uma placa de vidro rugosa. A norma NBR 7180 (ABNT, 2016) rege os ensaios de Determinação do Limite de Plasticidade.

#### 4.2.4.4. PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE

Foram realizados ensaios de permeabilidade a carga constante conforme NBR 13292 (ABNT, 1995), para o rejeito de minério de ferro, para o solo laterítico e para as três diferentes misturas. Todos os ensaios foram realizados em triplicata e todos os corpos de prova foram moldados na energia normal e na umidade ótima conforme apresentado posteriormente no Capítulo 05.

Os ensaios de permeabilidade foram realizados no intuito de avaliar como o rejeito de minério de ferro muito fino preenche os vazios deixados pelo o solo granular e como esse preenchimento influencia nos valores de permeabilidade das misturas.

CRUZ (1996) diferencia o termo condutividade hidráulica do termo permeabilidade, conceituando condutividade hidráulica como a facilidade ou dificuldade que apresenta um meio confinado à passagem de fluxo, a esse meio confinado faz referência às fraturas ou fissuras rochosas e as juntas presentes em maciços rochosos. No caso da permeabilidade este meio se refere aos materiais porosos ou meios não confinados.

Ainda segundo CRUZ (1996), a permeabilidade e a condutividade de solos e rochas são influenciadas basicamente pela dimensão e pela forma dos vazios presentes. De uma forma geral, pode-se prever que solos porosos sejam mais permeáveis que solos densos, bem como que feições rochosas abertas tenham condutividades hidráulicas maiores do que feições preenchidas, mesmo que parcialmente.

O coeficiente de permeabilidade  $k$ , pode ser interpretado fisicamente como a velocidade de descarga correspondente a um gradiente hidráulico unitário. São apresentados na Tabela 4.2, os intervalos aproximados de  $k$  para diversos solos. (MARSAL & RESÉNDIZ, 1975).

Tabela 4.2 - Intervalo aproximado do coeficiente de permeabilidade ( $k$ ), para diversos tipos de solos.

Tipos de solos	Intervalo $k$ em (cm/s)
Pedregulhos	100 a 1
Areias limpas	1 a $10^{-3}$
Areias muito finas, limos e misturas de areia e silte	$10^{-3}$ a $10^{-7}$
Argilas	$10^{-7}$ a $10^{-9}$

Fonte: Modificado de MARSAL & RESÉNDIZ (1975).

#### 4.2.4.5. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MAGNÉTICO

Para a realização do ensaio a amostra de rejeito foi previamente seca na estufa à temperatura de 105°C por 24h. Posteriormente, 300g de rejeito foi depositado sobre a superfície de um papel filtro e submetida à ação do campo magnético do ímã permanente de base de ferro e pôde-se assim observar se a amostra de rejeito apresentava susceptibilidade magnética. O ensaio em questão não possui norma e é um ensaio qualitativo. O procedimento foi realizado segundo Santos (2018). Posteriormente, o mesmo procedimento foi realizado para o solo tropical puro, já que o mesmo apresenta comportamento laterítico. O ensaio do comportamento magnético é apresentado na Figura 4.14.



Figura 4.14 – Ensaio de avaliação do comportamento magnético.

É de fundamental importância a análise da susceptibilidade magnética, pois o comportamento magnético está relacionado com a presença de bens minerais que contém ferro em sua estrutura. E a quantidade de minério de ferro encontrada vai influenciar diretamente nos ensaios estudados nesta tese.

As grandes mineradoras do Brasil e do mundo que possuem um elevado grau de tecnologia e equipamentos mais modernos para o beneficiamento do minério de ferro, alcançam um rendimento mais adequado no processo de retirada do minério de ferro. Entretanto, empresas de pequeno e médio porte que beneficiam o minério de ferro com equipamentos mais modestos não conseguem um rendimento satisfatório no beneficiamento, gerando uma grande quantidade de rejeito que ainda possui uma grande quantidade de ferro.

#### **4.2.5. ENSAIOS GEOTÉCNICOS APLICADOS À PAVIMENTAÇÃO**

Nessa etapa, foram executados ensaios de sucção conforme ASTM D5298 (ASTM, 2010); curva característica; compactação Proctor, conforme a norma NBR 7182 (ABNT, 2016); ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC), segundo a norma NBR 9895 (ABNT, 2016); ensaios de resistência à compressão simples, conforme a norma NBR 12770 (ABNT, 1992) e também os ensaios de módulo de resiliência, segundo a AASHTO T-307 (AASHTO, 1999). Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

##### **4.2.5.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR**

Foram realizados quinze ensaios de compactação nas energias normal, intermediária e modificada para o rejeito de minério de ferro, o solo laterítico e as três diferentes misturas em volume,

totalizando quarenta e cinco ensaios, sendo todos executados com reuso de material. Os ensaios foram executados com reuso de material devido à dificuldade em coletar e transportar os materiais de Natal a Brasília.

Foram utilizados aproximadamente cinco quilos de material para cada ensaio de compactação. Os materiais, acondicionados nos sacos hermeticamente fechados, continham um teor de umidade inicial inferior a 1%, correspondente ao local onde estava armazenado na mina e na margem da BR-226. Foi adicionada água, até se atingir o teor de umidade de 5%. Esse foi o valor referente à umidade inicial para a realização dos ensaios. A cada novo ponto, adicionou-se uma quantidade de água, que correspondeu a 2% em peso do material. A mistura do material a ser compactado se deu dentro de uma bandeja de plástico a fim de se evitar a perda de água. Além disso, enquanto o ensaio era realizado, o restante da mistura permanecia dentro da bandeja, vedado com papel filme para que a água contida na mistura não evaporasse. Entre cinco e sete pontos foram obtidos para cada ensaio realizado.

De posse dos resultados, foi feita uma média aritmética simples dos resultados dos ensaios de compactação de uma mesma energia ponto a ponto, tanto para os valores de umidade como para os valores de massa específica aparente seca, e de forma que essa média passou a representar os critérios de  $\gamma_{d,max}$  e  $w_{ot}$  referente ao ponto mais alto da curva de compactação dos corpos de prova a serem moldados nos ensaios de ISC.

#### **4.2.5.2. CURVA CARACTERÍSTICA**

Para a obtenção das curvas características foi realizado a determinação da sucção usando a técnica do papel filtro para o rejeito puro, o solo puro e as três diferentes misturas na energia intermediária, efetuando trajetórias de secagem e molhagem, a partir da umidade ótima de compactação das amostras. Esta técnica é conhecida como de trajetória mista, pois parte-se de uma determinada umidade em direção ao umedecimento e à secagem. Desta forma, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 25 mm de altura e 50 mm de diâmetro. Para a elaboração da curva foram feitos quatorze pontos sendo eles localizados antes da umidade ótima e após a umidade ótima como é apresentado no Capítulo 5.

Após atingir os percentuais de saturação desejados, utilizou-se o papel filtro quantitativo Whatman nº 42 para determinação da sucção total. Determinada a sucção, após 15 dias de tempo de equilíbrio, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio da balança hidrostática (ABNT NBR-

10838 - MB-288) e determinação de umidade com o auxílio da estufa. De posse dos dados experimentais, as curvas características são representadas em termos de sucção x umidade, a sucção sendo mostrada em pF, que é o logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água (Delgado, 2007).

#### **4.2.5.3. ENSAIO ISC**

Foram realizados três ensaios de ISC na energia normal, três ensaios de ISC na energia intermediária e três ensaios de ISC na energia modificada para o rejeito de minério de ferro, o solo laterítico e as três diferentes misturas. Todos os corpos de prova foram moldados na umidade ótima e consequentemente na massa específica aparente seca máxima.

Os ensaios de ISC foram realizados no intuito de dimensionar o pavimento flexível por meio do método empírico e posteriormente compará-lo ao método mecanístico-empírico.

Todos os ensaios seguiram rigorosamente a NBR 9895 (ABNT, 2016) ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC).

No período de quatro dias o cilindro com o material compactado ficou submerso em água, onde foi realizada a leitura da expansão diariamente. Ao término do período o corpo de prova foi submetido ao puncionamento, obtendo-se assim os resultados dos ISC's.

A capacidade de suporte de um solo compactado pode ser medida por meio do ensaio ISC, idealizado pelo engenheiro O. J. Porter em 1939, no estado da Califórnia nos Estados Unidos.

O ensaio consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa mistura padrão de brita estabilizada granulometricamente. Essa relação é expressa em porcentagem. Em paralelo, nesse ensaio também pode ser medida a expansibilidade do solo quando submerso em água por 96 horas.

Esse ensaio é sem dúvida, um método importante para avaliar o comportamento de um solo, quer como de um subleito de um pavimento, quer como componente das camadas que irão compor esse pavimento. Nos últimos anos, o ensaio ISC vem sendo substituído pelo Módulo de Resiliência. Entretanto, o Módulo de Resiliência apesar de ser um ensaio mais preciso do que o ISC para avaliar o comportamento do material, ainda é pouco utilizado no Brasil devido ao seu elevado custo, a necessidade de calibração periódica do equipamento, a falta de mão de obra qualificada para operá-lo, além da pequena quantidade de equipamentos espalhados pelo Brasil.

#### 4.2.5.4. RESISTÊNCIA à COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios de Resistência à Compressão Simples foram realizados para o rejeito de minério de ferro, para solo puro e para as três diferentes misturas. Os corpos de prova foram moldados nas três energias de compactação e os ensaios realizados em triplicata.

Foram utilizados corpos de prova cilíndricos com 50mm de diâmetro e 100mm de altura. A ruptura aconteceu depois de 24 horas após a moldagem do corpo de prova. Empregou-se no ensaio uma velocidade de 1,27 mm/min, que atende o intervalo estabelecido pela norma de 0,5%/min a 2%/min. Os ensaios foram conduzidos até a ruptura dos corpos de prova, admitindo-se como tal a queda na tensão axial ou a ocorrência de deformações excessivas, geralmente visualizada com trincas nos corpos de prova. É apresentado na Figura 4.15 o ensaio de Resistência à Compressão Simples.



Figura 4.15 – Ensaio de Resistência à Compressão Simples.

O ensaio de resistência a compressão simples também é denominado de resistência a compressão sem confinamento. O ensaio consiste na aplicação de uma carga axial num corpo de prova cilíndrico sem aplicação de uma tensão confinante. Este procedimento é considerado uma particularidade do ensaio triaxial não consolidado e não drenado (UU) em que a pressão confinante é nula e devido a curta duração do ensaio não há tempo suficiente para que ocorra a drenagem ou

dissipação das pressões neutras provocadas pela carga aplicada.

#### 4.2.5.5. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os ensaios triaxiais cíclicos foram executados no Laboratório de Infraestrutura da Universidade de Brasília e de acordo com a norma T 307-99 (AASHTO, 2003) com o objetivo de determinar os módulos de resiliência dos materiais. A Norma Americana foi utilizada, pois o equipamento e o computador utilizado no ensaio estão calibrados para serem operados segundo a Norma citada. Os corpos de prova foram moldados nas três energias de compactação e os ensaios foram realizados em triplicata. O equipamento triaxial utilizado para a execução desse ensaio é constituído por pórticos de reação, câmara triaxial, sistema de válvulas para aplicação de cargas, *Linear Variable Differential Transformers* (LVDTs) para a leitura dos deslocamentos do corpo de prova. Nota-se que os LVDT's deste modelo são colocados pelo lado de fora da cápsula, e apesar dessa disposição alterar os resultados dos deslocamentos quando comparado com os LVDT's colocados fora da cápsula, os resultados foram válidos, pois todos os materiais foram ensaiados na mesma condição. Os LVDT's posicionados fora da cápsula são utilizados devido ao tamanho dos corpos de prova que possuem aproximadamente 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. O sistema de aquisição de dados utilizado é do próprio equipamento da marca *International Limited England*. É apresentado na Figura 4.16 o equipamento de módulo de resiliência.



Figura 4.16 – Ensaio de Módulo de Resiliência.

O procedimento geral consiste em colocar um corpo de prova numa célula triaxial e submetê-lo a uma tensão confinante que representa o confinamento do material esperado abaixo do pavimento. Pulsos de carregamento dinâmico são aplicados no material para simular a passagem do veículo e a deformação resultante é medida. Para os solos granulares os fatores que afetam o valor do módulo são: número de repetições da tensão desvio, história de tensões, duração e frequência do carregamento e nível de tensões aplicado. Já para os solos finos coesivos, além dos fatores citados para os solos granulares, é importante considerar a condição de compactação.

Segundo Medina (1997a), os ensaios têm sido realizados com corpos de prova compactados na energia normal e na umidade ótima para materiais de subleito e com outras energias para materiais utilizados na base e sub-base. Geralmente, tem-se utilizado o equipamento com aplicação de um ciclo por segundo, pulso de carregamento de 0,1 segundo e repetição na faixa de algumas centenas, sendo que as deformações são medidas com transdutores do tipo *linear variable differential transformer* (LVDT). O processo de seleção do MR de projeto tornou-se complexo, pois este parâmetro deve ser determinado para condições consistentes com o solo na sua situação final, analisando a condição sob o pavimento, os níveis de tensão e o carregamento aplicado.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos por meio dos ensaios descritos no capítulo 4 para as misturas utilizadas nesta pesquisa são apresentados adiante, além de mais detalhes referentes aos resultados dos ensaios do solo tropical puro e do rejeito de minério de ferro puro. Para melhor compreensão dos resultados e do comportamento do material estudado, foram feitos comentários em cada tipo de ensaio, tendo em vista que o objetivo da realização dos ensaios foi avaliar e comparar o potencial das misturas, do solo e do rejeito para a utilização como material para compor as camadas de pavimentos rodoviários.

### 5.1. ENSAIOS DA METODOLOGIA MCT E CLASSIFICAÇÃO MCT

A família de curvas de compactação para o rejeito de minério de ferro puro é apresentada na Figura 5.1, onde são apresentados os valores de umidade e as massas específicas aparente secas de acordo com o número de golpes.

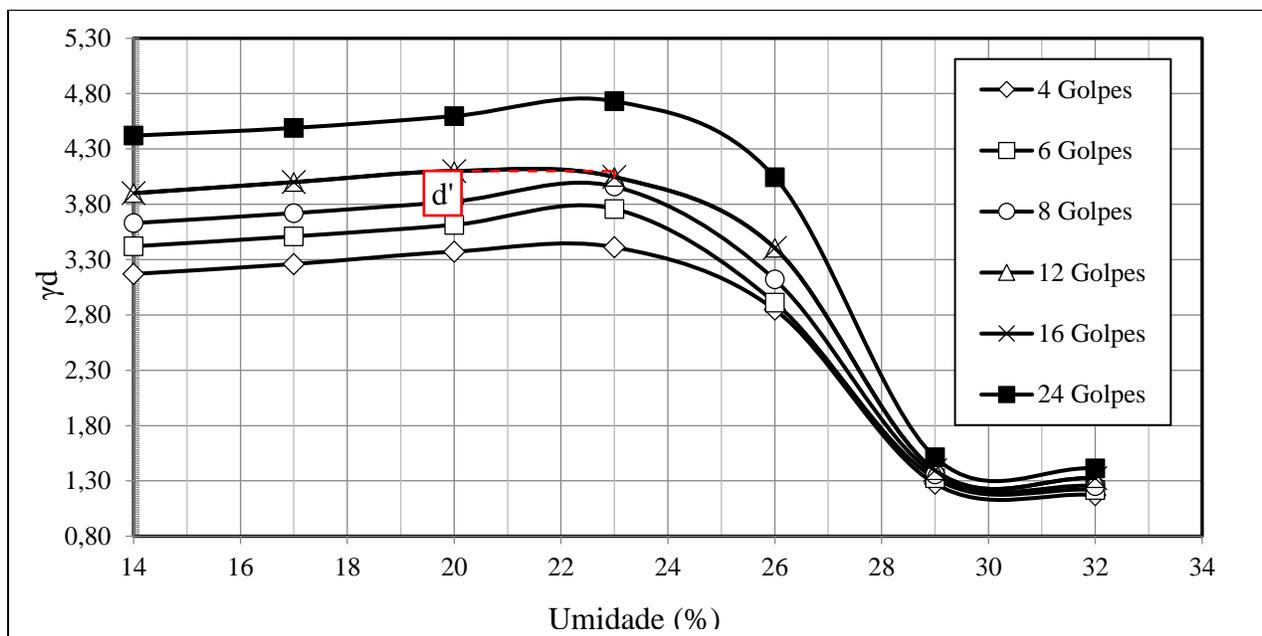


Figura 5.1 – Família de curvas de compactação do rejeito de minério de ferro.

Para o solo tropical puro é apresentado na Figura 5.2 a família de curvas de compactação com os mesmos parâmetros, umidade e massa específica aparente seca, como indicados na figura anterior.

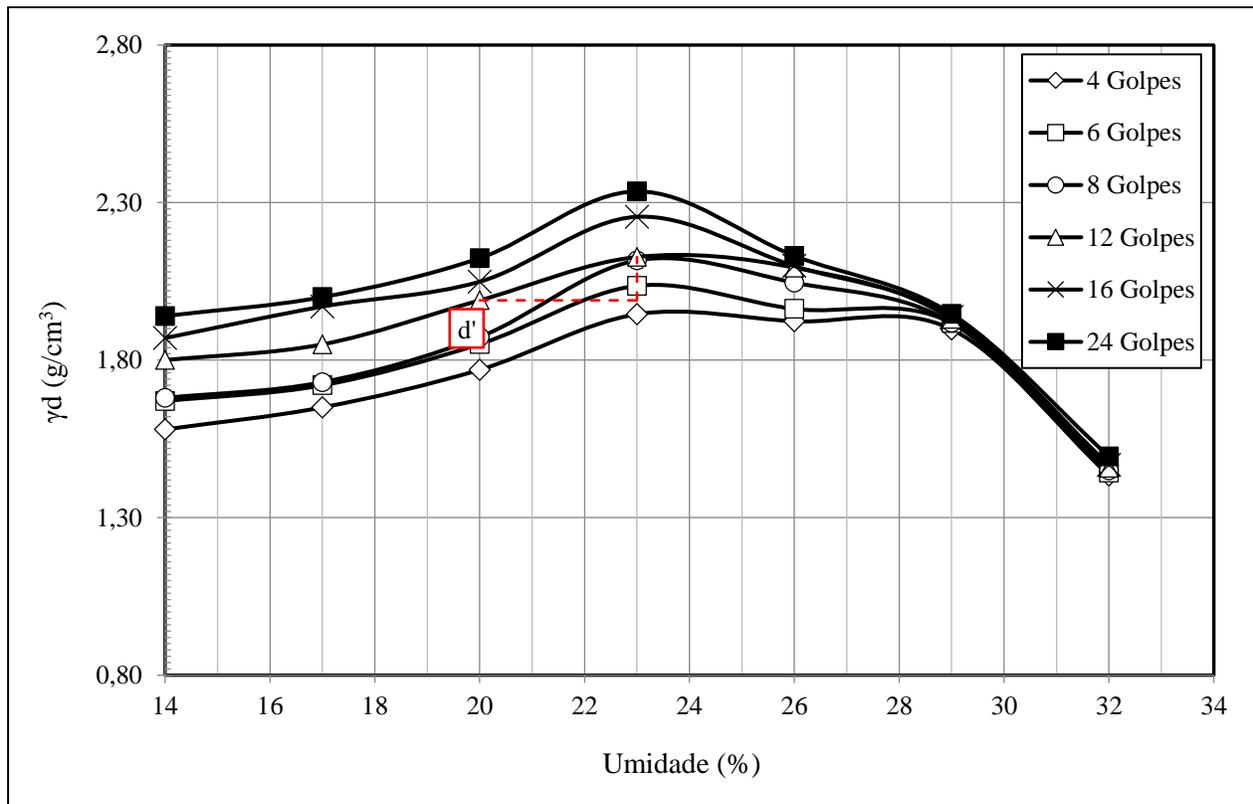


Figura 5.2 – Família de curvas de compactação do solo puro.

A Tabela 5.1 apresenta o resumo dos coeficientes obtidos por meio do ensaio de mini-MCV e perda de massa por imersão para amostras de solo tropical puro e de rejeito puro, que foram obtidos para os valores e Mini-MCV de 15, conforme preconiza a Norma ME 258 (DNER, 1994).

Tabela 5.1 – Resumo dos coeficientes obtidos através do ensaio de Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão.

Amostra	Pi (%)	c'	d'	e'	MCT
Rejeito Puro	35,7	0,12	-18	-0,91	-
Solo Puro	91,5	0,13	46	1,11	LA

Segundo Nogami & Villibor (1995), em geral, as argilas lateríticas possuem d' (inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação correspondente a 12 golpes) acima de 20, enquanto as não lateríticas não atingem esse valor e, frequentemente, apresentam valores inferiores a 10. O coeficiente angular da curva de deformabilidade correspondente a MiniMCV igual a 10 (c')

apresenta valor acima de 1,5, que caracteriza as argilas e solos argilosos. Para tais solos o coeficiente  $c'$  é pouco variável ao longo de uma larga faixa de teores de umidade.

O ensaio foi realizado para o rejeito puro no intuito de avaliar uma semelhança a um possível comportamento laterítico do material. Entretanto, não foi possível classificar o rejeito puro através da carta de classificação dos solos da Metodologia MCT, em virtude do parâmetro  $e'$  ser menor que 0,5. No entanto, os solos costumam apresentar indícios de laterização para parâmetros  $d'$  maiores que 20 e perdas de massa por imersão menores que 100% (Nogami & Villibor, 1995). No caso do rejeito puro, o coeficiente  $d'$  foi menor que 20 (-18), o que poderia inferir que, na classificação MCT, esse material poderia ser enquadrado como um solo não laterítico, ou seja, o rejeito de minério de ferro se comporta como um solo não laterítico.

É apresentado na Figura 5.3 a classificação do solo puro através da carta de classificação MCT de acordo com os coeficientes apresentados na Tabela 5.1

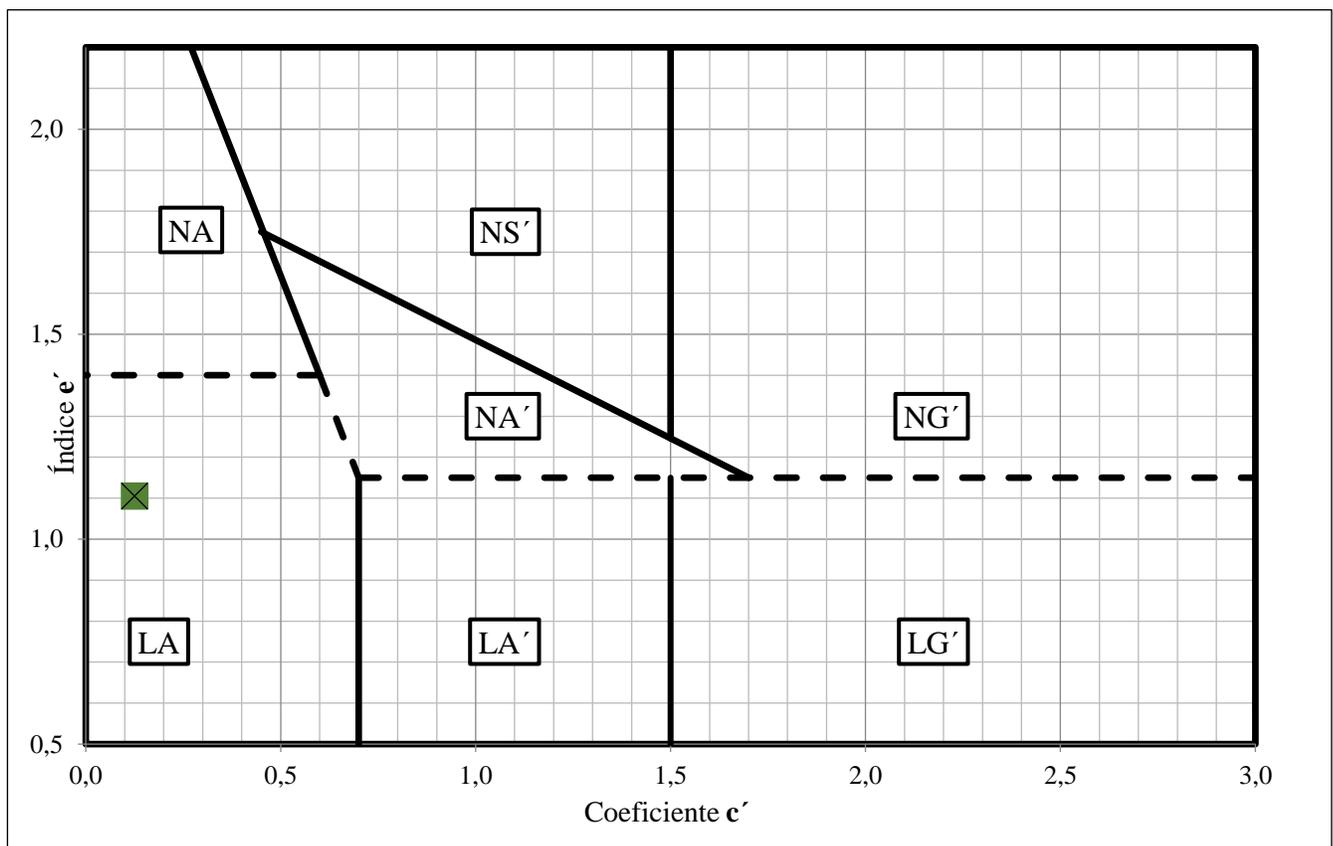


Figura 5.3 – Classificação MCT do solo estudado.

Para o solo tropical puro apesar de ser considerado um solo granular segundo a classificação TRB, o que inviabilizaria a classificação MCT, classificação esta recomendada para solos finos. O solo foi ensaiado devido a sua quantidade de finos, quantidade esta que influencia diretamente no

comportamento do material. E por meio da classificação apresentada na Figura 5.12, pode-se perceber que o solo é classificado como uma areia laterítica quartzosa, comportamento que será confirmado posteriormente pelo ensaio de Difração de Raios-X e MEV com EDS.

## **5.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA**

Os resultados e as análises dos ensaios químicos e mineralógicos que compreendem os ensaios de determinação do pH, fluorescência de raios-x com perda ao fogo, difração de raios-x com identificação de fases cristalinas, microscopia eletrônica de varredura com EDS.

### **5.2.1. RESULTADOS DE pH**

A acidez ou alcalinidade de um solo é medida através do potencial hidrogeniônico (pH) do material. Valores de pH menores que 7 indicam uma maior acidez, enquanto valores maiores indicam uma maior alcalinidade.

Bigarella *et al.* (1996) classifica os solos em função de seus valores de pH de acordo com a seguinte orientação:

- Solo ácido, pH menor que 5,5;
- Moderadamente ácido, com pH entre 5,5 e 6,4;
- Praticamente neutro, com pH variando de 6,5 a 6,9;
- Neutro, com pH igual a 7;
- Alcalino, com pH maior que 7.

O rejeito de minério de ferro puro apresentou pH em H<sub>2</sub>O médio na ordem de 7,04. Já o solo puro apresentou pH em H<sub>2</sub>O médio na ordem de 8,16. E as misturas apresentaram valores médios de pH em H<sub>2</sub>O de 8,35 para 10% de rejeito e 90% de solo, 8,31 para 20% de rejeito e 80% e 7,96 para 30% de rejeito e 70% de solo.

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (1996) e Cardoso (1995, 2002), o pH dos solos finos está associado ao teor de argila que o compõe, sendo que a floculação dos minerais de argila é mais fácil quanto mais ácido é o pH do solo. Como o pH encontrado para o solo é alcalino, o solo encontra-se em princípio desagregado.

Botelho da Costa (1973) e Cardoso (2002), citado por Rezende (2003), destaca que além do

processo de endurecimento e cimentação que ocorre nos solos tropicais, a agregação em solos lateríticos decorre também da ação floculante (irreversível ou não) dos hidróxidos de ferro ou alumínio, presentes no solo e também no rejeito de minério de ferro estudados. Tem-se também que os sistemas dominados por íons de Al e H apresentam fraca resistência à floculação. Neste tipo de material, a lixiviação geralmente provoca a liberação de  $Al^{3+}$  da malha cristalina que passa a ocupar posições de troca. A forte retenção do íon trivalente corresponde à fraca espessura da camada dupla e forte neutralização das cargas negativas das partículas coloidais, explicando o domínio do processo de floculação em sistemas controlados por íons  $Al^{3+}$  e  $H^+$  em comparação com materiais saturados por  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  ou  $Na^+$ . Além da influência de Al e H, a floculação por ácidos é facilitada pela redução da carga negativa resultante da influência do pH reduzido.

Para os resultados de pH em KCl, tem-se os valores médios para o rejeito de minério de ferro puro 6,09, para o solo puro 7,86, para a mistura de 10% de rejeito de minério de ferro e 90% de solo 7,75, para a mistura de 20% de rejeito de minério de ferro e 80% de solo 7,80 e para a mistura de 30% de rejeito de minério de ferro e 70% de solo 7,61.

Segundo Kiehl (1979) existe uma diferença entre os valores de pH em KCl e em água, denominada por  $\Delta pH$ . Valores positivos para  $\Delta pH$  indicam preponderantes concentrações de óxidos de ferro e alumínio, enquanto valores negativos indicam o predomínio de argilas silicatadas. O valor negativo também indica que a quantidade de alumínio substituível na superfície do coloide é alta. Os respectivos valores de  $\Delta pH$  são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Valores de pH em  $H_2O$ , pH em KCl e  $\Delta pH$ .

	pH em KCl	pH em $H_2O$	$\Delta pH$ (KCl – $H_2O$ )
Rejeito Puro	6,09	7,04	- 0,95
Solo Puro	7,86	8,16	- 0,30
10% Rejeito + 90% Solo	7,75	8,35	- 0,60
20% Rejeito + 80% Solo	7,80	8,31	- 0,51
30% Rejeito + 70% Solo	7,61	7,96	- 0,35

Todos os valores encontrados para o  $\Delta pH$  foram negativos indicando a predominância de argilas silicatas no solo laterítico e nas misturas, conforme será apresentado nas imagens do MEV. Os valores negativos também indicam que a quantidade de alumínio substituível na superfície do coloide é alta, comportamento este apresentado para o rejeito puro. Portanto, há um aumento na adsorção dos cátions, ou seja, a retenção de metais na matriz porosa conforme foi identificada por Santos (2018).

Ainda segundo Santos (2018), o balanço de cargas no solo tem correlação direta com o delta pH ( $\Delta\text{pH}$ ) e influência na adsorção dos metais pesados no solo.

Na Figura 5.4 é apresentado um gráfico em função do pH em  $\text{H}_2\text{O}$  e KCl em relação a porcentagem de rejeitos. No gráfico fica evidenciado que a maior variação de pH acontece para o rejeito de minério de ferro puro, de forma que a quantidade de alumínio substituível alta influência nos valores do  $\Delta\text{pH}$  negativo mais do que a quantidade de argilas silicatadas presentes no solo puro e nas misturas, já que segundo a granulometria o solo tem menos de 10% de argila.

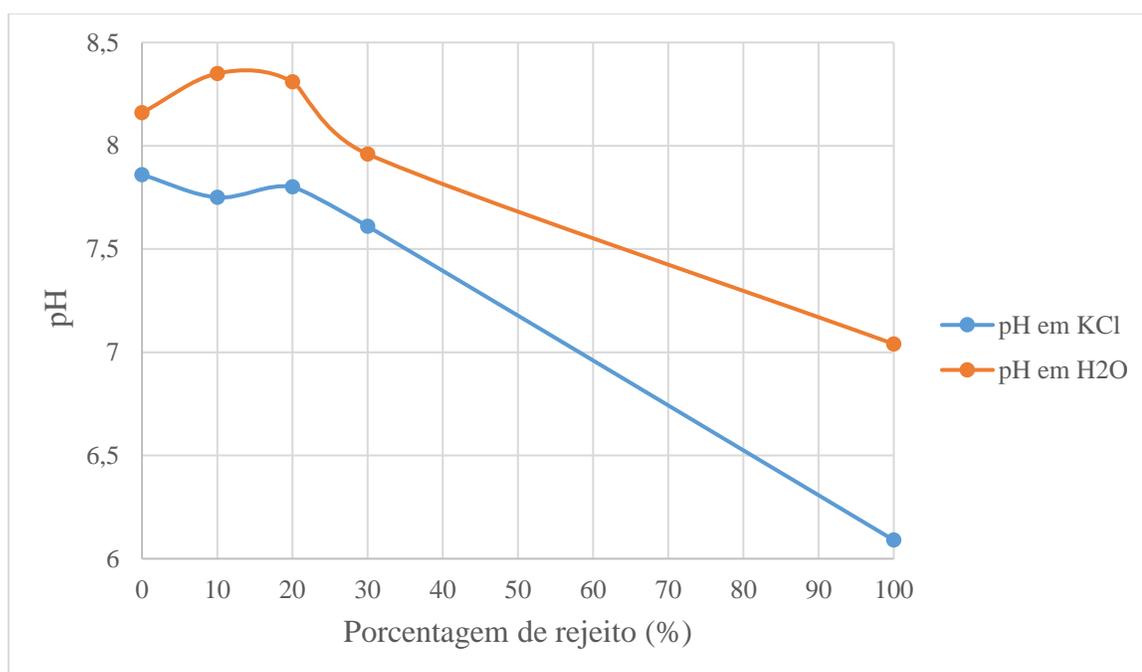


Figura 5.4 – pH em água e pH em KCl em relação as porcentagens de rejeitos.

### 5.2.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX) COM PERDA AO FOGO E ENSAIOS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) COM IDENTIFICAÇÃO DE FASES CRISTALINAS

Nos resultados da análise química quantitativa das amostras de solo (Tabela 5.3) destacam-se principalmente:  $\text{SiO}_2$  (50,75%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (26,39%) e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (9,11%) correspondendo aproximadamente a 86% dos óxidos. As fases mineralógicas presentes (Figura 5.5) em concordância com os valores referidos, apresentam silicatos como principais fases minerais, destacando o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e o plagioclásio cálcico (anortita). O mineral quartzo, segundo mineral mais abundante da crosta, é quimicamente inerte e não expansivo.

Os principais constituintes minerais dos solos são os argilominerais, óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio. De acordo com Borba (1981), os elementos Si, Fe, e Al são considerados os elementos químicos mais importantes dos Solos Lateríticos. Isto corrobora como sendo possível inferir que os resultados da análise química por meio da fluorescência de raios-x (FRX) e de difração de raios-x (DRX) o material analisado tem características de um solo laterítico.

Tabela 5.3 – Resultado da análise química semiquantitativa da amostra de solo.

Óxidos (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	MnO	SrO	ZnO	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P.F.
	50,75	26,39	9,11	3,15	2,02	1,53	1,47	0,15	0,15	0,03	0,01	0,01	5,23

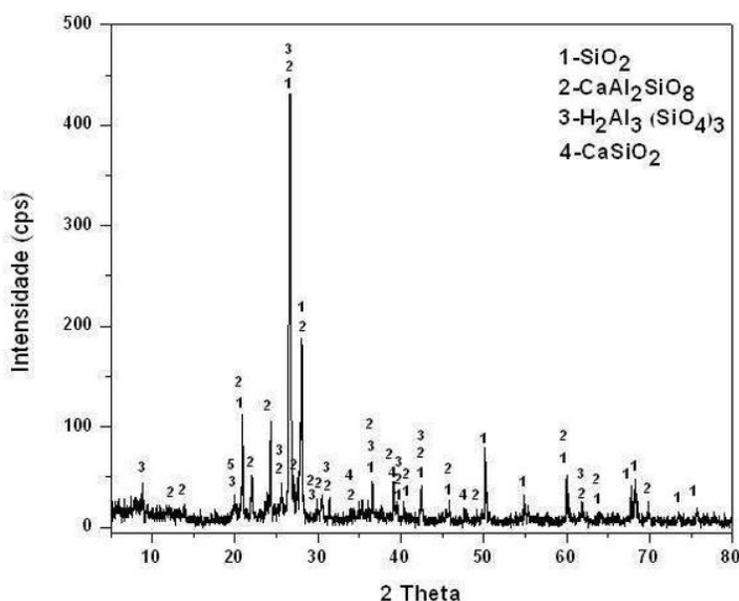


Figura 5.5 – Difratograma da amostra de solo.

Quanto ao rejeito de minério de ferro, os resultados da análise química quantitativa (Tabela 5.4) indicam o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) como principal na composição, alcançando aproximadamente 80%. Destacam-se também com porcentagens similares o SiO<sub>2</sub> (12,32%) e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11,20%). Conseqüentemente, o difratograma correspondente (Figura 5.6) mostra uma composição de óxidos de ferro: hematite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), quartzo (SiO<sub>2</sub>) e silicatos da classe filossilicatos, a caulinita (Al<sub>2</sub>(SiO<sub>5</sub>)(OH)<sub>4</sub>) e o talco (Mg<sub>3</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>). A hematita é a principal fonte de ferro do mundo e o mais abundante mineral que o contém. A hematita é estável em meio oxidado e é um mineral não expansivo.

Tabela 5.4 – Resultado da análise química semiquantitativa da amostra de rejeito de ferro.

Óxidos	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	P.F.
(%)	69,11	12,32	11,20	1,48	0,73	0,14	0,02	5,00

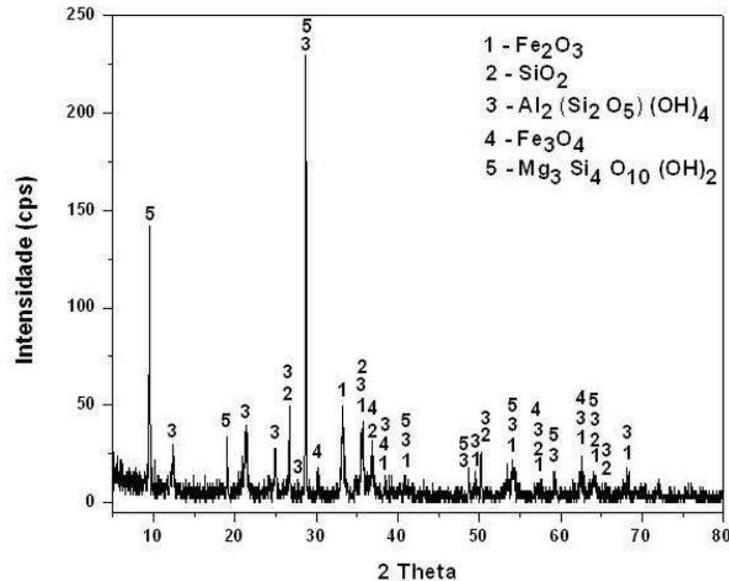


Figura 5.6 – Difratograma da amostra de rejeito de ferro.

A composição mineralógica corresponde à esperada no contexto geológico da região do Seridó no estado do Rio Grande do Norte. Assim, geologicamente, a área estudada se enquadra na denominada Formação Serra dos Quintos, dentro do Grupo Seridó, interpretada como uma sequência metavulcanossedimentar, composta principalmente por gnaisses e micaxistos, localmente migmatizados com formações ferríferas, anfibólitos e muscovita quartzitos (Angelim, 2007).

### 5.2.3. ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Na Figura 5.7 é apresentado os resultados dos ensaios MEV realizados para o rejeito puro. Na Figura 5.8 é apresentado o EDS ponto 01 e na Figura 5.9 o EDS ponto 02. Morfologicamente, trata-se de um material de tamanho variável sendo comuns grãos menores de 50 µm com frequentes partículas de tamanho inferior na forma de agregados irregulares aderidas às superfícies de grãos maiores. Os resultados de EDS, pontos 1 e 2, mostram uma composição essencialmente silicática com uma química complexa que pode ser explicada a partir da caracterização geológica regional, conforme foi apresentado no item 5.2.2, e/ou dos processos de extração e beneficiamento utilizados no minério que podem ter passado por um processo de deslamagem.

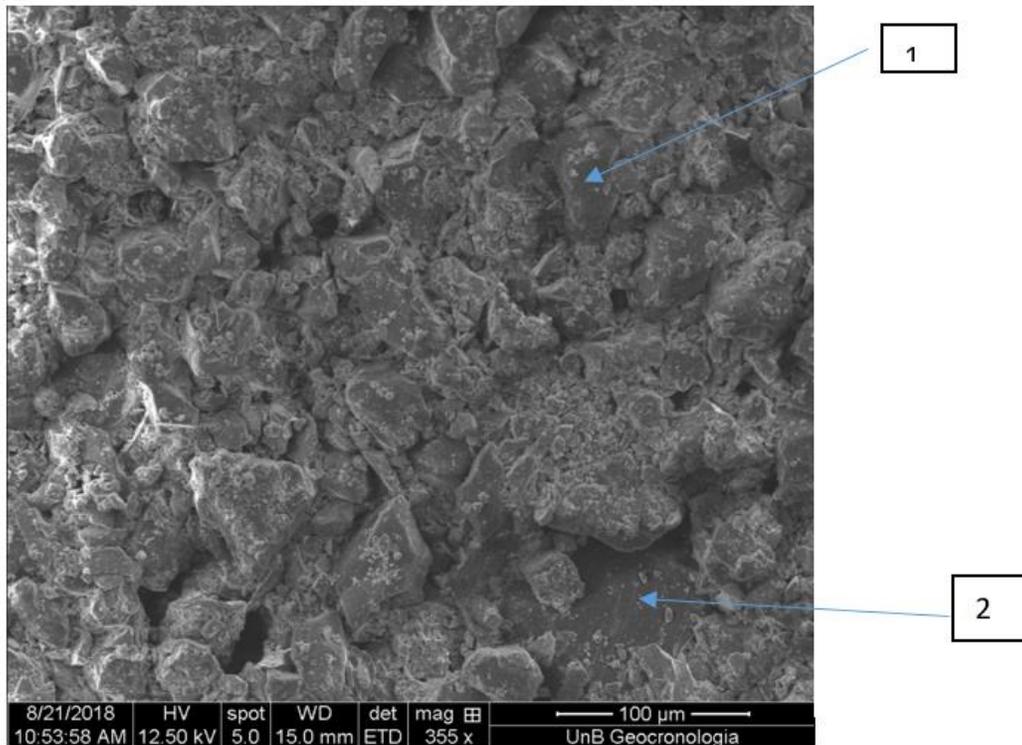
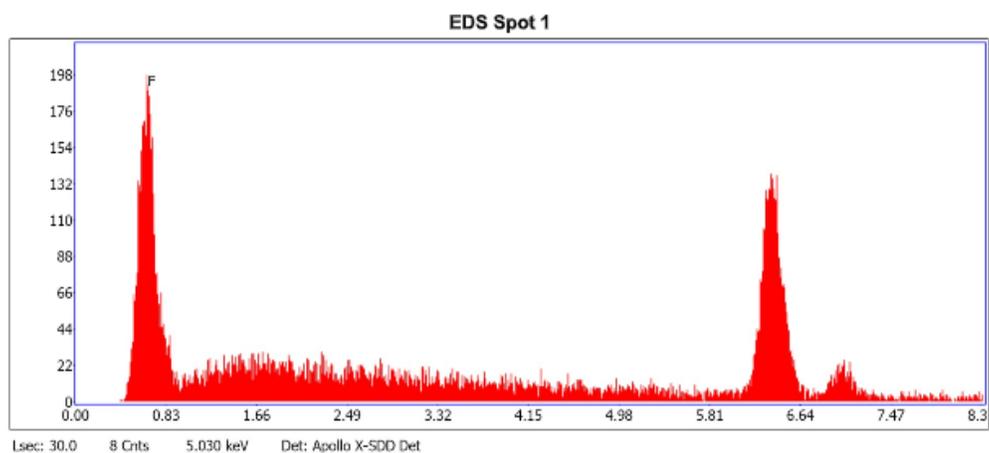


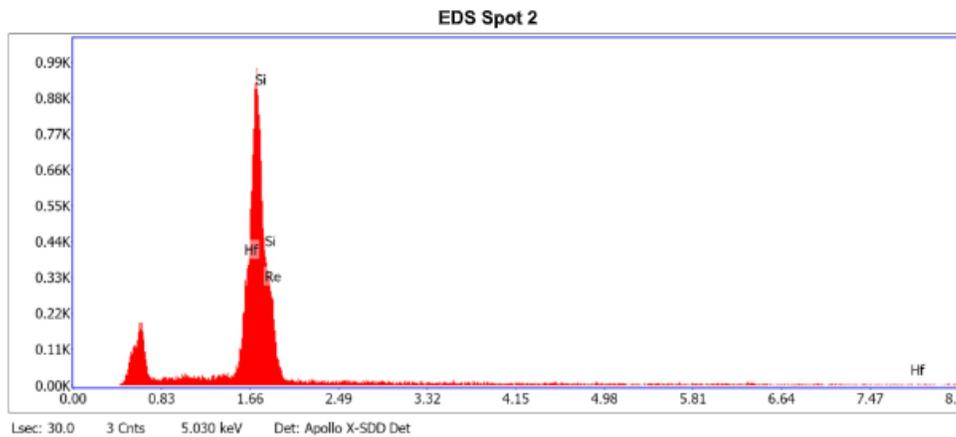
Figura 5.7 – Microscopia eletrônica de varredura do rejeito puro.



**eZAF Smart Quant Results**

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
F K	100.00	100.00	91.43	4.63	0.9692	0.9334	0.9334	1.0384	1.0000

Figura 5.8 – EDS Ponto 01 do rejeito puro.



**eZAF Smart Quant Results**

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
HfM	28.62	8.55	100.14	7.45	0.2498	0.7000	1.0246	1.1707	1.0651
SiK	44.03	83.61	286.26	4.34	0.4231	1.1136	0.7675	0.8624	1.0006
ReM	27.35	7.83	56.12	7.70	0.1798	0.6949	1.0331	0.9317	1.0153

Figura 5.9 – EDS Ponto 02 do rejeito puro.

Para o MEV do solo puro, Figura 5.10, é possível observar que o solo está constituído basicamente por sílica, alumínio e ferro, apresentando em quantidades variáveis elementos correspondentes à família dos lantanídeos (terras raras) cuja presença pode ser explicada pela contaminação do solo com material antrópico (resíduos de construção). Neste sentido, o ponto 1 (Figura 5.11) mostra um grão de quartzo arredondado com aproximadamente 80 µm de diâmetro e o ponto 2 (Figura 5.12) é caracterizado por uma química complexa, conforme foi apresentado nos resultados da difração de raios-x. Morfologicamente, o solo se caracteriza por grãos arredondados, principalmente de quartzo, numa matriz de silicatos de alumínio lamelares a placóides.

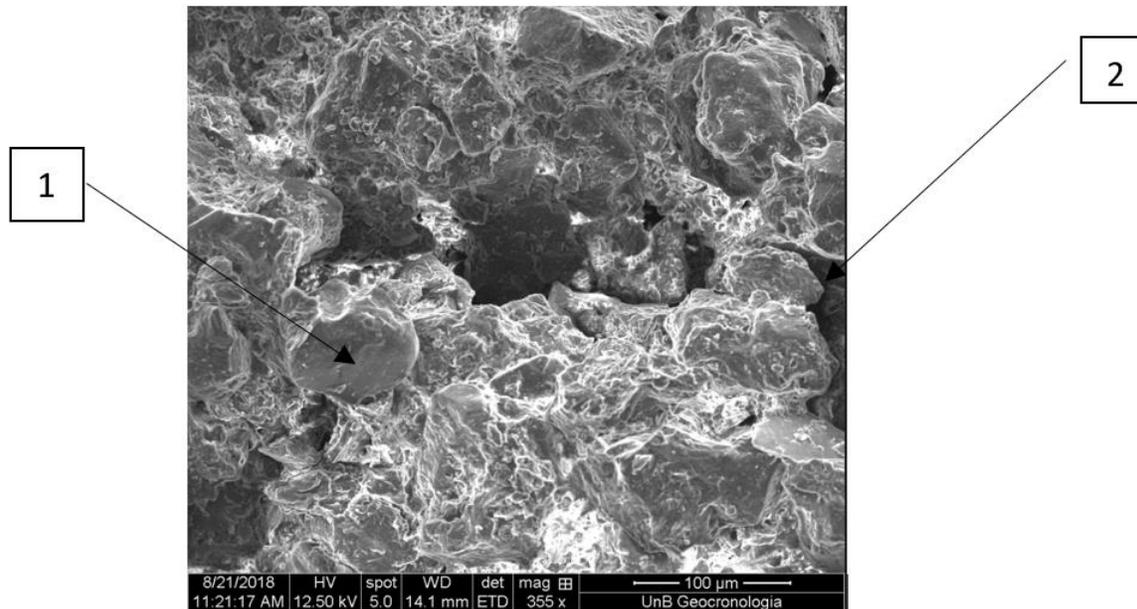
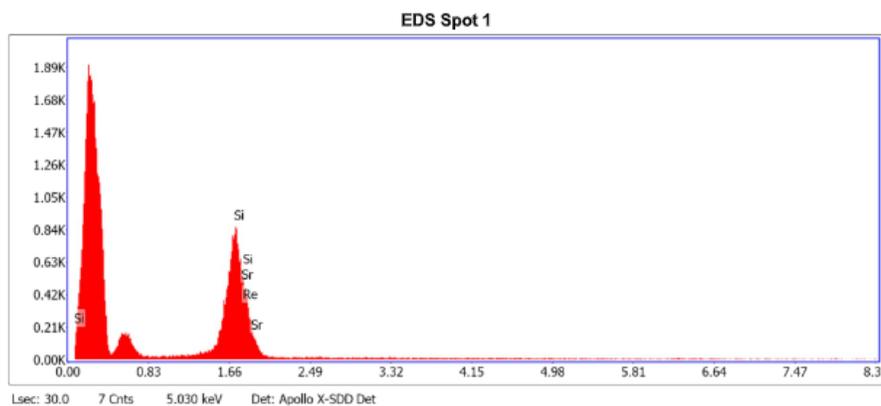


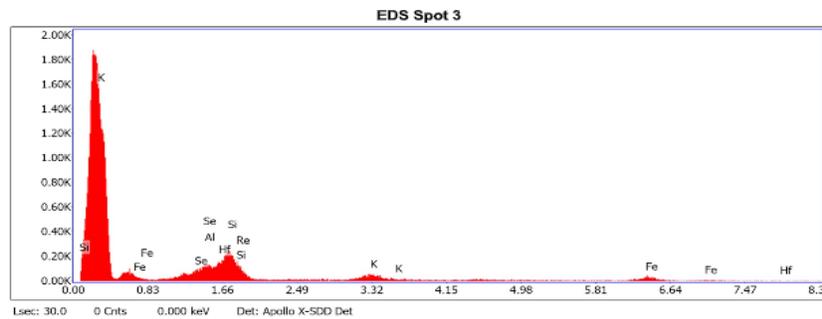
Figura 5.10 – Microscopia eletrônica de varredura do solo puro.



**eZAF Smart Quant Results**

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
SiK	54.21	80.50	333.86	3.19	0.5451	1.0303	0.8369	0.9721	1.0040
SrL	36.70	17.47	99.07	3.55	0.2859	0.7654	0.9760	1.0158	1.0017
ReM	9.08	2.03	17.71	13.07	0.0628	0.6428	1.1260	1.0122	1.0619

Figura 5.11 – EDS Ponto 01 do solo puro.



**eZAF Smart Quant Results**

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
SeL	6.26	4.32	19.88	12.65	0.0471	0.8155	0.9022	0.9202	1.0035
AlK	7.08	14.33	39.31	8.60	0.0609	1.0678	0.7840	0.8028	1.0022
HfM	18.65	5.70	49.69	7.70	0.1416	0.6874	1.0596	1.0483	1.0539
SiK	12.19	23.69	62.83	7.73	0.1059	1.0934	0.7936	0.7942	1.0009
ReM	10.98	3.22	20.93	11.76	0.0766	0.6823	1.0681	0.9856	1.0368
K K	11.75	16.40	32.07	9.38	0.1131	1.0296	0.8419	0.9309	1.0044
FeK	33.09	32.34	22.15	14.59	0.3292	0.9839	0.9242	0.9916	1.0199

Figura 5.12 – EDS Ponto 02 do solo puro.

As Figuras 5.13 a 5.15 mostram microfotografias do MEV obtidas para as misturas estudadas. Observa-se uma tendência similar em todas as misturas. Existe uma interação entre os grãos devido essencialmente ao tamanho das partículas, de forma que tamanhos menores tendem a preencher os vazios existentes. Neste sentido os tamanhos maiores são apresentados por grãos com tamanho igual ou superior a 50  $\mu\text{m}$  e correspondem a morfologias de grãos arredondados e placoides enquanto os componentes com tamanho inferior a 50  $\mu\text{m}$  se apresentam como agregados irregulares, capazes de preencher espaços intergranulares.

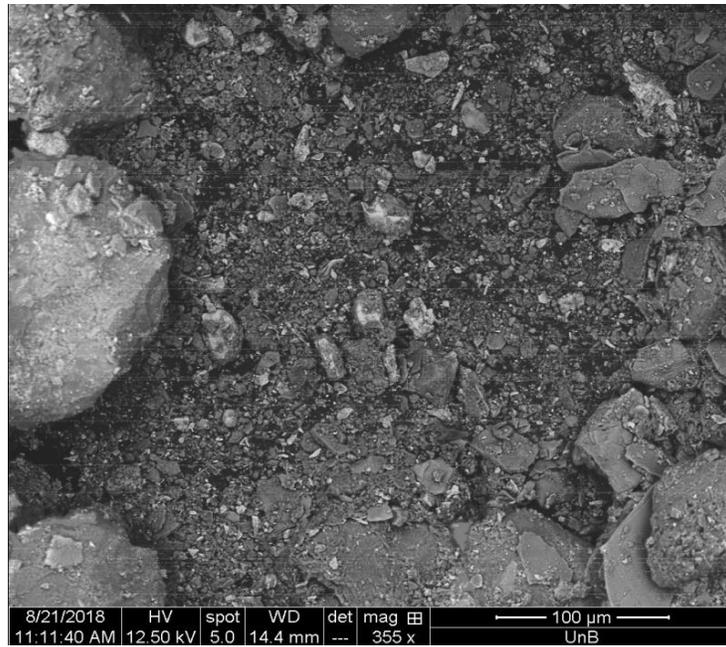


Figura 5.13 – Microscopia eletrônica de varredura da mistura 10% rejeito e 90% solo.

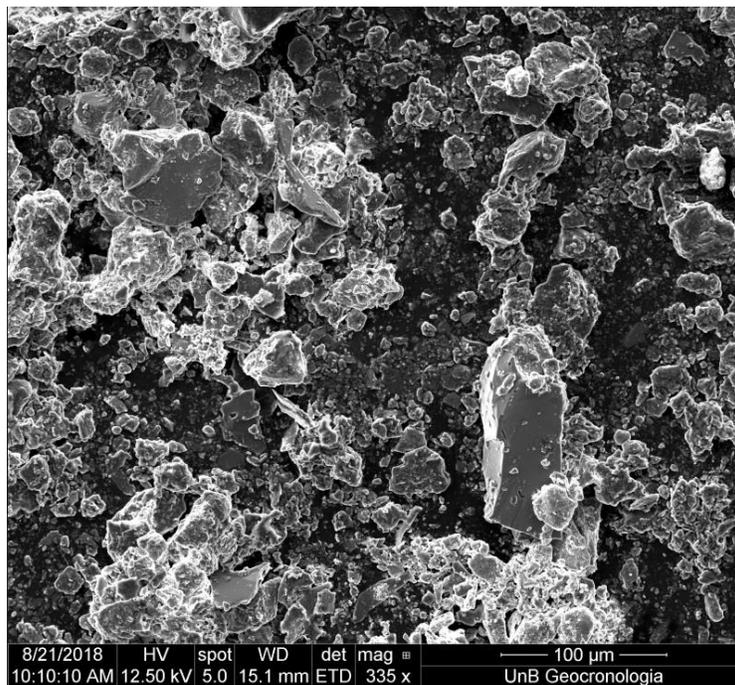


Figura 5.14 – Microscopia eletrônica de varredura da mistura 20% rejeito e 80% solo.

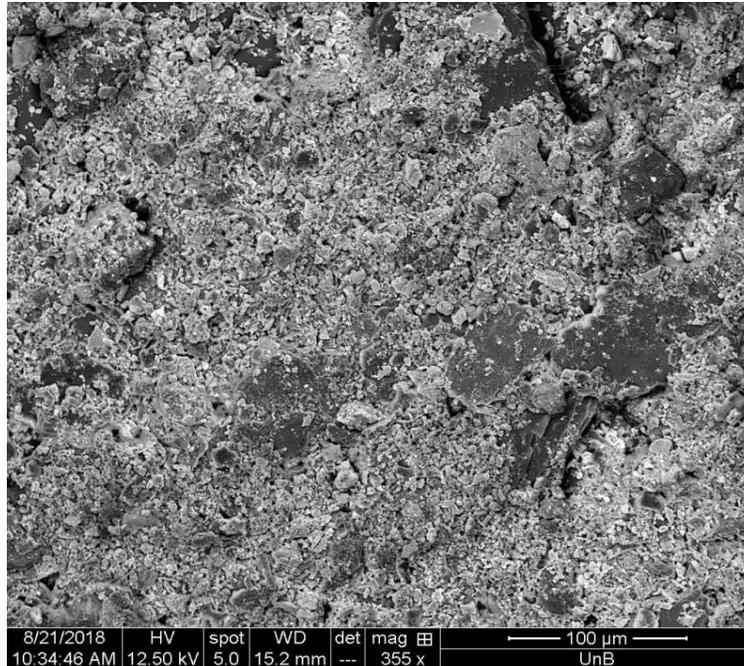


Figura 5.15 – Microscopia eletrônica de varredura da mistura 30% rejeito e 70% solo.

Após o MEV dos materiais soltos, foi realizado o MEV para as misturas com os materiais compactados na umidade ótima e na energia intermediária. Na Figura 5.16 são apresentadas as imagens do MEV para a mistura de 10% de rejeito e 90% de solo. Na Figura 5.17 são apresentadas as imagens do MEV para a mistura de 20% de rejeito e 80% de solo. Na Figura 5.18 são apresentadas as imagens do MEV para a mistura de 30% de rejeito e 70% de solo. Optou-se por utilizar os aumentos de 100, 200, 500, 1000, 3000 e 5000 vezes, cuja resolução de imagens permite analisar aspectos microestruturais que possam influenciar o comportamento geotécnico das misturas.

Observou-se de maneira geral misturas heterogêneas de diferentes tamanhos de partículas e formas que constituem uma estrutura definida, mineralogicamente representada por granulometrias maiores de natureza predominantemente quartzosa e por materiais mais finos argilosos e siltosos.

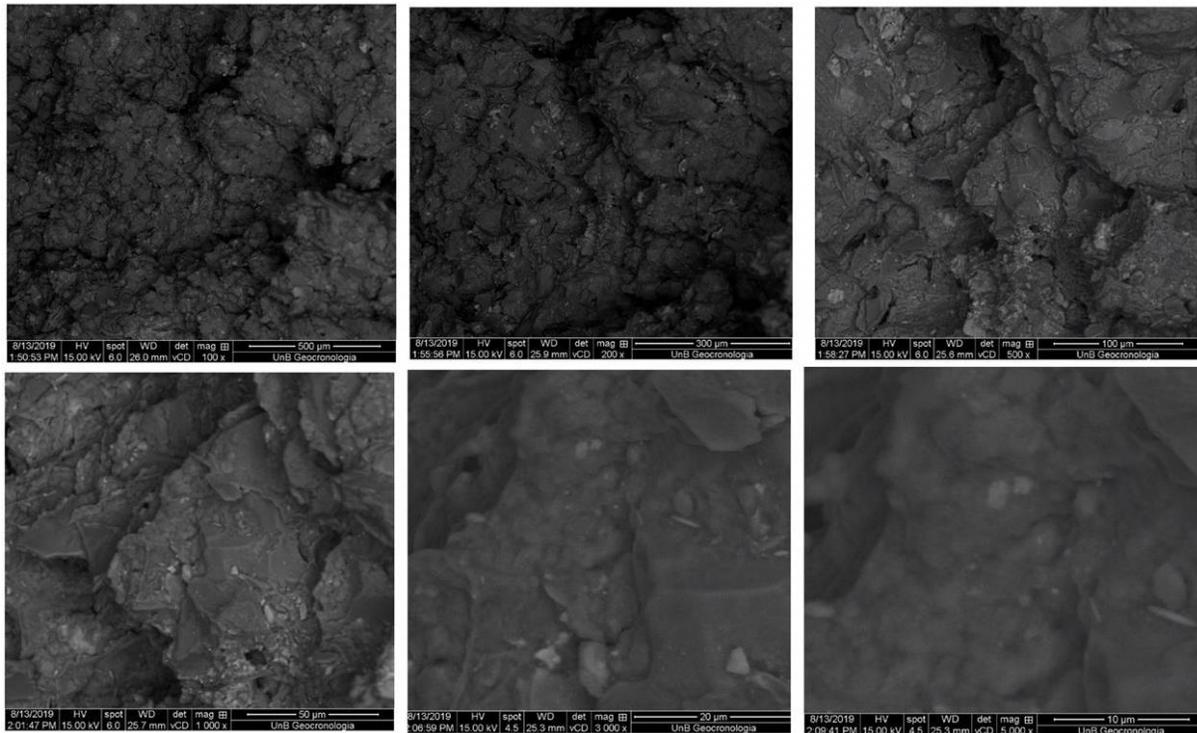


Figura 5.16 - Microscopia eletrônica de varredura da mistura 10% rejeito e 90% solo, para o material compactado com diferentes níveis de aproximação (100x, 200x, 500x, 1000x, 3000, e 5000x).

A mistura de 10% rejeito e 90% de solo (Figura 5.16) caracteriza-se morfologicamente por apresentar uma matriz bem estruturada, na qual os grãos de tamanho maior que são predominantemente quartzosos estão rodeados por partículas mais finas conferindo uma boa compactação estrutural, com provável influência positiva na resistência da mistura. Esta situação é ainda observada na mistura de 20% de rejeito e 80% de solo (Figura 5.17), na qual destacam-se as estruturas lamelares com partículas argilosas aderidas na superfície. Neste sentido cabe ressaltar a existência de pequenas discontinuidades, observadas com maior nitidez na Figura 5.18 com 5000x, que indica uma distribuição granulométrica não uniforme, provavelmente influenciada pelos óxidos de ferro que não apresentam um comportamento marcadamente aglomerante quanto o material argiloso.

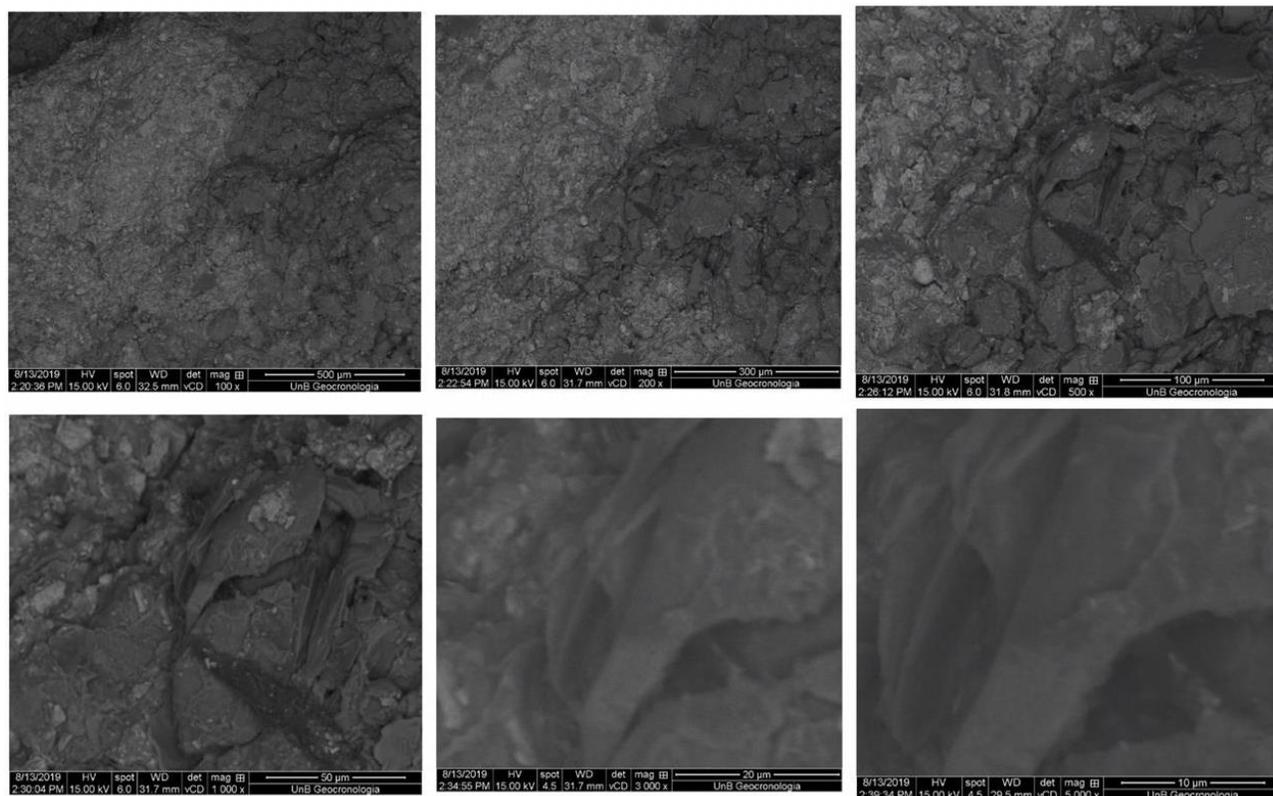


Figura 5.17 - Microscopia eletrônica de varredura da mistura 20% rejeito e 80% solo, para o material compactado com diferentes níveis de aproximação (100x, 200x, 500x, 1000x, 3000, e 5000x).

Nas imagens MEV da mistura de 30% de rejeito e 70% de solo (Figura 5.18) é revelada a presença de depressões irregulares e cavidades indicando provavelmente um pior desempenho no comportamento mecânico. Observa-se de forma mais detalhada na imagem de 5000x (seta vermelha) uma partícula siltosa de natureza quartzosa, de aproximadamente 0,02 mm de largura, cuja superfície apresenta algumas partículas argilosas aderidas, constituindo um agregado heterogêneo irregular, conferindo ao conjunto da amostra uma menor compactação estrutural.

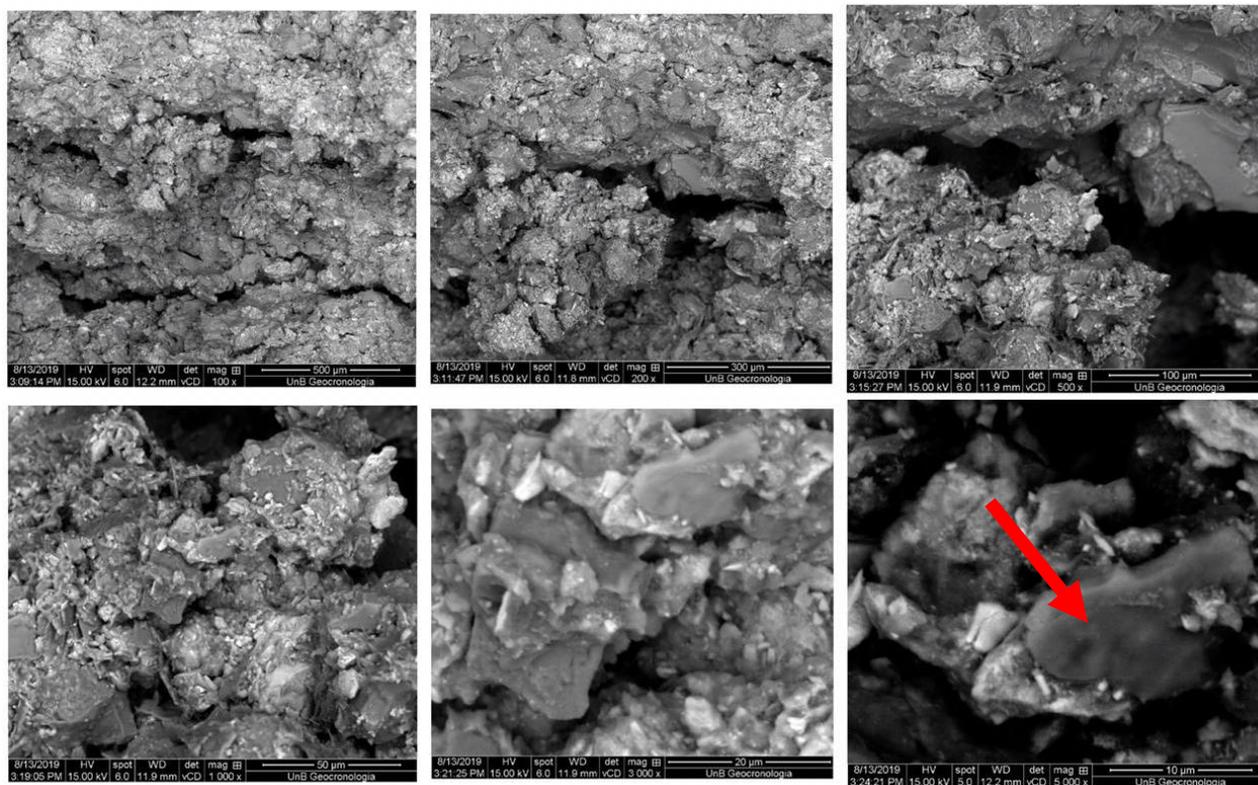


Figura 5.18 - Microscopia eletrônica de varredura da mistura 30% rejeito e 70% solo, para o material compactado com diferentes níveis de aproximação (100x, 200x, 500x, 1000x, 3000, e 5000x).

### 5.3. CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL

No subitem abaixo serão apresentados os resultados e as análises dos ensaios da solubilização. Ressalta-se ainda que o ensaio de lixiviação não foi realizado nesta pesquisa, pois o mesmo é realizado pela mineradora na Mina do Bonito anualmente para renovar a licença ambiental. E os resultados de lixiviação encontram-se dentro dos valores exigidos pelas normas brasileiras.

#### 5.3.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SOLUBILIZAÇÃO

O ensaio de solubilização apresenta os elementos que foram solubilizados prontamente por mecanismos de dissolução, conforme são apresentados na Tabela 5.5. Os valores obtidos foram comparados com os limites estipulados pela NBR 10004 (ABNT, 2004a).

De modo geral, o ensaio de solubilização indicou que todos os elementos que foram analisados são inertes. Entretanto, o selênio se mostrou solúvel em água com valores bastante inferiores aos estabelecidos pela norma.

Não houve nenhum elemento químico que ultrapassou os limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004a). Então, de acordo com essa norma, o rejeito da mineração de ferro foi classificado como um material não perigoso de classe IIB. Esta condição justifica que o rejeito de minério de ferro não apresenta riscos de contaminação quando incorporado ao solo estudado para camadas de pavimentos rodoviários, a curto prazo. Entretanto, obras rodoviárias são projetadas para durar por décadas. Portanto, se faz necessário realizar os ensaios de lixiviação e solubilização a longo prazo para alcançar resultados mais compatíveis com a aplicação da proposta.

Segundo Santos (2018), é importante ressaltar que o procedimento de solubilização NBR 10006 (ABNT, 2004d) avalia em prazo de 7 dias qual seria a liberação de metais pelo rejeito. Conseqüentemente, as limitações do ensaio de curto prazo geralmente fazem com que esse não seja aplicável para avaliar as taxas em que uma reação ocorre a longo prazo e prever qual será a influência pelo contato com o rejeito na qualidade da água durante o período de serviço do pavimento. Entretanto, os resultados desse ensaio proporcionam uma avaliação inicial do que pode se esperar em termos de solubilização de metais em um primeiro momento em uma determinada amostra. Para resultados mais representativos a longo prazo é necessário fazer os ensaios de lixiviação.

Tabela 5.5 – Ensaio de solubilização.

Elementos	Rejeito de Ferro (mg/L)	Desvio Padrão	Limites máximos (mg/L)
			NBR
			10.004 (ABNT, 2004a)
Al	0	0	0,2
As	0	0	0,01
Ba	0	0	0,7
Cd	0	0	0,0055
Cr	0	0	0,05
Cu	0	0	2
Pb	0	0	0,01
Fe	0	0	0,3
Mn	0	0	0,1
Na	0	0	200
Se	0,001	0,0002	0,01
Zn	0	0	5

## 5.4. PROPRIEDADES FÍSICAS

Adiante são apresentados os resultados e as análises dos ensaios referentes as propriedades físicas que compreendem os ensaios de massa específica dos sólidos, granulometria (peneiramento e sedimentação com e sem defloculante), limite de liquidez, limite de plasticidade, permeabilidade à carga constante e comportamento magnético.

### 5.4.1 MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

A massa específica dos sólidos é uma característica física em função dos seus constituintes mineralógicos. Segundo Campanha (2011) a massa específica dos sólidos é função dos minerais constituintes do solo e do percentual em que se apresentam. Simboliza o valor médio das massas específicas da fase sólida dos minerais, compostos orgânicos, sais precipitados e materiais não cristalinos. Na Tabela 5.6 é apresentado os valores das massas específicas dos sólidos dos materiais estudados.

Tabela 5.6 – Resumo das massas específicas dos sólidos.

Materiais Ensaçados	Amostra 01 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Amostra 02 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Amostra 03 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Média Aritmética ( $\rho_s$ )	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Solo puro	2,63	2,67	2,64	2,65	0,02	0,79%
10% rejeito 90% solo	2,78	2,83	2,75	2,79	0,04	1,45%
20% rejeito 80% solo	2,90	2,90	2,95	2,92	0,03	0,99%
30% rejeito 70% solo	3,06	3,02	3,08	3,05	0,03	1,00%
Rejeito puro	4,01	4,02	4,01	4,01	0,01	0,14%

Em relação ao rejeito de minério de ferro puro, os altos valores encontrados para a massa específica dos sólidos acontecem devido à grande quantidade de óxidos de ferro presentes no próprio

rejeito, conforme foram evidenciados na caracterização química. Portanto, à medida que o rejeito de minério de ferro ia sendo acrescentado à mistura a massa específica dos sólidos do material ia aumentando gradativamente, pois o rejeito do minério de ferro que possui uma maior densidade passou a ocupar o lugar do solo granular que possui uma menor densidade. O solo estudado possui fração granular que é identificada segundo a NBR 7217 (ABNT, 1987) como pedregulho médio e pedregulho fino, os valores em porcentagens foram apresentados no item a seguir que trata da granulometria.

Com relação ao valor encontrado para massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ) do solo estudado, a ordem de grandeza média para composições de grãos de quartzo (areia) é da ordem de  $2,65 \text{ g/cm}^3$ , o que reflete exatamente o valor encontrado para o solo tropical analisado, pois de acordo com os resultados da caracterização química apresentados o material possui mais de 50% de quartzo, sendo o mineral predominante encontrado.

Já para a massa específica dos sólidos do rejeito de minério de ferro, Espósito (2000) encontrou valores de  $2,94 \text{ g/cm}^3$ , Fell (2015) valores de  $3,7 \text{ g/cm}^3$ , Sreekutty & Jacob (2016) encontraram valores de  $3,1 \text{ g/cm}^3$ , Du *et al.* (2018) encontraram valores de  $3,18 \text{ g/cm}^3$  e Santos (2018) encontrou valores de  $3,49 \text{ g/cm}^3$ . Todos os autores referenciados anteriormente concluíram que os altos valores encontrados para a massa específica dos sólidos do rejeito de minério de ferro estão relacionados com os altos teores de minérios encontrados no próprio rejeito, isto é, a fração remanescente de óxidos de ferro que podem ser encontradas em diferentes tipos de minério de ferro e que não foram extraídos durante o processo de beneficiamento, além de outros minerais mais densos. As porcentagens da quantidade de minério de ferro segunda a caracterização química, apresentadas por alguns dos autores citados, presente nos rejeitos são apresentadas na Tabela 5.7. A significativa presença de óxido de ferro encontrada no rejeito de minério de ferro tem um papel fundamental no estudo dessa tese, na qual o material possui propriedades cimentantes que contribui de forma relevante com o aumento dos parâmetros de resistência estudados.

Tabela 5.7 – Quantidade de rejeito de minério de ferro encontradas nos rejeitos segundo os autores citados e a comparação com o rejeito de minério de ferro desta pesquisa.

Autores	Minério de ferro encontrado no rejeito (%)	Massa Específica dos sólidos (g/cm <sup>3</sup> )
Espósito (2000) – Brasil - Minas Gerais – Mina Alegria	54,0	2,94
Sreekutty & Jacob (2016) – China – Sun Xiaowei	11,6– Possui outros minérios com quantidades relevantes que também contribuem com o aumento da massa específica dos sólidos.	3,1
Santos (2018) – Brasil – Minas Gerais – Complexo Água Limpa	56,23	3,49
Dados desta pesquisa	69,11	4,01

#### 5.4.2. GRANULOMETRIA

Nas Figuras 5.19, 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23, são apresentadas as curvas granulométricas médias encontradas nesta pesquisa com adição de defloculante e sem adição de defloculante, para o rejeito puro, para o solo puro, para as misturas de 30% de rejeito e 70% de solo, 20% de rejeito e 80% de solo e 10% de rejeito e 90%, respectivamente.

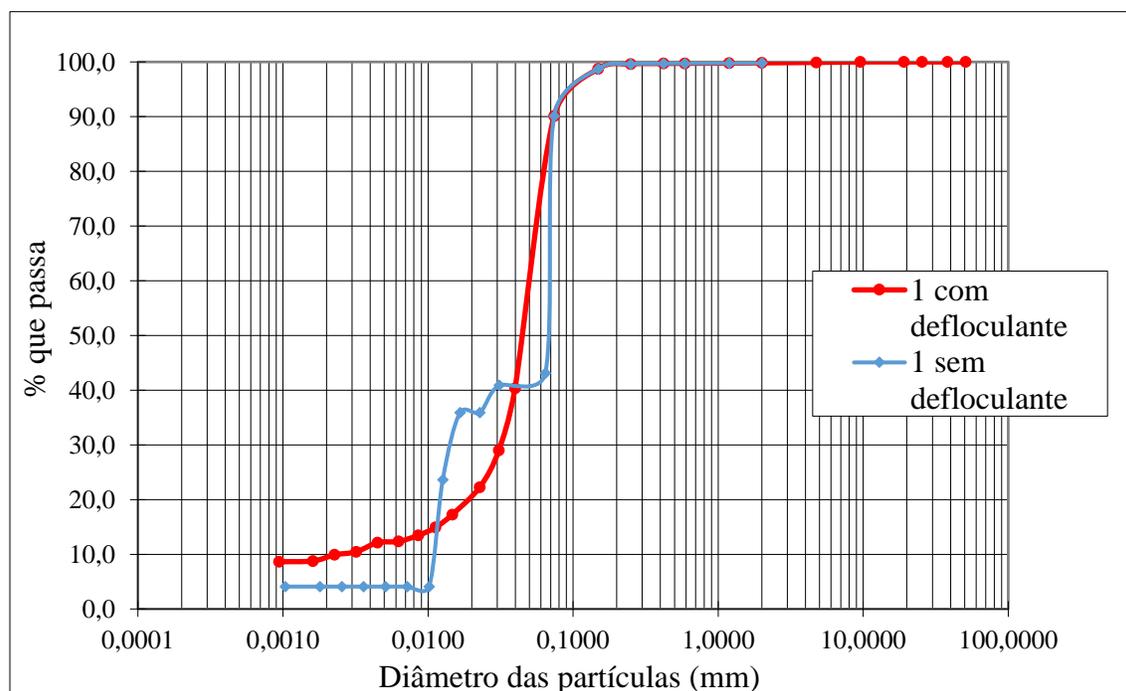


Figura 5.19 – Curva granulométrica para o rejeito puro.

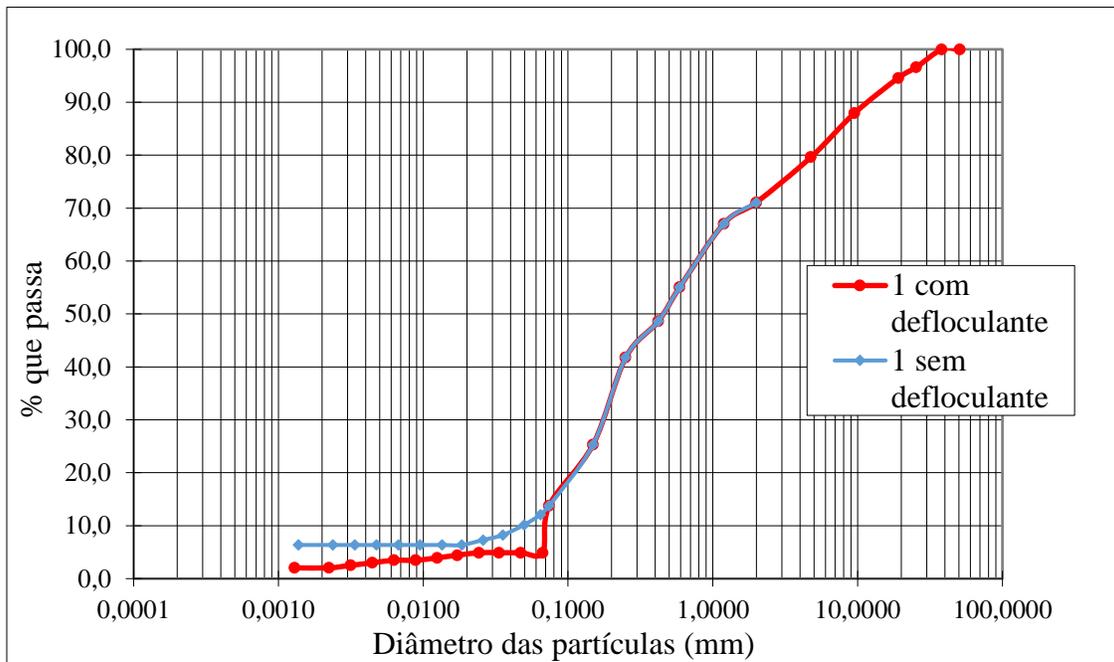


Figura 5.20 – Curva granulométrica para o solo tropical puro.

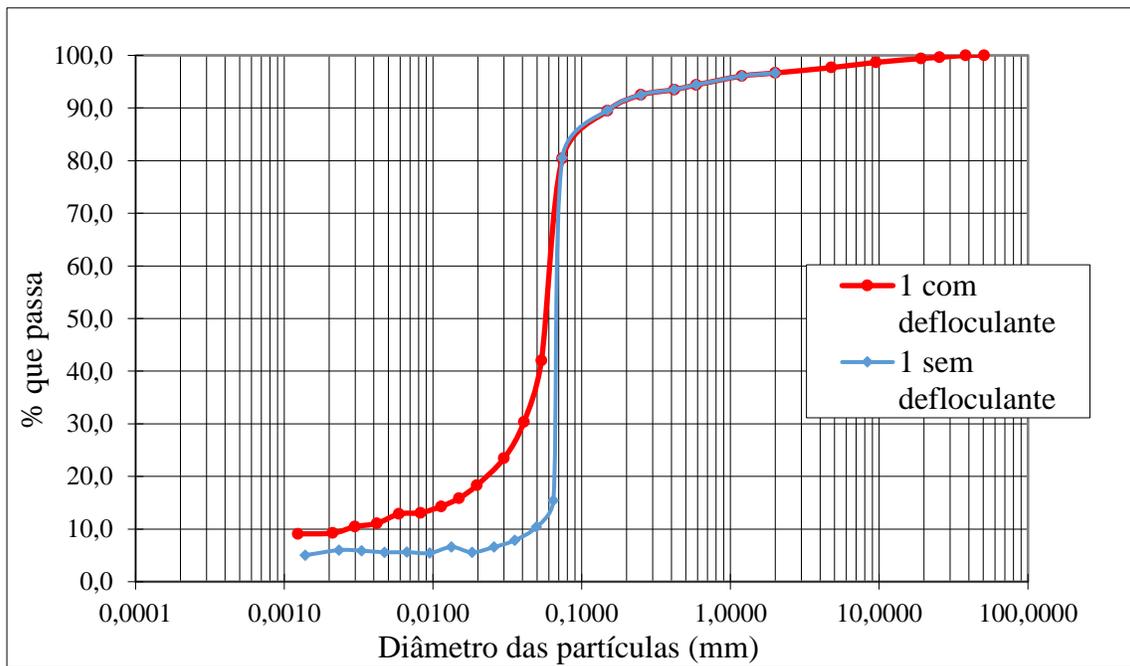


Figura 5.21 – Curva granulométrica para a mistura com 30% de rejeito e 70% de solo.

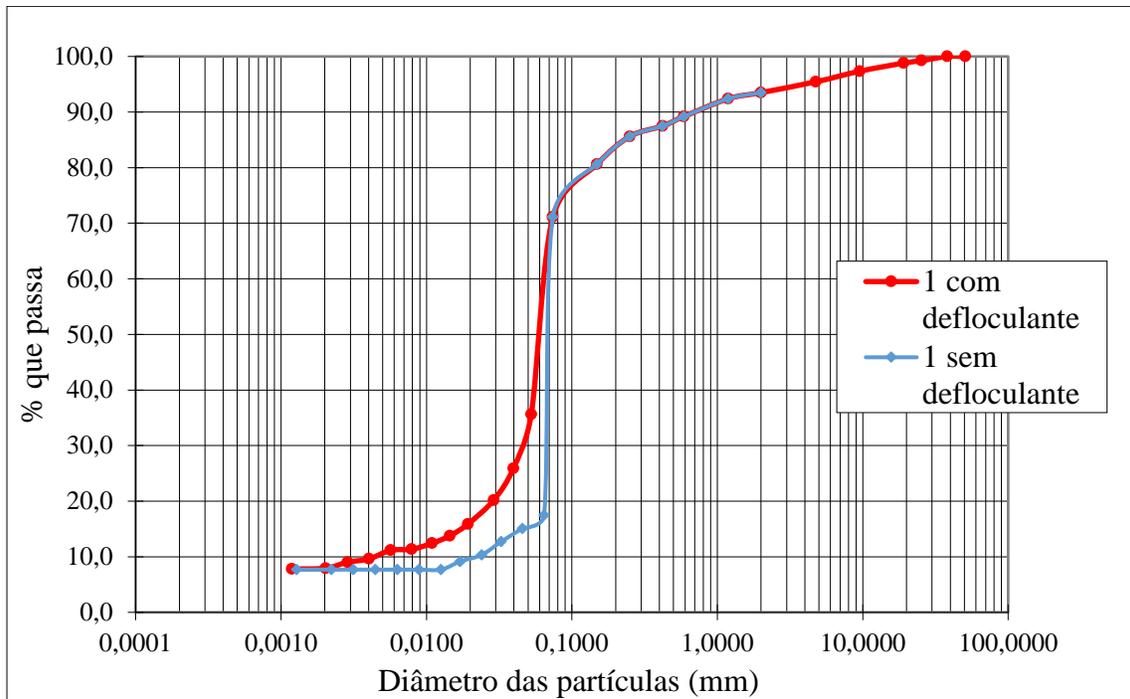


Figura 5.22 – Curva granulométrica para a mistura com 20% de rejeito e 80% de solo.

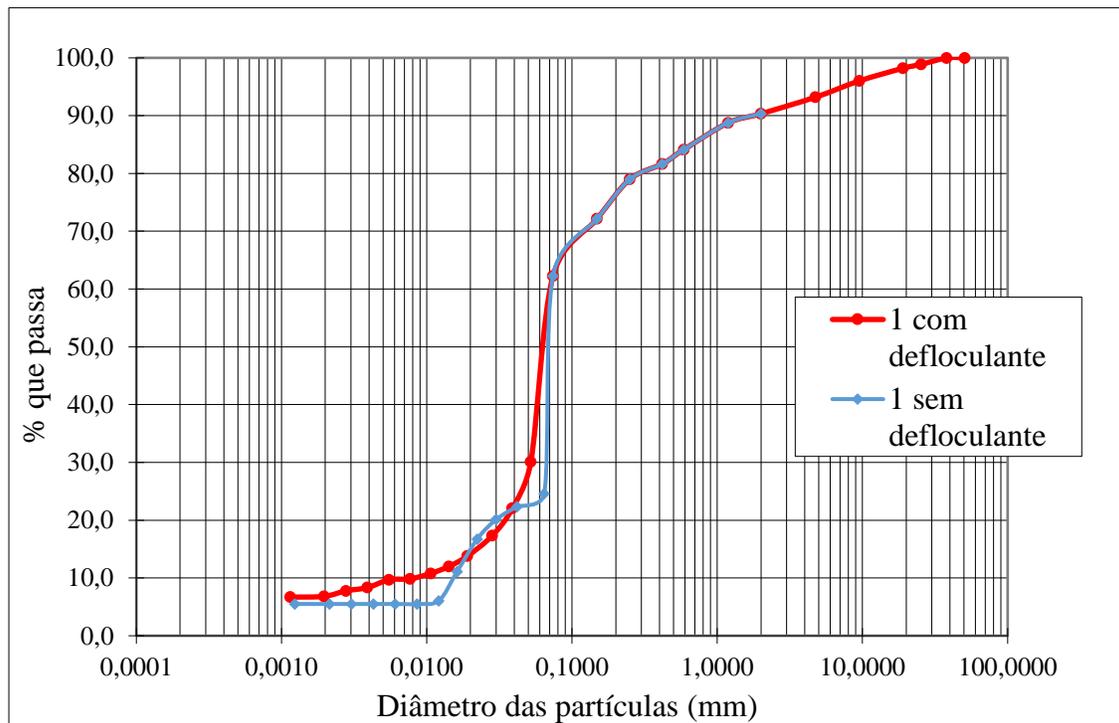


Figura 5.23 – Curva granulométrica para a mistura com 10% de rejeito e 90% de solo.

Villibor *et al.* (2009) considera que as misturas de solos finos e grossos lateríticos para uma camada de base de uma rodovia de baixo custo podem ter uma granulometria contínua ou descontínua. No primeiro caso, a estrutura tem por objetivo garantir a estabilização da base compactada, com a formação de uma estrutura granular, que transmite as pressões provenientes das cargas que são exercidas sobre ela em direção a camada inferior. No segundo caso, a qualidade dos finos lateríticos exerce um papel importante na estabilização pela interação de seus grãos de areia com os de argila laterítica de coesão elevada, na medida onde os grãos mais grossos, não têm, geralmente, contato entre eles, e são distribuídos na massa do Solo Laterítico. Isto cria uma estrutura diferente de bases estabilizadas granulometricamente.

A análise dos resultados obtidos mostra que o rejeito de minério de ferro puro é composto essencialmente em termos de tamanho pela fração silte com uma pequena fração de argila. Apresentando assim um grande teor de finos, teor esse que influencia diretamente no comportamento das misturas, preenchendo os vazios e conseqüentemente diminuindo a permeabilidade, como será comprovado no item 5.4.4 relativos aos ensaios de permeabilidade. De acordo com a morfologia que foi apresentada no item 5.2.3, o rejeito possui grãos irregulares menores do que 50  $\mu\text{m}$ , e, portanto, devido ao diâmetro há uma facilidade no preenchimento dos vazios decorrentes do solo granular das misturas estudadas. Segundo os resultados obtidos, o rejeito de minério de ferro foi classificado como um silte conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS/USCS). De acordo com o sistema de classificação rodoviário *Transportation Research Board* (TRB), o rejeito é classificado, segundo os ensaios de granulometria e limite de Atterberg, como A-5 (solo siltoso), não plástico, de uso não recomendado para subleitos. Entretanto, apesar de ser classificado como um material siltoso, não se comporta como material siltoso, pois o material foi classificado segundo as normas utilizadas para ensaios de solos. Portanto, a mineralogia é um fator bastante importante e deve ser considerada. E segundo os ensaios de difração de raios-x a grande quantidade de óxidos de ferro encontrada garante um comportamento não plástico aos materiais estudados.

Para o solo nota-se que menos de 20% do material passa na peneira #200 (0,075mm) e segundo a classificação SUCS/USCS o material é classificado como uma areia argilosa. E de acordo com a classificação rodoviária (TRB) o solo é classificado como A-1-b com presença de fragmentos de pedra, pedregulho e areia. Sendo um material de excelente a bom para subleitos.

Para as misturas nota-se que à medida que o solo granular é estabilizado com o rejeito de minério de ferro nas três diferentes proporções. As curvas granulométricas têm um aumento significativo na quantidade de finos. Entretanto, a presença do rejeito de minério de ferro nas misturas

aumenta o comportamento não plástico das mesmas. A maior quantidade de óxidos de ferro incorporado ao realizar as misturas geraram uma a mesma classificação SUCS/USCS e TRB que o rejeito de minério de ferro puro. De forma semelhante ao que ocorreu com o rejeito não foi possível realizar o ensaio de limite de plasticidade e, portanto, não foi possível obter o índice de plasticidade. A Tabela 5.8 apresenta um resumo de todas as informações pertinentes as curvas granulométricas e classificação dos materiais estudados de acordo com o sistema SUCS/USCS e TRB.

De acordo com as misturas estudadas, levando em consideração as curvas granulométricas sem a adição de defloculante é possível notar que não houve uma alteração significativa em relação ao diâmetro das partículas. Para o rejeito de minério de ferro puro, houve uma alteração considerável em comparação com a curva granulométrica que foi adicionado o defloculante. Isso indica que as partículas da fração intermediária da sedimentação com adição de defloculante sofreram um processo de desagregação, isso significa que essas partículas possuem uma constituição química-mineralógica diferenciada das demais e influenciam o comportamento do rejeito durante a fase de sedimentação (Santos, 2018). Essa constituição química-mineralógica foi melhor explicada no item 5.2.3 por meio do ensaio de MEV-EDS, aonde foi identificado elementos químicos complexos compostos principalmente por gnaisses e micaxistos, provenientes da caracterização geológica da região e dos processos de extração e beneficiamento utilizados no minério. Para o solo tropical puro estudado, a pequena diferença entre as curvas granulométricas com e sem defloculante não permite verificar o grau de agregação do solo, o que daria a ideia do nível de intemperismo sofrido pelo mesmo. Entretanto, por meio da caracterização mineralógica feita é possível identificar o grau de intemperismo elevado, devido à forma geométrica dos grãos que representa um grande desgaste provocado pelo tempo, conforme foi evidenciado no item 5.2.3.

Tabela 5.8 – Resumo das curvas granulométricas.

	Classificação SUCS/USCS	Classificação TRB	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	CNU	CC
Rejeito Puro	M – Silte (Comportamento não plástico) – Não se aplica	A5 – Solo siltoso	0,012	0,015	0,07	5,8	0,26
30% Rejeito 70% Solo	M – Silte (Comportamento não plástico) – Não se aplica	A5 – Solo siltoso	0,05	0,068	0,07	1,4	1,32
20% Rejeito 80% Solo	M – Silte (Comportamento não plástico) – Não se aplica	A5 – Solo siltoso	0,02	0,07	0,07	2	3,5
10% Rejeito 90% Solo	M – Silte (Comportamento não plástico) – Não se aplica	A5 – Solo siltoso	0,017	0,07	0,07	4,11	4,11
Solo Puro	SC – Areia Argilosa	A-1-b – Solo Granular	0,05	0,18	0,8	16	0,81

De acordo com os valores de CNU e o CC, o rejeito de minério de ferro é considerado um material mal graduado que apresenta uma curva descontínua com a maior fração de grãos na parte intermediária da curva que a classifica como um material uniforme.

Para a mistura de 30% de rejeito e 70% de solo segundo o CNU e o CC, o material é considerado mal graduado, entretanto não apresenta uma acentuada descontinuidade. Para a mistura de 20% de rejeito e 80% de solo segundo o CNU e o CC, o material é considerado mal graduado e muito uniforme na parte intermediária da curva. Para a mistura de 10% de rejeito e 90% de solo segundo o CNU e o CC, o material é considerado mal graduado e também muito uniforme na parte intermediária da curva. Para o solo tropical puro segundo o CNU e o CC, o material é considerado bem graduado. Entretanto, apresenta uma leve descontinuidade no ramo intermediário da curva.

No que concerne à composição granulométrica, o DNIT menciona, por meio da norma ES 141 (DNIT, 2010), seis faixas de enquadramento para os solos destinados à estabilização de camadas de bases de pavimentos. Essas faixas possuem sua denominação variando de “A” a “F”, onde as faixas “A”, “B”, “C” e “D” são indicadas para um tráfego atuante com um número de repetições do eixo padrão (N) maior que  $5 \times 10^6$  e as faixas “E” e “F” recomendadas apenas para um N menor que  $5 \times 10^6$ .

De acordo com as curvas apresentadas, o rejeito de minério de ferro puro não atende a nenhuma faixa estabelecida pela Norma ES 141 (DNIT, 2010). As misturas estudadas se encontram

parcialmente apenas dentro da faixa “F”. E o solo tropical, classificado como um solo bem graduado, se encontra totalmente dentro da faixa “F”, conforme é apresentado na Figura 5.24. A faixa “F” representa as areias bem graduadas.

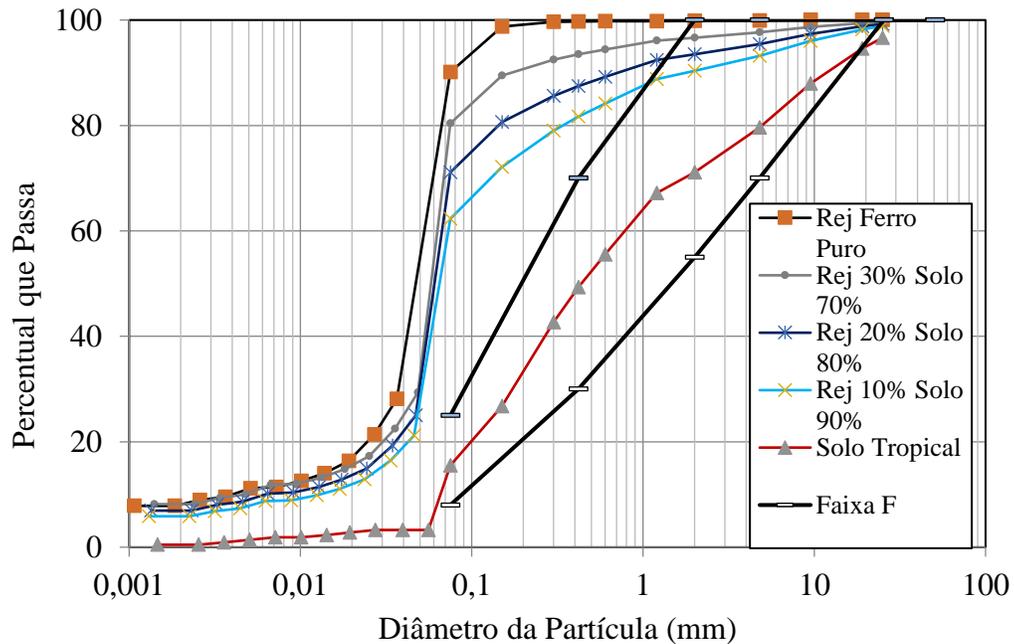


Figura 5.24 – Curvas granulométricas estudadas e Faixa “F” ES 141 (DNIT, 2010).

### 5.4.3. LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE

Queiroz de Carvalho (1987) relata que vários fatores podem influenciar nos valores finais do limite de liquidez e do limite de plasticidade, normalmente tendo como principais fatores a natureza mineralógica e o teor da fração fina. A literatura demonstra que, independente da origem do solo (de região tropical ou temperada), os limites de plasticidade e liquidez aumentam à medida que aumentam os teores de argila no solo. Uma vez que a variação da massa específica dos sólidos está intimamente relacionada aos minerais constituintes e ao nível de intemperização sofrido pelo solo, é de se esperar que este varie com o teor de argila existente no material, o que de forma geral é verificado nos materiais estudados.

Os limites de Atterberg refletem a influência dos argilominerais, composição química, agregação e textura nas propriedades do solo, considerando distintamente a influência do tipo e da quantidade dos argilominerais, elementos e compostos químicos presentes. De forma a considerar

tais influências (exceto a agregação), Vargas (1982), definiu a atividade coloidal das argilas baseando-se nos resultados dos ensaios de índice de plasticidade e no teor de argila presente nos solos.

De acordo com o citado autor, a classificação apresenta três níveis: inativa ( $I_a < 0,75$ ), normal ( $1,25 < I_a < 0,75$ ) e ativa ( $I_a > 1,25$ ). Este índice de atividade ( $I_a$ ) indica o grau de influência das propriedades mineralógicas e químico-coloidais da fração argila nas propriedades geotécnicas de um solo argiloso, sendo expresso pela relação do índice de plasticidade (IP) pela percentagem de argila presente no solo.

Segundo Delgado (2007), esta proposta, dado os solos estudados pelo autor, não contempla a influência marcante dos óxi-hidróxidos de ferro e do nível de agregação que marcam os solos tropicais, sobretudo os mais intemperizados. Ao mesmo tempo, é possível supor que a agregação presente nos solos tropicais intemperizados afeta a plasticidade no que se refere à textura e interação entre as partículas. No entanto, o mais relevante parece ser o fato de os poros presentes no interior dos agregados armazenarem água livre, fato este que apesar de acrescer os limites de plasticidade e liquidez, pouco afeta o índice de plasticidade. Tal característica contribuiria para a localização dos pontos abaixo da linha “A” na carta de plasticidade de Casagrande.

A redução do limite de plasticidade com o aumento da massa específica dos sólidos deixa claro que os dois fatores, poros internos (ver imagens do MEV no item 5.2.3) e presença de rejeito de minério de ferro, interferem na plasticidade. Cabendo lembrar que os óxi-hidróxidos de alumínio, com papel relevante na agregação, é traço comum aos solos profundamente intemperizados e também está presente no rejeito de minério de ferro.

De acordo com os ensaios realizados, o rejeito de minério de ferro se comportou como um material não plástico, evidenciando que o material não se comporta como um silte como foi classificado segundo o SUCS e a TRB. Mais uma vez é evidenciado que a mineralogia é um fator representativo na classificação do rejeito e neste caso específico não só os métodos de classificação baseados em granulometria e limites de consistência utilizados para solos devem ser considerados.

Já o solo tropical apresentou um limite de liquidez na ordem de 24% e um limite de plasticidade de 17%, alcançando assim um índice de plasticidade no valor de 7%, classificando o solo como um material pouco plástico.

Para as misturas em volume de 10%, 20% e 30% de rejeito de minério de ferro o ensaio de limite de liquidez foi realizado, alcançando valores da ordem de 21%, 23%, 22% respectivamente. Entretanto, o ensaio de limite de plasticidade foi realizado, não foi possível obter o cilindro conforme

a NBR 6459 (ABNT, 2016). Esse comportamento evidencia que à medida que o rejeito de minério de ferro foi adicionado ao solo tropical, a mistura perdeu a sua plasticidade. É apresentado na Tabela 5.9 um resumo dos valores de Limites de *Atterberg* obtidos para as amostras analisadas.

Tabela 5.9 – Resumo dos limites de Atterberg.

	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)	Índice de Atividade (Ia)
Rejeito Puro	-	-	Não plástico	Não se aplica
30% Rejeito 70% Solo	21	-	Não plástico	Não se aplica
20% Rejeito 80% Solo	23	-	Não plástico	Não se aplica
10% Rejeito 90% Solo	22	-	Não plástico	Não se aplica
Solo Tropical Puro	24	17	7	2,65

O rejeito de minério de ferro puro apesar de possuir uma granulometria semelhante aos siltes não se comporta como tal, a principal diferença neste comportamento é a falta de coesão, característica esta uma das mais importantes dos materiais siltosos e argilosos.

Ainda que os óxidos de ferro presentes no rejeito possuam carga positiva de superfície enquanto a caulinita presente no solo possui carga negativa nas faces, o que pode contribuir para gerar uma plasticidade. Entretanto, não aconteceu a plasticidade por uma questão estrutural (Cardoso, 2002), como será evidenciado nos ensaios de MEV-EDS.

#### 5.4.4. PERMEABILIDADE à CARGA CONSTANTE

Na Tabela 5.10 estão apresentados os valores dos coeficientes de permeabilidade obtidos para corpos de prova saturados na energia normal de compactação, determinados em laboratório por meio de ensaios de carga constante para o solo tropical puro, o rejeito puro e as três diferentes misturas conforme a NBR 13292 (ABNT, 1995). Além disso, são apresentados os valores de porosidade e índices de vazios, além da massa específica dos sólidos e da massa específica aparente seca máxima.

Considerando os resultados obtidos, fica evidenciado uma variação da permeabilidade em função dos diferentes valores de índices de vazios. A classificação proposta por Pinto (2006), o solo tropical classifica-se como uma areia com alta permeabilidade. Já as misturas classificam-se como solos permeáveis de baixa permeabilidade. E o rejeito de minério de ferro puro fica no limite entre

um solo com baixa permeabilidade e próximo a solos impermeáveis.

Tabela 5.10 – Resumo dos coeficientes de permeabilidade e demais parâmetros relevantes.

Amostra	Massa Específica dos Sólidos (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica Aparente Seca Máx. (g/cm <sup>3</sup> )	k – 20°C (cm/s)	Porosidade	Índice de Vazios
Rejeito puro	4,01	2,62	1.10 <sup>-6</sup>	0,35	0,55
30% Rejeito + 70% Solo	3,05	2,08	7,5.10 <sup>-5</sup>	0,32	0,47
20% Rejeito + 80% Solo	2,92	2,05	7,7.10 <sup>-5</sup>	0,30	0,42
10% Rejeito + 90% Solo	2,79	2,04	8,3.10 <sup>-5</sup>	0,27	0,37
Solo Puro	2,65	1,98	1.10 <sup>-4</sup>	0,25	0,34

No que diz respeito a permeabilidade relacionada a porosidade dos materiais, o maior valor observado foi do solo tropical puro (menor porosidade), sendo diminuída à medida que se adiciona o rejeito de minério de ferro (maior porosidade), entretanto, houve na permeabilidade uma variação muito pequena com o acréscimo do rejeito. Portanto, a porosidade não teve um papel relevante em relação a pequena variação da permeabilidade, e foi observado no item 5.2.3 que a pequena variação da permeabilidade é influenciada pela mineralogia do rejeito. Assim, as adições de minério de ferro afetam as características hidromecânicas dificultando o fluxo e a retenção de água.

Para a construção de camadas de pavimentos este comportamento é satisfatório, pois a dificuldade da água entrar nas camadas do pavimento faz com que a umidade de compactação seja preservada e conseqüentemente não aconteça a expansão devido ao aumento do volume de água. A expansão também poderia acontecer caso fossem encontrados minerais expansivos nos materiais estudados, entretanto, os mesmos não foram encontrados de acordo com os ensaios químicos e mineralógicos.

Conforme a Figura 5.25, que considera os resultados obtidos para os materiais estudados de acordo com a variação da permeabilidade em função dos diferentes valores de índices de vazios. Para os índices de vazios, o valor encontrado para o solo puro é um valor muito baixo, devido ao processo de compactação e a variação dos diâmetros dos grãos, condição mais bem graduada, que causa o encaixe das partículas. Para os outros materiais, à medida que o rejeito de minério de ferro foi incorporado ao solo, a mistura foi ganhando características de materiais uniformes e houve um aumento no índice de vazios, devido à pouca variação dos diâmetros dos grãos do rejeito.

De acordo com as imagens do MEV que foram apresentadas no item 5.2.3 é possível observar

que a microestrutura do solo tropical puro é composta de partículas arredondas que contribuem para o aumento da permeabilidade devido a facilidade da água em percolar pelo meio. Mas devido a variação dos diâmetros dos grãos, há um encaixe que contribui para a diminuição dos índices de vazios. Pelas imagens também é possível notar a pouca presença de poros.

Já para o rejeito de minério de ferro puro ainda segundo as imagens do MEV é possível observar que a microestrutura é composta por partículas irregulares que dificultam a permeabilidade, além disso a presença de óxidos de ferro encontradas no rejeito após o beneficiamento tendem a diminuir a permeabilidade. A presença de óxidos de ferro foi comprovada também pelos altos valores de massa específica dos sólidos, além do comportamento magnético. Mas devido à pouca variação dos diâmetros dos grãos, que são uniformes, não há um encaixe satisfatório e consequentemente há um aumento nos valores de índice de vazios. Pelas imagens também é possível notar a elevada porosidade do material.

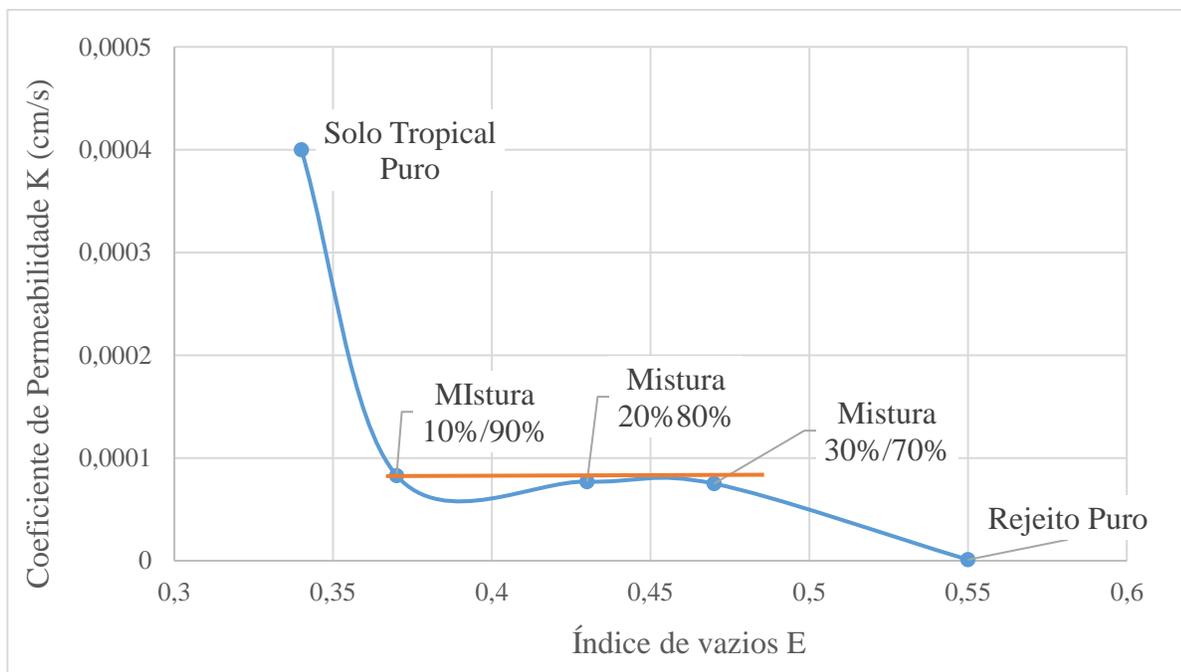


Figura 5.25 - Curva de coeficiente de permeabilidade versus índice de vazios para os materiais estudados.

#### 5.4.5. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MAGNÉTICO

Em geral o comportamento magnético dos materiais é definido pela composição mineralógica ou química, além dos eventuais processos aos quais o material pode ficar exposto. Para o estudo dos rejeitos, o magnetismo é uma importante ferramenta para avaliar a presença de ferro na sua estrutura. Para o rejeito de minério de ferro estudado, foi encontrada uma susceptibilidade magnética significativa na presença de ímã, como é indicada na Figura 5.26. A área do ímã preenchida por rejeito de minério de ferro foi de aproximadamente 90%. Essa susceptibilidade magnética indica a presença de óxidos ferro na estrutura do rejeito. As presenças dos minerais metálicos foram confirmadas por meio dos ensaios de difração de raios-x apresentados nessa pesquisa.

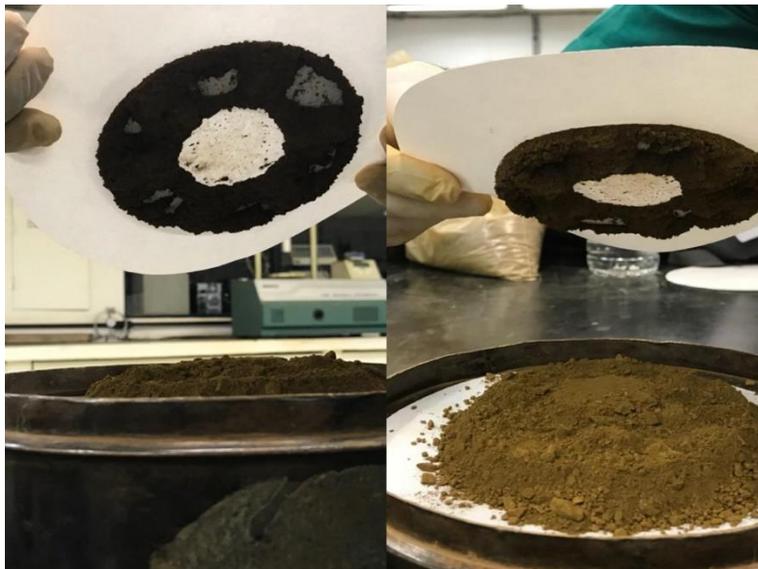


Figura 5.26 – Ensaio de potencial metálico do rejeito de minério de ferro.

Para o solo tropical estudado também foi encontrada uma susceptibilidade magnética pequena na presença do ímã, como é indicado na Figura 5.27. A área do ímã preenchida pelo solo foi de aproximadamente 10%. Essa susceptibilidade magnética indica a presença de óxidos de ferro na estrutura do material, típicos de solos lateríticos. As presenças dos minerais metálicos foram confirmadas por meio dos ensaios de difração de raios-x apresentados desta pesquisa mais adiante no item 5.2.3.

De acordo com Sadiki *et al.* (2009), Santos *et al.* (2011) e Souza Júnior *et al.* (2010), a susceptibilidade magnética é um atributo que reflete a composição de minerais ferrimagnéticos, nas diferentes frações do solo, indicando o grau de evolução dos processos pedogenéticos. De acordo

com Souza Júnior *et al.* (2010), os óxidos de ferro são o segundo grupo de minerais mais presentes na fração argila, principalmente em solos lateríticos.



Figura 5.27 – Ensaio de potencial metálico do solo tropical.

## 5.5. ENSAIOS GEOTÉCNICOS APLICADOS À PAVIMENTAÇÃO

Os resultados aqui expostos tiveram o objetivo de verificar o comportamento mecânico do solo tropical, do rejeito de minério de ferro e das três diferentes misturas.

### 5.5.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR

Segundo Santos (2018), a utilização da técnica de compactação é essencial em obras de terraplanagem, visando o aumento da resistência dos solos sob a ação de cargas externas, redução de possíveis variações volumétricas, impermeabilização dos solos, pela redução de coeficiente de permeabilidade, resultante do menor volume de vazios. Por isso, o ensaio de compactação é frequentemente utilizado como técnica de estabilização aplicada também a estudos de uso de materiais alternativos para melhoria de solos.

Os resultados dos ensaios de compactação Proctor nas energias normal, intermediária e modificada, e as respectivas massas específicas aparentes secas máximas, teores de umidade ótima, índices de vazios e porosidade são apresentados na Tabela 5.11. As Figuras 5.28, 5.29, 5.30, 5.31 e 5.32 mostram as curvas de compactação obtidas para o rejeito, solo natural e misturas 10% Rejeito e

90% Solo; 20% Rejeito e 80% Solo; 30% Rejeito e 70% Solo, respectivamente.

Tabela 5.11 – Resultados dos ensaios de compactação.

		Energias de Compactação		
		Normal	Intermediária	Modificada
Rejeito Puro	Teor de umidade ótima (%)	9,3	9,0	8,6
	Massa esp. aparente seca máx. (g/cm <sup>3</sup> )	2,621	2,642	2,754
Rejeito 10% + Solo 90%	Teor de umidade ótima (%)	11,1	10,8	10,06
	Massa esp. aparente seca máx. (g/cm <sup>3</sup> )	2,047	2,125	2,172
Rejeito 20% + Solo 80%	Teor de umidade ótima (%)	12,66	11,8	9,2
	Massa esp. aparente seca máx. (g/cm <sup>3</sup> )	2,059	2,141	2,203
Rejeito 30% + Solo 70%	Teor de umidade ótima (%)	13,5	12,2	11,2
	Massa esp. aparente seca máx. (g/cm <sup>3</sup> )	2,082	2,150	2,201
Solo 100%	Teor de umidade ótima (%)	11,0	9,6	8,4
	Massa esp. aparente seca máx. (g/cm <sup>3</sup> )	1,985	2,043	2,106

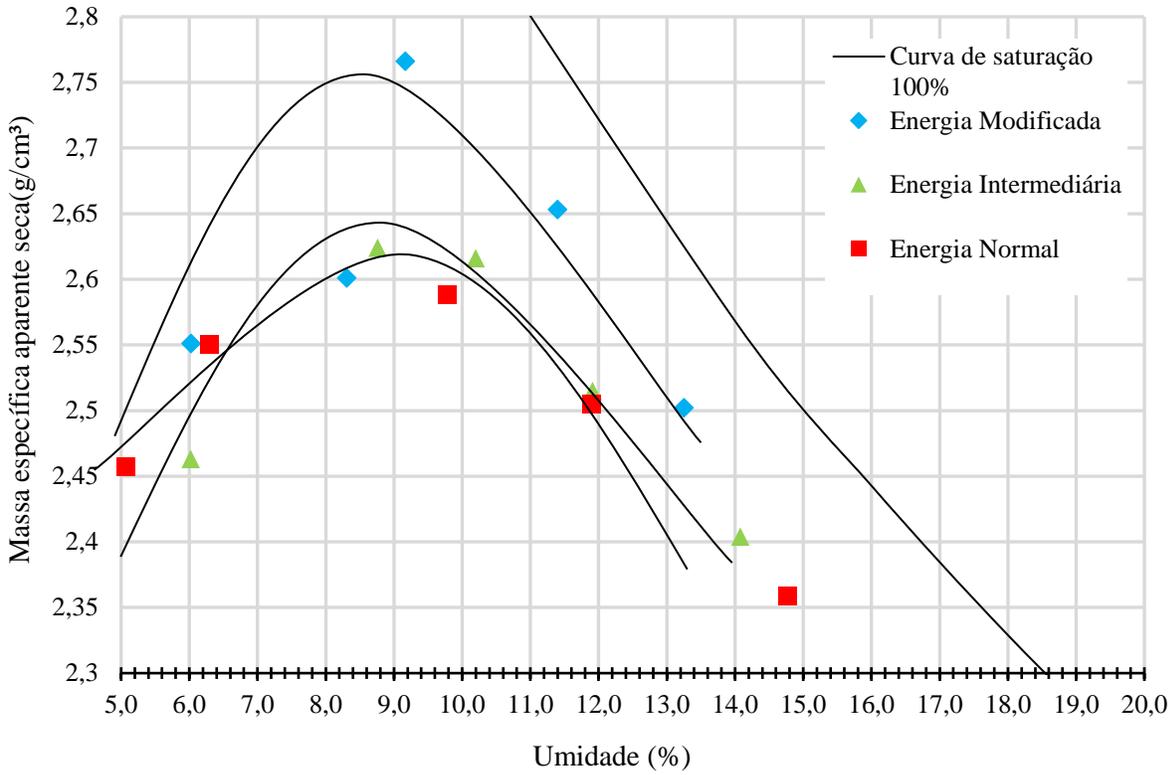


Figura 5.28 – Curvas de compactação obtidas para três energias para o rejeito puro.

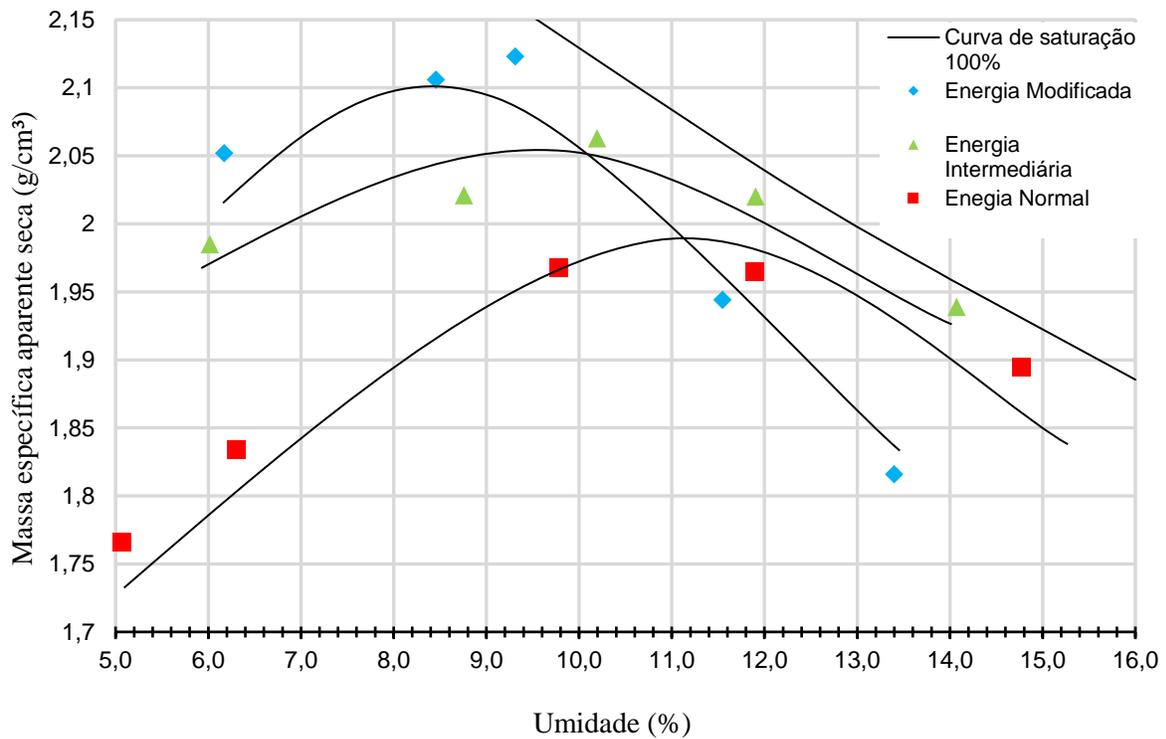


Figura 5.29 – Curvas de compactação obtidas nas três energias para o solo puro.

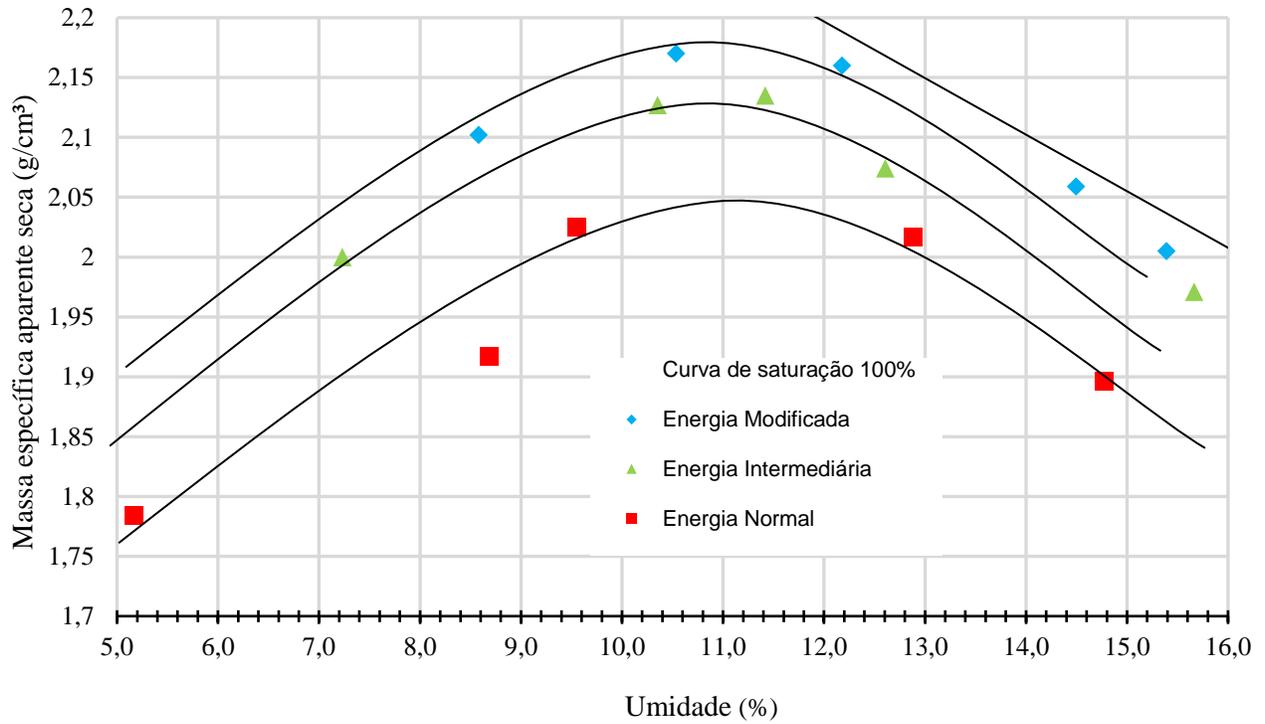


Figura 5.30 – Curvas de compactação obtidas nas três energias para 10% de rejeito e 90% de solo.

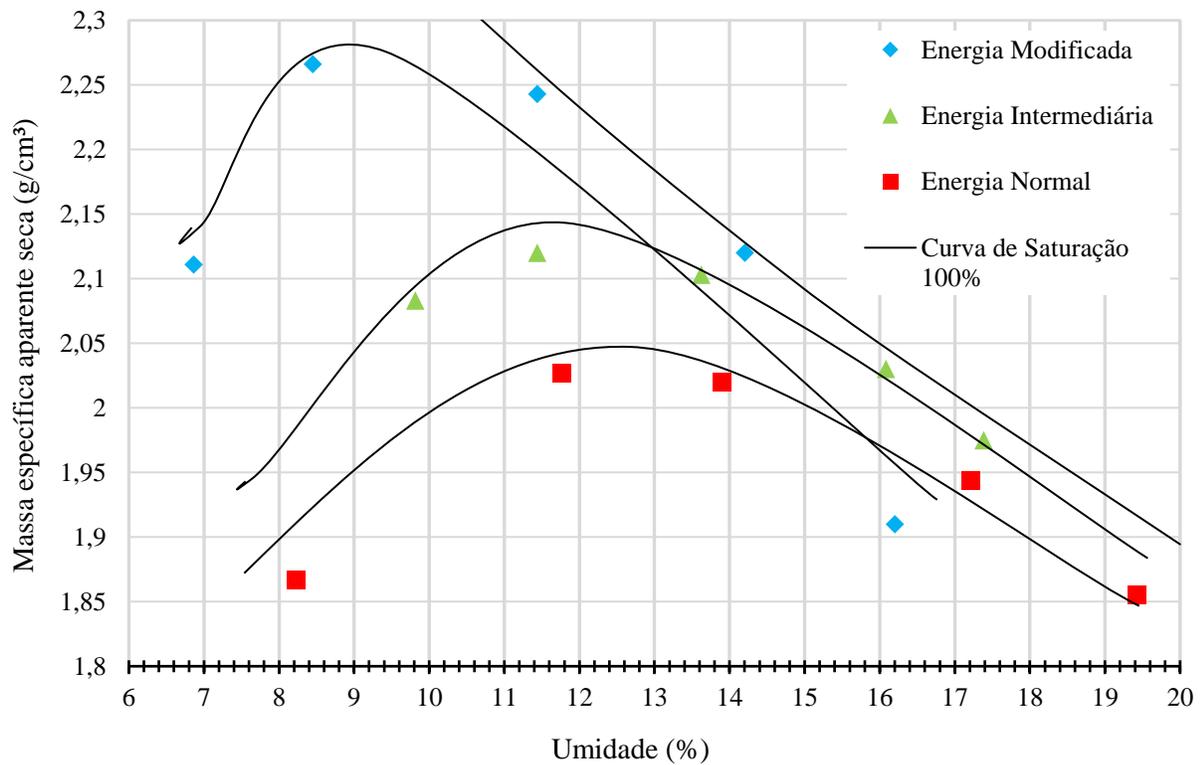


Figura 5.31 – Curvas de compactação obtidas nas três energias para 20% de rejeito e 80% de solo.

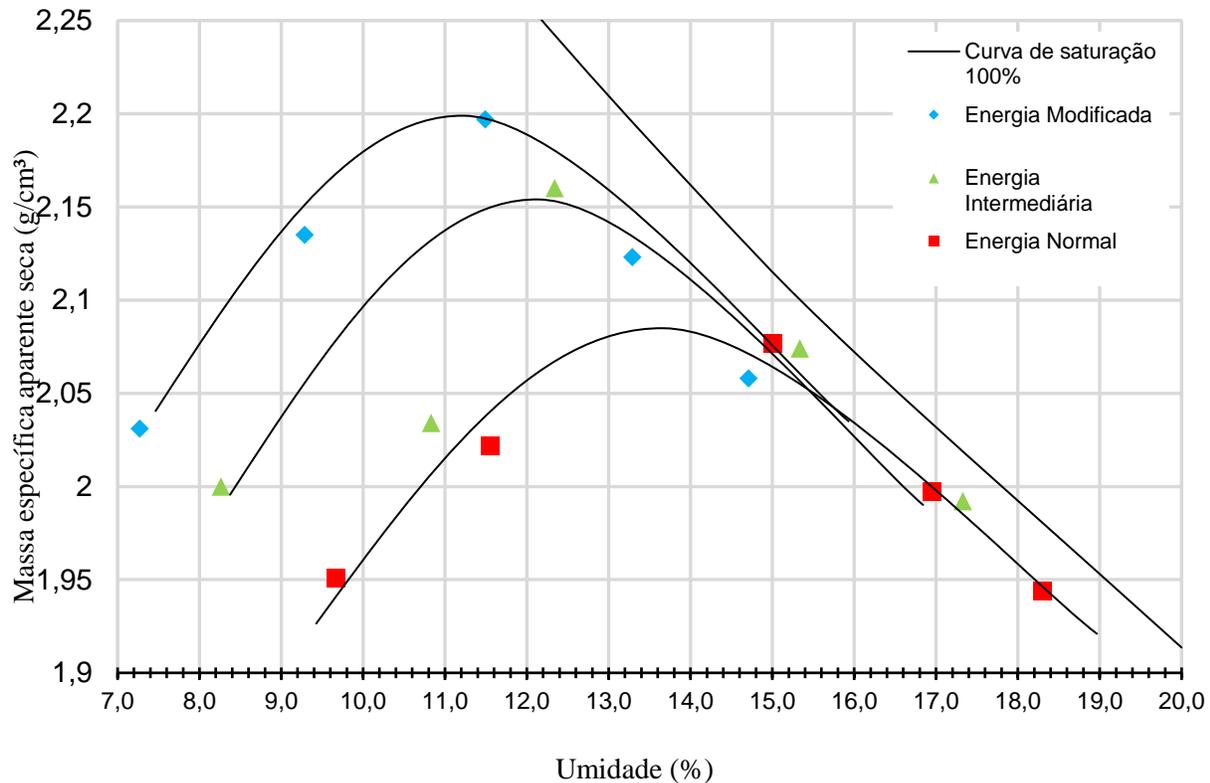


Figura 5.32 – Curvas de compactação obtidas nas três energias para 30% de rejeito 70% de solo.

As curvas de compactação apresentadas nas Figuras de 5.28 a 5.32 mostram que, de modo geral, o solo que é o material mais intemperizado, conforme foi evidenciado o item 5.4.3 relacionados aos ensaios de plasticidade, apresenta a curva de compactação menos inclinada e à medida que o rejeito de minério de ferro é incorporado na mistura a curva tende a se tornar mais inclinada. Cabe ainda destacar que curvas mais inclinadas permitem a adoção de faixas de umidade mais amplas na compactação de campo (Delgado, 2007).

De maneira geral constata-se que os valores de umidade ótima para o solo puro tendem a se aproximar da linha de saturação, aparentemente esta aproximação está ligada ao teor de argila presente no solo tropical estudado.

Ao analisar os parâmetros de compactação apresentados e os resultados da granulometria relacionados aos encaixes das partículas devido aos diferentes diâmetros e formas, a mineralogia devido ao comportamento estrutural após a compactação e as análises químicas relacionadas aos minerais encontrados nos materiais estudados, nota-se que a mudança de comportamento na compactação se encontra associada a junção destes três parâmetros e não apenas a composição mineralógica. Sendo assim, em conformidade com Nóbrega (1991) há diversos fatores que interferem

no comportamento mecânico e hídrico dos solos, tais como a textura, a mineralogia, a sua forma de organização e a composição química dos mesmos. Os fatores apresentados por Nóbrega (1991) foram evidenciados por meio dos ensaios químicos e mineralógicos realizados nesta pesquisa.

Também se torna evidente que a aplicação de uma maior energia de compactação, desde que não haja uma mudança na distribuição granulométrica original de um solo pela quebra de grãos, tende a gerar um decréscimo no valor da umidade ótima e conduzir a um valor mais alto para o peso específico seco máximo, conforme se observa nos valores encontrados, a mesma análise também foi realizada por Amorim (2013). Este é o comportamento compatível com solos de uma forma geral. Para a compactação do rejeito puro há uma inclinação acentuada nas curvas, que indica a baixa estabilidade do material na compactação, isto é uma pequena variação de umidade tende a gerar uma grande variação nos valores da massa específica aparente seca. Existe uma tendência de que esse comportamento seja encontrado nas misturas à medida que o rejeito seja incorporado ao solo.

Os resultados encontrados também podem ser justificados levando em consideração os resultados da difração de raios-x e morfologia dos materiais estudados. O solo puro é formado por silicatos de alumínio lamelares a placóides. Estes minerais se quebram muito mais facilmente do que grãos arredondados, o que diminui o índice de vazios, sem significar ganho de resistência. Entretanto, o rejeito de ferro, por se tratar de um material de tamanho relativamente uniforme, da ordem de 50  $\mu\text{m}$ , ainda preenche os vazios do solo que são da ordem de 80  $\mu\text{m}$ . Tornando a mistura mais densa e compacta que na energia modificada apresentou um leve ganho de resistência.

Na Figura 5.33 é apresentada a variação da massa específica aparente seca de acordo com o teor de umidade para os materiais na mesma energia. Nota-se que o aumento de massa específica aparente seca do solo puro para o rejeito de minério de ferro não acontece de forma linear, desta forma fica evidenciado que há um limite para o acréscimo do rejeito de minério de ferro na mistura, pois a mesma não apresenta mais um aumento significativo nos valores de massa específica aparente seca. Esse comportamento pode ser explicado pelas imagens do MEV na qual o aumento da massa específica aparente seca acontece aproximadamente até a porcentagem de 20% de rejeito quando os vazios do solo são preenchidos, depois disso, as partículas de rejeito tendem a envolver a partícula de solo e desta forma não há um aumento significativo nos valores de massa específica aparente seca.

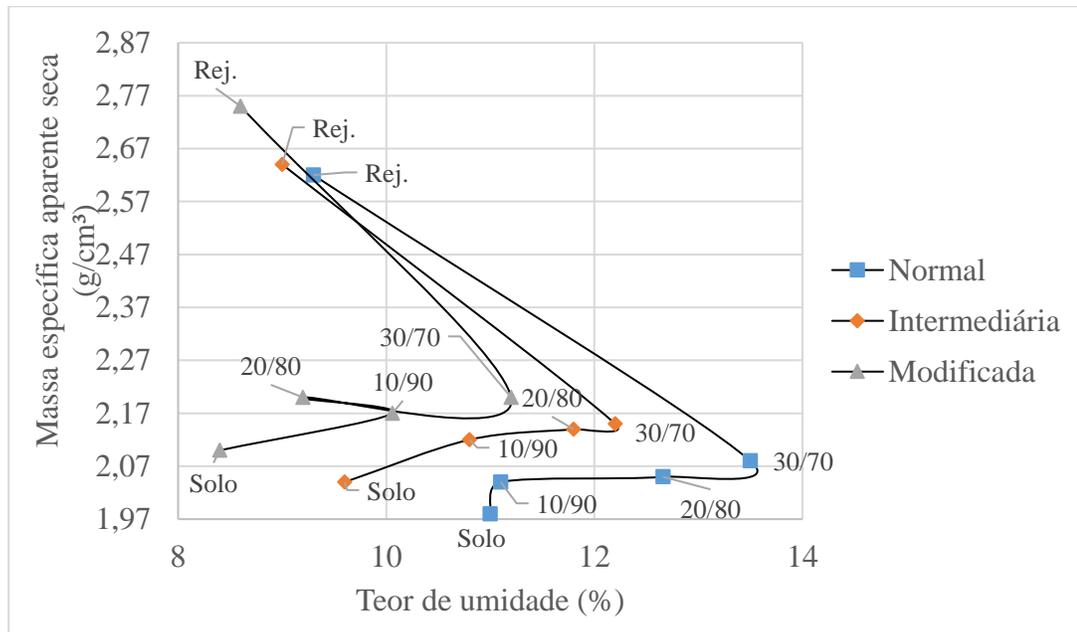


Figura 5.33 – Massa específica aparente seca em função do teor de umidade levando em consideração as mesmas energias de compactação aplicada.

Para definir a maior efetividade no processo de compactação, foi avaliada a variação dos índices de vazios em relação ao teor de umidade de todos os materiais estudados (para o rejeito, solo natural e misturas 10% Rejeito e 90% Solo; 20% Rejeito e 80% Solo; 30% Rejeito e 70% Solo) conforme as Figuras 5.34 a 5.38 respectivamente.

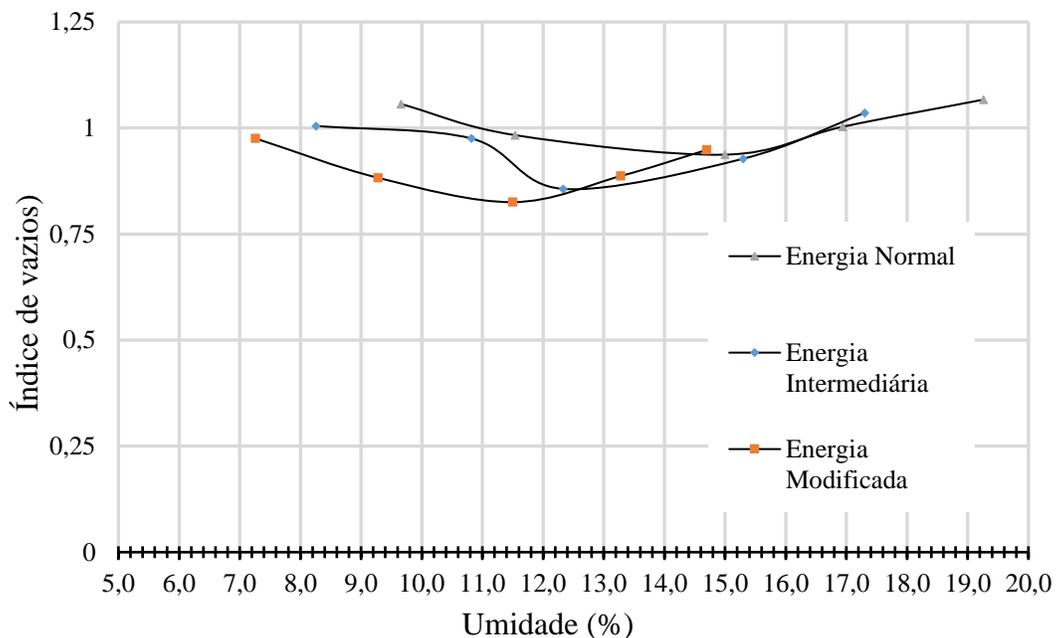


Figura 5.34 – Curvas de variação do índice de vazios e teor de umidade para o rejeito puro.

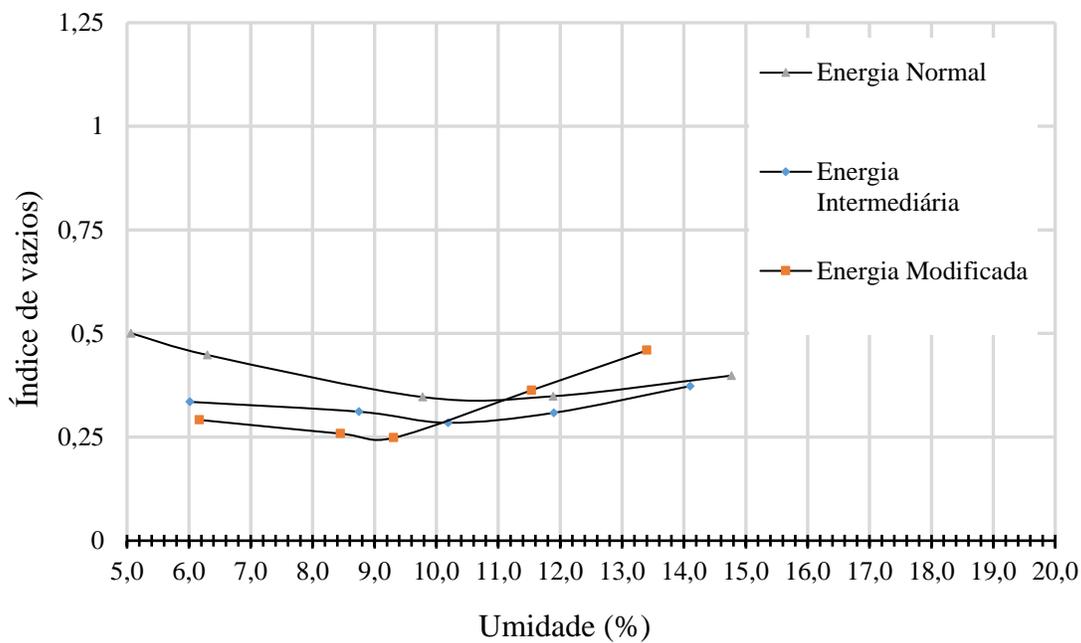


Figura 5.35 - Curvas de variação do índice de vazios e teor de umidade para o solo puro.

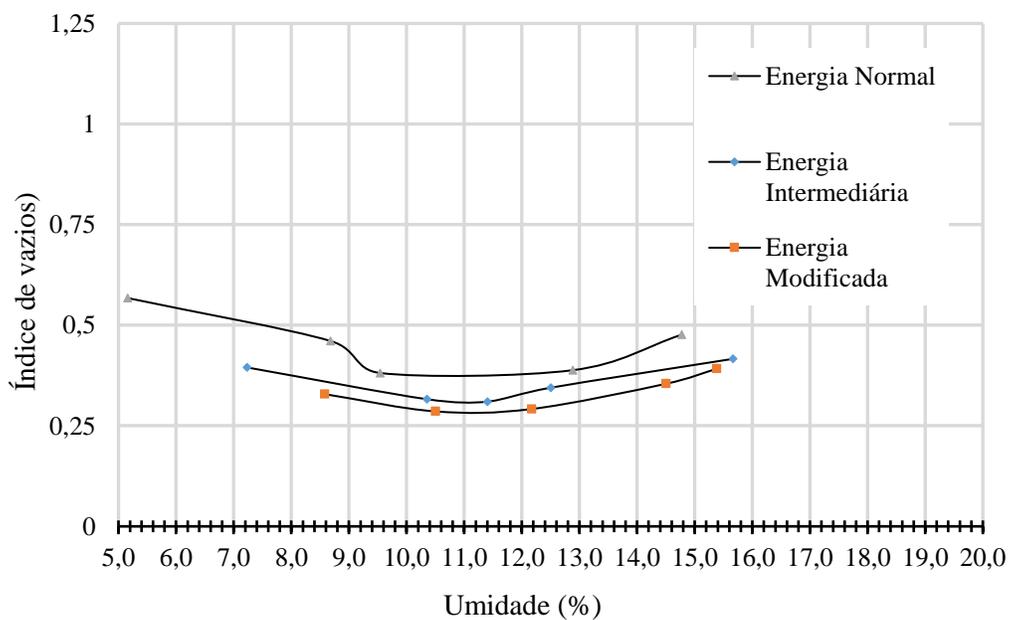


Figura 5.36 – Curvas de variação do índice de vazios e teor de umidade para o 10% de rejeito e 90% de solo.

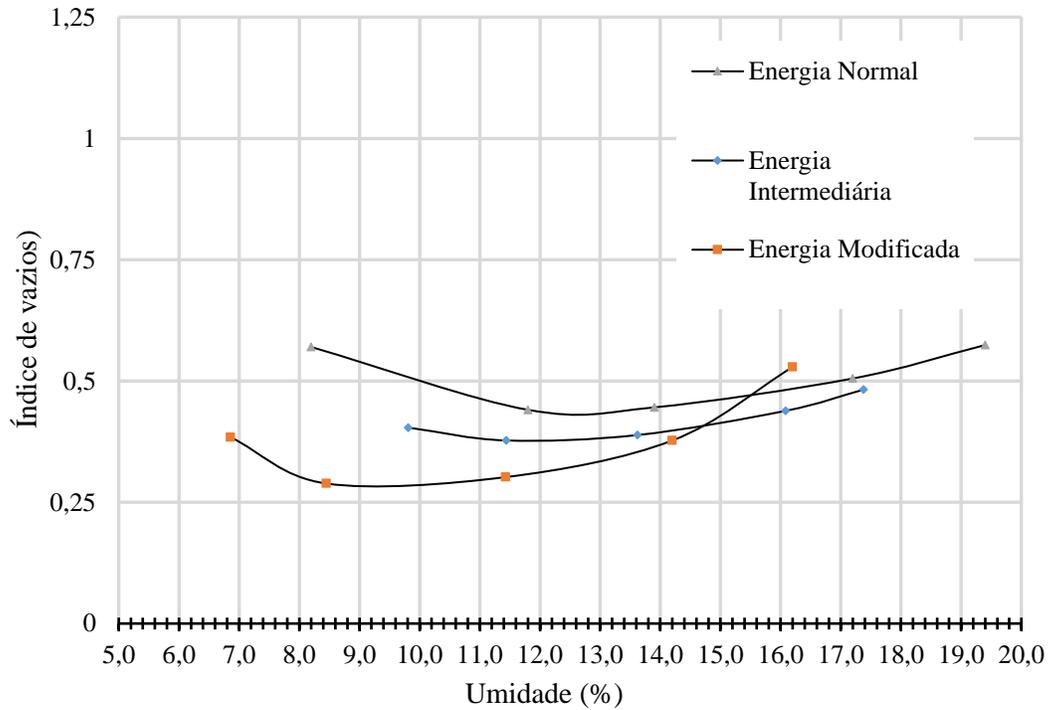


Figura 5.37 – Curvas de variação do índice de vazios e teor de umidade para o 20% de rejeito e 80% de solo.

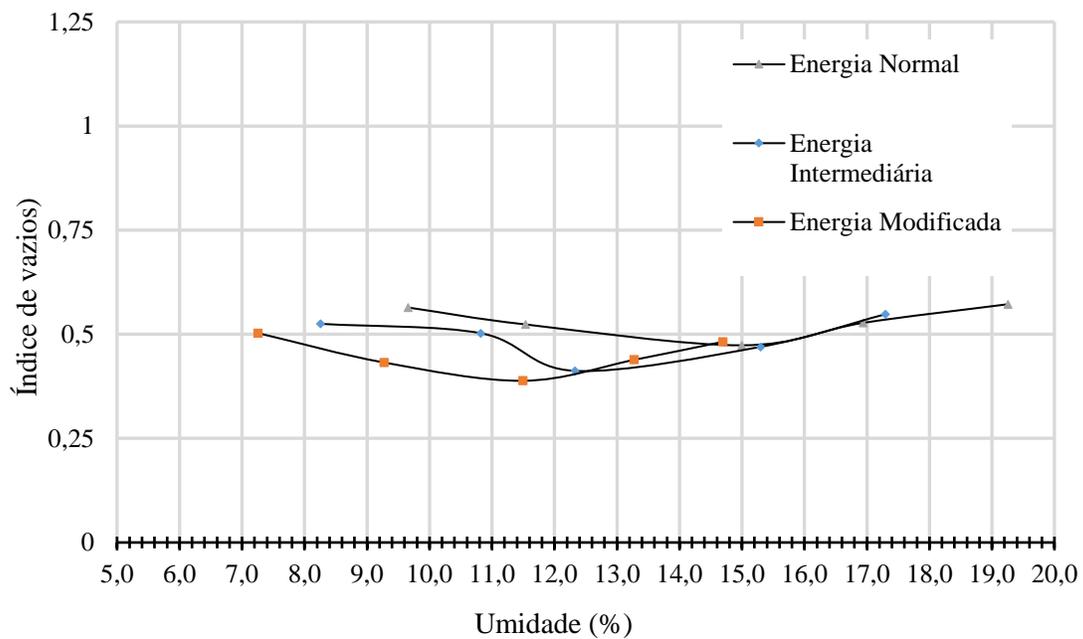


Figura 5.38 – Curvas de variação do índice de vazios e teor de umidade para o 30% de rejeito e 70% de solo.

Observa-se que para todos os materiais estudados houve uma pequena variação no índice de vazios com o incremento da umidade até a umidade ótima. Os baixos valores de índices de vazios para o solo puro são devidos a variação do diâmetro dos grãos, características de solos bem graduados com presença de finos que preenche os vazios e de acordo com as imagens do MEV para o solo compactado o material apresentou uma matriz bem estruturada, no qual os grãos maiores predominantemente quartzosos estão rodeados por partículas mais finas ocasionando uma boa compactação estrutural.

Para o rejeito puro, o material uniforme com grãos muito pequenos, conforme as imagens MEV, faz com que os grãos fiquem muito próximos e o valores de índices de vazios sejam baixos. E devido a uniformidade do material há uma perda no desempenho mecânico quando o material é compactado.

Para as misturas estudadas, os grãos do rejeito de ferro tendem a preencher os poucos vazios deixados pelas partículas do solo presente na mistura, este comportamento garante uma boa compactação estrutural, com provável influência no ganho de resistência das misturas, conforme as imagens MEV este processo ocorre até o incremento de aproximadamente 20% de rejeito. Para a mistura de 30% de rejeito é revelada a presença de depressões irregulares e cavidades, que indicam provavelmente um pior desempenho no comportamento mecânico após a compactação.

### **5.5.2. CURVA CARACTERÍSTICA**

Uma forma de avaliar as variações da sucção de um solo é por meio da curva característica de retenção de água, que representa uma relação gráfica entre a sucção total e o grau de saturação do solo (Presa, 1982).

A curva característica é a relação entre a água presente nos poros e a sucção de um solo ou rejeito. Este volume de água pode ser quantificado em termos de teor de umidade volumétrica, definido como a relação entre o volume de água e o volume total, de teor de umidade gravimétrico, cuja magnitude é obtida em função da relação entre pesos de água e de sólidos, ou em termos de grau de saturação.

Segundo Vanapalli *et al.* (1999), as propriedades peculiares da curva característica dependem de vários fatores tais como: estrutura e agregação, teor de umidade inicial, índice de vazios, tipo de solo, textura, mineralogia, histórico de tensões e método de compactação.

Objetivando a associação de níveis de saturação com o comportamento mecânico dos materiais, é de fundamental importância a determinação das curvas características dos mesmos para os diferentes teores de umidade passíveis de ocorrer em campo. Sob este aspecto, considerando as variações climáticas da região nordeste brasileira, foram determinadas curvas características para a umidade ótima, para o ramo seco e o úmido da curva de compactação. São apresentados na Tabela 5.12 os valores de sucção total e de grau de saturação para os materiais estudados.

Tabela 5.12 – Valores de Grau de Saturação (Sr) e Sucção Total (pF) de todos os materiais estudados na energia intermediária.

Rejeito Puro		10% Solo/ 90% Rejeito		20% Solo/ 80% Rejeito		30% Solo/ 70% Rejeito		Solo Puro	
Sr (%)	pF	Sr (%)	pF	Sr (%)	pF	Sr (%)	pF	Sr (%)	pF
5,32	5,10	5,54	5,01	4,56	5,08	4,52	5,11	5,86	5,11
11,43	5,01	6,96	4,92	9,23	4,98	9,97	5,01	8,93	5,01
16,23	4,94	11,38	4,84	11,38	4,93	11,94	4,95	11,38	4,95
26,53	4,83	16,32	4,74	17,43	4,83	17,43	4,85	17,50	4,85
32,40	4,67	21,40	4,58	22,32	4,68	23,12	4,72	21,40	4,72
39,10	4,63	25,92	4,54	28,10	4,61	39,32	4,65	28,10	4,65
45,11	4,44	33,20	4,35	35,22	4,45	45,11	4,49	38,45	4,49
52,76	4,23	44,10	4,13	46,12	4,24	52,93	4,29	47,94	4,29
63,90	4,00	52,40	3,91	55,34	3,99	58,12	4,06	56,93	4,06
69,12	3,87	63,22	3,77	66,78	3,86	69,20	3,88	63,48	3,88
75,21	3,82	71,32	3,72	72,45	3,81	74,23	3,85	69,23	3,85
83,12	3,69	82,30	3,69	83,56	3,72	84,51	3,76	74,43	3,76
88,39	3,67	94,20	3,66	92,30	3,65	91,80	3,66	87,90	3,66
95,50	3,63	101,90	3,64	98,43	3,62	97,32	3,63	95,50	3,63

Obs.: Pf = logaritmo de sucção total em cm de coluna d'água.

Na Figura 5.39 é apresentada as curvas características plotadas com pF (logaritmo da sucção total em cm de coluna d'água) em função do grau de saturação.

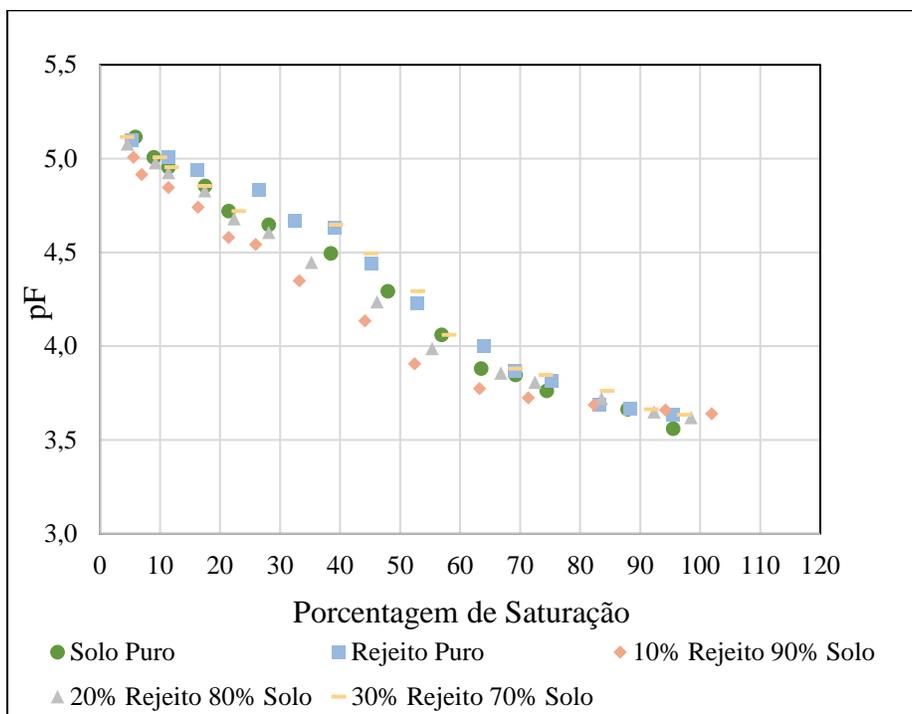


Figura 5.39 – Curvas características dos materiais estudados pF (logaritmo da sucção total em cm de coluna d’água) em função do grau de saturação.

Segundo Camapum de Carvalho e Pereira (2001) e posteriormente Delgado (2007), vários fatores interferem nas curvas características, tais como as propriedades químicas e mineralógicas, a distribuição de poros e o índice de vazios. Em relação as propriedades químicas e mineralógicas, estas afetam as curvas características de solos distintos, não interferindo em relação ao mesmo solo, quando consideradas as curvas características transformada (Figura 5.40) ou não (Figura 5.39). Em se tratando da distribuição de poros e do índice de vazios, por refletirem o estado do solo, o comportamento é inverso. Embora a curva característica transformada independa do índice de vazios, ela não contempla diferenças na distribuição de poros.

Utilizando a transformação da sucção proposta por Camapum de Carvalho & Leroeil (2000), são plotados gráficos que relacionam pF<sub>xe</sub> e grau da saturação (Figura 5.29). Neste caso, o objetivo é avaliar o comportamento dos materiais conjuntamente em função da sucção e do índice de vazios. Assim, na Figura 5.40 observa-se que realizando esta transformação com os dados obtidos para os materiais ensaiados, são verificadas algumas diferenças: para Sr menor que 50% tem-se que os valores de pF<sub>xe</sub> são um pouco maiores, enquanto para Sr maior que 50% os resultados se aproximam. Camapum de Carvalho & Pereira (2002) mostram, no entanto, que para solos com distribuição de poros bi-modal como é o caso da maioria dos solos finos intemperizados do Brasil, o ideal seria

realizar a transformação considerando distintamente a variação de poros inter e intra agregados.

Na Figura 5.40 são apresentadas as curvas características plotadas com  $pF \times e$  (logaritmo da sucção total em cm de coluna d'água  $\times$  índice de vazios) em função do grau de saturação.

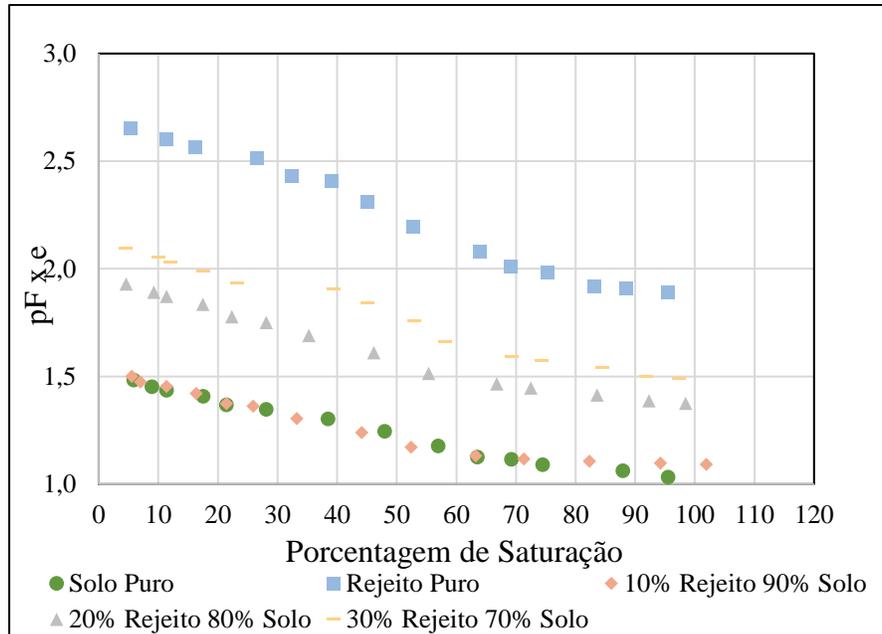


Figura 5.40 – Curvas características dos materiais estudados  $pF \times e$  (logaritmo da sucção total em cm de coluna d'água  $\times$  índice de vazios) em função do grau de saturação.

Segundo Camapum de Carvalho e Leroueil (2004), a distribuição de poros bem graduados conduzem a variações gradativas de sucção com teor de umidade. Já a distribuição de poros mais uniforme geralmente conduz a curvas mais horizontalizadas. Nos solos tropicais, entretanto, as curvas características fogem a estes formatos gerais e isso também se dá devido à distribuição de poros que é nestes solos marcada pela presença de macro e microporos que originam modelos de curvas características do tipo bimodal. Portanto, devido à presença dos micros e macroporos presentes no solo laterítico estudado e nas das misturas as curvas apresentaram um comportamento bimodal.

Segundo Li & Selig (1994) e Jin *et al.* (1994), existe uma relação não linear entre o módulo de resiliência e teor de umidade, mostrando também que, um incremento no teor de umidade resulta em uma diminuição no módulo de resiliência. Para a sucção e o teor de umidade, também existe uma relação não linear, aonde a sucção tende a diminuir com o aumento do teor de umidade. Portanto, materiais com valores de sucção crescente tendem a apresentar um crescimento nos valores de módulo de resiliência.

Segundo Bento (2006), o conhecimento da curva característica de um solo é de fundamental importância para as obras e projetos de engenharia, permitindo prever seu comportamento com a

variação de umidade, expansão e demais parâmetros, uma vez que estes influenciam diretamente na sucção total.

### 5.5.3. ENSAIO ISC

Os resultados dos ensaios de ISC e da expansão são apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Resultados dos ensaios ISC's e da expansão.

		Energia de Compactação		
		Normal	Intermediária	Modificada
Rejeito 100%	ISC (%)	18	19	38
	Expansão (%)	0,07	0,076	0,05
Rejeito 10% + Solo 90%	ISC (%)	33	39	52
	Expansão (%)	0,04	0,039	0,09
Rejeito 20% + Solo 80%	ISC (%)	38	45	74
	Expansão (%)	0,05	0,065	0,036
Rejeito 30% + Solo 70%	ISC (%)	32	40	48
	Expansão (%)	0,054	0,045	0,07
Solo 100%	ISC (%)	30	37	45
	Expansão (%)	0,1	0,12	0,065

Os valores de ISC dos solos lateríticos dependem de fatores de composição, especialmente das características e tamanho de partículas, grau de intemperismo e plasticidade de finos. De acordo com os resultados da compactação e das imagens MEV é possível comprovar que o solo por ser um material bem graduado com partículas de diferentes tamanhos apresentou uma compactação estrutural e valores de ISC maiores do que o rejeito puro que possui partículas predominantemente uniformes. Para as misturas o aumento do desempenho estrutural conforme o MEV acontece até aproximadamente 20% de rejeito, o que é refletido nos valores de ISC. Logo em seguida os valores de ISC tendem a diminuir devido à presença de depressões irregulares e cavidades que contribuem para a diminuição do desempenho mecânico conforme os resultados de ISC para a mistura de 30% de rejeito.

Assim, é possível constatar que o ISC é muito sensível às condições de moldagem, ou seja, ao índice de vazios e teor de umidade (Gidigas, 1976), por isso a moldagem no teor de umidade ótima

foi rigorosamente controlada.

Segundo Camapum de Carvalho (2015), um solo laterítico natural com um grau de saturação superior a 60% pode apresentar deformabilidade considerável com baixo valor de ISC sendo ainda pouco susceptível de colapso por inundação. Entretanto, fatores como o grau de cimentação podem fazer com que isto seja modificado. Essa peculiaridade de comportamento está ligada à presença de macroporos e à sua quantidade. Para a pesquisa em questão os maiores valores de sucção aconteceram para graus de saturação menores do que 50%, os valores de sucção estão relacionados diretamente com os valores de ISC, no qual, à medida que a sucção cresce os valores de ISC aumentam.

Segundo os requisitos de camadas de pavimentos estabelecido pelo Manual de pavimentação do DNIT (DNIT, 2006), todos os materiais analisados apresentam uma expansão que atendem aos critérios estabelecidos pela norma.

Para a camada de reforço de subleito, quando necessária, todos os materiais poderiam ser utilizados. Entretanto na pesquisa em questão essa camada não foi considerada para efeito de cálculo no dimensionamento do pavimento flexível devido aos resultados encontrados no ISC para o solo natural, que é a camada de subleito, atenderem os requisitos exigidos pelo Manual de pavimentação do DNIT (DNIT, 2006).

Para a camada de sub-base, todas as misturas podem ser utilizadas independente da energia, pois todas as amostras apresentaram ISC maior do que 20%. Para a camada de base, apenas a mistura com 20% de rejeito e 80% de solo na energia modificada pode ser utilizada de acordo com as especificações do Manual de pavimentação do DNIT (DNIT, 2006) para vias com tráfego leve, pois é a única que atinge valores maiores do que 60%.

O rejeito de minério de ferro estudado por ser um material muito fino preenche os vazios do solo granular e devido à grande quantidade de óxido de ferro presente no rejeito, que gera um aumento no grau de cimentação (Camapum de Carvalho, 2015), há um aumento na resistência do material devido a sua propriedade cimentante.

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

outros fatores devem ser levados em consideração como, a expansão quando o corpo de prova foi saturado para o ensaio de ISC, a granulometria do material segundo as faixas estabelecidas pelo Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006), além da resistência à fadiga que foi verificada por meio dos ensaios de módulo de resiliência.

#### 5.5.4. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES

Com relação aos ensaios de compressão simples nas Figuras 5.41, 5.42, 5.43, 5.44, 5.45 são apresentados os resultados relativos as curvas tensão vs. deformação obtidas durante a compressão dos corpos de provas. Os valores de umidade ótima, massa específica aparente seca máxima e índice de vazios relacionados a moldagem dos corpos de prova para os materiais estudados e as respectivas resistência a compressão simples estão apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Resumo da RCS, umidade ótima, massa específica aparente seca máxima e índice de vazios.

	RCS máx.(kPa)			Umidade Ótima (%)			Massa esp. aparente seca máx. (g/cm <sup>3</sup> )			e (Índice de vazios)		
	Nor.	Int.	Mod.	Nor.	Int.	Mod.	Nor.	Int.	Mod.	Nor.	Int.	Mod.
Rejeito 100%	369	419	469	9,3	9,0	8,6	2,62	2,64	2,75	0,53	0,52	0,46
Rejeito 10% + Solo 90%	354	504	569	11,1	10,8	10,06	2,04	2,12	2,17	0,37	0,32	0,29
Rejeito 20% + Solo 80%	499	604	679	12,6	11,8	9,2	2,05	2,14	2,20	0,42	0,36	0,33
Rejeito 30% + Solo 70%	339	564	584	13,5	12,2	11,2	2,08	2,16	2,2	0,47	0,41	0,39
Solo 100%	544	649	654	11,0	9,6	8,4	1,98	2,04	2,10	0,34	0,30	0,26

Observa-se na Tabela 5.14 acima que não há um aumento significativo na resistência a compressão com adição de rejeito ao solo natural. Apenas a mistura com 20% de rejeito e 80% de solo apresentou um aumento da resistência a compressão simples em relação ao solo puro na energia modificada. Nota-se ainda que as variações das umidades são muito similares e que a massa específica aparente seca máxima pouco se alterou com a variação da energia aplicada, o que pode ser observado também na Tabela 5.14.

Segundo Burgos (2016), a utilização de ensaios de compressão simples como forma de avaliar a resistência dos materiais como elementos de construção tem sido empregada com recorrência. O ensaio submete o material a condição mais crítica possível, justificada pela isenção de confinamento

lateral durante a compressão axial. O comportamento mecânico no ensaio de compressão simples é reflexo da estrutura do material, da porosidade e distribuição de poros e da sucção e/ou capilaridade atuante. Nas Figuras 5.41 a 5.45 são apresentados os gráficos da resistência a compressão simples vs. a deformação axial dos materiais estudados.

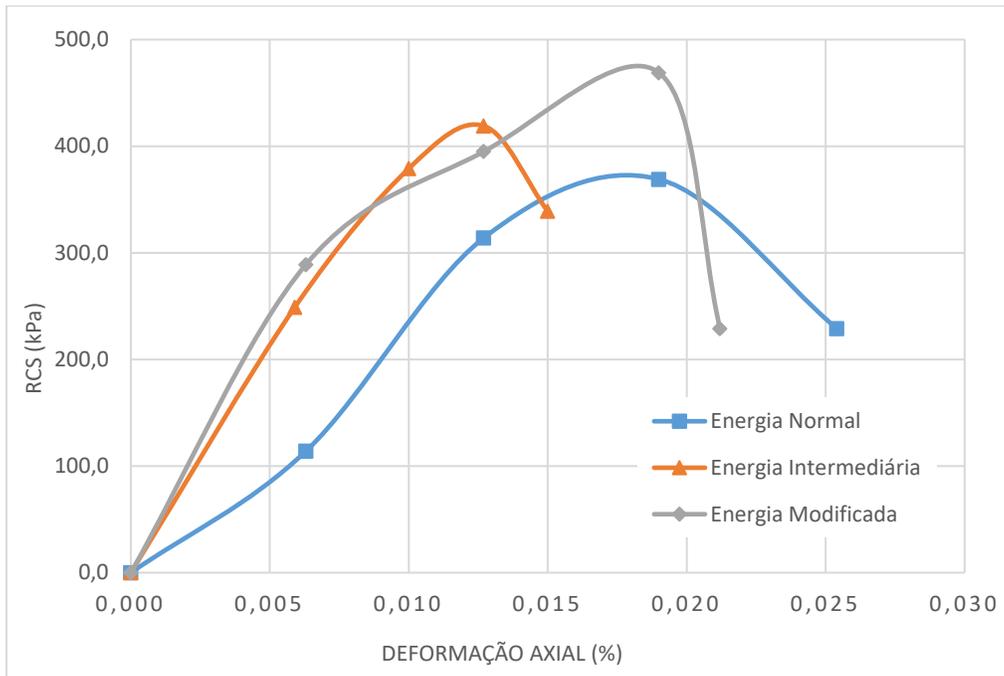


Figura 5.41 – RCS Rejeito puro.

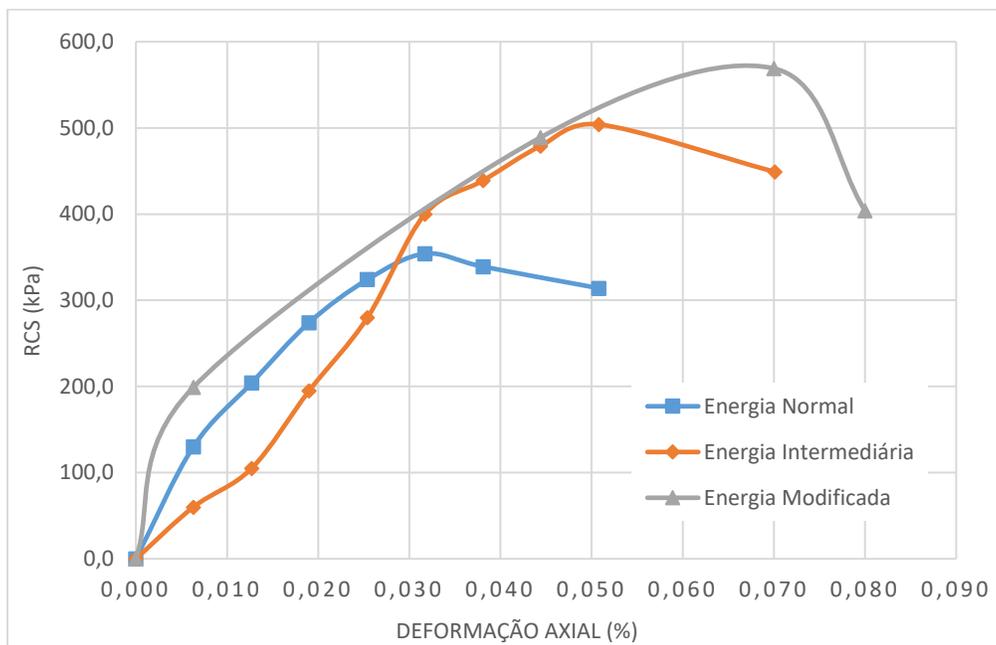


Figura 5.42 – RCS 10% de rejeito e 90% de solo.

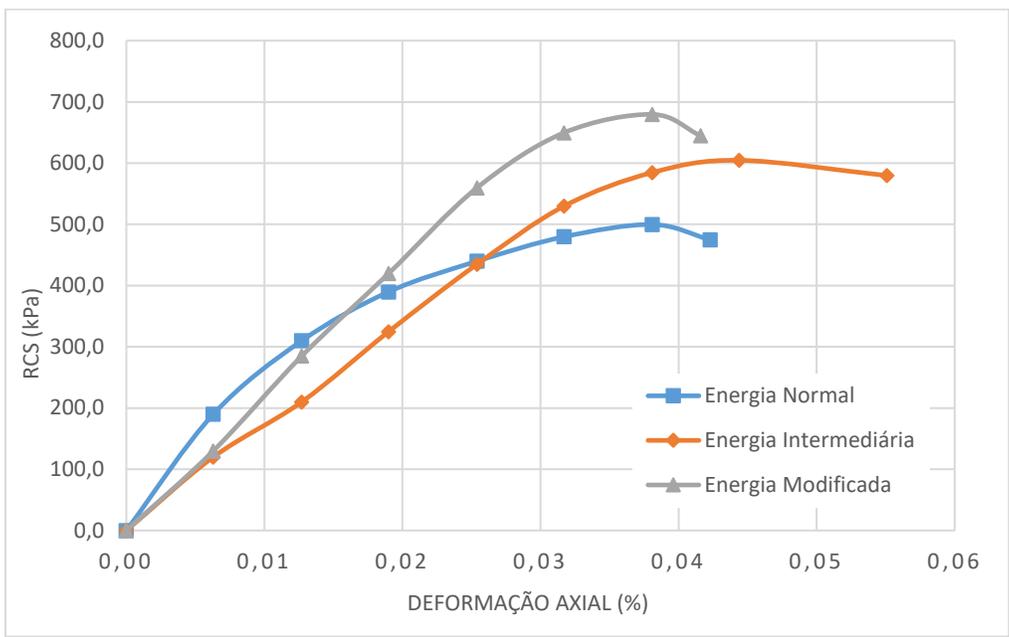


Figura 5.43 – RCS 20% de rejeito e 80% de solo.

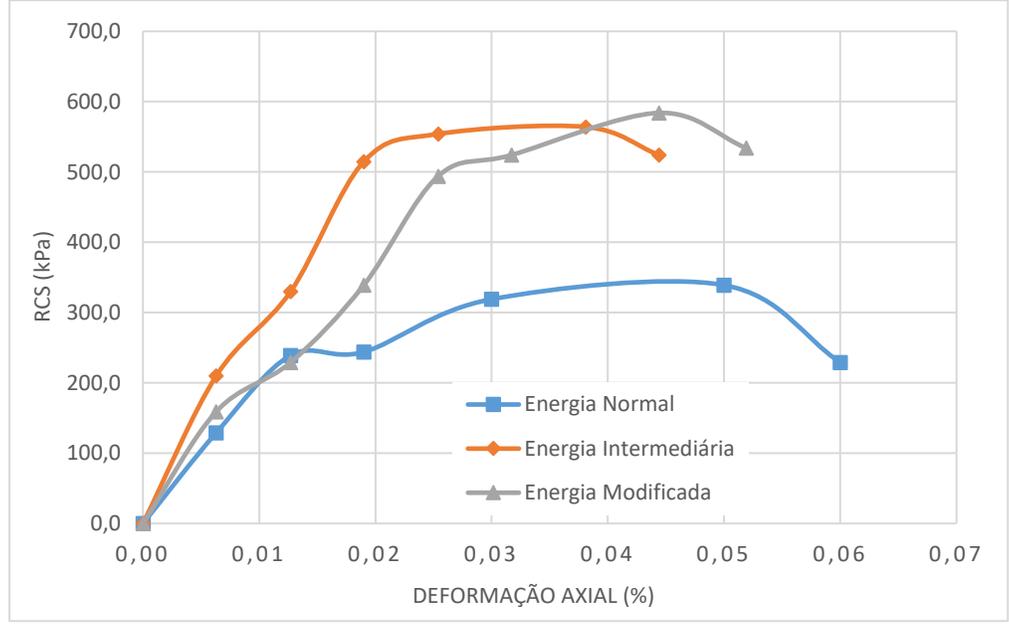


Figura 5.44 – RCS 30% de rejeito e 70% de solo.

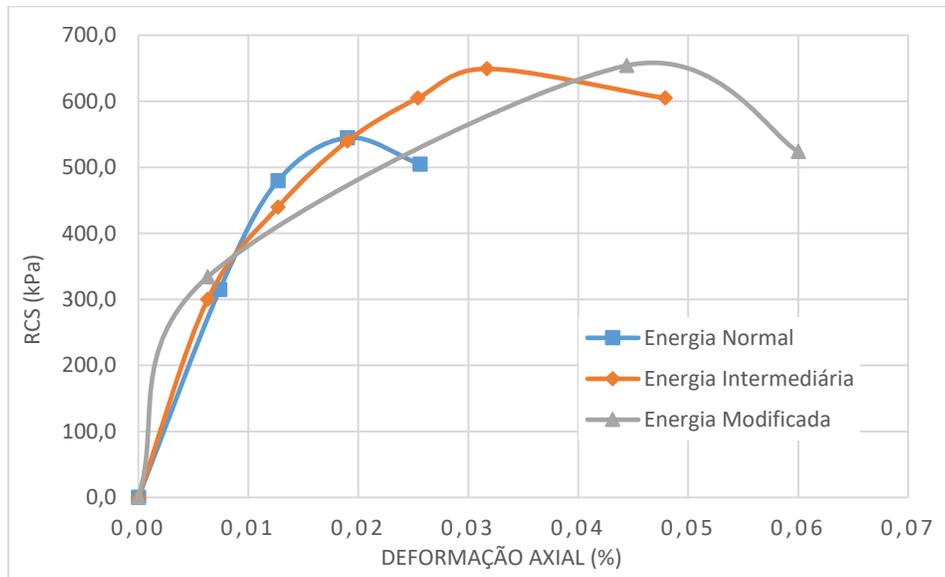


Figura 5.45 – RCS Solo puro.

De acordo com as Figuras 5.41, 5.42, 5.43, 5.44 e 5.45 as curvas relacionadas aos resultados tensão vs. deformação para os materiais estudados são influenciadas diretamente pela energia de compactação aplicada ainda que de forma sutil. Os valores de índices de vazios diminuem à medida que a energia de compactação aumenta. Portanto, para corpos de prova moldados com baixos valores de índices de vazios, aumento crescente da energia de compactação, foram observados os maiores valores de resistência a compressão simples. Entretanto, outros fatores também influenciaram nesses resultados. De acordo com a estrutura dos materiais segundo as imagens obtidas do MEV, o rejeito tem grãos uniformes que tende a influenciar de forma negativa no desempenho mecânico, segundo os ensaios de compactação, e nos valores de RCS. Contudo, pode-se observar ainda que de forma incipiente a possibilidade de existir um teor ótimo de rejeito que possa gerar uma melhor estruturação do solo na compactação. Esta situação foi observada na mistura contendo 20% de rejeito na energia intermediária. Contudo, mais estudos devem ser realizados para identificar como mais segurança este comportamento. O solo puro por ser um material bem graduado e com partículas finas compatíveis com o comportamento dos solos naturais apresentou um desempenho mecânico melhor, segundo os ensaios de compactação e nos ensaios de RCS apresentando maiores valores de resistência em comparação ao rejeito. Em resumo, para as misturas o maior valor de RCS foi observado para a mistura de 20% de rejeito e 80% de solo, mistura que apresentou o melhor desempenho mecânico de acordo com os ensaios de compactação e segundo as imagens do MEV apresentou um preenchimento mais eficiente dos vazios das partículas de solo pelo rejeito.

Nas Figuras 5.46, 5.47 e 5.48 são apresentadas as curvas tensão vs. deformação para todos os

materiais estudados considerando a mesma energia de compactação.

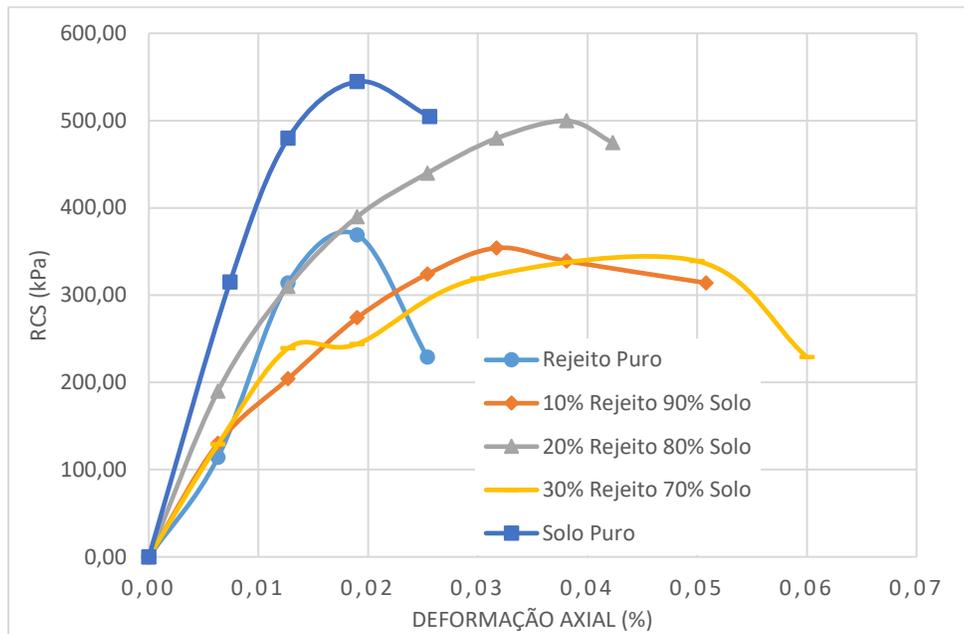


Figura 5.46 – RCS dos materiais estudados na energia normal.

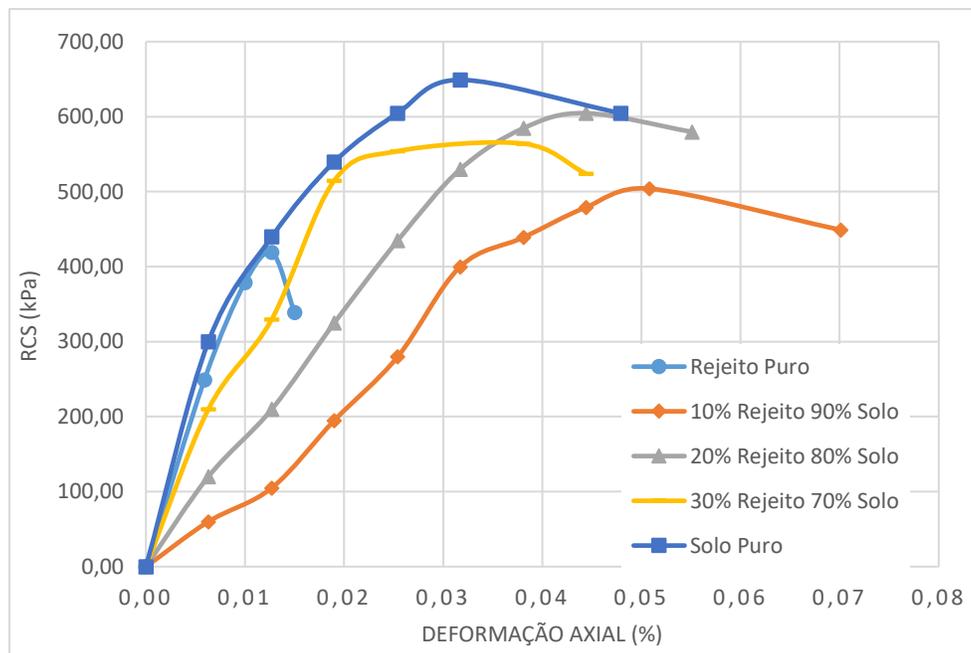


Figura 5.47 – RCS dos materiais estudados na energia intermediária.

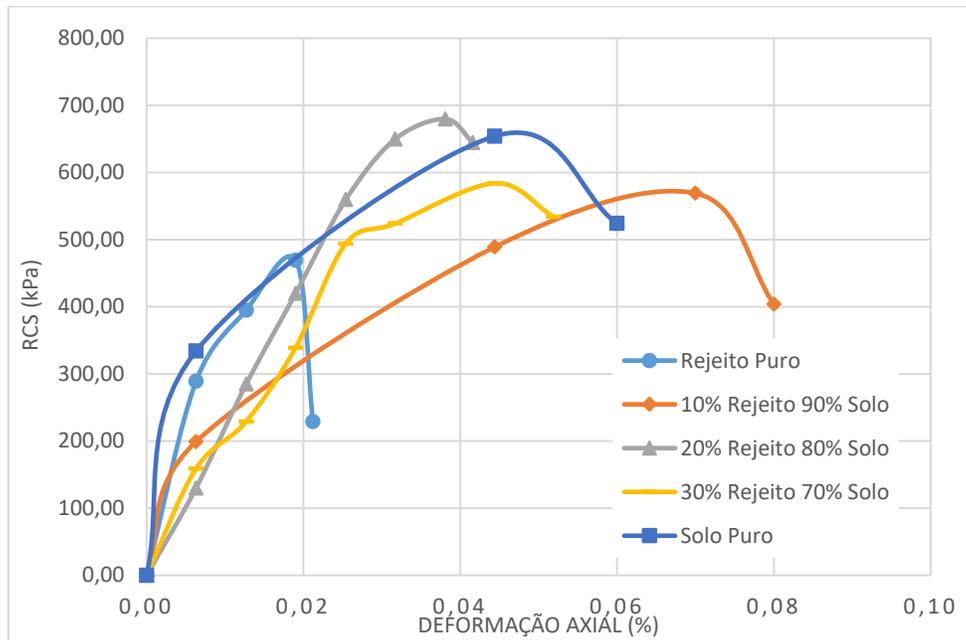


Figura 5.48 – RCS dos materiais estudados na energia modificada.

De acordo com as figuras apresentadas é possível observar que independente da energia aplicada, o rejeito puro é o material que menos sofre deformação antes da ruptura do corpo de prova e apresenta os menores valores de RCS. Apesar do rejeito possuir o maior índice de vazios, o corpo de prova rompeu com a menor deformação comparada com os outros materiais. Desta forma fica comprovada a influência dos grãos uniformes no comportamento mecânico do rejeito, além de que os finos não plásticos podem ter gerado essa ruptura frágil.

Para o solo puro foram alcançados os maiores valores de RCS para os corpos de prova compactados na energia normal e na energia intermediária, comportamento este típico de materiais bem graduados com presença de finos. A deformação intermediária no solo puro, maior do que a do rejeito e próximo a das misturas, comparada com os outros materiais aconteceu devida a grande carga de compressão axial aplicada e a ainda que pequena presença de vazios encontrados no material que podem ter contribuído para a deformação da amostra.

Para as misturas os valores de RCS, maiores do que o do rejeito e próximos ao do solo, aconteceram por causa da incorporação do rejeito na mistura.

### 5.5.5. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O ensaio de módulo de resiliência simula um veículo que passa sobre um pavimento que gera um pulso dinâmico de tensão que é transmitido para o solo e isto gera as chamadas deflexões. As tensões e deformações geradas dentro do pavimento como resultado das deflexões são os fatores que controlam a performance do pavimento. Logo, este comportamento é diretamente influenciado pela relação tensão-deformação do solo (Elliot, 1992).

Segundo Medina e Mota (2005), resiliência é a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, à qual é desenvolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações. Sendo assim o módulo de resiliência é representado pela Equação 5.1:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (5.1)$$

Onde:

- MR: módulo de resiliência (MPa);
- $\sigma_d$ : tensão desvio cíclica ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) (MPa);
- $\epsilon_r$ : deformação resiliente (vertical).

Segundo Medina (1997), para cada material ensaiado o módulo de resiliência pode ser expresso por um modelo matemático que é função do estado de tensões ao qual foi submetido o corpo de prova. Solos arenosos tendem a se comportar segundo um modelo dependente da tensão confinante (Equação 5.2), enquanto que solos argilosos apresentam comportamento mais dependente da tensão desvio (Equação 5.3).

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (5.2)$$

$$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (5.3)$$

Onde:

- $k_1$  e  $k_2$ : constantes de regressão do modelo.

Ainda segundo Medina (1997), existe também um modelo, denominado composto, que relaciona o módulo de resiliência à tensão confinante e tensão desvio (Equação 5.4). Este modelo tem sido muito utilizado nos últimos anos por se adaptar melhor a materiais de granulometrias diversas. Por esta pesquisa trabalhar com misturas, este foi o modelo utilizado para as misturas.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (5.4)$$

Com o propósito de descrever a deformação elástica que os materiais estudados manifestam, este item descreve os resultados obtidos nos ensaios de módulo de resiliência. Como sua determinação é um elemento preponderante para o dimensionamento mecânico-empírico, os valores obtidos foram ajustados segundo os modelos compostos, que para mistura de matérias é o mais eficiente.

Inicialmente são analisados os MR em função da tensão confinante, posteriormente em relação a tensão desvio e por último a análise composta que leva em consideração as duas situações.

É importante destacar que as amostras ensaiadas tiveram os seus teores de umidade obtidos, após o ensaio do módulo de resiliência, para verificar possíveis variações e interferências que esses teores pudessem produzir nas análises dos resultados obtidos. Contudo, os teores de umidade obtidos estavam bem próximos da umidade ótima encontrada para todos os materiais ensaiados, possuindo variações da ordem de mais ou menos 2%. Diante desse aspecto, não há uma representatividade significativa em termos de variação da umidade para os resultados obtidos nos módulos de resiliência.

Também é importante destacar que os valores de MR podem ser influenciados pelo tempo. Nesse contexto, acredita-se que o comportamento apresentado pelos materiais estudados encontram-se efetivamente influenciados pela estabilização interna associados aos efeitos da sucção.

Observando-se todas as Figuras 5.49 a 5.53 em que são apresentados os resultados dos ensaios de módulo de resiliência em função da tensão confinante, é possível verificar que o módulo de resiliência se mostrou crescente à medida que a tensão confinante aumentou. Esse comportamento condiz com o esperado para um solo granular, haja vista que alguns trabalhos já desenvolvidos por Medina & Motta (1988); Oliveira (2007); Gómez (2011) e Carvalho *et al.* (2018) refletiram bem essa tendência em materiais com características semelhantes aos estudados nesta pesquisa.

Ainda analisando as figuras que relacionam o módulo de resiliência com a tensão confinante, nota-se que as equações com um nível de regressão mais próximas de 1 ( $R^2$ ), independente da energia de compactação, constituem-se de uma importante ferramenta na retroanálise de outros valores de

MR, em situações semelhantes as apresentadas. Valores próximos que tendem a 1 representam uma melhor confiabilidade.

Nas Figuras 5.49 a 5.53 são apresentados os gráficos de variação do módulo de resiliência em função da tensão confinante para as três energias de compactação de todas os materiais estudados nesta pesquisa.

Nota-se ainda que os valores de MR estão diretamente relacionados com a energia de compactação aplicada ao corpo de prova e que os MR também variam à medida que o teor de umidade é alterado conforme a mudança da energia de compactação. Para um aumento no teor de umidade há um decréscimo nos valores de MR. Já os valores de MR em relação a sucção tendem a aumentar a medida que a sucção se eleva. Os maiores valores de sucção foram identificados para graus de saturação menores do que 50%.

A relação não linear entre o módulo de resiliência e o teor de umidade, no qual um incremento no teor de umidade resulta em uma diminuição no módulo de resiliência, além de que para a sucção e o teor de umidade também existe uma relação não linear, no qual a sucção tende a diminuir com o aumento de umidade. E, dessa forma, materiais com sucção elevadas tendem a apresentar altos valores de módulo de resiliência foi proposto por Li & Selig (1994) e Jin *et al.* (1994).

Os maiores valores de MR em relação a tensão confinante acontecem para o solo puro devido a boa graduação do material e os elevados valores de sucção que contribuem com o aumento da rigidez da amostra ensaiada. O mesmo não acontece para o rejeito de minério de ferro puro, pois o mesmo é um material essencialmente uniforme, característica essa que diminui o MR e contribui com o decréscimo da rigidez. Para as misturas segundo as imagens do MEV há um preenchimento dos vazios do solo pelo rejeito de minério de ferro até aproximadamente 20% do rejeito, desta forma os vazios são preenchidos elevando a rigidez da mistura e conseqüentemente aumentando os valores de MR. Já para a mistura de 30% de rejeito, os grãos do rejeito em excesso tendem a envolver os grãos de solo, além de que foram identificados a presença de depressões e cavidades no material após a compactação na umidade ótima por meio das imagens do MEV que tendem a piorar o desempenho no comportamento mecânico. E, portanto, este envolvimento das partículas com a presença de depressões e cavidades não contribui com o aumento significativo dos valores de MR.

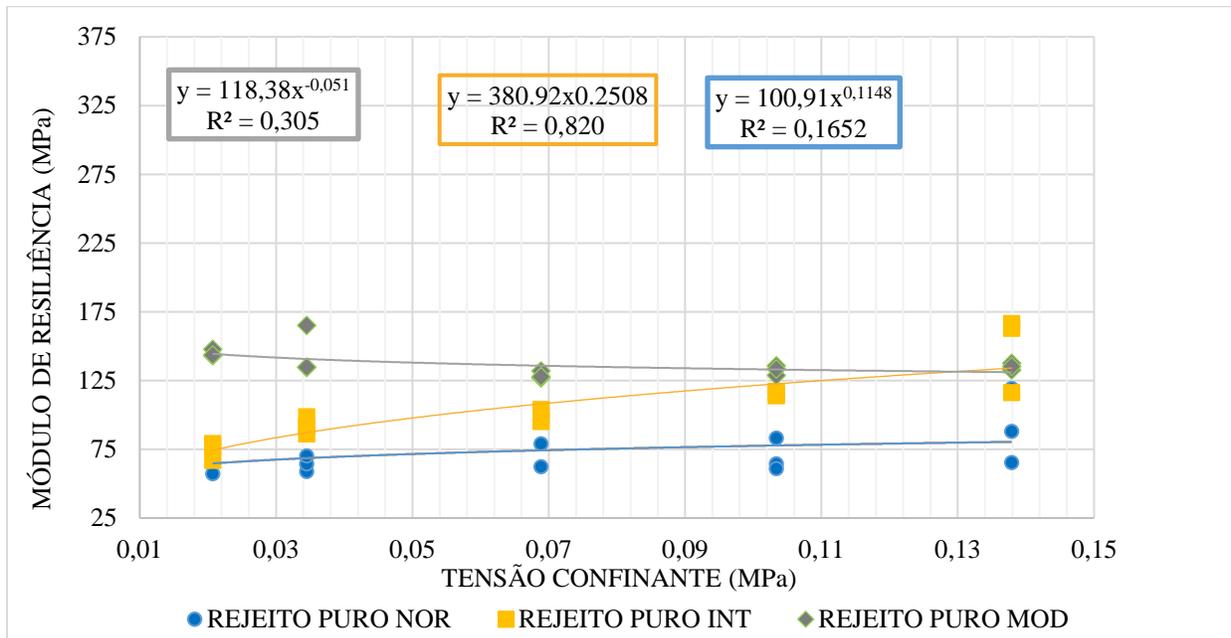


Figura 5.49 – Módulo de Resiliência em função da tensão confinante para o rejeito de ferro puro.

De acordo com a Figura 5.49, o rejeito puro na energia normal alcançou valores de MR da ordem de 57 MPa para uma tensão confinante de 0,02 MPa até MR 86 MPa para uma tensão confinante de 0,13 MPa, atingindo um nível de regressão de 0,165 que é considerado um resultado insatisfatório muito distante de 1. Portanto, o ensaio para o rejeito puro na energia normal não possui confiabilidade. O mesmo acontece para o rejeito puro na energia modificada que alcançou valores de MR da ordem de 143 MPa para uma tensão confinante de 0,02 MPa até MR 137 MPa para uma tensão confinante de 0,13 MPa, atingindo um nível de regressão de 0,305 que também é considerado um resultado insatisfatório muito distante de 1. Portanto, o ensaio para o rejeito puro na energia modificada não possui confiabilidade. Quando o ensaio não possui confiabilidade o mesmo precisa ser repetido, persistindo a baixa confiabilidade, o modelo dependente da tensão confinante utilizado deve ser descartado (Motta, 1991).

Já para o rejeito puro na energia intermediária que variou de MR 77 MPa para uma tensão confinante de 0,02 até MR 130 MPa e uma tensão confinante de 0,13 MPa, o coeficiente de regressão foi de 0,820, sendo considerado uma boa ferramenta de retroanálise com elevada confiabilidade. Segundo Carvalho (2019) o modelo proposto foi considerado satisfatório e com boa confiabilidade quando atingiu constantes de regressão maiores do que  $R^2 = 0,8$ .

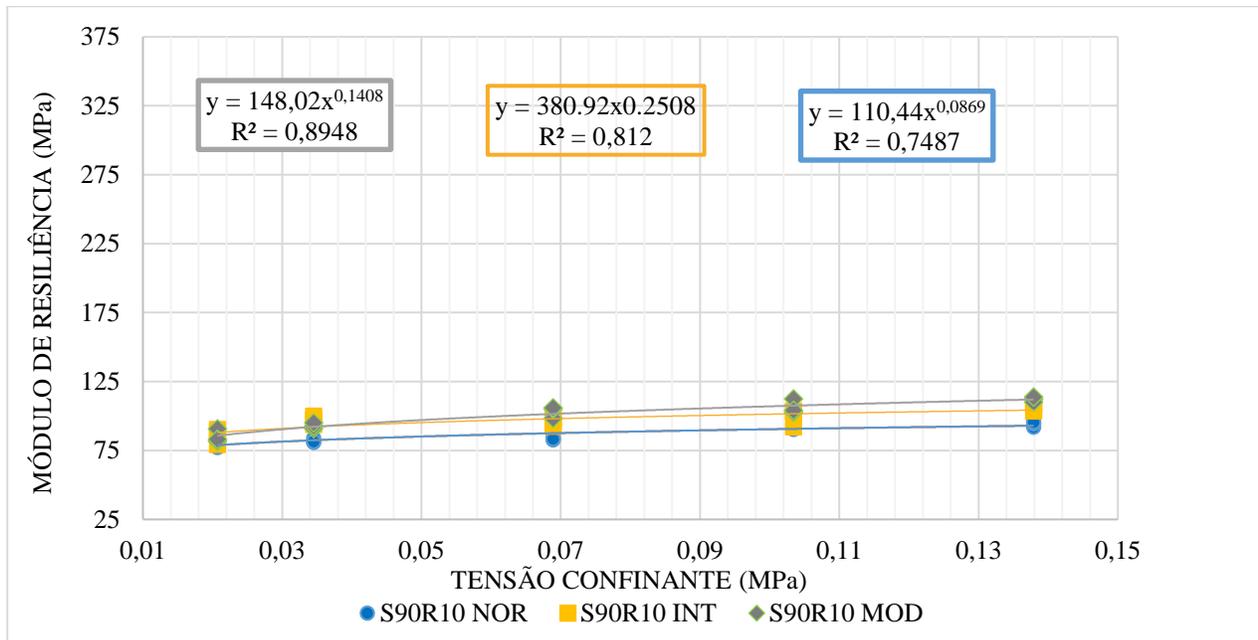


Figura 5.50 – Módulo de Resiliência em função da tensão confinante para a amostra de 10% de rejeito de ferro e 90% de solo.

De acordo com a Figura 5.50, a mistura de 10% rejeito e 90% de solo na energia normal alcançou valores de MR da ordem de 75 MPa para uma tensão confinante de 0,02 MPa até MR 95 MPa para uma tensão confinante de 0,13 MPa, atingindo um nível de regressão de 0,748. Para a mistura na energia intermediária houve uma variação de MR 78 MPa para uma tensão confinante de 0,02 MPa até MR 100 MPa para uma tensão confinante de 0,13 MPa, atingindo um nível de regressão de 0,812. E para a mistura na energia modificada houve uma variação de MR 80 MPa para uma tensão confinante de 0,02 MPa até MR 120 MPa para uma tensão confinante de 0,13 MPa, atingindo um nível de regressão de 0,894. Portanto, para a energia normal o nível de regressão não foi satisfatório. Mas para a energia intermediária e modificada os níveis de regressão foram satisfatórios e próximo de 1. Sendo o melhor ensaio para a energia modificada.

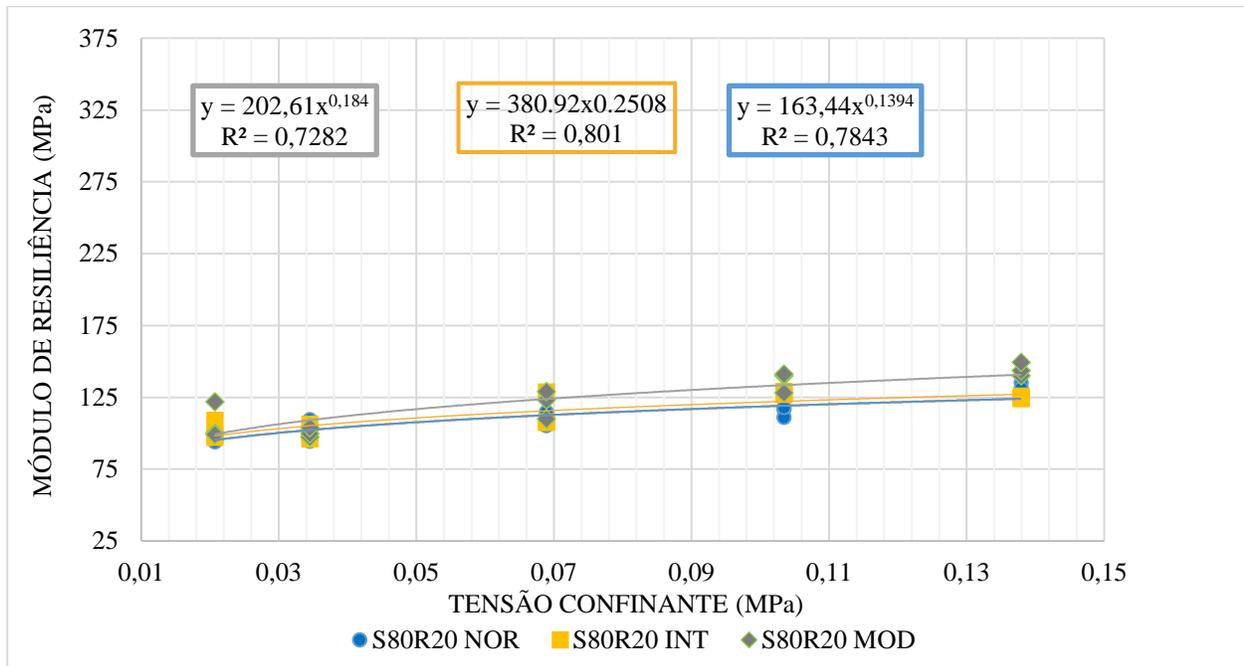


Figura 5.51 – Módulo de Resiliência em função da tensão confinante para a amostra de 20% de rejeito de ferro e 80% de solo.

De acordo com a Figura 5.51, a mistura de 20% rejeito e 80% de solo na energia normal alcançou valores de MR da ordem de 90 MPa para uma tensão confinante de 0,02 MPa até MR 125 Mpa para uma tensão confinante de 0,13 MPa, atingindo um nível de regressão de 0,784. Para a mistura na energia intermediária houve uma variação de MR 92 MPa para uma tensão confinante de 0,02 MPa até MR 130 MPa para uma tensão confinante de 0,13 MPa, atingindo um nível de regressão de 0,801. E para a mistura na energia modificada houve uma variação de MR 95 MPa para uma tensão confinante de 0,02 MPa até MR 140 MPa para uma tensão confinante de 0,13 MPa, atingindo um nível de regressão de 0,728. Segundo Carvalho (2019) apenas o ensaio realizado na energia intermediária atingiu um nível de regressão satisfatório.

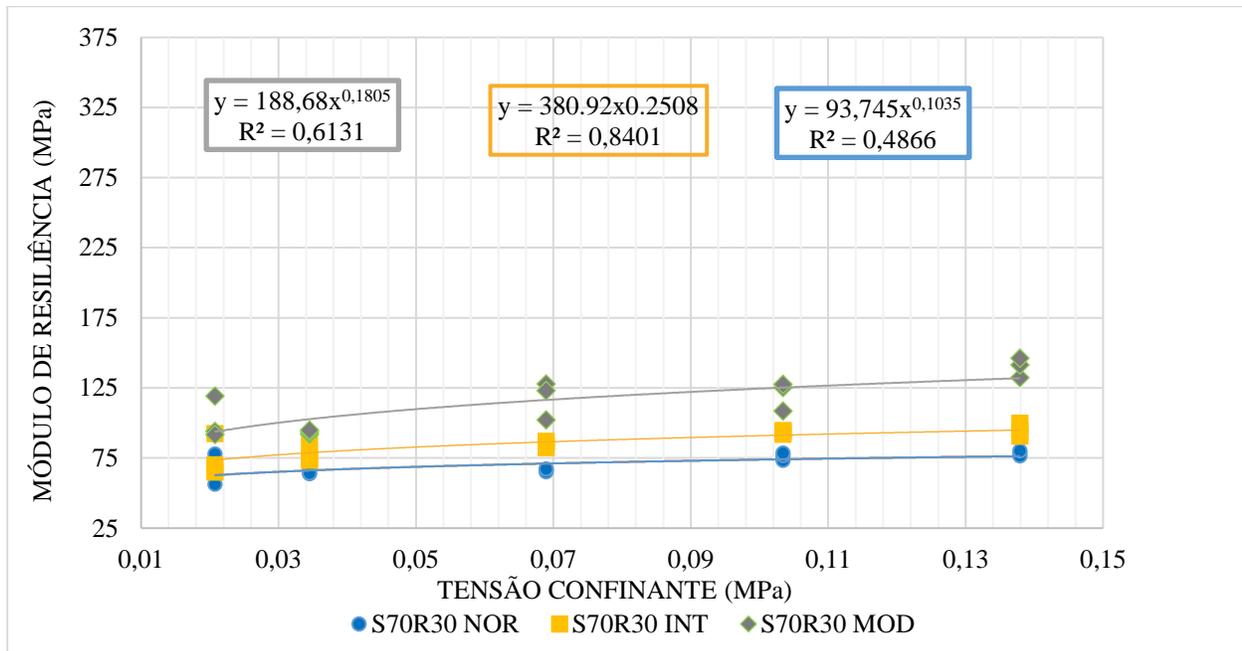


Figura 5.52 – Módulo de Resiliência em função da tensão confinante para a amostra de 30% de rejeito de ferro e 70% de solo.

De acordo com a Figura 5.52, a mistura de 30% rejeito e 70% de solo na energia normal alcançou valores de MR da ordem de 60 MPa para uma tensão confinante de 0,02 MPa até MR 75 MPa para uma tensão confinante de 0,13 MPa, atingindo um nível de regressão de 0,486. Para a mistura na energia intermediária houve uma variação de MR 65 MPa para uma tensão confinante de 0,02 MPa até MR 95 MPa para uma tensão confinante de 0,13 MPa, atingindo um nível de regressão de 0,840. E para a mistura na energia modificada houve uma variação de MR 93 MPa para uma tensão confinante de 0,02 MPa até MR 130 MPa para uma tensão confinante de 0,13 MPa, atingindo um nível de regressão de 0,613. Apenas o ensaio na energia intermediária apresentou um nível de regressão satisfatório.

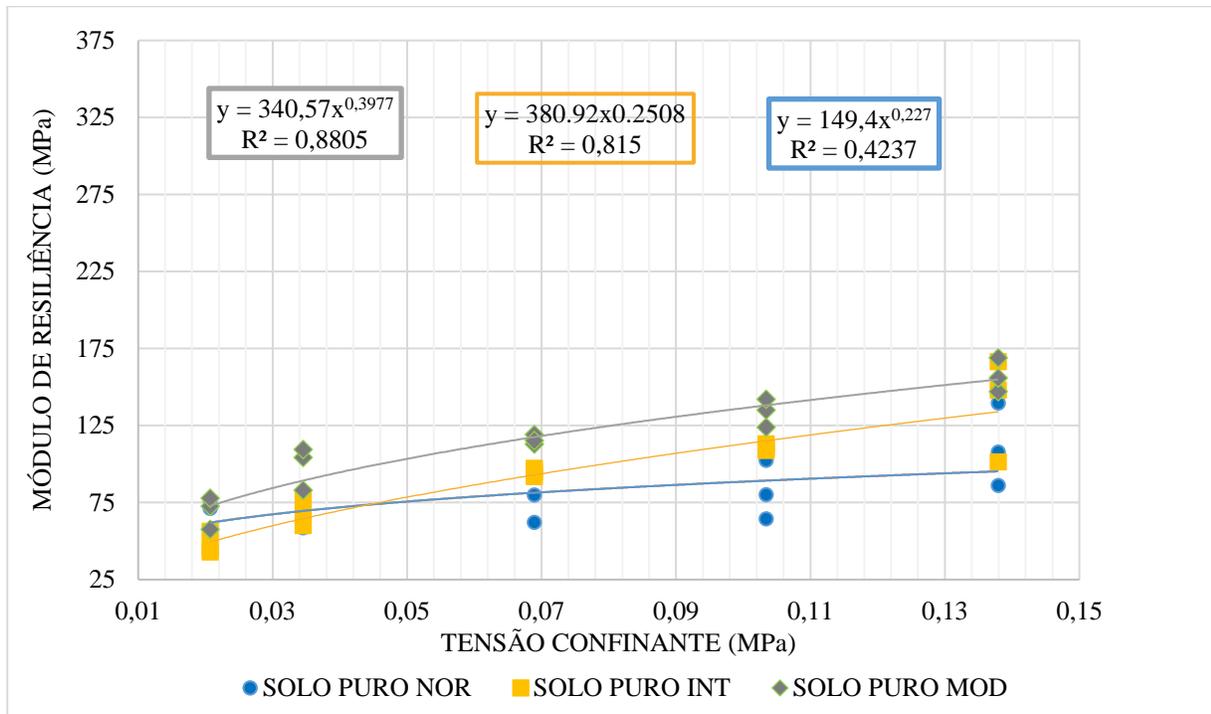


Figura 5.53 – Módulo de Resiliência em função da tensão confinante para o solo puro.

De acordo com a Figura 5.53, o solo na energia normal alcançou valores de MR da ordem de 65 MPa para uma tensão confinante de 0,02 MPa até MR 85 MPa para uma tensão confinante de 0,13 MPa, atingindo um nível de regressão de 0,423. Para a mistura na energia intermediária houve uma variação de MR 50 MPa para uma tensão confinante de 0,02 MPa até MR 130 MPa para uma tensão confinante de 0,13 MPa, atingindo um nível de regressão de 0,815. E para a mistura na energia modificada houve uma variação de MR 75 MPa para uma tensão confinante de 0,02 MPa até MR 150 MPa para uma tensão confinante de 0,13 MPa, atingindo um nível de regressão de 0,880. Os ensaios realizados na energia intermediária e modificada apresentaram níveis de regressão satisfatórios próximos de 1, indicando uma boa confiabilidade (Carvalho, 2019).

Observando-se as Figuras 5.54 a 5.58, que relacionam o módulo de resiliência em função da tensão desvio, torna-se possível verificar que a dependência do módulo de resiliência em função da tensão desvio só é considerada expressiva quando o nível de regressão ( $R^2$ ) tende a 1. Os valores que tendem a zero são considerados pouco expressivos. Embora, possa ser visto um pequeno acréscimo nos valores dos módulos de resiliência à medida que a tensão desvio aumenta. Essa mesma tendência foi relatada por Medina & Motta (1988), para solos granulares, onde esses autores mostraram que o comportamento apresentado por materiais granulares é bastante dependente da tensão confinante aplicada e pouco influenciado pela tensão desvio.

Nas Figuras 5.54 a 5.58 são apresentados os gráficos de variação do módulo de resiliência em função da tensão desvio para as três energias de compactação de todos os materiais estudados nesta pesquisa.

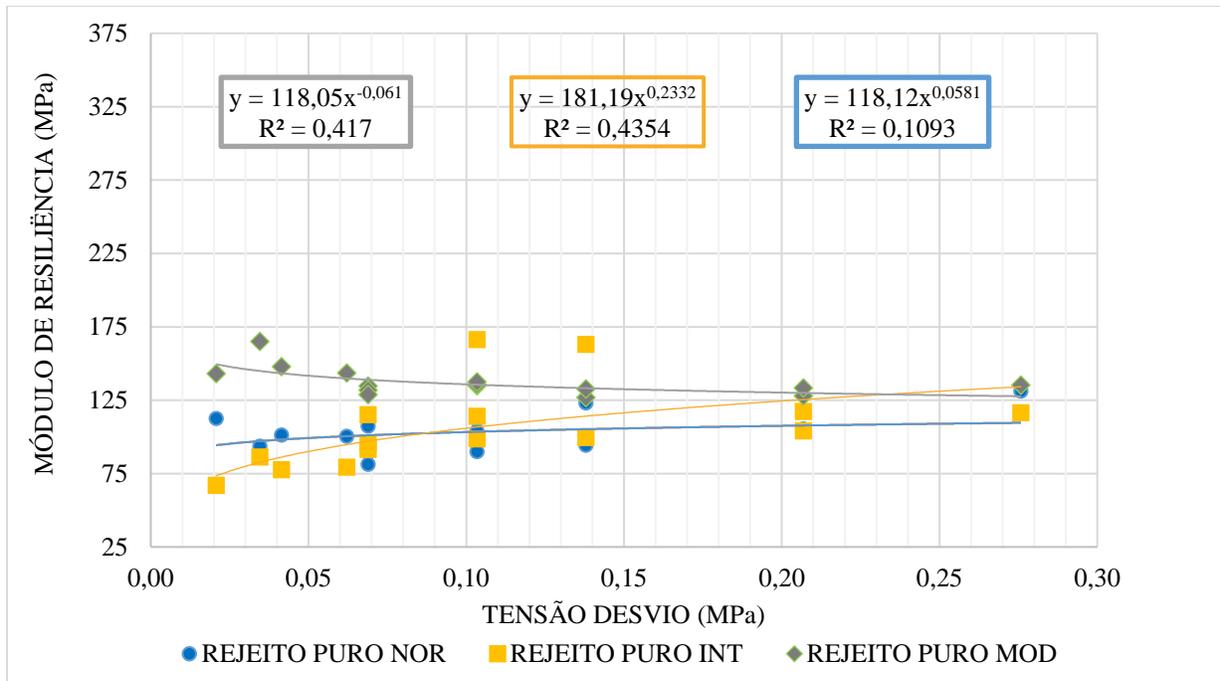


Figura 5.54 – Módulo de Resiliência em função da tensão desvio para o rejeito de ferro puro.

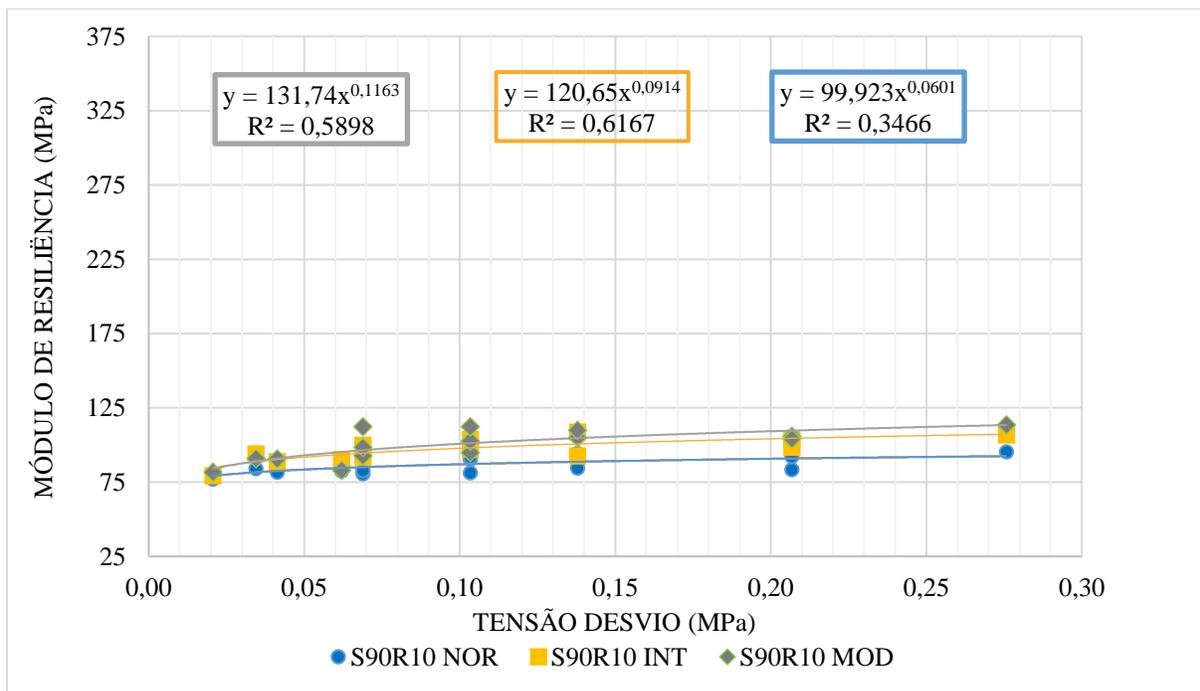


Figura 5.55 – Módulo de Resiliência em função da tensão desvio para a amostra de 10% de rejeito de ferro e 90% de solo.

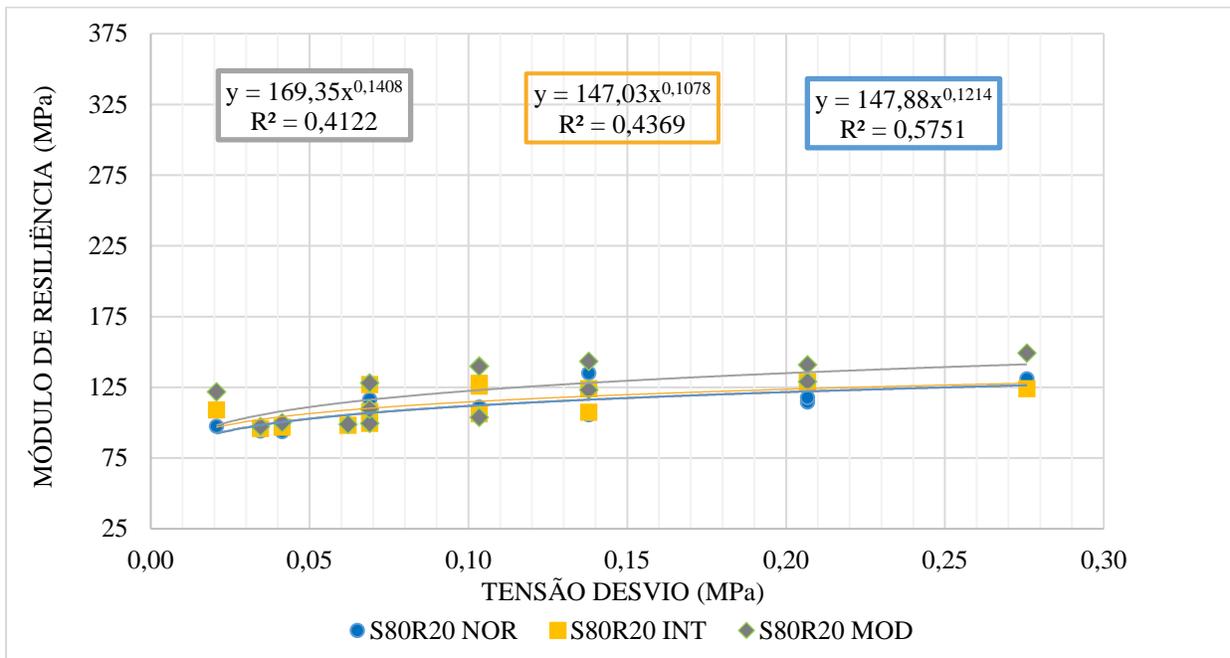


Figura 5.56 – Módulo de Resiliência em função da tensão desvio para a amostra de 20% de rejeito de ferro e 80% de solo.

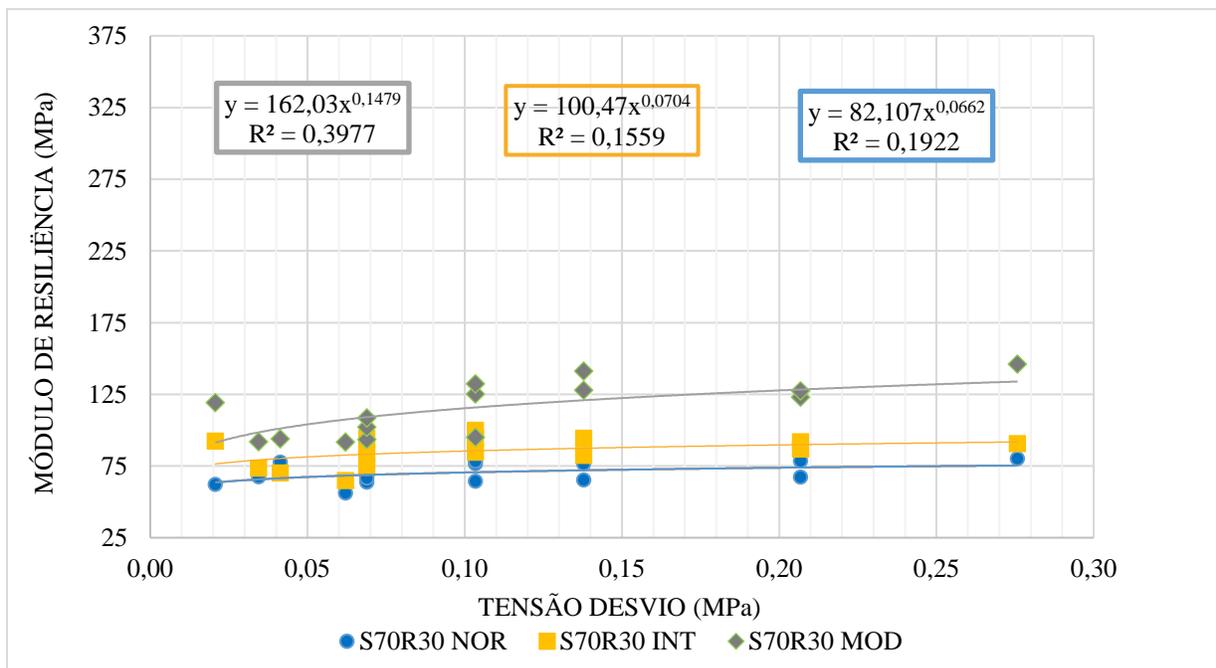


Figura 5.57 – Módulo de Resiliência em função da tensão desvio para a amostra de 30% de rejeito de ferro e 70% de solo.

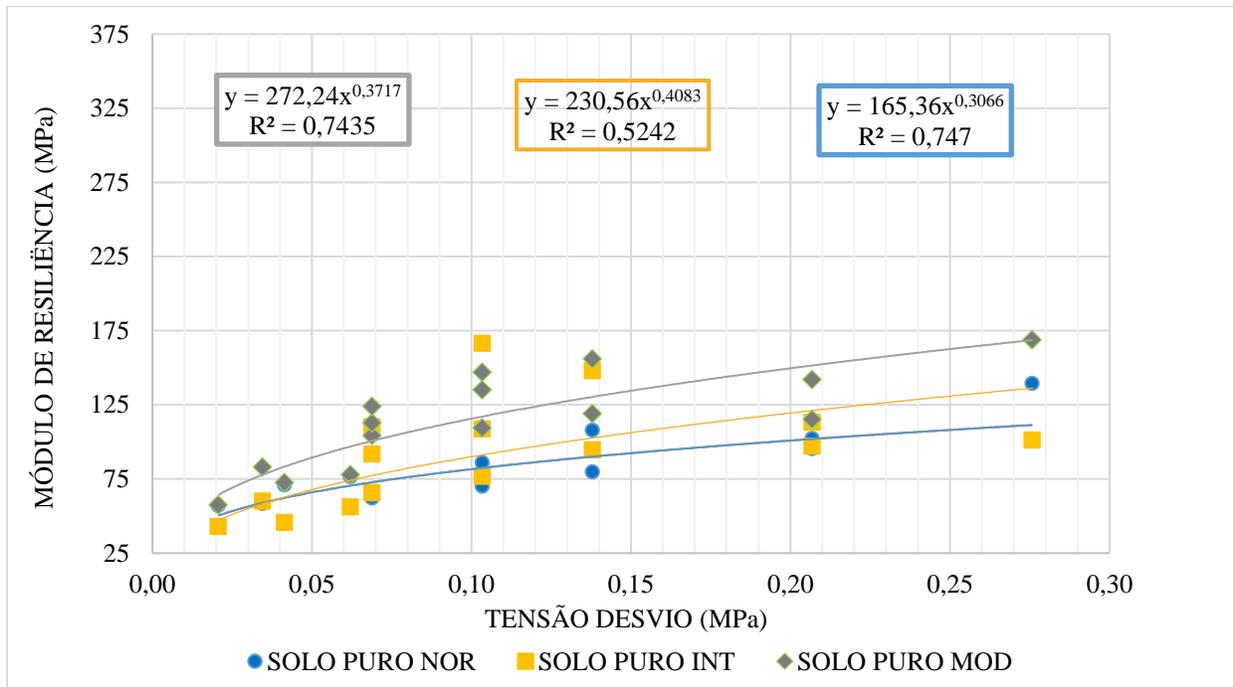


Figura 5.58 – Módulo de Resiliência em função da tensão desvio para o solo puro.

Nota-se ainda que de acordo com as Figuras 5.54 a 5.58 os níveis de regressão para todos os ensaios e todas as energias do rejeito puro e das três misturas apresentaram uma baixa confiabilidade. Comportamento este que significa que os valores de módulo de resiliência sofreram pouca influência da tensão desvio. O comportamento dos solos argilosos está diretamente relacionado com a tensão desvio (Carvalho *et al.*, 2018). Portanto, apesar do rejeito de minério de ferro possuir uma granulometria semelhante à das argilas, o mesmo não se comporta como tal, uma vez que as partículas de sílica devido ao processo de beneficiamento (cominuição) sofreram uma redução significativa do tamanho. As partículas finas do rejeito, embora com tamanhos compatíveis das frações argilas são predominantemente compostas por óxidos de ferro e sílica, como foi observado nas análises mineralógicas, DRX e MEV.

Já para o solo puro os níveis de regressão foram satisfatórios para a energia normal e a energia modificada. Indicando a presença de finos no material, típico de solos bem graduados conforme foi apresentado nos ensaios granulométricos e nas imagens do MEV.

As análises dos dados obtidos nos ensaios de módulo de resiliência forneceram constantes de regressão que permitem afirmar que os materiais estudados se ajustaram bem ao modelo composto. As constantes de regressão obtidas por este modelo estão apresentadas na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Constantes de regressão para os materiais estudados referentes ao modelo composto.

	Normal			Intermediária			Modificada		
	K1	K2	K3	K1	K2	K3	K1	K2	K3
Rejeito 100%	113,658	0,111	0,313	248,346	0,310	0,001	116,186	0,016	0,049
Rejeito 10% + Solo 90%	110,000	0,095	-0,011	126,994	0,050	0,054	149,372	0,0124	0,024
Rejeito 20% + Solo 80%	165,778	0,112	0,037	167,377	0,0128	0,012	203,136	0,179	0,007
Rejeito 30% + Solo 70%	92,874	0,121	0,025	120,935	0,182	-0,066	190,696	0,160	0,028
Solo 100%	167,321	0,012	0,298	384,692	0,504	0,031	362,159	0,281	0,162

No caso do modelo composto a representação do módulo de resiliência é dada por uma superfície contida no espaço tridimensional ( $\sigma_3$ ,  $\sigma_d$ , MR), visto que estes modelos são dependentes da tensão confinante e da tensão desvio. Assim, por meio das superfícies é possível prever o Módulo de Resiliência para diversas combinações de tensão confinante e desvio desejadas (Carvalho, 2019).

Campanha (2011) realizou uma bateria de ensaios na energia normal e na energia intermediária de MR para dois diferentes rejeitos de minério de ferro, de concentração e de flotação, e também constatou que o modelo composto apresentou o melhor desempenho, com níveis de regressão da ordem de  $R^2 = 0,98$  para a energia intermediária.

Carvalho (2019) realizou ensaios de MR para um solo argiloso com diferentes misturas de pó de PET, PET triturado e fibra de PET e constatou que para mistura de materiais o modelo que apresenta o melhor desempenho também é o composto.

Finalizado, os ensaios de módulo de resiliência permitiram observar que o solo puro apresenta valores mais elevados de MR do que o rejeito de minério de ferro puro. Já para as misturas, os melhores resultados de MR foram para a mistura 80% de solo e 20% de rejeito de ferro. Assim, no item 5.6, essa mistura que apresentou o maior valor de MR foi utilizada para o dimensionamento do pavimento flexível apresentado nesta pesquisa.

## 5.6. DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL COM OS MATERIAIS ESTUDADOS

Nos itens são apresentadas os procedimentos e cálculos relativos ao dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizando os resultados dos ensaios de laboratório por meio do Método Empírico, por meio do Método Mecânico-Empírico e Método AASHTO.

### 5.6.1. DIMENSIONAMENTO POR MEIO DO MÉTODO EMPÍRICO

Este método foi desenvolvido pelo Eng.º Murilo Lopes de Souza – Método do DNER, preconizado pelo Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006).

Para o estudo do subleito, os dados foram obtidos por meio de ensaios de caracterização geotécnica física e mecânica em laboratório e correspondem ao solo natural do município estudado. Os ensaios realizados, bem como os valores obtidos para cada ensaio são apresentados na Tabela 5.16. De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006), o solo natural atende às exigências para camadas de subleito, não sendo necessária a aplicação de uma camada de reforço de subleito.

Tabela 5.16 – Valores obtidos dos ensaios laboratoriais para o subleito.

Energia de Compactação	Umidade ótima (%)	ISC (%)	Expansão (%)	LL (%)	IP	%Passa #200
Normal	10,74	30	0,1	24	7	15,52
Intermediária	10,32	37	0,12			
Modificada	9,21	45	0,065			

Para a camada de sub-base, podem ser utilizados, segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006): o rejeito de minério ferro puro na energia modificada (ISC 38%); a mistura 10% de rejeito e 90% de solo nas três energias (normal - ISC=33%, intermediária – ISC=39% e modificada – ISC=53%); a mistura 20% de rejeito e 80% de solo nas três energias (normal - ISC=38%, intermediária - ISC=45% e modificada - ISC=74%); a mistura 30% de rejeito e 70% de solo nas três energias (normal ISC=32%, intermediária - ISC= 40% e modificada ISC=48%); além do solo puro nas três energias (normal - ISC=30%, intermediária - ISC=37% e modificada - ISC=45%).

Para a camada de base, levando-se em consideração tráfego leve, apenas a mistura de 20% de rejeito e 80% de solo pode ser utilizada, pois atende aos requisitos estabelecidos pelo Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006) com valores maiores do que  $ISC > 60\%$ , sendo o valor encontrado de ISC igual a 74% na energia modificada.

Para o dimensionamento de um pavimento hipotético utilizando os materiais estudados, foram levados em consideração os dados a seguir.

Para o estudo do tráfego, o parâmetro de tráfego (número N de repetições de aplicação do eixo padrão de carga) utilizado para subsidiar o projeto de pavimentação foi obtido considerando uma rodovia de tráfego leve, rodovias típicas do município de Jucurutu-RN, como descrito por Amorim (2013), sendo  $N = 3,2 \times 10^6$  e considerando um período de projeto de 10 anos.

Os coeficientes de equivalência estrutural adotados foram:

- Revestimento Betuminoso:  $k_{REV} = 1,7$  e  $H_{REV} = 5,0$  cm;
- Para a camada de base:  $k_B = 1,0$ ;
- Para a camada de sub-base:  $k_{SB} = 1,0$ .

Para a camada de base mais revestimento, a espessura mínima requerida adotada foi  $H_{20} \geq 25$  cm, conforme o Manual de pavimentação do DNIT (DNIT, 2006). Resolvendo-se a inequação pertinente ao método aplicado, obteve-se:

$$H_{REV} \times k_{REV} + H_B \times k_B \geq H_{20} \quad (5.5)$$

Onde:

$H_{REV}$ : espessura do revestimento (cm);

$K_{REV}$ : coeficiente de equivalência estrutural para revestimento;

$H_B$ : espessura da base (cm);

$K_B$ : coeficiente de equivalência estrutural para base;

$H_{20}$ : espessura mínima requerida (cm).

Substituindo-se os valores adotados:

$$5,0 \times 1,7 + H_B \times 1,0 \geq 25 \quad (5.6)$$

Solucionando a inequação, obtém-se  $H_B \geq 16,5$  cm. Adotando-se a espessura múltipla de 5 cm imediatamente superior, especifica-se a espessura de 20 cm para a camada de base. Para a sub-base, de acordo com os valores do ISC da mistura estudada e a espessura mínima requerida,  $H_T = 25$  cm. Resolvendo-se a inequação pertinente ao método aplicado, obteve-se:

$$H_{REV} \times k_{REV} + H_B \times k_B + H_{SB} \times k_{SB} \geq H_T \quad (5.7)$$

Onde:

$H_{REV}$ : espessura do revestimento (cm);

$K_{REV}$ : coeficiente de equivalência estrutural para revestimento;

$H_B$ : espessura da base (cm);

$K_B$ : coeficiente de equivalência estrutural para base;

$H_{SB}$ : espessura da sub-base (cm);

$K_{SB}$ : coeficiente de equivalência estrutural para sub-base;

$H_T$ : espessura mínima requerida (cm).

Substituindo-se na Equação 5.8 os valores adotados, têm-se:

$$5,0 \times 1,7 + 20 \times 1,0 + H_{SB} \times 1,0 \geq 25 \quad (5.8)$$

Consequentemente o  $H_{SB} \geq - 3,5$ . Fisicamente essa espessura não existe e, portanto, não se faz necessário adotar a camada de sub-base. Dessa forma, o pavimento flexível, adotando o dimensionamento por meio do Método Empírico para a pesquisa em questão, apresenta as seguintes espessuras, conforme é apresentado na Figura 5.59.

Revestimento = Betuminoso (Pré misturado a quente) = 5 cm
Base = 20% rejeito + 80% solo = Espessura 20 cm = Energia Modificada
### Subleito ###

Figura 5.59 – Pavimento flexível por meio do Método Empírico para a pesquisa em questão.

O dimensionamento do pavimento flexível, a fim de realizar uma comparação, utilizando apenas o solo natural da região por meio do Método ISC não é possível, uma vez que o solo puro não

atende aos requisitos estabelecidos pelo DNIT para camadas de base.

O pavimento hipotético dimensionado acima corresponde ao pavimento com as menores espessuras conforme os materiais utilizados nesta pesquisa. Entretanto, os materiais utilizados podem ser combinados com outros tipos de materiais (cimento, cal, fibras, brita, outros rejeitos, resíduos sólidos, materiais geossintéticos, etc.) a fim de aumentar os seus valores de ISC e manter os seus valores de expansão, de forma que venham atender os requisitos estabelecidos pelo Manual de pavimentação do DNIT (DNIT, 2006). Além disso, as espessuras das camadas podem aumentar e, conseqüentemente, absorver os esforços provocados pelo tráfego da região. Na Figura 5.60 é apresentado um pavimento flexível genérico com os materiais desta pesquisa que atendem aos requisitos do Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006).

Revestimento = Betuminoso (Pré misturado a quente) = 5 cm
Base = 80% solo + 20% rejeito de minério de ferro = Espessura 20 cm = Energia Modificada Base = Solo utilizado nesta pesquisa combinado com outros materiais a fim de melhorar os valores de ISC e manter os valores de expansão. Espessura = variável
Sub-base = Rejeito de minério ferro puro na energia modificada (ISC 38%) Mistura 90% de solo e 10% de rejeito nas três energias (ISC 33% normal, 39% intermediária e 53% modificada) Mistura 80% de solo e 20% de rejeito nas três energias (ISC 38% normal, 45% intermediária e 74% modificada) Mistura 70% de solo e 30% de rejeito nas três energias (ISC 32% normal, 40% intermediária e 48% modificada) Solo puro nas três energias (ISC 30% normal, 37% intermediária e 45% modificada) Espessura = variável
Reforço do Subleito = Rejeito Puro, Solo Puro, Três Diferentes Misturas (Qualquer energia de compactação) Espessura = variável
### Subleito ###

Figura 5.60 – Pavimento flexível genérico – utilizando valores de ISC.

## 5.6.2. DIMENSIONAMENTO POR MEIO DO MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO

O dimensionamento do pavimento flexível hipotético por meio do Módulo de Resiliência foi realizado utilizando o *software* MEDINA. Para o dimensionamento, foi considerado um pavimento utilizando apenas o solo natural da região, como descrito na Figura 5.61, e um pavimento utilizando a mistura escolhida (20% rejeito + 80% de solo), como descrito na Figura 5.62. Além disso, os dados do tráfego considerado estão apresentados na Figura 5.63.

Revestimento = Betuminoso (Pré misturado a quente); Espessura = 5 cm; Modelo Elástico Linear; $\nu = 0,30$ ; M.R. = 8289 MPa
Base = Solo da região; Modelo Sigma 3; Espessura = Variável; $\nu = 0,45$ ; Energia Modificada
Subleito = Solo da região; Modelo Sigma 3; $\nu = 0,45$ ; Energia Normal

Figura 5.61 – Pavimento flexível considerando apenas o solo natural da região.

Revestimento = Betuminoso (Pré misturado a quente); Espessura = 5 cm; Modelo Elástico Linear; $\nu = 0,30$ ; M.R. = 8289 MPa
Base = 80% solo + 20% rejeito de minério de ferro; Espessura = Variável; Modelo Composto (Misturas); $\nu = 0,45$ ; Energia Modificada
Subleito = Solo da região; Modelo Sigma 3; $\nu = 0,45$ ; Energia Normal

Figura 5.62 – Pavimento flexível considerando a mistura escolhida (20% de rejeito e 80% de solo).

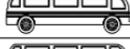
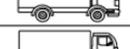
Tipos de Veículos	Horário		9:00	11:00	12:30	15:00	18:00	Total
			7:00	9:00	11:30	13:00	16:00	
Veículos Leves	Autos 		127	131	142	108	93	601
	Caminhonetas 		37	54	31	42	34	198
Ônibus	2C 		3	1	1	3	1	9
	3C 		4	2	2	1	3	12
Caminhões	2C 		4	3	2	-	2	11
	3C 		2	1	2	1	3	9
	2S2 		1	-	1	1	-	3
	3S2 		-	-	1	-	-	1
Total			178	192	182	156	136	844

Figura 5.63 – Dados do tráfego (Amorim, 2013).





Figura 5.66 – Dados do subleito para o pavimento flexível utilizando apenas o solo natural.

As espessuras das camadas para o pavimento hipotético obtidas conforme o *software* MEDINA são apresentadas na Figura 5.67.

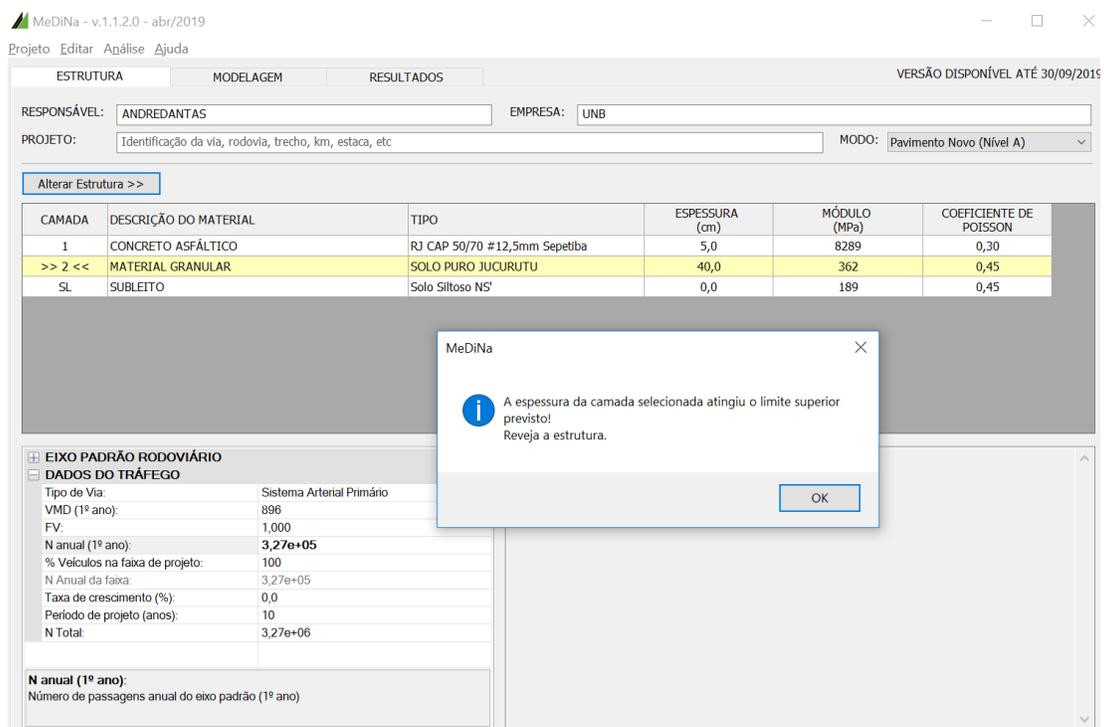


Figura 5.67 – Pavimento dimensionado por meio do *software* MEDINA utilizando o solo natural.

De acordo com o *software* MEDINA, não foi possível dimensionar o pavimento considerando apenas o solo natural da região na camada de base, pois os valores encontrados segundo o módulo de resiliência foram insuficientes para o dimensionamento da camada de acordo com o tráfego utilizado. Conseqüentemente, a espessura da camada atingiu o limite superior previsto pelo programa, com valores maiores do que 40 cm. Nota-se que o resultado do dimensionamento do pavimento fictício para o solo puro por meio do Método Mecanístico-empírico é semelhante ao Método Empírico, em que, nas duas situações, a camada de base não atende os requisitos estabelecidos pelo Manual de pavimentação do DNIT (2006) e o *software* MEDINA, respectivamente.

Ainda segundo a avaliação do *software* para o pavimento calculado, o nível de confiabilidade da análise é de 85%, a área trincada estimada do pavimento no fim do período é 46,9%, além do afundamento de trilho de roda, que é de 1636 mm. Esses valores são calculados automaticamente pelo *software* de acordo com os valores de módulo de resiliência, coeficiente de Poisson e tráfegos inseridos no programa. E, portanto, o programa emite uma alerta para os materiais utilizados no qual informa que o tráfego é elevado para a estrutura proposta, a camada de base apresentou um afundamento de trilho de roda acima do limite de 5%; o subleito apresentou afundamento de trilho de roda acima do limite de 5 mm; e a estrutura ultrapassou o limite de afundamento de trilho de roda para o tipo de via. Então, o solo puro não pode ser utilizado na camada de base para o pavimento proposto.

Da mesma forma, como foi descrito no item acima para aumentar os valores de ISC, também é possível aumentar os valores de MR por meio da combinação de outros materiais (cimento, cal, fibras, brita, outros rejeitos, resíduos sólidos, materiais geossintéticos, etc.), como apresentado na Figura 5.68, incorporados ao solo e, conseqüentemente, no dimensionamento pelo *software* MEDINA, a fim de que a espessura da base seja atendida, a qual é limitada pelo *software* com valores entre 15 cm e 40 cm. Além disso, também é possível aumentar o número de camadas, adicionando outros materiais, conforme apresentado na Figura 5.69.

Revestimento = Betuminoso (Pré misturado a quente); Espessura = 5 cm; Modelo Elástico Linear; $\nu = 0,30$ ; M.R. = 8289 MPa
Base = Solo da região misturado com outros materiais; Modelo Composto; Espessura = Variável; $\nu =$ Variável; Energia Variável
Subleito = Solo da região; Modelo Sigma 3; $\nu = 0,45$ ; Energia Normal

Figura 5.68 – Pavimento flexível considerando na camada de base o solo misturado com outros materiais.



Revestimento = Betuminoso (Pré misturado a quente); Espessura = 5 cm; Modelo Elástico Linear; $\nu = 0,30$ ; M.R. = 8289 MPa
Base = 20% rejeito de minério de ferro e 80% de solo; Modelo Composto; Espessura = 22cm; $\nu =$ Variável; Energia Variável
Subleito = Solo da região; Modelo Sigma 3; $\nu = 0,45$ ; Energia Normal

Figura 5.71 – Pavimento flexível considerando na camada de base a mistura de 20% de rejeito de ferro + 80% de solo.

Portanto, segundo o método MEDINA o solo puro não pode ser utilizado em camadas de base de acordo com os valores de MR encontrados para o tráfego utilizado. Conseqüentemente, o rejeito puro, a mistura de 10% de rejeito e 90% de solo, e a mistura de 30% de rejeito e 70% de solo, também não podem ser utilizadas na camada de base pois tiveram MR inferiores ao solo. A única mistura que pode ser utilizada de acordo com a metodologia é a de 20% de rejeito e 80% de solo apenas na energia modificada na qual atingiu os maiores valores de MR encontrados nesta pesquisa.

### 5.6.3. DIMENSIONAMENTO POR MEIO DO MÉTODO AASHTO

Para o dimensionamento por meio do Método AASHTO foi considerado um pavimento utilizando apenas o solo natural da região e um pavimento utilizando a mistura escolhida (20% rejeito + 80 de solo).

Para o pavimento dimensionado pelo Método AASHTO o valor adotado para  $W_{18}$  (número de solicitações equivalente ao eixo padrão 80 KN/8,2 tf) foi de  $N = 3,2 \cdot 10^6$  que é referente a um tráfego leve, típico do município de Jucurutu-RN. Também foi considerado um período de projeto de 10 anos.

O fator de confiabilidade do projeto adotado foi de 80%, que classifica a rodovia como urbana e local, segundo Balbo (2007). O desvio padrão combinado ( $S_o$ ) tomado como base nas pistas experimentais da AASHTO quando leva em consideração o tráfego futuro é de 0,49. O valor de MR para o subleito foi de 24221 psi.

A variação do PSI, *Present Serviceability Index*, mede a diferença entre o valor de serventia no início das atividades do pavimento ( $p_i$ ) e no final do período ( $p_t$ ). A AASHTO (AASHTO, 1986) adota como valor inicial da serventia, utilizado na Pista Experimental, o valor de 4,2. O valor terminal

( $p_t$ ) varia para diferentes vias, sendo considerado 2 para volume baixo.

O Número Estrutural do Pavimento (SN) o qual tem por objetivo indicar a resistência estrutural do pavimento completo ou das suas camadas foi obtido por meio da Equação 3.12, o qual depende dos coeficientes estruturais ( $a_1 = 0,44$ ;  $a_2 = 0,14$  e  $a_3 = 0,11$ , segundo os valores da pista experimental da AASTHO, 1986), espessura de camadas ( $D_i$ ) e coeficientes de drenagem ( $m_i$ ). Os valores mínimos das espessuras das camadas foram apresentados na Tabela 3.5 e os coeficientes de drenagem na Tabela 3.4. Para a espessura do revestimento foi adotado 9 cm e para a base 15 cm de acordo com o tráfego da região. O coeficiente de drenagem adotado foi de 1,4 que corresponde uma excelente drenagem para todas as camadas (Balbo, 2007). Na Tabela 5.17 está apresentado um resumo com todos os valores mencionados e o valor de SN.

Tabela 5.17 – Resumo para o dimensionamento pelo Método AASHTO e valor de SN.

<i>Design Inputs</i>				
$W_{18} =$	3.000.000		<i>ESALs Applications Over Design Period</i>	
$Z_R =$	80	%	<i>Reliability</i>	
$S_o =$	0,49		<i>Standard Deviation</i>	
$MR =$	24.221	psi	<i>Subgrade Resilient Modulus</i>	
$P_i =$	4,2		<i>Initial Serviceability</i>	
$P_t =$	2		<i>Terminal Serviceability</i>	
	<b>DESIGN SN =</b>	<b>2,44</b>		

Para o cálculo do pavimento foi levado em consideração a camada de revestimento com CAP 50/70, o CAP 50/70 é o material usado na camada de revestimento pela prefeitura de Jucurutu-RN, de 9 cm de espessura (valor mínimo de acordo com o tráfego da região) e a camada de base utilizando o solo natural de Jucurutu-RN na energia modificada e o subleito com o solo natural de Jucurutu-RN na energia normal. Mais uma vez não foi possível realizar o dimensionamento, pois, com os valores do módulo de resiliência encontrados para o solo na energia modificada, a camada de base dimensionada não atingiu a espessura mínima de 15 cm. Na Tabela 5.18 são apresentados os valores para o cálculo do pavimento utilizando o solo natural para a camada de base segundo o Método AASHTO.

Tabela 5.18 - Cálculo do pavimento utilizando o solo natural para a camada de base segundo o Método AASHTO.

					<i>SN Using E of next</i>	<i>Min. Layer Thickness, D,</i>	<i>Practical Layer Thickness, D,</i>		
		<i>Layer</i>	<i>Drainage</i>	<i>Elastic</i>	<i>lower layer in</i>	<i>Thickness, D,</i>	<i>Thickness, D,</i>	<i>Associated</i>	
<i>Layer No.</i>	<i>Description</i>	<i>Coefficient, a<sub>i</sub></i>	<i>Coefficient, m<sub>i</sub></i>	<i>Modulus, psi</i>	<i>inputs box below</i>	<i>inches</i>	<i>inches</i>	<i>SN</i>	
<i>Layer 1</i>	CA 50/70	0,30	1,40	52.503	1,55	3,69	3,69	1,55	
<i>Layer 2</i>	BASE SOLO JUCU	0,45	1,40	24.221	2,10	0,87	0,87	0,55	
<i>Sub-grade</i>	<i>Subgrade</i>	N/A	N/A	24.221	N/A	N/A	N/A	N/A	
					<i>Total Pavement Thickness, inches,</i>			2,10	<i>Calcul. SN</i>
						4,56	4,56	2,44	<i>SN to Match</i>
								<i>Error! Design is not sufficient</i>	

Já para o cálculo do pavimento levando em consideração a mistura de 20% de rejeito e 80% de solo para a camada de base na energia modificada e utilizando o mesmo revestimento (CAP 50/70 com 9 cm de espessura) e o solo natural de Jucurutu-RN na energia normal para o subleito, a mistura também não atingiu o valor mínimo de 15 cm para base com os valores de módulo de resiliência utilizados. Portanto, conforme o dimensionamento pelo Método AASHTO, a mistura com 20% de rejeito e 80% de solo só pode ser utilizada na base para espessuras maiores do que 15 cm. Na Tabela 5.19 são apresentados os valores para o cálculo do pavimento utilizando a mistura 20% de rejeito e 80% de solo para a camada de base segundo o Método AASHTO.

Tabela 5.19 - Cálculo do pavimento utilizando a mistura 20% de rejeito e 80% de solo para a camada de base segundo o Método AASHTO.

					<i>SN Using E of next</i>	<i>Min. Layer Thickness, D,</i>	<i>Practical Layer Thickness, D,</i>		
		<i>Layer</i>	<i>Drainage</i>	<i>Elastic</i>	<i>lower layer in</i>	<i>Thickness, D,</i>	<i>Thickness, D,</i>	<i>Associated</i>	
<i>Layer No.</i>	<i>Description</i>	<i>Coefficient, a<sub>i</sub></i>	<i>Coefficient, m<sub>i</sub></i>	<i>Modulus, psi</i>	<i>inputs box below</i>	<i>inches</i>	<i>inches</i>	<i>SN</i>	
<i>Layer 1</i>	CA 50/70	0,30	1,40	52.503	1,55	3,69	3,69	1,55	
<i>Layer 2</i>	MISTURA 2080	0,45	1,40	29.442	2,10	0,87	5,90	3,72	
<i>Subgrade</i>	<i>Subgrade</i>	N/A	N/A	24.221	N/A	N/A	N/A	N/A	
					<i>Total Pavement Thickness, inches,</i>			5,27	<i>Calculated SN</i>
						4,56	9,59	2,44	<i>SN to Match</i>
								<i>Design is sufficient</i>	

Da mesma forma como foi descrito nos métodos anteriores, é possível aumentar os valores de MR com a combinação de outros materiais (cimento, cal, fibras, brita, outros rejeitos, resíduos sólidos, materiais geossintéticos, etc.) incorporados ao solo e/ou o rejeito. Além disso, também é possível acrescentar outras camadas ao pavimento e, dessa forma, fazer com que os materiais utilizados nesta pesquisa sejam validados conforme o Método AASHTO.

O método AASHTO se mostrou o mais conservador, pois os valores do módulo de resiliência para a mistura de 20% de rejeito e 80% de solo compactados na energia modificada não foram suficientes para que a camada de base fosse aprovada. Portanto, os níveis de confiabilidade do projeto, a diferença entre índices de serventia e a qualidade da drenagem, que não são considerados nos outros métodos, influenciam diretamente no dimensionamento das camadas.

#### **5.6.4. RETROANÁLISE UTILIZANDO O *SOFTWARE* AEMC**

Para a simulação da retroanálise, os dados pertinentes foram retirados e adaptados da pesquisa de Saraiva (2006), na qual o autor estudou o comportamento geotécnico de um rejeito de minério de ferro aplicado na camada de base incorporado a um solo laterítico da região do quadrilátero ferrífero mineiro na construção de um trecho experimental de 300 m. No ensaio de viga Benkelman, a ponta de prova é inserida entre as rodas do eixo traseiro (eixo simples de rodas duplas) do caminhão com 8,2 ton., sendo a carga da roda de 4,1ton. e pneus calibrados com 0,560 MPa.

O *software* de análise de tensões, deformações e deslocamentos utilizado foi o Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC). O AEMC (ferramenta do método MeDiNa), desenvolvido na tese de doutorado de FRANCO (2007), permite a verificação da retroanálise de forma indireta, usando a combinação de módulos de elasticidade das camadas encontrados nas retroanálises, são encontrados os deslocamentos verticais (deflexões) existentes na superfície, sob ação de um carregamento específico em pontos determinados pelo usuário.

Nesta pesquisa, as camadas em estudo foram classificadas como não aderidas, situação mais desfavorável para a retroanálise. De acordo com a Figura 5.72, à esquerda da tela está o tipo de carregamento utilizado, para simular o mesmo carregamento aplicado pelo caminhão, que foi o eixo simples de 8,2t, sendo a carga da roda de 4,1t com uma pressão do pneu de 0,56 MPa (Saraiva 2006). À direita da tela, no quadro pontos de análise e resultados, o eixo Y (sentido do rolamento) foi preenchido com os mesmos pontos do levantamento do eixo do pneu do caminhão se afastando para os lados de acordo com as seguintes distâncias (0, 20, 30, 45, 60, 90, 120cm). A seguir foram

determinadas as bacias deflectométricas pelo processo indireto de retroanálise, obtendo-se os deslocamentos verticais na coluna Uz (deslocamentos no eixo z) e, assim, determinando uma bacia deflectométrica nos mesmos pontos de aplicação do FWD. Na Figura 5.72 estão apresentados os dados do AEMC. Os dados inseridos no *software* correspondem aos dados referentes ao pavimento dimensionado pelo *software* MEDINA para a camada de base com 20% de rejeito e 80% de solo conforme foi apresentado na Figura 5.65.

AEMC v.2.4.1 (jan/2019) - □ ×

Projeto [Ajuda](#)

Estrutura >>

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MASSA ESP (g/cm³)	COMPORTAMENTO	MÓDULO (MPa)	k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	5	2,4	LINEAR	8289	3,0e-13	-3,78	0,0	0,0	0,30	0,0
2	22	2,92	LINEAR	203	203	0,179	0,007	0,0	0,45	0,0
3	0	1,98	LINEAR	167	167	0,012	0,029	0	0,45	0

Tipo de carregamento:

- Eixo padrão rodoviário
- Eixo simples
- Dois eixos simples (direcional)
- Eixo duplo
- Dois eixos duplos
- Dois eixos duplos em tandem
- Três eixos duplos em tandem

**EIXO SIMPLES**

Número de rodas: 2  
 Carga de eixo (ton): 8,2  
 Carga de roda (ton): 4,10  
 Pressão de pneus (MPa): 0,56  
 Ty (cm): 0,00  
 Tx (cm): 0,00  
 Área (cm²): 732,14  
 Raio (cm): 15,27

Tx (cm):  
 Distância entre rodas

Pontos de análise e resultados

Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Ux (µm)	Uy (µm)	Uz (µm)
1	0	0	0	0,00000	0,00000	638,93312
2	0	20	0	0,00000	-34,85428	416,76903
3	0	30	0	0,00000	-25,23975	287,08684
4	0	45	0	0,00000	-12,57652	172,43153
5	0	60	0	0,00000	-6,15910	115,57389
6	0	90	0	0,00000	-1,80737	69,61584
7	0	120	0	0,00000	-0,81133	51,71156
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						

Figura 5.72 - Análise Elástica de Múltiplas Camadas por meio do *software* AEMC.

Os módulos de elasticidade retroanalizados pelo processo indireto determinado pelo AEMC para o trecho da rodovia hipotético considerado nesta pesquisa, são apresentados graficamente na Figura 5.73.

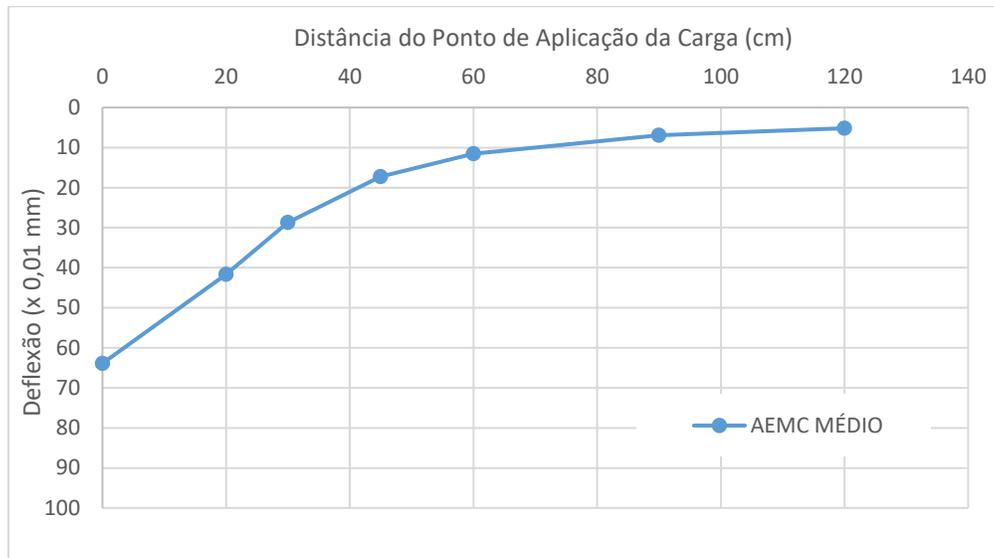


Figura 5.73 - Bacias deflectométricas obtidas pelo método indireto através do *software* AEMC.

A deflexão máxima encontrada é de  $63,89 \times 10^{-2}$  mm e, de acordo com IP-DE-P00/001 (DER-SP, 2006), os deslocamentos verticais recuperáveis de um pavimento representam a resposta das camadas estruturais e do subleito à aplicação do carregamento. Quando uma carga é aplicada em um ponto da superfície do pavimento, todas as camadas fletam devido às tensões e às deformações geradas pelo carregamento, sendo que o valor dos deslocamentos geralmente diminui com a profundidade e com o distanciamento do ponto de aplicação da carga. Dessa forma, é conveniente verificar o valor do deslocamento vertical recuperável máximo da superfície do pavimento, comparando-o com o valor de projeto obtido pelas expressões matemáticas do PRO 011 (DNER, 1979) ou PRO 269 (DNER, 1994), que é função do número “N”. Também é comum denominar o deslocamento vertical recuperável máximo da superfície do pavimento como deflexão. A equação matemática referente é:

$$\log D_{adm} = k - n \times \log N \quad (5.9)$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas para o período de projeto;

k e n: coeficientes determinados por regressões lineares. Em que tem-se:  $k=3,01$  e  $n=0,174$  PRO 011 (DNER, 1979) e  $k=3,148$  e  $n=0,188$  PRO 269 (DNER, 1994).

Portanto, de acordo com a PRO 011 (DNER, 1979) a Deflexão admissível ( $D_{adm}$ ) é de  $75,33 \times 10^{-2}$  e de acordo com PRO 269 (DNER, 1994) a Deflexão admissível ( $D_{adm}$ ) é de  $83,94 \times 10^{-2}$ . E, dessa forma, a deflexão máxima é inferior as deflexões admissíveis, comprovando o potencial uso do rejeito de minério de ferro em camadas de base de pavimentos na proporção de 20% de rejeito e 80% de solo da região estudada. As análises foram baseadas nas avaliações realizadas por Saraiva (2006) que se aproximam de uma condição compatível com os materiais utilizados nesta pesquisa.

### 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Adiante, serão apresentadas as principais conclusões extraídas da presente tese, e em seguida serão feitas sugestões para pesquisas futuras.

#### 6.1. CONCLUSÕES

Diferentemente das grandes mineradoras que extraem e beneficiam minério de ferro nos principais polos mineradores do Brasil, Minas Gerais e Pará. A mina localizada no estado do Rio Grande do Norte, nordeste brasileiro, ainda não alcançou sua maior eficiência, e, conseqüentemente, não consegue atingir um rendimento tão elevado no beneficiamento do minério, podendo-se inferir que grande parte do minério de ferro ainda pode ser encontrado no rejeito.

A Mina do Bonito gera por ano 125 mil toneladas de rejeito que de acordo com esta pesquisa pode se transformar em aproximadamente 190 km de estradas não pavimentadas, aterros rodoviários ou camada de base de uma rodovia pavimentada quando levado em consideração uma camada de 20 cm de espessura e uma faixa de domínio de 10 metros.

Com a reutilização do rejeito e conseqüentemente a diminuição da exploração indiscriminada de novas jazidas de materiais convencionais o meio ambiente será preservado, diminuindo o impacto negativo causado na sociedade, na fauna e na flora da região de Jucurutu-RN, além de preservar os corpos d'água, o lençol freático e o solo da região.

Por meio da metodologia MCT, o rejeito de minério de ferro se comporta como um solo não laterítico, já o solo encontrado na região como uma areia laterítica quartzosa. No geral, os solos lateríticos são excelentes matérias-primas para obras de pavimentação e, quando misturados ao rejeito na proporção de 20 % de rejeito e 80 % de solo, apresentam uma melhora discreta em relação aos parâmetros estudados nesta tese.

De acordo com a caracterização química e mineralógica, o rejeito de minério de ferro puro possui uma composição complexa, que é explicada pela caracterização geológica da região. Também contribui para essa composição complexa a forma como é extraído e beneficiado o minério.

Para o solo da região, na sua composição é encontrado basicamente sílica, óxidos de alumínio e ferro, típico de solos lateríticos. Também foram encontrados na composição do solo uma pequena

quantidade de material típico de uma família lantanídea (terras raras), o que pode indicar a presença de resíduos da construção e demolição no local da retirada das amostras de solos. Entretanto, pela irrelevante quantidade, esse material não influencia no comportamento do solo. Para as misturas, os vazios dos grãos dos solos são preenchidos pelos grãos do rejeito de minério de ferro à medida que o rejeito é incorporado ao solo. Até o valor aproximado de 20% de rejeito, é identificado um aumento na resistência mecânica da mistura. Para proporções maiores que 20% de rejeito o aumento na resistência mecânica passa a ser pequeno e pouco relevante.

De acordo com a caracterização geoambiental realizada por meio do ensaio de solubilização, os resultados foram bastante positivos para todos os elementos químicos estudados, em que todos se apresentaram dentro dos limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004a). Entretanto, o rejeito de minério de ferro ainda deve ser ensaiado para um maior período de tempo e, caso os resultados sejam semelhantes aos obtidos nesta pesquisa para um pequeno período de tempo, o rejeito poderá ser incorporado ao solo da região para fins rodoviários.

De acordo com a caracterização física, o rejeito de minério de ferro puro não é indicado para compor camadas de pavimentos, pois se encontra fora de todas as faixas estabelecidas pelo DNIT 141/2010 – ES para camadas de base estabilizadas granulometricamente e, portanto, esse material puro não garante a estabilidade da camada e, conseqüentemente, provoca a diminuição da vida útil do pavimento. Todavia, o rejeito de minério de ferro puro, segundo os resultados da caracterização física, pode ser usado em movimentos de terra durante a terraplenagem para compor aterro de rodovias, pois apresentou resultados significativos em relação aos critérios estabelecidos pelo Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006).

As misturas se encontram parcialmente dentro da faixa “F”, o que pode acarretar problemas de estabilidade com o passar do tempo, o que pode diminuir a vida útil do pavimento; entretanto, essas misturas apresentaram viabilidade técnica, conforme os ensaios de caracterização física e mecânicos aplicados a pavimentação mencionados nesta pesquisa, para compor camadas do pavimento, além de movimentos de terra durante a terraplenagem para compor aterro de rodovias, conforme foram apresentados no item 5.5.4. Já o solo granular puro se encaixa totalmente dentro da faixa “F” e possui viabilidade técnica para compor as camadas do pavimento, além de movimentos de terra durante a terraplenagem para compor aterro de rodovias.

De acordo com os ensaios mecânicos de compactação Proctor, a utilização da técnica de compactação é essencial em obras de terraplanagem, visando o aumento da resistência dos solos sob a ação de cargas externas, redução de possíveis variações volumétricas, impermeabilização dos solos,

pela redução de coeficiente de permeabilidade, resultante do menor volume de vazios. Por isso, o ensaio de compactação é frequentemente utilizado como técnica de estabilização em estudos de uso de materiais alternativos para melhoria de solos. E por meio dos resultados alcançados nesta pesquisa ficou comprovado que o aumento de energia de compactação contribuiu de forma discreta para o ganho dos parâmetros estudados como Resistência a Compressão Simples, ISC e valores de Módulo de Resiliência.

Para os ensaios de resistência à compressão simples, a escolha deste tipo de ensaio se deu basicamente pela possibilidade de verificação simples do real ganho de resistência das amostras submetidas à adição dos rejeitos de ferro em diferentes proporções, como também do estabelecimento de comparações com o solo laterítico em condições naturais. Os ensaios realizados mostraram que houve um ganho de resistência à compressão simples quando se aumentou a energia de compactação. Entretanto, a adição de rejeito de minério de ferro no solo laterítico não apresentou um ganho significativo da resistência estudada.

De acordo com os ensaios de sucção em relação a resistência à compressão simples, observou-se que, à medida que o rejeito era incorporado ao solo, a sucção aumentou e, conseqüentemente, houve um aumento na resistência da mistura para graus de saturação menores do que 50%, e que depois desse valor a resistência se torna decrescente. As amostras com maiores teores de rejeito apresentaram maiores ganhos de resistências, tendo em vista seu melhor comportamento em consequência do aumento da sucção. Dessa forma, ficou comprovado que a melhor interação solo-rejeito acontece para a mistura de 20% de rejeito e 80% de solo.

Para os ensaios de Módulo de Resiliência, os valores encontrados para o solo puro foram maiores do que o rejeito de minério de ferro puro, pois o solo puro se apresentou como um material mais bem graduado, enquanto o rejeito puro se apresentou como um material mais uniforme. Já para as misturas, os melhores resultados de MR foram para a mistura de 80% de solo e 20% de rejeito de ferro. Essa mistura foi utilizada para dimensionar o pavimento flexível apresentado nesta pesquisa. O ensaio de Módulo de Resiliência é hoje uma importante ferramenta no dimensionamento de pavimentos, pois analisa as propriedades dinâmicas do material, na qual apresenta uma maior confiabilidade em reação ao ensaio de ISC, proporcionando resultados mais seguros.

Em síntese, o desenvolvimento desta pesquisa permitiu avaliar a adição de rejeito de minério de ferro num solo laterítico da região nordeste brasileira e ficou comprovado que a mistura de 20% de rejeito de minério de ferro e 80% de solo possui viabilidade técnica para ser utilizada em camadas de base de pavimentos e todas as misturas podem ser utilizadas em camadas de sub-base.

Para os pavimentos dimensionados por meio do método do DNIT, MEDINA e AASHTO, os respectivos valores foram: de 20 cm para a camada de base e 5 cm para a camada de revestimento; 22 cm para a camada de base e 5 cm para a camada de revestimento; e, no mínimo, 15 cm para a camada de base e no mínimo 9 cm para a camada de revestimento. O método AASHTO se mostrou o mais conservador, pois os valores do módulo de resiliência para a mistura de 20% de rejeito e 80% de solo compactados na energia modificada não foram suficientes para que a camada de base fosse aprovada segundo o método. Portanto, fica validado que os parâmetros relacionados as tensões dinâmicas, nível de confiabilidade do projeto, diferença entre índices de serventia e a qualidade da drenagem, influenciam diretamente no dimensionamento do pavimento.

Para a retroanálise do pavimento por meio do *software* AEMC, a deflexão máxima foi inferior as deflexões admissíveis estabelecidas pela PRO 011 (DNER, 1979) e PRO 269 (DNER,1994). E, portanto, o rejeito de minério de ferro em camadas de base de pavimentos na proporção de 20% de rejeito e 80% de solo possui viabilidade mecânica para ser utilizado.

## 6.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Uma vez que as análises realizadas nesta pesquisa encontram-se limitadas ao programa experimental proposto com fins voltados para aplicação em camadas de base e sub-base, a partir de misturas de um rejeito de minério de ferro e um solo laterítico da região nordeste brasileira e posteriormente com os resultados alcançados, foi elaborado e analisado um trecho de uma rodovia hipotética pelos métodos DNIT, MEDINA e AASTHO, além de simular por meio da retroanálise com o *software* AEMC desenvolvido por Franco (2007) a determinação da compatibilidade entre tensões, os deslocamentos e as camadas do pavimento. Há a possibilidade de novos estudos com o rejeito de minério de ferro, o solo laterítico, além de outros rejeitos e também outros solos. Portanto, os seguintes tópicos são sugeridos para pesquisas futuras:

- Estudar proporções diferentes das misturas solo-rejeito com aplicação voltada para uso em obras rodoviárias, diminuindo a faixa de variação granulométrica das misturas e possíveis enquadramentos nas faixas preconizadas nas normas do DNIT;
- Interpretar de forma mais aprofundada as particularidades do rejeito, como mineralogia, forma dos grãos, rugosidade e fragilidade;
- Realizar o estudo com misturas que se encaixem completamente dentro de uma das faixas de “A” a “F” do DNIT;
- Realizar o estudo das misturas com solo de outras regiões com o mesmo rejeito e diferentes rejeitos da mineração no Rio Grande do Norte e no Brasil;
- Avaliar a viabilidade do emprego do rejeito de minério de ferro in natura ou reciclado como fíller incorporado a misturas asfálticas na camada de revestimento;
- Avaliar o emprego do rejeito de minério de ferro puro estabilizado quimicamente com diferentes porcentagens de cimento, cal e aditivos para camadas de base e sub-base;
- Realizar ensaios geoambientais de solubilização com longos períodos de tempo para avaliar o

comportamento do rejeito a longo prazo e para fins de ganho de conhecimento sobre a mobilidade dos metais contidos no rejeito, é indicado que seja realizado ensaios de lixiviação;

- Executar um trecho experimental com os materiais utilizados nesta pesquisa e posteriormente monitorar o trecho a curto, médio e longo prazo;

- Estabelecer parcerias entre Universidades, Setor Público e Privado, Mineradoras por meio de convênios como instrumento de cooperação para viabilização de projetos e trechos experimentais e o consequente monitoramento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

AASHTO (1986). *Guide for Design of Pavements Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA.

AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavements Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA.

AASHTO (1999). **T-307 - Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA.

AASHTO (2008). *MEPDG-1 Mechanistic Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA.

AASHTO (2014). *Guide for Design of Pavements Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT (2016). **NBR 7181 - Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016. 16p.

\_\_\_\_ABNT (1987). **NBR 7217 - Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, RJ, 3p.

\_\_\_\_ABNT (1984). **NBR 6508 - Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984. 8p.

\_\_\_\_ABNT (1988). **NBR 10838 – MB-2887. Solo - Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática**. Rio de Janeiro, RJ, 4p.

\_\_\_\_ABNT (2004a). **NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação**. Brasil.

\_\_\_\_ABNT (2004b). **NBR 10.007: Amostragem dos resíduos sólidos**. Brasil.

\_\_\_\_ABNT. (2004d). **NBR 10.006: Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Brasil.

\_\_\_\_ABNT. (2012c). **NBR 12253 - Solo-cimento: Dosagem para emprego como camada de pavimento: Procedimento**. Rio de Janeiro, RJ.

\_\_\_\_ABNT (1995). **NBR 13292 - Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante**. Rio de Janeiro, 1995, 8p.

\_\_\_\_ABNT (2016). **NBR 6459 - Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016. 9p.

\_\_\_\_ABNT (2016). **NBR 7180 - Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016, 7p.

\_\_\_\_ABNT (2016). **NBR 7185 - Solo - Determinação da massa específica aparente, in situ, com emprego do frasco de areia**. Rio de Janeiro, 2016, 12p.

\_\_\_\_ABNT (2016). **NBR 7182 - Solo - Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016. 13p.

\_\_\_\_ABNT (2016). **NBR 9895 - Solo - Índice de Suporte Califórnia - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2016. 17p.

\_\_\_\_ABNT (1992). **NBR 12770 – Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada**. Rio de Janeiro, 1992. 4p.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2016). **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2016**. Rio de Janeiro.

AHMED, I.; LOVELL, C. W. (1992). *Use of waste materials in highway construction: state of the practice an evaluation of the selected waste products*. *Transportation Research Record*, 1345, Transportation Research Board: Washington, D.C., U.S.A., 1-9.

ALBERS, A. P. F.; MELCHIADES, F. G.; BALBO, J. B.; BOSCHI, A. (2002). **Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X**. *Cerâmica* 48 (305) Jan/Fev/Mar.

ALECRIM, A.V.; FABRI, G.T.P. (2005). **Utilização de rejeitos de quartzito em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis**. In: 36ª Reunião Anual de Pavimentação, 2005, Curitiba, - PR. 1-10p.

ALMEIDA, G. B. O.; CAVALCANTE, E. H.; CASAGRANDE, M. D. T. (2017). **Aplicabilidade da Inserção de Escória de Cobre Jateada em Misturas de Solo-Cimento para Camadas de Base de Pavimentos**. *REVISTA PAVIMENTAÇÃO*, v. 46, p. 36-51.

ALCOCK. (1950). *Rammed Earth Technique In West*. *Housing and town and country planning Bulletin N. 4*. United Nation Organization.

ALECRIM, A.V. (2009). **Estudo do resíduo de quartzito foliado para o emprego em estruturas de pavimentos**. São Paulo. 168p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

AMORIM, E. F. (2013). **Viabilidade Técnica de Misturas de Solo-RCD em Camadas de Base de Pavimentos Urbanos. Estudo de Caso: Município de Campo Verde – MT**. Tese de Doutorado. Publicação G.TD-090/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 151p.

AMORIM, E. F.; LIMA, L. R. (2018). **Emprego de Resíduos de Borracha em Pavimentação Asfáltica: Uma Revisão Bibliográfica**. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Ano 03, Ed. 07, Vol. 02, pp. 39-47, Julho. ISSN:2448-0959.

ANDRADE, L. C. R.; MARQUES, E. A. G.; PEIXOTO, R. A. F. (2017). **Perspectivas para o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro como materiais de construção**. *Revista Geografias*, p. 32-44.

ANGELIM, L.A.A. (2007). **Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte**. CPRM - Serviço Geológico do Brasil.

ANM – Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral 2009**. Brasília, 2009.

ANM – Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral 2015**. Brasília, 2015.

ANM – Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral 2016**. Brasília, 2016.

ANM – Agência Nacional de Mineração. **Informe Mineral – 1º/2017**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br>>. Acesso em: 15 jun.2019.

ARAÚJO, W. E. L. (2008). **Aproveitamento de resíduos da extração de micaxisto em pavimentos flexíveis**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Univ. Federal de Goiás, Goiânia, Brazil, 1–142 (in Portuguese).

ASTM - American Society for Testing and Materials. (2001). **D4972 - Standard test method for pH of soils**.

\_\_\_\_\_. **ASTM (2010). D5298 - Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper**.

AUBERT, G. (1964). *Extrait des Actes et Comptes Rendus du V Congrès International de la Science du Sol, Léopoldville, 16-21 août 1954, Volume I, pp. 103-118. Les Sols Latéritiques PAR (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, France)*.

AUTRET, P. (1983). *Latérites et graveleux latéritiques. Institut des sciences et des Techniques de l'équipement et de l'environnement pour le développement. Études. Laboratoire Central des Pontes et Chaussées.*

**BALANÇO MINERAL BRASILEIRO. (2001).** Ministério de Minas e Energia. Ano base 2001.

BALBO, J. T. (2007). **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração.** Oficina de Textos, São Paulo.

BASTOS, L. A. C.; SILVA, G. C.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. (2016). *Using Iron Ore Tailings from Tailing Dams as Road Material. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 04016102, p. 1-9. ISSN 0899-1561.*

BEHAK, L. (2013). **Análise estrutural de pavimentos de baixo volume de tráfego revestidos com solo modificado com cal considerando ensaios laboratoriais e monitoramento de trechos experimentais.** 266p. Tese – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2013.

BENTO, P.F. (2006). **Uso de Cal e Fibra na Melhoria de Materiais para Utilização em Estruturas de Pavimentos.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 132p.

BIGARELLA, J. J., BECKER, R. D. & PASSO, E. (1996). **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais.** Editora da UFSC, Florianópolis, SC, vol. 2, 875p.

BISSACOT, L. C. G. (2014). **Caracterização geoquímica de rejeitos de mineração de ouro como contribuição à gestão ambiental e ao projeto de fechamento da mina.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 90 p.

BORBA, S. M. C. (1981). **Estudo das Propriedades Químicas e Mineralógicas dos Solos Vermelhos Tropicais do Norte e Nordeste do Brasil.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

BORJESSON, J.; ISAKSSON, M.; MATTSSON, S. (2003). *X-ray fluorescence analysis in medical sciences: a review. Acta Diabetologica, v. 40, n. 1, p. S39-S44.*

BORTOLETO, G. G. (2007). **Desenvolvimento de Métodos Analíticos Usando Espectrometria de Raios-X e Quimiometria.** Tese de Doutorado. Campinas – SP.

BOURGEON G.; GUNNELL Y. (2005). *La latérite de Buchanan. Étude et Gestion des Sols, Volume 12, 2, - pages 87 à 100.*

BOURLEGAT, F. M. (2010). **Disponibilidade de metais em amostras de fosfogesso e fertilizantes fosfatados utilizados na agricultura.** Dissertação de mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, Brasil, 87 p.

BUITRAGO, N D. T.; OLIVEIR, V. H. S.; RIBEIRO, L. F. M.; CAVALCANTE, A. L. B. (2016). **Análise da Viabilidade do Uso de Açobrita em Pavimentos Rodoviários.** In: XVIII Congresso Brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica, COBRAMSEG, 2016, Belo Horizonte.

BURGOS, J.F. (2016). **Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados.** Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM- 272/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 149 p.

CAI XIA. (2000). *Advance in Applying Iron Tailings as Building Material. Edited by Metal mine Vol. 10 (2000), P. 45-47*

CALLISTER JR, W. D. (2002). **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** LTC (Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.) 5ª edição, Rio de Janeiro – RJ.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2015). **Notas de aula: Geotecnia de solos tropicais.** Universidade de Brasília.

Brasília.

CAMAPUM DE CARVALHO, J., GUIMARÃES, R.C., CARDOSO, F.B.F. & PEREIRA, J.H.F (1996). **Proposta de uma nova metodologia para ensaio de sedimentação**. 30º Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Salvador, BA, 2:520-531.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & LEROEIL, S. (2000). **Modelo de normalização da curva característica**. 32a Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Brasília, DF, 1: 96-106.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & PEREIRA, J.H.F. (2002). *Une approche pour la description des proprétés des sols non saturés*. Unsaturated Soils, Jucá, de Campos & Marinho (eds), Recife, Brazil, 2:501-506.

CAMAPUM DE CARVALHO, J., LEROUEIL, S. (2004). **Curva Característica de Sucção Transformada**. Revista Solos e Rochas, São Paulo, SP, 27 (3), p. 231-242.

CAMPANHA, A. (2011). **Caracterização de Rejeitos de Minério de Ferro para Uso em Pavimentação**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa. 86p.

CARDOSO, S.H. (1988). **Estudo de deformações resilientes de solos lateríticos da região de Brasília**. 23a Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Florianópolis, SC, 1:203-219.

CARDOSO, F.B.F (1995). **Análise química, mineralógica e micromorfológica de solos tropicais colapsíveis e o estudo da dinâmica do colapso**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-026A/95, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 140p.

CARDOSO, F.B.F. (2002). **Propriedades e comportamento mecânico de solos do Planalto Central Brasileiro**. Tese de Doutorado G.TD-009A/02. Doutorado em Geotecnia, UnB, 351p.

CARVALHO, B. V.; CASAGRANDE, M. D. T.; VELLOSO, R. Q.; FARIAS, M. M. (2018). **Avaliação do comportamento mecânico de solo argiloso com inserção de politereftalato de etileno (PET) para aplicação em base de pavimentos**. In: XIX Congresso Brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica, COBRAMSEG, Salvador.

CARVALHO, B. V. (2019). **Avaliação do comportamento resiliente de solo argiloso com inserção de politereftalato de etileno (PET) para aplicação em base de pavimentos**. Orientadora: Raquel Quadros Velloso; Coorientadora: Michéle Dal Toé Casagrande.

CASAGRANDE, M. D. T.; VIZCARRA, G. O. C. ; MOTTA, L. M. G. (2013). **Aplicabilidade de Cinzas de Incineração de Resíduo Sólido Urbano em Camadas de Base de Pavimentos**. Geotecnia (Lisboa), v. 129, p. 43-71.

CHAVAN, M. A. J. (2013). *Use of plastic waste in flexible pavements*. *International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management*, v. 2, n. 4, p. 540-552.

CIENFUEGOS, F.; VAITSMAN, D. (2000). **Análise Instrumental**. Rio de Janeiro: Interciência, p. 606.

COLEMAN, J.D., FARRAR, D.M. (1964). *The Moisture Characteristics, Composition and Structural Analysis of a Red Clay Soil From Nyeri – Kenya*. *Geotechnique*, 14:3.

CONCEIÇÃO LEITE, F.; MOTTA, R. S.; VASCONSELOS, K. L.; BERNUCCI, L. (2011). *Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements*. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 6, p. 2972-2979.

CÓRDOBA, R. E. (2014). **Estudo do potencial de contaminação de lixiviados gerados em aterros de resíduos da construção civil por meio de simulações em colunas de lixiviação**. 2014. 340 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Departamento de Hidráulica e Saneamento, São Carlos, SP.

COSTA, C. G. (2006). **Incorporação do resíduo do beneficiamento de caulim em concreto asfáltico**. Dissertação

de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

COUTINHO Neto, B. (2000). **Redes neurais artificiais como procedimento para retroanálise de pavimentos flexíveis**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 119p.

CRUZ, C. P. (1996). **100 Barragens Brasileiras, Casos Históricos, Materiais de Construção Projeto**. Oficina de Textos, São Paulo, 330 p.

DANTAS, A. A. N. (2015). **Caracterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação**. 88p. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

DE OLIVEIRA, T. M.; GENEROSO, F. J.; DA SILVA, T. O.; SANT'ANNA, G. L.; SILVA, C. H. C. (2019). *Geomechanical properties of mixtures of iron ore tailings improved with Portland cement. Acta Scientiarum. Technology, v. 41, p. e38038.*

DEGEO. Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: <<http://www.degeo.ufop.br/laboratorios/microlab/mev.htm>>. Acesso em: 08 set. 2018.

DELGADO, A. K. C. (2002). **Influência da Sucção no Comportamento de um Perfil de Solo Tropical Compactado**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 200p.

DELGADO, A. K. C. (2007). **Estudo do Comportamento Mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na Pavimentação Rodoviária**. Tese de Doutorado, G.TD-044/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 391p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO. (2006). **DER/SP IP-DE-P00/001: INSTRUÇÃO DE PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO**. São Paulo.

*DIRECTION DES ETUDES GENERALES ET DE LA NORMALISATION – DEGN. (1984). Pour l'Utilisation en Corps de Chaussée de Graveleux Latéritiques Naturels. République du Cameroun. Recommandation, Edition provisoire.*

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **ME 258 – Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-MCV**. Rio de Janeiro, 1994. 16p.

\_\_\_\_DNER (1979). **PRO 011/79 – Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis – Procedimento “B”**. Rio de Janeiro, 16 p. 4

\_\_\_\_DNER (1994). **PRO 269/94 – Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis – Tecnapav**. Rio de Janeiro, 17 p.

\_\_\_\_DNER (1994c). **ME 131 – Solos – Determinação do módulo de resiliência**. MT – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Norma Rodoviária, Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, 8p

\_\_\_\_DNER (1994): Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **ME 256: Determinação de perda de massa por imersão em água - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro. 6p.

\_\_\_\_DNER (1994): Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **ME 258: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini – MCV, Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 1994a. 14p.

\_\_\_\_DNER (1996b). **Manual de pavimentação**. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico – IPR/DNER, 320 p.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2006). Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 3.ed. - Rio de Janeiro, 278p.

- DO NASCIMENTO, R. S. de M. P.; SKORUPA, A. L. A.; PASSOS, L. P.; MARQUES, J. J. (2014). **Extração e fitodisponibilidade de zinco e chumbo em latossolo tratado com resíduos de siderurgia**. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, Recife: UFRPE, v.9, p.322-329.
- DUBOIS, V.; ABRIAK, N. E.; ZENTAR, R.; BALLIVY, G. (2008). *The use of marine sediments as a pavement base material*. Waste Management, v. 29, p. 774 – 782, 2008.
- DUNCAN, J.M., MONISMITH, C.L., WILSON, E.L. (1968). *Finit element analysis of pavements*. Highway Research Board, HRB-228, USA.
- DU, J., HU, L., LIN, Z. (2018). *Experimental Study on Physical and Mechanical Properties of Iron Tailing Materials*. GSIC 2018, Proceedings of GeoShanghai 2018. Shanghai, China.
- ELLIOT, R.P. (1992). *Selection of subgrade modulus for AASHTO flexible pavement design*. Transportation Research Record, USA, vol. 1354, 39-44.
- ESPÓSITO, T.J. (2000). **Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 363 p.
- FABBRI, G. T. P. (1994). **Caracterização da Fração Fina de Solos Tropicais Através da Adsorção de Azul de Metileno**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
- FADANELLI, L. A.; WIECHETECK, G. K. (2010). **Estudo da utilização do lodo de estação de tratamento de água em solocimento para pavimentação rodoviária**. Revista de Engenharia e Tecnologia, p 31 – 37.
- FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G.; FOSTER, M. (2014). **Geotechnical engineering of dams**. URS Australia, Sydney, Australia. – 2nd edition.
- FERNANDES, W. D. (2016). **Análise comparativa entre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Brasil e o método AASHTO**. Dissertação – Universidade Federal de Santa Maria.
- FERNANDES, P. G. P. S.; VALOURA, L. V.; ESPINDOLA, A. C.; CIRIACO, T. G. M. (2017). **Estudo comparativo dos métodos empírico do dner e mecanístico-empírico pelo sispav aplicado a rodovia br-316**. XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Recife, 2017.
- FILHO, J. N. S; DA SILVA, S. N.; SILVA, G. C.; MENDES, J. C. (2017). *Technical and environmental feasibility of interlocking concrete pavers with iron ore tailings from tailings dams*. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 29, n. 9.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATION - FAO. (2006). *A Framework for International Classification, Correlation and Communication*. World Reference Base for Soil Resources, World Soil Resources Reports. Rome, 103. ISSN 0532-0488.
- FRANCO, F. A. C. D. P. (2007). **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. Rio de Janeiro, 2007. XXI, 294p., 29,7cm, (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil)
- FRANCO, F. A. C. P. (2018). **Análise Elástica de Múltiplas Camadas. Manual de Utilização**. Versão 2.4. Rio de Janeiro, 2018.
- FREDLUND, D.G. & XING, A. (1994). *Equation for the soil-water characteristic curve*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 31, p. 521-532.
- FONSECA, L. F. S. (2013). **Análise das Soluções de Pavimentação do Programa CREMA 2ª ETAPA do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**. Dissertação de mestrado PEC/ COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

- FUJII, L. M. T.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2013). **Estudo de um Solo Tropical, RCD, Cal Virgem e Cal Hidratada**. In: 6º Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos, 2013, Cuiabá - MT. Geocentro 2013 - 3º Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região Centro-Oeste / 6º Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos. Cuiabá - MT: KCN Editora, 2013. v. Único. p. 295-300.
- GABR, A. R.; MILLS, K. G.; CAMERON, D. A. (2013). **Repeated Load Triaxial Testing of Recycled Concrete Aggregate for Pavement base Construction**. *Geotechnical and Geological Engineering*, v.31, p. 119.
- GHIO, A.J; KENNEDY, T.P.; SCHAPIRA, R.M.; CRUMBLISS, A.I.; HOIDAL, J.R. (1990). **Hypothesis: is lung disease after silicate inhalation caused by oxidant generation**. *The Lancet*, Vol. 336 (8721), pp.967-969.
- GIDIGASU, M.D. (1974). **Identification of Problem Laterite Soils in Highway Engineering: A review**, *Transportation Research Record*, 497, 96-111.
- GIDIGASU, M. D. (1976). **Laterite soil engineering pedogenesis and engineering principles**. Elsevier scientific publishing company, Amsterdam, 554 p.
- GÓMEZ, A. M. J. (2011). **Estudo Experimental de um Resíduo de Construção e Demolição (RCD) para Utilização em Pavimentação**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.TM-196/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília - DF. 148p.
- GOUVES, R. P. H. (1991). **Le Panda: Pénétrômetre dynamique léger à energie variable pour la reconnaissance de sols**. *Université Blaise Pascal*.
- GRATÃO, L. S.; PEREIRA, E. L.; RIBEIRO, L. F. M. (2006). **Utilização de um rejeito de mineração como alternativa para estabilização de um solo tropical da região Centro-oeste**. II GeoJovem, Friburgo.
- HERRADOR, R.; PEREZ, P.; GARACH, L.; ORDÓÑEZ, J. (2012). **Use of recycled construction and demolition waste aggregate for road course surfacing**. *Journal of Transportation Engineering*, v. 138, n. 2, p. 182-190.
- HORONJEFF, R. (1962). **Planning and Airports**, MacGraw-Hill Book Co., New York.
- HUANG, Y.; BIRD, R. N.; HEIDRICH, O. (2007). **A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, n. 1, p. 58-73.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Cidade do Brasil, 2018. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/jucurutu/historico>>. Acesso em: 13 abril 2018.
- IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. Informações sobre a economia mineral brasileira 2015. Brasília, 2015. Disponível em: < <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005836.pdf>>. Acesso em: 04 nov.2017.
- IMTEAZ, M. A. (2012). **Possible environmental impacts of recycled glass used as a pavement base material**. *Waste Management & Research*, v. 30, n. 9, p. 917 – 921.
- INGUNZA, M.P.D.; GERAB, A.T.F.S.C.; MURILO, F. (2014). **Avaliação de rejeito de mineração de feldspato com vistas ao seu uso em construção civil**. In: XXXIV Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental, Monterrey.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. (1999). **Industrial and environmental applications of nuclear analytical techniques**. Vienna: IAEA.
- IPEA: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. (2012). **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas - Relatório de Pesquisa**. Brasília, DF.
- ISTED. (1990). **Utilisation des Graveleux Latéritiques en Technique Routière**. Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et de l'Environnement pour le Développement, Paris. France. ISSN 0989-64241.
- ISTED & LCPC. (1983). **Latérites et Graveleux Latéritiques**. Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement

*et de l'Environnement pour le Développement & Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris. France. ISSN 0989-64241.*

JENKINS, R. (1999). *X-Ray Fluorescence Spectrometry. Second edition. New York: Wiley.*

JONES, M.P. & WITCZAK, M.W. (1977). *Subgrade modulus on the San Diego test road. Transportation Research Record, vol. 641, 1-6.*

KALOUSH, K. E.; RODEZNO, M. C. (2011). **Diretrizes para implementação do guia de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos (MEPDG) para a concessionária Nova Dutra.** Relatório ANTT. ASU. Tempe, AZ, EUA.

KIEHL, E. J. (1979). **Manual de Edafologia: Relações Solo-Planta.** Editora Agronômica “CERES”, Ltda, São Paulo, SP, 262p.

KOPPERMAN, S.; TILLER, G.; TSENG, M.T. (1985). *Elsym5 Interactive Microcomputer Version: User Manual IBM-PC and Compatible Version – FHWA – Final Report DTFH 61-85 – C – 00051.*

KUMAR, P.; SHARMA, S. K. (2013). *Prediction of Equivalency Factors for Various Subbase and Base Courses. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 25, No. 10, October 1. © ASCE, ISSN 08991561/2013/10-1357-1365.*

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, LABORATORIO DE ENGENHARIA DE ANGOLA, LABORATORIO DE ENSAIOS DE MATERIAIS E MECÂNICA DOS SOLOS. (1959). **As Lateritas do Ultramar Português.** Ramos, Afonso & Moita, Ltda. Lisboa, Portugal.

LAWAL A. (1981). *Réflexions sur les études routières dans les pays sahéliens. Travail de fin d'études ENTPE effectué au LCPC.*

LECOMTE-NANA, G.L.; E. LESUEUR, J.P.; BONNET, G. LECOMTE. (2008). *Characterization of a lateritic geomaterial and its elaboration through a chemical route. Construction and Building Materials. ELSEVIER. N. 23, 1126–1132.*

LI, D.; SELIG, E. T. (1994). *Resilient modulus for fine grained subgrade soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v.120, n.6, p. 939-957.*

LI, H. B. (2014). *Experimental Research on Performance of Road Base with Cement Stabilized Iron Tailings Sand. In: Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, p. 60-64.*

LIMA, M. (2003). **Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas.** Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Faculdade de tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, DF, 336 p.

LIMA, G. F. de. (2013). **Avaliação da eficácia da proposta de classificação universal para solos lateríticos aplicada a três solos do nordeste brasileiro.** Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande.

LIU, X.; XU, L. J. (2011). *Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci. Edit., 26 (2): 335-338. <https://doi.org/10.1007/s11595-011-225-1>*

LOPES, L. S. E.; MALKO, J. A. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; MOTTA, L. M. G. (2015). **Análise do Comportamento de um Solo Estabilizado com Cinzas de Carvão Mineral para Aplicação em Camadas de Base de Pavimentos.** REVISTA PAVIMENTAÇÃO, v. 36, p. 63-82.

LYON ASSOCIATES INC. (1971). *Une Etude Géotechnique pour Agence pour le Développement International, Les Sols Latéritiques et d'Autres Sols Difficiles d'Afrique. Baltimore, Maryland, U.S.A. Building & Road Research Institute.*

MAHLER, C.F; MOTTA, L.M.G. (1982). **Comentários sobre a aplicação do método de elementos finitos à análise de pavimentos.** 26a Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Brasília, DF.

- MAHMOOD, A. A.; MULLIGAN, C. N. (2010). *Investigation Of The Use Of Mine Tailings For Unpaved Road Base, Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy: 12, 11*. Disponível em: <https://scholarworks.umass.edu/soilsproceedings/vol12/iss1/1>.
- MAIGNEIN, R. (1966). *Review of Research Laterites*. Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-mer. Paris. United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Place de Fontenoy, Paris-7. Printed by Vaillant-Carmanne, Liège.
- MARSAL, R.J.; RESÉNDIZ D.R. (1975). *Earth and Earth-Rock Dams (in Spanish)*. Limusa, Ciudad de Mexico, Mexico, 38 p.
- MARTINS, T.A.; SANTOS, A.A. (2012). **Caracterização física, química e mecânica de resíduo de beneficiamento de feldspato e quartzo, visando aplicação em pavimentos**. In: Curso de Engenharia Civil da UNESC.
- MEDEIROS, M. A.; LUZ, T. E. B. ; DANTAS, A. A. N.; COSTA, V. P. (2016). **Levantamento quantitativo de resíduos oriundos da mineração no estado do Rio Grande do Norte para potencial uso em obras rodoviárias**. VII Simpósio Brasileiro e V Conferência Sul-americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens, Belo Horizonte.
- MEDINA, J. (1997a). **Mecânica dos Pavimentos**. Ed. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 380p.
- MEDINA, J. (1997b). *Tropical soils and climates in pavement mechanics studies. International Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, Almeida (Ed.), Balkema, Rotterdam, 103-115*.
- MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. (1988). *Design of Asphalt Pavements Using Lateritic Soil in Brazil. Revista Solos e Rochas, vol. 11, número único, 3-9*
- MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. (1997). **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos de baixo volume de tráfego**. I SINBATRA – I Simpósio Internacional de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego. Rio de Janeiro, I: 190-199.
- MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. (2015) **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª Edição. Editora UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil. 570 p.
- MELO JÚNIOR, A. S. **Análise quantitativa do material particulado na região de campinas através das técnicas de microfluorescência de raios-X e reflexão total usando radiação síncrotron**. Tese (Doutorado em Química) - Unicamp, Campinas, São Paulo, 2007.
- MILLER, W. P. (1981). Tese de Doutorado, *Virginia Polytechnic Institute and State University, USA. (Diss. Abstr. 81 - 21504)*.
- MHAG MINERAÇÃO S.A. **Visão Geral**. Disponível em: <<http://www.mhag.com.br>>. Acesso em: 15 de outubro 2016.
- Mineração Tomaz Salustino S.A. (2013). **História**. Disponível em:< <http://minabrejui.com.br/site/historia/>>. Acesso em: 25 abril. 2016.
- MOH, ZA-CHIEN; MAZHAR, M.F. (1969). *Effects of Method of Preparation on Index Properties of Lateritic Soil. Proceeding of the Specialty Session. Engineering Properties of Lateritic soils. VII ICSMFE, volume 1, Asian Intitute of Technology, Bangkok, Thailand*.
- MOTTA, L. M. G. (1991). **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas**. Tese de Doutorado. COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1991.
- MOTTER, L.; KETTL, E. (2015). **Gerenciamento de resíduos sólidos (SGA) em uma indústria de papel cartão no oeste catarinense**. Revista Tecnológica. 2(1): 288-301.
- NAGATA, N.; BUENO, M. I. M. S.; PERALTA-ZAMORA, P. G. (2001). **Métodos Matemáticos para Correção de**

**Interferências Espectrais e Efeitos Interelementos na Análise Quantitativa por Fluorescência de Raios-X.** Química Nova, v. 24, n. 4, p. 531-539, 2001.

NEWILL, D. (1961). *A Laboratory Investigation of Two Red Clays From Kenya. Geotechnique, London, Volume 2.*

NÓBREGA, M.T. (1991). **A estabilização dos solos tropicais com adição de cal para fins rodoviários.** Associação Brasileira de produtores de cal, boletim n.15, 116p.

*NIGERIAN GENERAL SPECIFICATIONS (1997). Roads and Bridges. Federal Ministry of Works, Abuja, Nigeria.*

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1995). **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos.** Brasil. Ed. Vilibor, São Paulo, SP, 213p.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D.F. (2000). **Nova Conceituação do Coeficiente c' da Classificação Geotécnica MCT.** 30a Reunião Anual de Pavimentação, Brasília – DF, 1: 33-41.

NOVAIS, F. H.; MEIRELES, J.M.F. (1972). **Influência nas Propriedades Geotécnicas de Solos Lateríticos, do Umedecimento e da Temperatura.** Laboratorio de Engenharia de Angola, N. 164, pp 251-259.

OLIVEIRA, J. C. (2007). **Indicadores de Potencialidades e Desempenho de Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Pavimentos Flexíveis.** Tese de Doutorado, Publicação G.TD-049/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília - DF. 167p.

PAGNUSSAT, D. T. (2004). **Utilização de escória granulada de fundição em blocos de concreto para a pavimentação.** 2004. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

PELLISSON, N. D.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; SILVA JÚNIOR, C A. P.; FONTENELE, H. B. (2015). **Avaliação de desempenho pelo MEPDG: o efeito da variação de espessuras de pavimentos flexíveis.** *The Journal of Transport Literature.* 20-24, 2015.

PEREIRA, E.L. (2005). **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 185 p.

PEREIRA, A. R. S. (2016). **Análise comparativa de duas indústrias de cerâmica vermelha na região do Vale do Assú.** Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016, Natal – RN, Brasil. 02p.

PINTO, C. S. (2006). **Curso básico de mecânica dos solos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. (2004). **IP- 05 - Dimensionamento de pavimentos flexíveis tráfego meio pesado, pesado, muito pesado e faixa exclusiva de ônibus.**

PRESA, E.P.(1982). *Deformabilidade de las Arcilas Expansivas bajo Succión Controlada.* Tese Doutorado, E. T. S. de Ing. de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

PREUSSLER, E.S.; MEDINA, J.; PINTO, S. (1981). **Resiliência de solos tropicais e sua aplicação à mecânica dos pavimentos.** Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, COPPE/UFRJ – CNPq - ABMS, Rio de Janeiro, 2:591-614.

QUEIROZ DE CARVALHO, J.B. (1987). **Análise da Microestrutura de Solos Lateríticos do Brasil.** 22a Reunião Anual de Pavimentação, Maceió, 1: 373-382.

QUINTANS, A. L. L. (2008). **Estudos das propriedades físicas, mecânicas e químicas/mineralógicas de um solo arenoso fino laterítico (SAFL) utilizado na pavimentação do complexo aeroportuário da Grande Natal-RN/NE.** Dissertação de Mestrado. UFCG. Orientador: John Kennedy G. Rodrigues.

RAURET, G.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, J.F.; SAHUQUILLO, A.; DAVIDSON, C.; URE, A.; QUEVAUVILLER, P.

(1999). *Improvement of the BCR 3-step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials*. *J. Environ. Monit.* 1:57–61.

REZENDE, L.R. (1999). **Técnicas Alternativas para a Construção de Bases de Pavimentos Rodoviários**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 178p.

REZENDE, L.R. (2003). **Estudo do Comportamento de Materiais Alternativos Utilizados em Estruturas de Pavimentos Flexíveis**. Tese de Doutorado. Publicação GTD 014/03. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 372p.

REZENDE, L. R.; SILVEIRA, L. R.; ARAÚJO, W. L.; LUZ, M. P. (2013). *Reuse of Fine Quarry Wastes in Pavement: A Case Study in Brazil*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 122, p. 131205055109001.

RODRIGUES, J. K. G. (2010). *Rationalisation de L'utilisation de Sols Lateritiques en Plateformes de Chaussees Durables et de Faible Cout*. *Rapport Stage Pos-Doctorale*. LCPC, Paris.

SADIKI, A.; FALEH, A.; NAVAS, A.; BOUHLASSA, S. (2009). *Using magnetic susceptibility to assess soil degradation in the Eastern Rif, Morocco*. *Earth Surface Processes and Landforms*, Malden, v. 34, n. 15, p. 2057-2069.

SANCHEZ, P. N. (2015). **Avaliação da Aplicabilidade de Canga de Minério de Ferro na Estabilização de dois Solos para Camadas de Pavimento**. Rio de Janeiro: UFRJ/ ESCOLA POLITÉCNICA, 2015, XVI, 107 p.

SANTOS, H. L.; JÚNIOR, J. M.; MATIAS, S. S. R.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. (2011). **Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em uma vertente**. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v. 6, n. 4, p. 710-716.

SANTOS, T. G. (2018). **Reaproveitamento de rejeitos de mineração de ferro e ouro com base em uma caracterização tecnológica e ambiental**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109p.

SARAIVA, S. L. C. (2006). **Metodologia e Análise Experimental do Comportamento Geotécnico da Estrutura de Pavimentos Rodoviários**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 123p.

SAS, W., GLUCHOWSKI, A., RADZIEMSKA, M., DZIECIOL, J., SZYMANSKI, A. (2015). *Environmental and Geotechnical Assessment of the Steel Slags as a Material for Road Structure*. *Journal Materials* 2015, 8, 4857-4875; doi:10.3390/ma8084857.

SCHELLMANN, W. (2009). **An Introduction in Laterite**.

SEGALIN, P. (1964). *Le fer dans sols*. *Directeur de Recherches de l'O.R.S.T.O.M. P A R I S*.

SENÇO, W. (2008). **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo. Ed. PINI. Volume 1, 2ªed. Ampl – 761p.

SHARMA, A. K., SIVAPULLAIAH, P. V. (2016). *Strength development in fly ash and slag mixtures with lime*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement* 169 August 2016 Issue G13 Pages 194–205 .Paper 1400024. Published online 06/05/2016.

SIKALI, F. (1979). *Caractéristique et Comportement élastoplastique d'une Latérite pour son Utilisation en Couche de Chaussée*. *Thèse – Master's degree – Yaoundé*.

SILVA, R. G. O (2011). **Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro**. Dissertação apresentada ao Programa de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto/MG, 2011.

SILVA, J. A. A.; RODRIGUES, J. K. G.; DE CARVALHO, M. W.; LUCENA, L. C. F. L.; CAVALCANTE, E. H. (2017). *Mechanical performance of asphalt mixtures using polymer-micronized PET-modified binder*. *Road*

*Materials and Pavement Design JCR*, v. 1, p. 1-9.

SKOOG, D.A.; HOLLER, F.J.; NIEMAN, T. A. (2009). **Princípios de Análise Instrumental**, 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, p. 31-36; p. 317-342, 2009.

SOUZA, M.L. (1979). **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. MT - DNER - Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ, 35 p.

SOUZA, M. L. (1981). **Pavimentação Rodoviária**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos: DNIT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 361p.

SOUZA, M. L. (1979). **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis**. 3ª Edição. Rio de Janeiro. IPR, 1981 (IPR Publicação 667).

SOUZA JÚNIOR, I. G.; GRANEMANN, I.; SARAIVA DA COSTA, A. C.; VILAR, C. C.; HOEPERS, A. (2010). **Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná**. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 40, n. 3, p. 513-519.

SOUZA JÚNIOR, J. G. (2018). **Aplicação do Novo Método de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos a Trechos de Uma Rodovia Federal/ José Geraldo de Souza Júnior**. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

SREEKUTTY, S.; JACOB, K. (2016). *Experimental study on iron ore tailings and bottom ash as fine aggregates in concrete*. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. ISSN: 2278-0181. Vol. 5 Issue 09.

TARDY, Y. (1993). *Péetrologie des Latérites et des Sols Tropicaux*. Masson, Paris, 459.

TEIXEIRA, W., MOTA, M. C. T., FAIRCHILD, T. R., TAIOLI, F. (2000). **Decifrando a terra**. Oficina de textos. São Paulo. 558 p.

TERZAGHI, K. (1958). **The Design and Performance of the Sasumua Dam**. I.C.E. Volume 9.

TOFFOLO, R. V. M.; SANT'ANA, F. J. N.; BATISTA, J. O. S.; SILVA, S. N.; CURY, A. A.; PEIXOTO, R. A. F. (2014). **Viabilidade técnica de elementos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de barragem de minério de ferro**. In: Anais do 56º Congresso Brasileiro Do Concreto - CBC2014 – 56CBC.

TOWNSEND, F.C.; MANKE, P.G.; AND PARCHER, J.V. (1969). *Effect of Remolding on the Properties of a Lateritic Soil*. *H.R.R. N.284*.

*USEPA-Method 1312, (1994). Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP)*. disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/1312.pdf>. (Acesso em maio de 2019).

VALLERGA, B.A. (1960). *Engineering study of laterite and soils in connection with construction of roads, hgwys and airfields*. *U.S. Agency Inst. Dev. AID/CSD, 1810*.

VANAPALLI, S.K.; Fredlund, D.G. & Pufahl, D.E. (1999). *The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristic of a compacted till*. *Géotechnique 49, n.2, p.143159*.

VARGAS, M. (1982). **O Uso dos Limites de Atteberg na Classificação dos Solos Tropicais**. VII Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia de Fundações, Olinda/Recife, Brasil. Volume 5.

VIANA, F.L.E. (2014). **Considerações sobre a Indústria de Fabricação de Cimento**. Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste, Ano VIII, n.5, 17p.

VILLIBOR, D.F.; NOGAMI, J.S.; BELIGNI, M.; CINCERRE, J.R. (2000). **Pavimentos com solos lateríticos e gestão de manutenção de vias urbanas**. Associação Brasileira de Pavimentação/ Universidade Federal de Uberlândia, São Paulo, SP, 138p.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. (2009). **Pavimentos Econômicos: Tecnologia do Uso dos Solos Finos**

**Lateríticos.** São Paulo, Brasil. Arte & Ciência. ISBN 9788561165345.

VUONG, B. T.; ARNOLD, G. (2006). ***Predicting in-service performance of alternative pavement materials for New Zealand conditions.*** Land Transport New Zealand Research Report 304, ISBN 0-478-20716-X, ISSN 1177-0600, New Zealand.

WANG, X.S. & QIN, Y. (2007). ***Leaching Characteristics of Heavy Metals and As from Two Urban Roadside Soils.*** Environ Monit Assess, 132: 83-92

WANG, G., THOMPSON, R. (2011). ***Slag Use in Highway Construction – the Philosophy and Technology of its Utilization.*** International Journal of Pavement Research and Technology.

WIDOJOKO, L. (2013). ***Evaluation the Use of Tailings as a Filler in Asphalt Concrete - Wearing Course Based on Results of Laboratory Tests to the Indonesian Specification for Hot-Mix Asphalt Year 2010.*** Advanced Materials Research, Vol. 723, pp. 328-336.

WINTERKORN, F.M.; CHANDRASEKHARAN, E.C. (1951). ***Lateritic Soil and Their Stabilization,*** HRB, Bulletin No. pg. 10-29.

XU, S. (2013). ***Research on application of iron tailings on road base.*** Advanced Materials Research, v. 743, p. 54-57. Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.743.54.

YISA, G. L.; Sani, J. E. (2014). ***Reliability Estimate of Strength Characteristic of Iron Ore Tailing Stabilized Lateritic Soil for Road Pavement Sub-Base Materials.*** EJGE - Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 19, Bund.

ZHANG, T., YU, W., ZHU, F., ZHANG, Z. (2010). ***Experiment of reinforced iron tailings used for road base.*** Journal of University of Science and Technology Liaoning.