

André Augusto Nóbrega Dantas

**CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS ORIUNDOS DO
BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO PARA USO EM
PAVIMENTAÇÃO**

NATAL/ FEV

2015

ANDRÉ AUGUSTO NÓBREGA DANTAS

**CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS ORIUNDOS DO
BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO PARA USO EM
PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), como requisito à obtenção do título de Mestre.

Professor (a) Orientador (a): Maria Del Pilar Durante Ingunza
Professor Co-orientador: Leonardo Flamarion Marques Chaves

NATAL/ FEV

2015

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN

Biblioteca Central Zila Mamede

Dantas, André Augusto Nóbrega.

Caracterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação / André Augusto Nóbrega Dantas. – Natal, RN, 2015.

88 f : il.

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Maria del Pilar Durante Ingunza.

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Flamarion Marques Chaves.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Minérios de ferro – Dissertação. 2. Solo granular – Dissertação. 3. Resíduos – Dissertação. 4. Pavimentação – Dissertação. I. Durante Ingunza, Maria del Pilar. II. Chaves, Leonardo Flamarion Marques. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 622.341

ANDRÉ AUGUSTO NÓBREGA DANTAS

**CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS ORIUNDOS DO
BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO PARA USO EM
PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), como requisito à obtenção do título de Mestre.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Maria Del Pilar Durante Ingunza - Orientadora (UFRN)

Prof. Dr. Leonardo Flamarion Marques Chaves – Co-orientador (UFRN)

Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França – Examinador Interno (UFRN)

Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim - Examinador Externo à Instituição (IFRN)

Natal, 25 de Fevereiro de 2015.

À minha Família, aos meus
colegas de mestrado, à minha
professora orientadora, ao meu
professor co-orientador e a
todos os colaboradores do
programa de pós-graduação
em Engenharia Civil da UFRN.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me presenteado com o dom de ser engenheiro civil, sendo completamente realizado com o que faço.

Aos meus Pais, José Araújo Dantas e Adeilza de Fátima N. Dantas, por nunca medirem esforços para que eu realizasse todos os meus sonhos, fazendo o possível e o impossível.

Aos meus irmãos, Thiago Murilo Nóbrega Galvão e Beatrice Nóbrega Dantas, pela fonte de inspiração e presença em todos os momentos da minha vida.

Aos meus grandes amigos que levo no peito para toda vida.

À minha professora orientadora Maria Del Pilar e ao meu professor co-orientador Leonardo Flamarion, por suas imensuráveis ajudas na elaboração deste trabalho.

Ao professor colaborador, Ênio Fernandes, por toda ajuda, orientação e suporte necessário ao longo da pesquisa.

Ao professor Fagner França por todas as orientações necessárias dentro do Laboratório de Solos da UFRN.

Aos amigos de pós-graduação, Tahyara Barbalho, Ícaro Suassuna, Luiz Felipe, Leonardo e Desiree por todos os ensinamentos compartilhados e momentos vividos durante essa caminhada.

A empresa GEOQUALITY por todo o suporte nos momentos de dificuldades.

Aos colaboradores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRN, por nos oferecerem um suporte em todas as situações ao longo do mestrado.

Aos técnicos de laboratório e engenheiros Paulo Leite e Batista pelas incansáveis orientações nos ensaios, o qual desejo meus infinitos agradecimentos.

Aos bolsistas: Keven Felipe, Márcio Avelino, do laboratório de mecânica dos solos, pela grande parceria e ajuda na execução dos ensaios.

Aos motoristas Kennedy e Vanderlei, por me levar com segurança a Mina do Bonito, pela companhia e pela ajuda na coleta do material.

A MHAG serviços e mineração S/A pela disponibilização do material e pela confiança no trabalho a ser desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte por dar a infraestrutura e as condições necessárias para a elaboração do trabalho.

A CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado, pois sem essa, a realização do trabalho se tornaria inviável.

RESUMO

A mineração no Brasil possui papel fundamental no desenvolvimento econômico e social, contribuindo diretamente na melhoria de vida da população. Entretanto, a atividade mineradora ainda que seja feita de forma responsável e com um estudo adequado de gestão de resíduos para diminuir o impacto dos seus efeitos, pode vir a causar danos nocivos ao meio ambiente. Outras formas de poluição também são geradas devido à atividade mineradora. A poluição visual, provocada, pelo armazenamento dos resíduos a céu aberto, além da poluição sonora, provocada pelo barulho excessivo das máquinas tanto na extração do minério, como no beneficiamento. Uma forma alternativa de diminuir os impactos ambientais provocados pela mineração é a utilização dos resíduos nas camadas que irão compor os pavimentos das rodovias. Então, este trabalho se propõe a dar uma destinação adequada aos resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro, decorrentes da atividade mineradora do grupo de mineração Mhag Serviços e Mineração S/A e Mineração, na mina do Bonito, localizada no município de Jucurutu, no estado do Rio Grande do Norte. Os resíduos do minério de ferro foram estabilizados com um solo granular proveniente do município de Macaíba, também no estado do Rio Grande do Norte, o qual está sendo utilizado da duplicação da BR-304 referente ao trecho intitulado de Reta Tabajara. O presente trabalho foi desenvolvido em três etapas, sendo a primeira dividida pelos ensaios químicos e mineralógicos, pelos ensaios de caracterização física e pelos ensaios de pavimentação para os resíduos do minério de ferro. A segunda etapa corresponde aos mesmos ensaios, sendo realizado para o solo granular. A terceira etapa contempla os ensaios citados para três diferentes misturas de resíduos de minério de ferro e solo granular, sendo elas: 15% de resíduos de minério de ferro e 85% de solo granular, 25% de resíduos de minério de ferro e 75% de solo granular, 50% de resíduos de minério de ferro e 50% de solo granular. Foi verificada a viabilidade técnica da utilização dos resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro, compactado na energia intermediária e modificada, para utilização em camadas de base, sub-base, reforço de subleito e subleito. A incorporação dos resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro em rodovias proporcionará uma alternativa ao

uso de agregados convencionalmente utilizados na pavimentação, além de preservar o meio ambiente.

Palavras-chaves: Minério de ferro; Solo granular; Resíduo; Pavimentação.

ABSTRACT

Mining in Brazil has a key role in economic and social development, contributing directly to improve the lives of the population. However, the mining activity even if done responsibly and with a proper study of waste management to reduce the impact of its effects, may cause harmful damage to the environment. Other forms of pollution are also caused due to mining activity. The visual pollution caused by the waste storage at open sky, in addition to the noise pollution caused by the excessive noise of the machines both in the extraction of ore, as in processing. An alternative way to lessen the environmental impacts caused by mining is the use of waste in layers that will compose the pavements along the highways. Thus, this work sets out to give a proper disposal of the wastes from the processing of iron ore, resulting from the mining activity of the group of mining Mhag Services and Mining S/A, in the mine of Bonito, located in Jucurutu, a town in the state of Rio Grande do Norte. The residues of the iron ore were stabilized with a granular soil from the city of Macaiba, also in the state of Rio Grande do Norte, which is being used in the duplication of the BR-304 referring to the entitled passage of Reta Tabajara. The present work was developed in three stages, being the first one divided by the chemical and mineralogical tests, by the tests of physical characterization and by the tests of paving for the residues of the iron ore. The second stage corresponds to the same tests being performed for granular soil. The third stage includes the essays above-mentioned for three different mixtures of iron ore waste and granular soil, being they: 15% of iron-ore waste and 85% of granular soil, 25% of iron-ore waste and 75% of granular soil, 50% of iron-ore waste and 50% of granular soil. The technical feasibility of using waste from the iron ore beneficiation was checked, compressed in the intermediate energy and modified for use in base layers, sub-base, reinforcement subgrade and subgrade. The incorporation of the residues originating from the improvement of the iron ore in highways will provide an alternative to the use of aggregate conventionally used in the paving, besides preserving the environment.

Keywords: Iron ore; Granular soil; Waste; Paving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Empresas mineradoras no Brasil.....	03
Figura 2.2- Representação da mineração no Brasil e no mundo.....	04
Figura 2.3- Principais regiões com depósitos minerais no Brasil.....	05
Figura 2.4- Principais produtos exportados no Brasil.....	05
Figura 2.5- O Rio Grande do Norte.....	09
Figura 2.6- Reservas minerais do RN.....	10
Figura 2.7- Vista geral da Mina do Bonito.....	11
Figura 2.8- Estruturas cristalinas.....	12
Figura 2.9- Mineral Itabirito.....	14
Figura 2.10- Mineral Hematita.....	15
Figura 2.11- Mineral Canga.....	15
Figura 2.12- Mineral Rúbio.....	16
Figura 2.13- Etapas do processamento de beneficiamento da Mina do Bonito.....	22
Figura 2.14- Limites de consistência.....	27
Figura 2.15- Gráfico de plasticidade.....	32
Figura 2.16- Classificação dos solos (HBR).....	33
Figura 3.1- Depósito de resíduo de minério de ferro.....	46
Figura 3.2- Amostra acondicionada.....	46
Figura 3.3- Rodovias de acesso à mina do Bonito.....	47
Figura 3.4- Trecho da BR - 304 intitulada de Reta Tabajara.....	48
Figura 3.5- Equipamento EDX-720 para Ensaio FRX.....	48
Figura 3.6- Ensaio de Massa Específica dos Sólidos.....	49
Figura 3.7- Granulometria por peneiramento.....	50
Figura 3.8- Granulometria por sedimentação.....	50

Figura 3.9- Determinação do Limite de Liquidez.....	51
Figura 3.10- Determinação do Limite de Plasticidade.....	51
Figura 3.11- Ensaio de Compactação.....	52
Figura 3.12- Ensaio do Índice de Suporte Califórnia.....	53
Figura 4.1- Resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos.....	59
Figura 4.2- Curva granulométrica para o resíduo do minério de ferro puro.....	60
Figura 4.3- Curva granulométrica para a mistura com 50% de resíduo de minério de ferro e 50% de solo granular.....	60
Figura 4.4- Curva granulométrica para a mistura com 25% de resíduo de minério de ferro e 75% de solo granular.....	61
Figura 4.5- Curva granulométrica para a mistura com 15% de resíduo de minério de ferro e 85% de solo granular.....	61
Figura 4.6- Curva granulométrica para o solo granular puro.....	62
Figura 4.7- Compilação das curvas granulométricas.....	63
Figura 4.8- Curvas granulométricas- Faixa A.....	65
Figura 4.9- Curvas granulométricas- Faixa B.....	65
Figura 4.10- Curvas granulométricas- Faixa C.....	66
Figura 4.11- Curvas granulométricas- Faixa D.....	66
Figura 4.12- Curvas granulométricas- Faixa E.....	67
Figura 4.13- Curvas granulométricas- Faixa F.....	67
Figura 4.14- Compactação nas três energias para o resíduo do minério de ferro puro.....	69
Figura 4.15- Compactação nas três energias para 50% de resíduo de minério de ferro e 50% de solo granular.....	70
Figura 4.16- Compactação nas três energias para 25% de resíduo de minério de ferro e 75% de solo granular.....	71
Figura 4.17- Compactação nas três energias para 15% de resíduo de minério de ferro e 85% de solo granular.....	72

Figura 4.18- Compactação nas três energias para o solo granular puro.....73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Participação da exportação de minérios no Brasil.....	06
Tabela 2.2- IDH de estados e municípios brasileiros.....	07
Tabela 2.3- Exportações brasileiras.....	08
Tabela 2.4- Principais minérios encontrados em jazidas naturais.....	13
Tabela 2.5- Principais minerais encontrados e problemas gerados pela sua exportação.....	18
Tabela 2.6- Frações de solos.....	26
Tabela 2.7- Requisito das camadas do pavimento.....	30
Tabela 3.1- Ensaio realizados.....	45
Tabela 4.1- Óxidos da primeira coleta do resíduo do minério de ferro.....	56
Tabela 4.2- Óxidos da segunda coleta do resíduo do minério de ferro.....	56
Tabela 4.3- Óxidos da única coleta do solo granular.....	57
Tabela 4.4- Granulometria do material das faixas de A até F conforme DNIT.....	64
Tabela 4.5- Resultados dos ensaios de compactação para o resíduo do minério de ferro puro.....	69
Tabela 4.6- Resultados dos ensaios de compactação para 50% de resíduo de minério de ferro e 50% de solo granular.....	70
Tabela 4.7- Resultados dos ensaios de compactação para 25% de resíduo de minério de ferro e 75% de solo granular.....	71
Tabela 4.8- Resultados dos ensaios de compactação para 15% de resíduo de minério de ferro e 85% de solo granular.....	72
Tabela 4.9- Resultados dos ensaios de compactação para o solo granular puro.....	73
Tabela 4.10- Valor de CBR médio para o resíduo de minério de ferro puro.....	75

Tabela 4.11- Valor de CBR médio para 50% de resíduo de minério de ferro e 50% de solo granular.....	76
Tabela 4.12- Valor de CBR médio para 25% de resíduo de minério de ferro e 75% de solo granular.....	77
Tabela 4.13- Valor de CBR médio para 15% de resíduo de minério de ferro e 85% de solo granular.....	78
Tabela 4.14- Valor de CBR médio para o solo granular puro.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C.	Antes de cristo
AM	Amazonas
BA	Bahia
BRICs	Brasil, Rússia, Índia e China
CBR	Califórnia Bearing Ration
C_c	Coeficiente de curvatura
CCC	Cúbica de corpo centrado
CFC	Cúbica de face centrada
CFN	Companhia Ferroviária do Nordeste
cm	Centímetros
C_u	Coeficiente de não uniformidade
CPRM	Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais
CP_s	Corpos de prova
D_{10}	Diâmetro efetivo
dm^3	Decâmetro cúbico
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EGF	Escória granulada de fundição

ETA	Estação de tratamento de águas
Fe	Ferro
FeCO ₃	Siderita
Fe ₂ O ₃	Hematita
Fe ₃ O ₄	Magnetita
FeS ₂	Pirita
FeTiO ₃	Ilmenita
FRX	Fluorescência de raios-X
GO	Goiás
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
Kg	Quilogramas
Km	Quilômetros
Km ²	Quilômetros quadrados
LL	Limite de Liquidez
MCT	Miniatura Compacta Tropical
MG	Minas Gerais
mm	Milímetros

MPa	Megapascal
MT	Mato Grosso
NBR	Norma Brasileira
PA	Pará
PB	Paraíba
PE	Pernambuco
P.E.	Ponto de ebulição
P.F.	Ponto de fusão
pH	Potencial de hidrogênio
PIB	Produto Interno Bruto
R\$	Reais
RCD	Resíduo de construção e demolição
RFC	Resíduo fino de caulim
RGC	Resíduo grosso de caulim
RO	Rondônia
RJ	Rio de Janeiro
RN	Rio Grande do Norte
SC	Santa Catarina
SP	São Paulo
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
US\$	Dólares
W_{ot}	Umidade ótima

$\rho_{s,max}$	Massa específica seca máxima
ρ_s	Massa específica dos sólidos
$^{\circ}\text{C}$	Graus celsius
$(\text{FeO}(\text{OH})n\text{H}_2\text{O})$	Limonita

SUMÁRIO

CAPÍTULO 01 – INTRODUÇÃO.....	01
1.1 – OBJETIVOS.....	02
1.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	02
CAPÍTULO 02 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	03
2.1 – CONTEXTO ATUAL DO SETOR MINERADOR.....	03
2.1.1 – A MINERAÇÃO NO BRASIL.....	03
2.1.2 – A MINERAÇÃO NO RIO GRANDE DO NORTE.....	08
2.2 – O MINÉRIO DE FERRO.....	11
2.2.1 – ROCHAS COM ALTO TEOR DE MINÉRIO DE FERRO.....	14
2.3 – RESÍDUOS PROVENIENTES DA EXTRAÇÃO MINERAL.....	16
2.3.1 – RESÍDUOS DO MINÉRIO DE FERRO.....	19
2.4 – O BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO.....	20
2.4.1 – PROCESSO DE LAVRA E BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO.....	20
2.4.2 – ETAPAS DE PROCESSAMENTO E BENEFICIAMENTO.....	21
2.5 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	24
2.5.1 – ENSAIO DE GRANULOMETRIA.....	24
2.5.2 – LIMITES DE CONSISTÊNCIA.....	27
2.5.3 – ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA.....	28
2.5.4 – ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	28
2.5.5 – ENSAIO CBR.....	29
2.5.6 – ENSAIO DE FRX.....	31
2.6 – CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS.....	31
2.7 – USO DE RESÍDUOS NA PAVIMENTAÇÃO.....	34

CAPÍTULO 03 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1 – INTRODUÇÃO.....	44
3.2 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA.....	48
3.3 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	49
3.4 – ENSAIO DE APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO.....	52
CAPÍTULO 04 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4.1 – INTRODUÇÃO.....	55
4.2 – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA.....	55
4.3 – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	58
4.4 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PAVIMENTAÇÃO.....	68
CAPÍTULO 05 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	80
REFERÊNCIAS.....	83

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

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 simplificou o nome do município para Jucurutu.

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 estadual, Natal. Seu território ocupa uma área de 934 km², posicionando-o como o nono município com maior extensão do Rio Grande do Norte.

A região do Seridó possui uma reserva de minério de ferro altíssima em relação aos outros estados do Nordeste. 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 Mhag Serviços e Mineração S/A, empresa mineradora, que atua em Jucurutu – RN, produziu, em 2012, 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 transporte é feito 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 é produzir 12 milhões de toneladas a partir de 2015 (IBRAM 2012).

Os resultados das pesquisas realizadas em diversos blocos da Mina do Bonito, inseridos num raio de 150 km, indicaram a existência do minério do tipo Itabirito, essencialmente magnético que, depois de beneficiado, poderá 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%. Apesar dos grandes índices de minério, há uma grande quantidade de resíduo.

Devido a grande preocupação com o meio ambiente nos dias atuais, o debate sobre materiais reaproveitados é cada vez maior, o destino e a quantidade de materiais que são lançados no meio ambiente tem se tornado algo preocupante. Medidas precisam ser tomadas para amenizar a exploração de novas jazidas e para conservar a natureza.

A preocupação ambiental é devida a diminuição dos recursos naturais que têm se tornado cada vez mais escassos e também ao meio ambiente que não tem a capacidade de absorver a quantidade atual de resíduos sem que haja um desequilíbrio ambiental.

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho a cerca do reuso dos resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro é a sua utilização em camadas de base, sub-base, reforço de subleito e subleito de pavimentos estabilizados com um solo granular em diferentes proporções. De modo a proporcionar uma alternativa à utilização dos agregados convencionais. Substituindo-os, conservando assim o meio ambiente e diminuindo a exploração indiscriminada de jazidas para a exploração de agregados usados na pavimentação.

1.2 Objetivos específicos

O trabalho tem por objetivos específicos:

- Caracterizar quimicamente o resíduo de minério de ferro e o solo granular;
- Caracterizar fisicamente o resíduo de minério de ferro e o solo granular;
- Classificar o resíduo de minério de ferro e solo granular quanto ao ensaios para pavimentação;

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Contexto atual do setor minerador

2.1.1 A mineração no Brasil

De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (2012), o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) registrou 8870 mineradoras em atividade no país no ano de 2011, 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 mostra a Figura 2.1 a seguir:

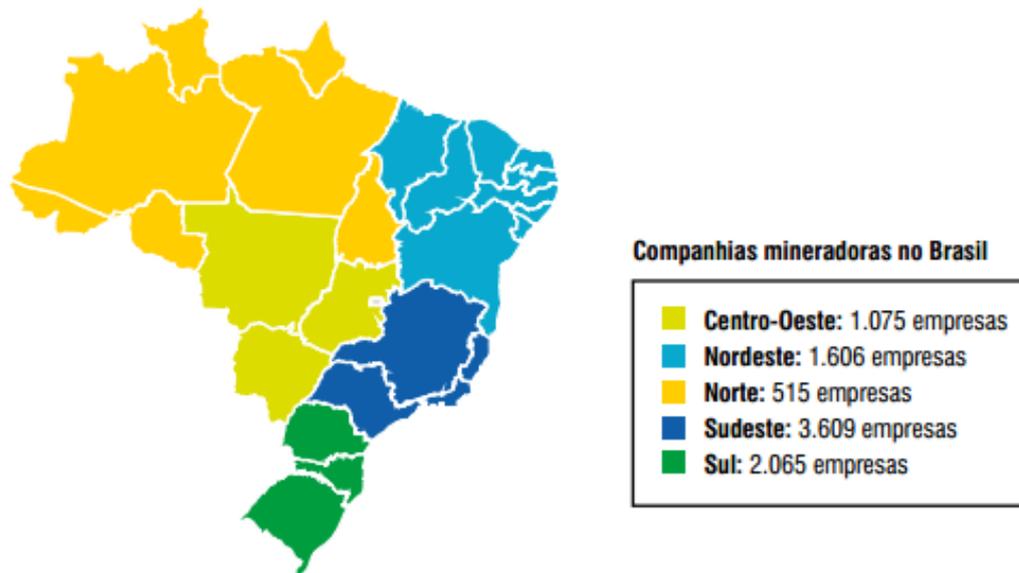


Figura 2.1 - Empresas mineradoras no Brasil

Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (2012)

Segundo o IBRAM (2012) a Indústria Mineral Brasileira registra ao longo da última década crescimento vigoroso decorrente das profundas mudanças socioeconômicas e de infraestrutura que o Brasil tem vivenciado. Embora a atividade

mineral tenha sofrido uma redução em suas expectativas em razão da crise internacional que casou diminuição dos investimentos no setor.

Esse crescimento é impulsionado pelo processo de urbanização em países emergentes com elevada densidade demográfica, grandes áreas territoriais, e elevado PIB (Produto Interno Bruto), como os BRICs (Brasil, Rússia, Índia e China), os quais, coincidentemente, são de grande importância para a mineração mundial, conforme se observa na Figura 2.2.

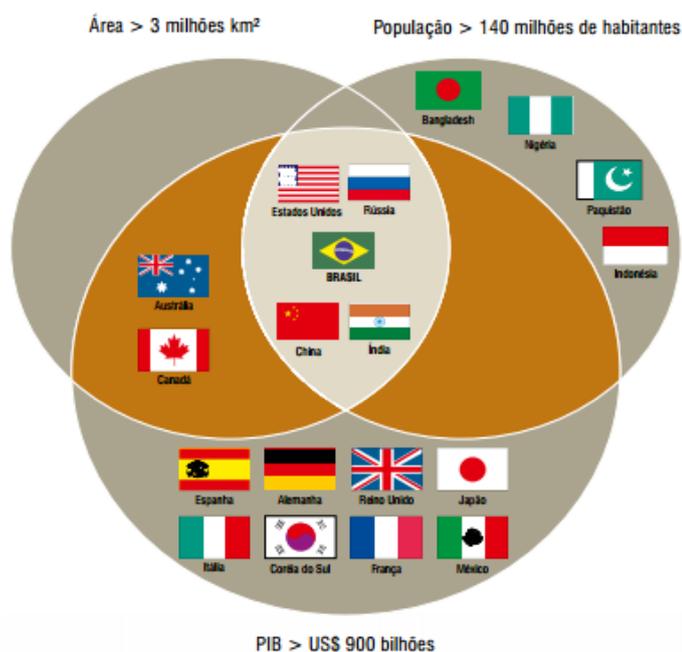


Figura 2.2 - Representação da mineração no Brasil e no mundo

Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (2012)

A Figura 2.3 apresenta as principais regiões com depósitos minerais do Brasil. Os principais minerais encontrados são o cobre, ouro, alumínio, estanho, ferro-manganês, grafita, caulim, níquel, carvão e agregados. Estão distribuídos praticamente por todo o território brasileiro, com destaque maior para os estados do Pará (PA), Minas Gerais (MG) e Goiás (GO).

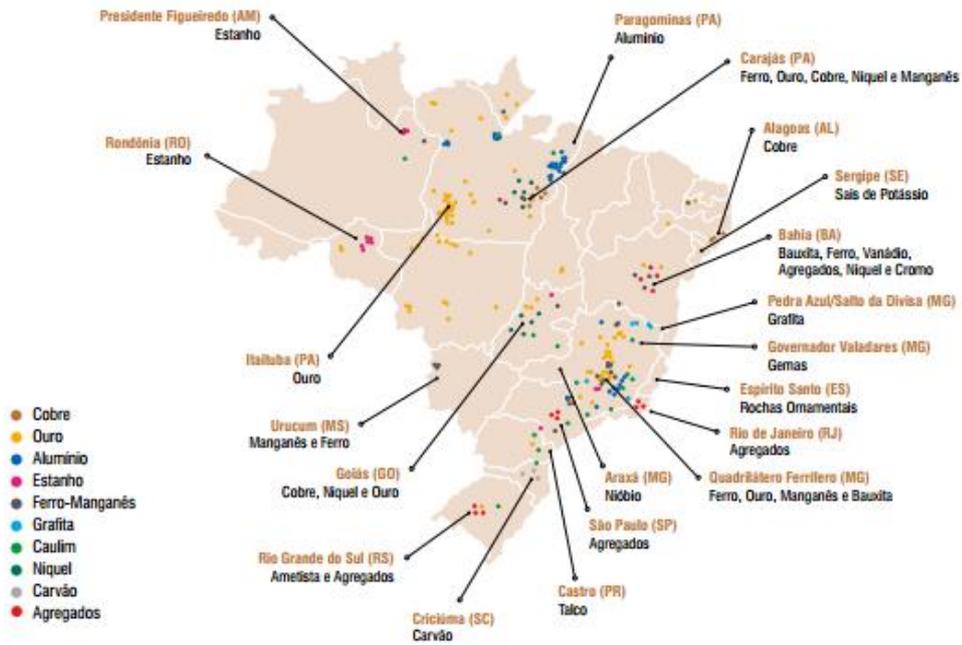


Figura 2.3 - Principais regiões com depósitos minerais no Brasil

Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (2012)

A Figura 2.4 e a Tabela 2.1 exemplificam os minerais exportados pelo Brasil, com destaque para os minérios de ferro, que totalizam mais de 80% de todos os minerais exportados pelo país.

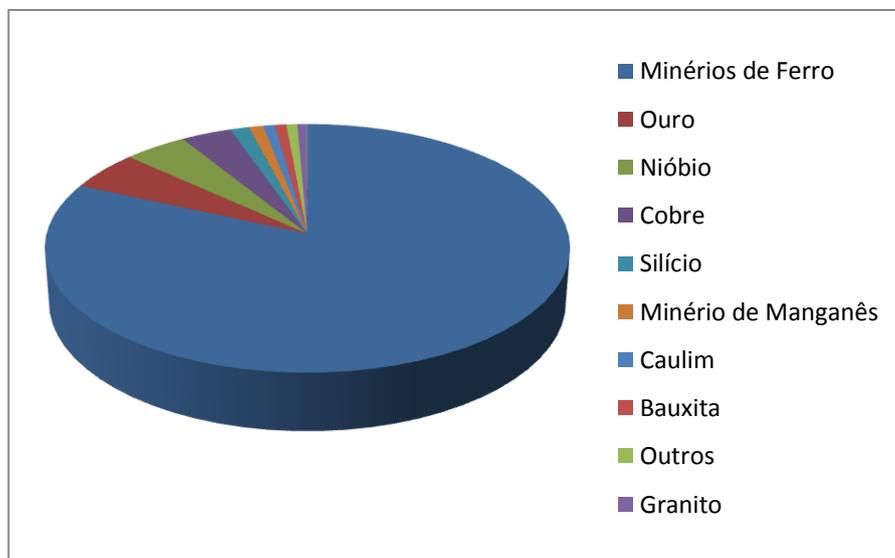


Figura 2.4 - Principais produtos minerais exportados no Brasil (%)

Fonte: Adaptado de IBRAM (2013).

Tabela 2.1 - Participação da exportação de minérios no Brasil.

Minérios de Ferro	81,80%
Ouro	5,10%
Nióbio	4,40%
Cobre	3,50%
Silício	1,30%
Minério de Manganês	1,00%
Caulim	0,80%
Bauxita	0,80%
Outros	0,76%
Granito	0,62%
Chumbo	0,03%
Estanho	0,02%

Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (2012)

A atividade mineradora é um fator importante para alavancar o índice de desenvolvimento humano de alguns municípios brasileiros conforme evidência o IBRAM (2012), ao afirmar que índice de desenvolvimento humano das cidades mineradoras é maior que o índice dos respectivos estados. A mineração provoca um elevado desenvolvimento regional, independente do município que possui atividade mineradora estar localizado distante de grandes centros urbanos ou até mesmo em regiões de nível social baixo. A Tabela 2.2 mostra algumas das principais cidades mineradoras do país e seus IDHs em comparação com os IDHs dos respectivos estados.

Tabela 2.2 - IDH de estados e municípios brasileiros

Municípios – Estados	Minério	IDH do Estado	IDH do Município
Itabira – MG	Minério de Ferro	0,766	0,798
Araxá – MG	Nióbio	0,766	0,799
Nova Lima – MG	Ouro	0,766	0,821
Catalão – GO	Fosfato	0,773	0,818
Cachoeiro de Itapemirim – ES	Rochas Ornamentais	0,767	0,770
Parauapebas – PA	Minério de Ferro	0,720	0,740
Oriximiná – PA	Bauxita	0,720	0,769
Presidente Figueiredo – AM	Cassiterita	0,713	0,742

Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (2012)

No cenário mundial da mineração o Brasil possui uma elevada importância, porém depende ainda de alguns minerais estratégicos para sua economia. O país é o quarto maior consumidor de fertilizantes do mundo e em contrapartida é responsável apenas por 2% da produção mundial. Além disso, o Brasil importa 91% do potássio e 51% de fosfato, ambos essenciais para a indústria de fertilizantes (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2012).

A Tabela 2.3 indica as quantidades de minerais importados e exportados pelo Brasil nos anos de 2010, 2011 e 2012, em milhares de toneladas. Destaca-se o carvão mineral que foi o produto com maior representatividade das importações nos três referidos anos abordados.

Tabela 2.3 - Exportações brasileiras

	2010	2011	2012
Exportações Brasileiras	201.915	256.039	242.580
Exportações Mineral Bens Primários	35.362	49.710	38.689
Minério de Ferro	28.912	41.817	30.989
Ouro (em barras)	1.786	2.239	2.341
Nióbio (ferronióbio)	1.557	1.840	1.811
Cobre	1.238	1.573	1.511
Silício	460	637	523
Caulim	275	261	236
Minério de Manganês	357	306	201
Bauxita	270	319	325
Estanho	8	23	16
Chumbo	12	9	7
Granito	219	247	233
Outros	268	439	495
Importações Brasileiras	181.768	226.243	223.154
Importações Mineral Bens Primários	7.757	11.292	9.139
Carvão mineral	3.575	5.231	3.600
Cloreto de Potássio	2.204	3.471	3.510
Fosfato	135	207	205
Cobre	952	1.141	562
Zinco	157	184	169
Enxofre	246	441	414
Outros	488	617	678
Saldo Brasil	20.147	29.796	19.425
Saldo do Setor Mineral	27.605	38.418	29.550

Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (2012)

2.1.2 A mineração no Rio Grande do Norte

De acordo com o IBGE (2013), o estado do Rio Grande do Norte se localiza na região nordeste do Brasil, em sua porção oriental com uma população estimada de 3.408.510 habitantes, distribuídas em uma área aproximada de 53.000 km². A Figura 2.5 indica a localização do estado do RN no território brasileiro.



Figura 2.5 - O Rio Grande do Norte

Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFICA E ESTATÍSTICA (2014)

Segundo a Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM, 2006), o estado do RN se situa entre os principais polos mineradores do nordeste brasileiro, sendo portador de diversos recursos minerais de valores econômicos atuais e potenciais.

Atualmente, o estado se destaca no cenário nacional como principal produtor de sal marinho, um dos principais produtores de petróleo, sendo o primeiro colocado quando a produção é em terra, além de quarto colocado em produção de gás natural. O estado ainda tem por destaque a produção de telhas e grande produtor de minerais e rochas industriais, dentre as quais o caulim, a mica, o feldspato, o calcário, além de outros, fazendo com que o Rio Grande do Norte figure como quarto maior produtor mineral do país.

O Rio Grande do Norte está vivenciando o início de um novo ciclo na mineração. Porém, muitos desafios precisam ser superados de forma a se alcançar

resultados mais significativos. Os principais problemas encontrados no estado são os incentivos às empresas mineradoras e principalmente a infraestrutura. O último tem causado sérias dificuldades em empresas que se instalam no estado, pois a falta de logística encarece a produção e a torna inviável (LIMA et al, 2012).

O estado do Rio Grande do Norte possui cerca de 50 bens minerais, dentre eles cita-se: o minério de ferro, o tungstênio, quartzo, calcário, gipsita, mármore, mica, sal, petróleo, etc. Porém, apenas cerca de vinte e dois desses cinquenta minerais são explorados, muitos ainda no processo de licenciamento ambiental (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 2012 apud LIMA et al, 2012).

Conforme se observa na Figura 2.6, dentre os vinte e dois minerais explorados do estado, destaca-se o calcário com mais de um milhão e setecentas e oitenta mil toneladas.

CLASSE/SUBSTÂNCIA	RESERVAS (1)				
	Medida	Indicada	Inferida	Lavrável	
Metálicos					
Bismuto	t	134.650	20.716	-	-
Ferro	t	141.763.337	64.246.000	34.367.000	205.629.884
Molibdênio	t Mo	168	38	272	-
Ouro (Primário)	Kg Au	1.418	220	-	547
Tungstênio	t WO3	19.421	15.565	30.438	13.703
Não-Metálicos					
Areia	t	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Argilas Comuns	t	1.702.510	4.489.396	-	6.191.906
Argilas Plásticas	t	2.027.184	420.801	-	-
Calcário (Rochas)	t	1.787.554.263	1.400.804.746	938.810.374	598.040.807
Caulim	t	729.008	249.640	-	153.654
Diatomita	t	388.998	600	15.000	263.034
Feldspato	t	32.300.435	4.492.073	398.876	5.640.436
Gipsita	t	3.844.686	1.968.843	-	936.804
Mica	t	2.086.124	1.126.000	295.256	1.309
Quartzito Industrial	t	5.383.802	-	-	-
Quartzito Ornamental	t	65.316	-	-	-
Quartzo	t	105.384	37.000	3.182	105.384
Rochas (Britadas) e Cascalho	t	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Rochas Ornamentais - Outras	t	1.314.099	2.432.378	403.445	642.770
Rochas Ornamentais (Granito e afins)	t	748.612.136	557.955.267	237.932.642	272.601.669
Rochas Ornamentais (Mármore e afins)	t	54.691.179	8.204.518	202.164.413	42.750
Talco	t	963.396	21.278	-	984.675

(1) Consulte os Apêndices A1 e A2.

Figura 2.6 - Reservas minerais do RN

Fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (2010)

A Mhag Serviços e Mineração S/A é uma empresa brasileira com amplos recursos geológicos de minério de ferro na região Nordeste do Brasil, região com grandes riquezas minerais. A extração de ferro da Mina do Bonito teve início em outubro de 2005 e a primeira exportação foi feita em janeiro de 2006. As jazidas estão divididas em 19 blocos que se estendem por uma área de 105 mil hectares. A excelente localização geográfica das jazidas, próximas entre si, distando 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, 2008). A Figura 2.7 apresenta uma vista geral da Mina do Bonito.



Figura 2.7 - Vista geral da Mina do Bonito

Fonte: MHAG SERVIÇOS E MINERAÇÃO S/A (2014)

2.2 O minério de ferro

O ferro (Fe) é um dos elementos mais abundantes da litosfera e se encontra na proporção de 5,6%. Existem cerca de 300 minerais de Fe, porém somente os óxidos se encontram em concentrações elevadas e de aproveitamento mineral. Durante tempos remotos, o ferro era obtido pela redução de seus óxidos com carvão vegetal, em pequenos fornos. Esta prática foi de tal importância que serviu para

caracterizar uma época da história, a idade do ferro com um período de duração de 1300 a.C. – 800 a.C (FOGGIATTO; LIMA, 2004). O Fe é um elemento metálico de transição, prateado, maleável e dúctil, número atômico $Z = 26$, configuração eletrônica: $[\text{Ar}] 4s^2 3d^6$, massa atômica $MA = 55,847 \text{ u}$, densidade $d = 7,87 \text{ g.cm}^{-3}$, ponto de fusão P.F. = 1535°C e ponto de ebulição P.E. = 3000°C , As principais fontes são os minério de hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), limonita ($\text{FeO}(\text{OH})n\text{H}_2\text{O}$), ilmenita (FeTiO_3), siderita (FeCO_3) e pirita (FeS_2). O elemento puro têm três formas cristalinas, a de ferro-alfa, estável abaixo de 906°C , com estrutura cúbica de corpo centrado, que é ferromagnético até a sua temperatura de Curie (768°C); ferro-gama, estável entre 906°C e 1403°C com estrutura não magnética, cúbica de face centrada, e ferro-delta com estrutura cúbica de corpo centrado, acima de 1403°C .

As estruturas cristalinas correspondentes ao ferro-alfa (CCC), ferro-gama (CFC) e ferro-delta (CCC), estão apresentadas na figura 2.8, a seguir.

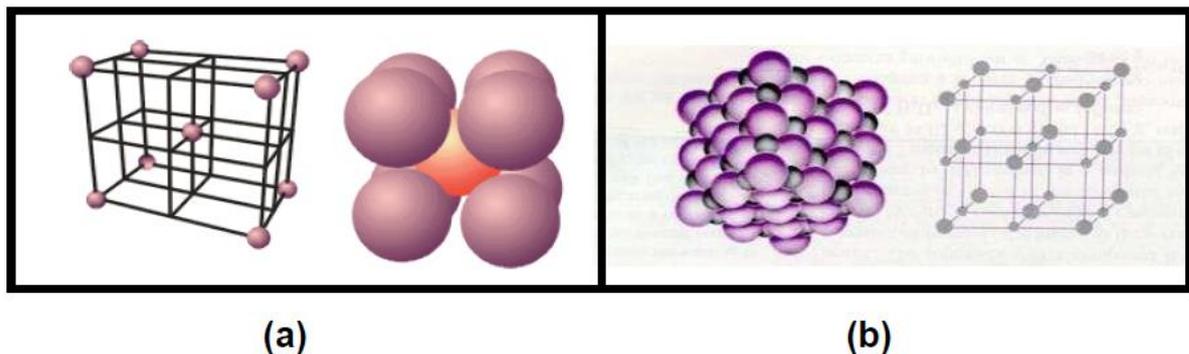


Figura 2.8 - Estruturas cristalinas: a) Cúbica de Corpo Centrado (CCC), b) Cúbica de Face Centrada (CFC)

As formações ferríferas bandadas, denominadas itabirito, compostas de hematita e sílica, se constituem nos maiores depósitos de minério de ferro. Essas formações enriquecidas pelos processos geológicos possibilitaram a existência de itabiritos intercalados com hematita compactada com teores de ferro bastante altos (BALANÇO MINERAL BRASILEIRO, 2001).

As jazidas de ferro foram formadas em períodos geológicos bastante antigos, podendo ser encontradas em todas as épocas geológicas. Os depósitos do pré-

cambriano são os mais importantes. Não se apresenta naturalmente na forma de metal, sendo extraído de minérios encontrados em jazidas naturais. No Brasil, os principais minerais encontrados são formados de hematita e magnetita (FOGGIATTO; LIMA, 2004). A Tabela 2.4 apresenta os principais minerais encontrados em jazidas naturais.

Tabela 2.4 - Principais minerais encontrados em jazidas naturais

Minerais	Características
Hematita (Fe ₂ O ₃)	Contém 69,9% de Fe Principal mineral no Brasil Provém de sedimentos químicos que sofreram metamorfismo
Magnetita (Fe ₃ O ₄)	Contém 72% de Fe Fortemente magnética Encontrada em jazidas de origem magmática
Limonita (Fe ₂ O ₃ nH ₂ O)	Amorfa Formada pela alteração da magnetita e hematita
Siderita (FeCO ₃)	Mineral argiloso, raro como constituinte de minério
Pirita (FeS ₂)	É o mineral mais comum encontrado na natureza Por conter enxofre não é usado na obtenção de Fe, mas para obtenção de enxofre

Fonte: FOGGIATTO; LIMA, 2004

O minério de ferro, em virtude de suas propriedades químicas e físicas, é na sua quase totalidade, utilizado na indústria siderúrgica (99%). O restante é utilizado como carga na indústria de ferro-liga, cimento e eventualmente na construção de estradas. O alto teor de ferro dispensa, em alguns casos, os processos de concentração, podendo o minério ser utilizado diretamente, apenas com a

adequação granulométrica. Os procedimentos físicos para preparação mecânica têm por finalidade a obtenção de minérios de composição e dimensões uniformes e adequadas à boa operação nos aparelhos siderúrgicos (BALANÇO MINERAL BRASILEIRO, 2001).

2.2.1 Rochas com alto teor de minério de ferro

Quatro tipos de rochas no Brasil apresentam consideráveis concentrações de minério de ferro, tornando-as assim economicamente viáveis para exploração (FOGGIATTO; LIMA, 2004). A seguir são descritas:

- Itabiritos ou hematitas lamelares (Figura 2.9) são rochas metamórficas compostas alternadamente por quartzo e hematita. O teor de ferro pode variar de 30% a 55%.



Figura 2.9 – Mineral Itabirito

Fonte: MACHADO, 2009

- Hematitas compactadas (Figura 2.10) encontradas dentro de camadas de itabirito são os minérios mais ricos e de alta pureza destinados para exportação. Seu teor é de 65% a 70% de ferro.



Figura 2.10 - Mineral Hematita

Fonte: MINERAL MINER'S, 2008

- Canga (Figura 2.11) é um mineral secundário constituído por hematita cimentada e limonita. É encontrado capeando afloramentos ou cobrindo encostas de morros com espessuras de dois a três metros. Contém de 50% a 60% de ferro e é poroso, com isto, sua redução é mais fácil. Quase todas as montanhas de itabiritos estão cobertas por canga. São geralmente utilizados em usinas que trabalham com carvão vegetal.



Figura 2.11 - Mineral Canga

Fonte: RIBEIRA JÚNIOR, 2008

- Rúbio (Figura 2.12) é um cascalho de itabirito que sofreu uma concentração natural, perdendo parte do quartzo. Não existem formações muito extensas.



Figura 2.12 – Mineral Rúbio (NONATO, 2002)

Fonte: NONATO, 2002

2.3 Resíduos provenientes da extração mineral

A mineração é um dos setores básicos da economia do país, contribuindo de forma decisiva para o bem estar e melhoria da qualidade de vida das presentes e futuras gerações. Sendo fundamental para o desenvolvimento de uma sociedade igualitária. Desde que seja operada com responsabilidade social, estando sempre presentes os preceitos do desenvolvimento sustentável (FARIAS, 2002).

Os impactos da mineração em área urbana sobre o meio antrópico revestem-se de especial importância devido ao alto grau de ocupação urbana, que são agravados face à proximidade entre as áreas mineradas e as áreas habitadas. É o caso dos impactos visuais, resultantes dos altos volumes de rochas e solos movimentados e as dimensões em cava ou da frente da lavra. O desconforto ambiental pode ser sentido mesmo quando as emissões estiverem abaixo dos padrões ambientais estabelecidos. Os impactos causados sobre a saúde, por outro lado, dificilmente ocorrem quando estes limites são respeitados (DIAS, 2001).

A geração de riquezas de um país geralmente vem acompanhada por fatores que têm uma interferência direta no bem estar da comunidade, principalmente devido à geração de produtos que não agregam valor comercial. Destaca-se a atividade de extração mineral como um setor que está diretamente associado a mudanças radicais no meio ambiente, principalmente devido à enorme quantidade de resíduos que são gerados.

A deposição dos resíduos provenientes de uma unidade de beneficiamento constitui uma tarefa delicada, quer por razões econômicas, quer por questões ambientais, levando-se em consideração os problemas relacionados ao tipo de minério e ao tipo de operação adotada. Na maioria dos casos, a maior fração do minério lavrado se torna resíduo por não possuir valor comercial e precisa ser descartado da forma mais econômica possível, minimizando, ainda, os impactos ambientais resultantes (DUTRA, 2005).

O projeto de atividade mineral deve explicitar os métodos de controle de poluição, recomposição, recuperação e destino posterior da área explorada. No caso do minério de ferro estão cada vez mais presentes algumas medidas como a reciclagem do aço e a melhoria nos processos que geram um consumo menor de minérios virgens, extraídos diretamente da mina. Outras medidas relevantes são tomadas, tais como: cuidados técnicos e ambientais necessários, incluindo providências em relação à recuperação da vegetação, paisagismo, levantamentos sobre a flora e fauna, reabilitação e monitoramento ambiental, estabilização de taludes e barragens, hidrogeologia, climatologia e aspectos sociais (FOGGIATTO; LIMA, 2004).

Com o conceito cada vez mais forte de desenvolvimento sustentável, faz-se necessário um programa eficiente de disposição de resíduos gerados por parte da mineração, pois de uma forma geral, precisa-se fazer uso dos bens minerais no momento, porém mantendo-se um meio ambiente adequado para as futuras gerações (SILVA, 2007)

Farias (2002) apresenta os problemas ambientais gerados por algumas substâncias minerais como ferro, ouro, chumbo, zinco e prata, carvão, agregados para construção civil, gipsita e cassiterita, conforme se observa na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Principais minérios e problemas gerados pela sua exploração

Substância Mineral	Estado	Principais problemas
Ferro	MG	Antigas barragens de contenção; poluição de águas superficiais.
Ouro	PA	Utilização de mercúrio nas concentrações de ouro de forma inadequada; aumento da turbidez.
	MG	Rejeitos ricos em arsênios; aumento da turbidez.
	MT	Emissão de Mercúrio na queima da amálgama
Chumbo, zinco e prata	SP	Rejeitos ricos em arsênios.
Chumbo	BA	Rejeitos ricos em arsênios.
Zinco	RJ	Barragem de contenção de rejeito, de antiga metalurgia em péssimo estado de conservação.
Carvão	SC	Contaminação das águas superficiais e subterrâneas pela drenagem ácida proveniente de antigos depósitos de rejeitos
Agregados para construção civil	RJ	Produção de areia em Itaguaí/Seropédica: contaminação do lençol freático, uso futuro da terra comprometido devido à criação desordenada de áreas alagadas.
	SP	Produção de areia no Vale do Paraíba acarretando a destruição da mata ciliar, turbidez, conflitos com uso e ocupação do solo, acidentes nas rodovias pelo causados transporte.
	RJ e SP	Produção de brita nas Regiões Metropolitanas do Rio de Janeiro e São Paulo, acarretando: vibração, ruído, emissão de particulado, transporte, conflitos com uso e ocupação do solo.
Calcário	MG e SP	Mineração em áreas de cavernas com impactos no patrimônio espeleológico.
Gipsita	PE	Desmatamento da região do Araripe devido a utilização de lenha nos fornos de queima da gipsita.
Cassiterita	RO e AM	Destruição de Florestas e leitos de rios

Fonte: Farias (2002)

A mineração de agregados para construção civil representa um dos principais ramos problemáticos do setor. Segundo Barreto (2001), a principal peculiaridade dessa atividade é que ela tem que forçosamente se desenvolver dentro de espaços urbanos, pois como se trata de matérias de baixo valor agregado, o transporte incide diretamente no preço final do produto, tendo dessa forma que ser minimizado. Dessa forma, acaba por gerar conflitos com as populações vizinhas, problemas ambientais de poeira, ruído, vibrações, controle de efluentes, trânsito de veículos pesados e etc.

Machado (1989) complementa que os problemas ambientais decorrente da mineração de uso imediato na construção civil, como areia, argila e brita, e os conflitos com outras formas e ocupação e uso do solo vêm acarretando uma queda do número de jazidas disponíveis a fim de abastecer as regiões metropolitanas.

2.3.1 Resíduos do minério de ferro

Os resíduos de mineração são os subprodutos das atividades de extração das riquezas minerais. O minério extraído durante a operação de lavra não apresenta uma concentração adequada para ser comercializado, estando composto por minerais úteis, como o ferro concentrado, e minerais de ganga, aos quais corresponde a porção mineral sem valor econômico ou com pequeno valor econômico que ocorrem agregados ao mineral-minério (MILONAS, 2006).

Estoques de resíduos podem representar riscos não desprezíveis em minas e instalações industriais associadas. A remediação de áreas degradadas ou contaminadas pela disposição inadequada de resíduos pode representar um dos maiores itens de passivo ambiental de uma empresa de mineração de ferro, que têm responsabilidades legais de zelar pela estabilidade e segurança de longo prazo das estruturas de contenção de resíduos. Algumas soluções de disposição de resíduos têm potencial de reduzir significativamente os riscos e o passivo, embora frequentemente representem custos mais elevados durante as etapas de implantação e de operação. Pilhas espessadas ou preparação de pastas de resíduos com vistas à disposição em escavações subterrâneas ou em sítios a céu

aberto são algumas tecnologias inovadoras que precisam ser mais investigadas no Brasil (FERNANDES et al., 2007).

No caso de depósitos de resíduos de minério de ferro lançados hidraulicamente, pode-se encontrar em determinadas regiões de uma barragem, zonas com alta concentração de partículas de ferro. Este tipo de seleção é função do processo de segregação hidráulica, que tende a gerar uma seleção granulométrica em função do tamanho, da forma e da massa específica das partículas e conduz à formação de zonas com propriedades geotécnicas distintas (ESPÓSITO; ASSIS, 1999).

2.4 O beneficiamento do minério de ferro

2.4.1 Processo de lavra e beneficiamento do minério de ferro

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

O minério proveniente da mina (*run of mine*) é alimentado em uma moega, 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 (primários); cônicos (secundários ou terciários) ou de impacto (terciários). Estes britadores operam em circuito fechado com peneiras, resultando em um produto menor que 32 mm.

O produto é então classificado em frações de diferentes tamanhos: o produto menor que 32 mm e maior que 6,3 mm é denominado granulado ou *lump*, e pode ser carregado diretamente nos fornos de redução para produção de ferro metálico; o produto menor que 6,3 mm e maior que 1,0 mm é denominado *sínter feed*, antes de ser carregado nos fornos de redução. Se for um produto impuro, é submetido a uma concentração (magnética ou gravimétrica), recuperando-se apenas as frações

magnéticas ou pesadas. As frações não magnéticas ou leves são descartadas como rejeito.

O produto menor que 1,0 mm e maior que 0,15 mm pode ter dois destinos. Pode fazer parte do *sínter feed*, após concentrado por meios semelhantes aos do produto anterior ou pode ser moído para a produção do quarto produto, o *pellet feed*. O *pellet feed* é o material menor que 0,15 mm e geralmente maior que 0,01 mm, já que uma fração finíssima, menor que 0,01 mm constitui as lamas, que são separadas constituindo-se em rejeito. Esse *pellet feed* é concentrado por flutuação, processo que tira proveito das propriedades de hidrofobicidade de alguns reagentes que aderem à superfície do quartzo, fazendo que este acompanhe bolhas de ar que são geradas em um equipamento denominado célula de flotação. Nesse equipamento as partículas de hematita (óxido de ferro) afundam, constituindo-se em concentrado.

2.4.2 Etapas de processamento e beneficiamento

O material retirado é processado de acordo com as seguintes etapas: rebitagem; moagem; deslamagem; flotação; espessamento de concentrado; espessamento de lamas; remoagem; transporte de polpa por mineroduto; filtragem; e empilhamento. A seguir na Figura 2.13 encontram-se descritas as principais funções de cada uma dessas etapas interligadas.

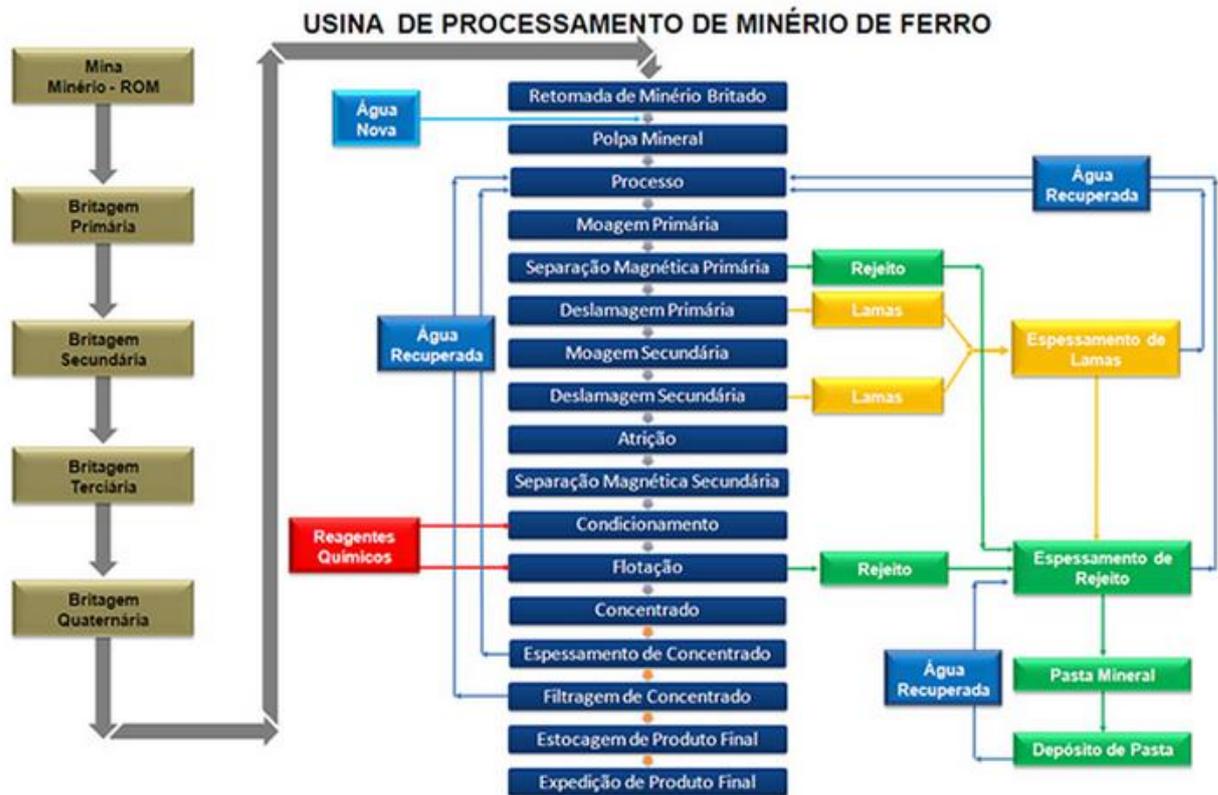


Figura 2.13 - Etapas do processo de beneficiamento da Mina do Bonito

Fonte: MHAG MINERAÇÃO S. A. (2014)

- **Rebritagem**

A rebritagem terá a função de cominuir o material a uma granulometria mais fina, de cerca de 25 mm, para possibilitar a alimentação da prensa de rolos. O produto da rebritagem será peneirado e o retido na peneira retornará para a rebritagem. O material que passar na peneira seguirá para a etapa de prensagem descrita abaixo.

- **Prensagem**

A prensagem será responsável pela redução do volume do material. O material que passar no peneiramento seguirá para os silos da prensa de rolos, de onde será extraído para alimentação da prensa. Caso um metal seja detectado, imediatamente o divisor será acionado e o fluxo que contém o metal será desviado da prensa de rolos e seguirá para a moagem.

- **Moagem**

O produto da prensagem seguirá para a etapa da moagem, através de transportadores de correia promovendo a cominuição do minério. A cominuição do minério é necessária para se obter uma granulometria adequada ao processo de concentração utilizado (flotação), assim como para consecução de uma liberação adequada dos minerais a serem separados (ferro e sílica). A moagem será realizada em circuito fechado com classificação onde o *underflow*, material que decanta, retorna para a moagem (carga circulante) e *overflow*, material que transborda, seguirá para a deslamagem.

- **Deslamagem**

A deslamagem será realizada em dois estágios, deslamagem primária e secundária. O *overflow* da deslamagem primária seguirá para a deslamagem secundária. O *overflow* da deslamagem seguirá para o espaçador de lamas. Já o *underflow* seguirá para o condicionamento da flotação, juntamente com o *underflow* da deslamagem primária.

- **Flotação**

O *underflow* da deslamagem seguirá para os condicionadores da flotação onde haverá adição de amido gelatinizado e soda cáustica. O amido atua como depressor do ferro e a soda ajusta o pH da polpa.

- **Remoagem**

O concentrado final da flotação seguirá a etapa da remoagem para ajustar a granulometria da polpa para alimentação do mineroduto. A remoagem trabalhará em circuito fechado. O *underflow* da classificação constituirá na carga circulante do circuito e o *overflow* seguirá para o espessamento de concentrado.

- **Espessamento de concentrado**

O concentrado final remoído seguirá para a alimentação do espessador de concentrado para ajustar a percentagem de sólidos para transporte por mineroduto, promovendo a recuperação de água.

- **Espessamento de rejeito**

O *overflow* da deslamagem (lamas) e o rejeito da flotação seguirão para a alimentação do espaçador de rejeitos para adequar a percentagem de sólidos, promovendo a recuperação de água, antes de seguir para a barragem de rejeitos.

- **Transporte de polpa por mineroduto**

O *underflow* do espaçador de concentrado seguirá para os tanques de expedição do mineroduto, com um tempo de residência de 6 horas. A polpa será transportada por mineroduto através de bombas de deslocamento positivo seguindo para o Porto do Mangue. No porto do Mangue haverá tanques para recebimento da polpa por mineroduto para regularizar a alimentação do espessamento e filtração no porto.

- **Filtração e empilhamento de produtos**

Dos tanques de recebimento do mineroduto, a polpa será bombeada para o espessador de concentrado para adequar a percentagem de sólidos para alimentação da filtração. O *underflow* do espessamento de concentrado seguirá para a filtração e o *overflow* será direcionado para o espessador clarificador.

2.5 Ensaio de caracterização

2.5.1 Ensaio de granulometria

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 nº 200, e abertura 0,075 mm) representativa maior que 5%, que influencia no comportamento do material (PINTO, 2006).

Na etapa de peneiramento, o material atravessará uma série de peneiras colocadas de forma de abertura de malhas, no sentido de maior diâmetro para o menor diâmetro, sendo a última peneira a ser atravessada a de número 200, que possui abertura de 0,075 mm, na qual evidenciará 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 um mistura de defloculante de hexametáfosfato de sódio e água destilada, uma amostra de material é dispersa na mistura, de forma que as partículas sedimentam 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).

Pode-se retirar, ainda, da curva granulométrica, o diâmetro máximo das partículas, que corresponde à abertura da malha da menor peneira na qual passam, no mínimo, 95% do material.

Os valores do CC e do CNU são obtidos conforme as Equações 2.1 e 2.2.

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.1)$$

$$CC = \frac{D_{30}^2}{D_{60}D_{10}} \quad (2.2)$$

Onde:

CNU: Coeficiente de não uniformidade;

Cc: Coeficiente de curvatura;

D₁₀: Diâmetro que, na curva granulométrica, corresponde à porcentagem que passa igual a 10%;

D₃₀: Diâmetro que, na curva granulométrica, corresponde à porcentagem que passa igual a 30%;

D₆₀: Diâmetro que, na curva granulométrica, corresponde à porcentagem que passa igual a 60%.

Uma das formas de se diferenciar os tipos de solos é através do tamanho das partículas, segundo a NBR 6502 (1995), conforme podemos observar na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Frações de solos

Fração	Limites definidos pela ABNT
Bloco de rocha	x > 1m
Matação	200mm a 1m
Pedra-de-mão	60mm a 200mm
Pedregulho	2,0mm a 60mm
Areia grossa	0,6mm a 2,0 mm
Areia média	0,2 mm a 0,6 mm
Areia fina	0,06 mm a 0,2 mm
Silte	0,002 mm a 0,06
Argila	x < 0,002

Fonte: NBR 6502 (1995)

2.5.2 Limites de consistência

Quando existe a presença de materiais argilosos em solo granular fino, esse solo pode ser remoldado na presença de alguma umidade sem desagregar (DAS, 2012).

Solos com teores elevados de água podem fluir com líquido, ao passo que solos com baixos teores de umidade se apresentam como sólido. Dessa forma, a depender do teor de umidade, o comportamento do solo pode ser dividido em quatro estados, conforme se observa na Figura 2.14: Sólido, semissólido, plástico e líquido.

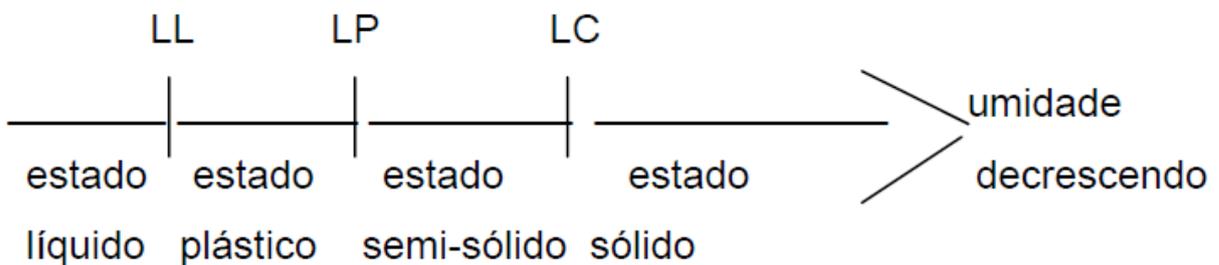


Figura 2.14 - Limites de consistência

Fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2006)

O teor de umidade na qual ocorre a transição do estado sólido para o semissólido é conhecido como limite de contração, na qual não haverá decréscimo de volume de massa de solo com a perda de umidade.

O teor que representa o ponto de transição do estado semissólido para o estado plástico é o limite de plasticidade, e do estado plástico para o estado líquido é denominado de limite de liquidez. Esses parâmetros são conhecidos como limites de Atterberg, ou limites de consistência (DAS, 2012).

O índice de plasticidade (IP) é obtido indiretamente através do LL e LP, conforme se observa na equação 2.3.

$$IP = LL - LP \quad (2.3)$$

O ensaio para determinação do limite de liquidez é realizado em um aparelho chamado de aparelho de Casagrande, que consiste essencialmente de uma concha metálica que, acionada por uma manivela, golpeia a base do citado aparelho. 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 ABNT NBR 6459/84.

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 7180/84 rege os ensaios de Determinação do Limite de Plasticidade.

2.5.3 Ensaio de Determinação da Massa Específica dos sólidos

O ensaio de determinação da massa específica dos sólidos (ρ_s), conforme a NBR 6508 (1984), visa determinar a densidade real dos grãos das partículas sólidas, ou seja, isenta de vazios. É a relação entre o peso das partículas sólidas e o seu volume.

2.5.4 Ensaio de compactação

Conforme Pinto (2006), a compactação é o ato de densificar, ou seja, retirar o ar dos vazios do solo, por meio de equipamentos mecânicos, como um rolo compactador, ou mesmo através de equipamentos manuais, como soquetes.

Segundo Massad (2012), entende-se por compactação de um solo, qualquer redução, mais ou menos rápida, do índice de vazios, por processos mecânicos.

A compactação tem o objetivo de basicamente de aumentar o contato entre os grãos e tornar o aterro mais homogêneo, reduzir a permeabilidade, etc. (PINTO, 2006).

Segundo Das (2012), a compactação aumenta a resistência dos solos, além de reduzir os recalques indesejáveis das estruturas e aumentar a estabilidade dos taludes do aterro.

Quando se compacta um solo com baixa umidade, não se consegue uma redução significativa de vazios, pois o atrito entre as partículas é muito alto. Ao se aumentar a umidade, ocorre uma lubrificação entre as partículas, promovendo assim um deslizamento entre elas, contribuindo para uma melhor acomodação. A partir de certo teor de umidade, o processo de compactação não mais consegue expulsar o ar dos vazios, porque o grau de saturação está alto (PINTO, 2006).

É perseguida uma condição em que o solo esteja compactado com uma umidade que forneça a máxima densidade aparente seca ($\gamma_{s,máx}$), chamada de umidade ótima de compactação.

O solo não é compactado em seu estado de máxima resistência, que se encontra em estado mais seco do chamado ramo seco, mas sim na condição de menor susceptibilidade a quedas bruscas de resistência quando inundado, que exatamente se encontra em seu ponto de umidade ótima.

Os solos argilosos, em regra, possuem $\gamma_{s,máx}$ baixa, da magnitude de 1,5 a 1,4 g/cm³ e umidades ótimas altas, da ordem de 35 a 30%. Já os solos que exibem valores de densidade seca na faixa de 2,0 a 2,1 kg/dm³ e umidade ótima no intervalo de 9 a 10 %, são representativos de areias com pedregulhos (PINTO, 2006).

2.5.5 Ensaio de CBR

O ensaio para determinação do índice de suporte Califórnia (ISC), conhecido também como Califórnia Bearing Ratio (CBR), foi criado no fim da década de 1920, a fim de determinar o potencial de ruptura de um subleito (POTER, 1950 apud BERNUCCI et al, 2010).

Segundo o DNIT (2006, p.37), “o ensaio de CBR 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 brita padronizada.

O corpo de prova, com o material compactado segundo critérios do ensaio de compactação Proctor, é moldado e levado à imersão em água por um período de 96 horas, na qual é empregada uma sobrecarga de 10 lb, a fim de simular a estrutura do pavimento acima dele. São medidos, com auxílio de um extensômetro, os valores de expansão do material.

Ao fim do período de imersão o corpo de prova é levado a uma prensa, na qual haverá a penetração do pistão, anotando-se as pressões do pistão e os deslocamentos correspondentes.

O ensaio fornece duas variáveis: o ISC, propriamente dito, expresso em porcentagem, e o valor de expansão.

De acordo com o DNIT (2006), existem critérios de aceitabilidade dos materiais para utilização em pavimentos, conforme se verifica na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Requisito das camadas do pavimento

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

Fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2006)

2.5.6 Ensaio de FRX

O intuito da caracterização química é conhecer a existência dos elementos e a quantidade destes na amostra, e desta forma entender possíveis comportamentos anômalos do resíduo do minério de ferro. Pois segundo o fornecedor do material, existe uma infinidade de compostos no material descartado.

Para a análise química, o material foi analisado pela técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX) que é uma técnica analítica, não destrutiva, utilizadas para identificar e determinar as concentrações dos elementos presentes nos sólidos.

2.6 Classificação dos solos

Os sistemas de classificação de solos fornecem uma ferramenta simples para averiguação das características dos solos, que são bastante variadas (DAS, 2012).

A classificação de solos tem por objetivo estimar o provável comportamento do solo, ou ao menos orientar o programa de investigação necessário para possibilitar a correta análise da problemática (PINTO, 2006).

Existem variados sistemas de classificação de solos como, por exemplo, o sistema de classificação textural, o sistema de classificação da *American Association of States Highway and Transportation Officials* (AASHTO), chamado de Sistema rodoviário de classificação ou HRB - *Highway Research Board*, e o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) (DAS, 2012).

O sistema unificado, de autoria de Casagrande, é bastante difundido em todo o mundo por sua simplicidade. Nesse sistema, todos os solos são classificados através de duas letras. A primeira, correspondendo à característica principal do solo e a segunda como característica complementar (PINTO, 2006).

Segundo Das (2012), o sistema é dividido em duas grandes categorias:

- Solos cuja porcentagem que passa na peneira número 200 (0,075 mm) é menor que 50 %. Os símbolos de grupo começam com as letras “G” que representa pedregulho ou solo pedregulhoso e “S” que representa areia ou solo arenoso.

A classificação mais utilizada atualmente, para fins de pavimentação, é a HRB, tendo sua versão final aprovada em meados de 1945, vindo a substituir o antigo sistema da *Public Roads Administration*. Essa classificação considera o limite de liquidez, o limite de plasticidade, a granulometria do solo e o índice de grupo (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006).

A Figura 2.16, e a Equação 2.6 nos mostram a classificação segundo o sistema rodoviário de classificação, e o cálculo do índice de grupo, respectivamente.

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

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

Figura 2.16 - Classificação dos solos (HRB)

Fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2006)

$$IG = 0,2a + 0,05ac + 0,01bd \quad (2.6)$$

Em que:

- a: sendo a porcentagem que passa na peneira n° 200 menos 35; se % > 75%, adota-se a= 40; se % < 35, adota-se a= 0 (a varia de 0 a 40).
- b: sendo a porcentagem que passa na peneira n° 200 menos 15; se % > 55%, adota-se b= 40; se % < 15, adota-se b= 0 (b varia de 0 a 40).
- c: sendo o valor de LL menos 40; se LL > 60, adota-se c= 20; se LL < 40, adota-se c= 0 (c varia de 0 a 20).
- d: sendo o valor de IP menos 10; se IP > 30%, adota-se d= 20; se IP > 10, adota-se d= 0 (d varia de 0 a 20).

2.7 Uso de resíduos na pavimentação

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 já foram elaborados a fim de proporcionar uma alternativa à destinação dos resíduos, das mais variadas origens, como a cinza de lodo utilizada na composição de argamassas, o resíduo fino do beneficiamento do caulim na confecção de tijolos e blocos e concreto de cimento Portland, além de composição em argamassas, como também da utilização de resíduos na construção de pavimentos de rodovias, conforme se evidencia adiante.

Costa (2006) avaliou o comportamento volumétrico e mecânico, em laboratório, de misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico, utilizando o rejeito grosso formado no processo de beneficiamento do caulim, em substituição parcial, ou mesmo total aos agregados normalmente empregados em misturas convencionais. Esta autora verificou também que se pode empregar, de acordo com a composição volumétrica, até 30% do resíduo em substituição aos agregados

comumente utilizados. O arranjo interno e a granulometria dos agregados de uma mistura influenciam seu comportamento mecânico e volumétrico. Além disso, verificou-se que a adição do resíduo nas misturas estudadas acarretou um aumento do volume de vazios do agregado mineral e do volume de vazios da mistura em geral, e uma redução da densidade aparente e da relação de betume-vazios. Ainda, concluiu que se pode empregar até 25 % do resíduo em substituição aos agregados convencionalmente utilizados, nas misturas estudadas, em relação à susceptibilidade das mesmas à umidade.

Pereira (2012) analisou a utilização da cinza de lodo em proporções pré-definidas incorporadas em uma mistura de solo-cimento, para utilizá-la como materiais de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Através do ensaio de CBR, evidenciou que o solo estudado não apresentou características mecânicas que indicassem sua utilização como material de base e sub-base de pavimentos. A resistência à compressão simples também não foi atendida, segundo exigências dos órgãos responsáveis. Apenas a expansão do material apresentou resultados satisfatórios. Ademais, observou-se que ocorreu um aumento da resistência a compressão simples em todos os traços com a adição de cimento.

Martins e Santos (2012) estudaram o comportamento de misturas de resíduo com adições de cimento para adequá-lo ao uso em pavimentação, através de ensaios como CBR, compressão simples e ensaios químicos. Estes autores concluíram que, do ponto de vista químico, o resíduo se classifica como material classe II A - material não inerte, visto que o mesmo não possui nenhuma característica que o defina como resíduo perigoso, conforme a indicação II. Já a classificação A - não inerte, se refere ao fato de que o resíduo apresenta alguns elementos como alumínio, ferro, fluoreto e manganês em teores acima dos permitidos em norma, fato este que podem leva-los a solubilizar em água, contaminando os corpos hídricos. Concluíram ainda que o resíduo em seu estado natural apresenta valores de CBR e expansão melhores quando compactados em seu ramo seco, em umidade 2% abaixo da umidade ótima. O CBR para esta umidade é, em média, 84% maior que o CBR para a umidade ótima de compactação. Ademais, evidenciou que, quando misturado com cimento, com teores de 2% a 4% abaixo da umidade ótima, a mistura apresentou valores de resistência a

compressão simples, em média, 151% maior quando comparado ao material em seu estado natural.

Santos et al. (2012) avaliou o comportamento do concreto, utilizando rejeitos de carvão em substituição aos agregados miúdos, para fins de pavimentação. Evidenciou-se que a produção de agregados miúdos oriundos dos rejeitos de carvão mostram-se bastante atraentes para a porcentagem dos rejeitos com densidade variando entre 2,4 e 2,8. Essa fração corresponde a 44% da amostra utilizada. Verificou que estudos exploratórios demonstraram a possibilidade de uso dos rejeitos do carvão como agregado na produção de blocos de concreto para a pavimentação. Concluíram que essa tecnologia traria bastantes benefícios ambientais, conservando as jazidas de exploração de agregados naturais e ajudando a acabar com o passivo ambiental oriundo da produção de carvão mineral.

Castro (2008) estudou a possibilidade de substituição parcial do solo por resíduo do beneficiamento do caulim para uso em solos-cimentos, além da caracterização ambiental, química e mineralógica das matérias primas convencionais (solos) e das alternativas (resíduo). Este autor concluiu que o resíduo é classificado como resíduo não perigoso e inerte, segundo normas da ABNT. Além disso, o material apresentou limites de Atterberg baixo, característica de materiais arenosos. Através da caracterização mineralógica por difração de raios-X o resíduo de caulim é composto das seguintes fases: caulinita, quartzo e mica. Os ensaios que determinaram o índice de atividade pozolânica, para os resíduos, com o cimento, apresentaram valores superiores ao estabelecido pela norma. Ainda, Castro (2008), evidenciou que os ensaios de resistência à compressão simples realizados nos corpos-de-prova apresentaram melhores resultados quando incorporados com 20 % da mistura de RFC (Resíduo fino de caulim) + RGC (Resíduo grosso de caulim) chegando a 95,83% de ganho de resistência em comparação ao corpo-de-prova de referência. Constatou ainda que houve um aumento de resistência considerável dos corpos de prova no 56º dia, decorrente da presença de materiais pozolânicos contidos na mistura. Os corpos de prova apresentaram picos irregulares de valores no quesito absorção de água, possivelmente pela presença de mica, no material, e por uma falta de controle da umidade no período de cura. Conclui, por fim, que é recomendado o uso de resíduo de caulim (incorporação de 20% de uma mistura de

RFC + RGC) no solo cimento para formação de uma mistura alternativa para obras civis.

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. Por fim, foram elaborados estudos a fim de analisar o comportamento da mistura com adição de ligantes (cimento e/ou cal). Chegaram à conclusão 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) estudaram 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. Estes autores concluíram que os contaminantes existentes nos vidros estão dentro dos limites aceitáveis nas normas ambientais australianas, a exceção dos teores de ferro que estavam acima dos limites aceitáveis, havendo, portanto uma necessidade de monitoramento da utilização do vidro. Por fim, concluíram que, apesar dos elevados teores de ferro, utilização de vidro reciclado é viável ambientalmente para execução de sub-base de pavimentos como material agregado.

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. Foram feitos ensaios tanto no lodo colhido na ETA quanto no solo utilizado na composição do solo-cimento. Chegaram ao resultado que a granulometria do solo analisado apresenta graduação mais uniforme com presença de 80,68% de areia, 11,5% de silte e 7,22% de argila, enquanto que o lodo oriundo da ETA possui larga distribuição de tamanhos das partículas, com porcentagens da ordem de 48,86% de areia, 32,82% de silte e 18,23% de argila. As amostras de lodo, mesmo após em secagem a temperatura ambiente, apresentaram teores de umidade bastante elevados, da ordem de 32,4%, se comparado à umidade presente em amostras de solos, secas nas mesmas condições (0,34%). As amostras de lodo e solo obtiveram resultados de massa específica real dos grãos de 2,172 g/cm³ e 2,631 g/cm³, respectivamente. Estes 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. Entretanto, a porcentagem de aproximadamente 33% de silte influenciou o comportamento da amostra, ocasionando um comportamento siltoso em segundo plano, contendo partículas finas, frágeis, pouco resistentes aos esforços de cisalhamento. A amostra de lodo contém, além de outros compostos, maiores teores respectivamente de alumínio, ferro e silício. 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.

Pagnussat (2004) estudou a utilização de escória granulada de fundição em blocos de concreto para pavimentação, na substituição parcial do cimento ou do agregado miúdo, através de ensaios de resistência à compressão, desgaste por abrasão e absorção de água em concreto com diferentes teores de substituição (10%, 30% ou 50%). A substituição parcial de cimento por EGF ocasionou efeito imediato na coloração dos blocos, saindo de um “cinza claro” para um “cinza escuro”, à medida que se aumentava o teor de substituição. Entretanto, não

ocorreram variações significativas na trabalhabilidade, tal qual no acabamento superficial. Todavia, os blocos produzidos com EGF em substituição parcial aos agregados miúdos, não sofreram variações em suas colorações, em relação aos blocos de referência. Este autor concluiu ainda 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 em substituição, não sendo significativo, porém, para teores de até 10% de EGF em relação ao cimento. No mais, evidenciou que, em relação à substituição de agregados miúdos por EGF, pode haver melhorias nas propriedades resistentes, ou pelo menos manutenção das existentes, para teores de substituição além do máximo teor estudado no trabalho. Para os intervalos de análises, contudo, houve um decréscimo para todos os traços estudados.

Hood (2006) estudou a viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação, através dos ensaios de resistência à compressão, resistência à abrasão e absorção de água, com intervalo de teores entre 0% e 100%. Foi evidenciado que, a amostra apresentou um decréscimo na resistência à compressão à medida que se aumentavam os teores de RCD. Dessa forma, os teores de 50%, 75% e 100 % de RCD foram insatisfatórios, com valores bem abaixo dos 25 MPa esperados aos 28 dias. Porém, para o teor de 25 %, o valor observado da resistência à compressão aos 28 dias ficou acima dos 25 MPa, confirmando, dessa forma, a possibilidade de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado, para pavimentos sujeitos a baixas solicitações de tráfego. Em relação à absorção de água, não há prejuízo significativo até o teor de 25%. Por outro lado, quanto à resistência à abrasão, todos os teores influenciaram significativamente nos resultados, sendo o menor índice de desgaste entre os blocos com agregado miúdo reciclado, para o teor de 25%. Assim, a substituição de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado, em teores de 25%, mesmo estando fora dos padrões técnicos exigidos por norma (NBR 9780/87), tem viabilidade técnica para utilização em blocos de concreto para pavimentação em

situações de menor solicitação de tráfego, sendo descartada sua utilização em teores de substituição de 50%, 75% e 100%.

Nóbrega e Melo (2009) analisaram o uso de agregado de resíduo da construção civil na pavimentação urbana de João Pessoa. Foram realizadas caracterizações físicas, através de ensaios de análise granulométrica, Abrasão Los Angeles e índice de forma, e mecânicas, com ensaios de compactação Proctor e Índice de suporte Califórnia, de agregados reciclados de RCD. Foi constatado que o material se enquadra na classificação de resíduo misto, devido à sua composição conter quantidades de concreto e argamassa inferiores a 90% de sua composição total, além do que os contaminantes existentes não ultrapassaram a 1%, estando abaixo dos requisitos em norma que é de 2% para materiais de mesmas características e 3% para materiais de características distintas. O resultado para o índice de forma correspondeu a 3,32, superando o limite preconizado em norma que é de 3. Quanto ao desgaste por abrasão, o RCD atingiu valores bem altos, da ordem de 65%. O material passante na peneira 0,42mm atingiu valores da magnitude de 42,9%, fora do intervalo de 10% a 40% prescrito em norma. Para os ensaios de compactação Proctor, executados para a energia intermediária, foram obtidos $\rho_{s,max}$ de 1,818 kg/m³ e umidade ótima (W_{ot}) de 14,3 %. Os ensaios de CBR revelaram que a amostra apresenta CBR na ordem de 40,8 e expansão de 0,23%, estando condizente com os requisitos exigidos para utilização como material de sub-base de pavimentos. Concluíram, portanto que, à exceção dos requisitos relacionados à porcentagem que passa na peneira 0,42mm e ao índice de forma, o agregado reciclado atende a todas as demais exigências de normas para utilização em camadas de sub-base de pavimentos. Uma solução simples pode ser adotada de forma a ajustar os demais requisitos exigidos em norma.

Farias (2005) avaliou a utilização de misturas de solo/cinza pesada na pavimentação, através de ensaios ambientais, e ensaios mecânicos como compactação, índice de suporte Califórnia, resistência à compressão simples e ao comportamento resiliente, isoladamente e misturados. Foram realizadas cinco tipos de misturas, com diferentes teores de cinza e solo em peso, a saber: Solo puro, 70% de solo + 30% de cinza, 50% de solo + 50% de cinza, 30% de solo + 70% de cinza e cinza pura. O solo estudado foi coletado numa jazida de solo explorada com material de aterro no município de Tubarão, em Santa Catarina. A cinza pesada, por outro

lado, foi coletada na bacia de sedimentação 7, na Usina Termelétrica Jorge Lacerda, localizada no município de Capivari de Baixo, em Santa Catarina. O solo estudado apresentou classificação A-5, segundo o sistema HRB de classificação rodoviária, e NG (não laterítico argiloso) conforme classificação MCT. Apresentou ainda LL de 49% e LP de 40%. Em relação ao ensaio de CBR, a amostra atingiu resultados variando de 5% a 11%, e expansão variando de 1,5% a 3,5%, resultados com variabilidade significativa (comum para os solos saprolíticos) e expansão acima dos requisitos permitidos para as camadas finais de terraplenagem (expansão acima de 2,0 %). A cinza pesada apresentou elevada dificuldade de ser compactada, e pequenas sensibilidades da $\rho_{s,max}$ em relação as variações nos teores de umidade. A cinza apresentou um altíssima umidade ótima, da ordem de 42%, baixa capacidade de suporte (CBR de 5%) e baixíssima $\rho_{s,max}$ (0,95 t/m³). Dessa forma, essas características tornam inviável sua utilização em camadas nobres de pavimentos. A mistura solo/cinza pesada, para as misturas estudadas, promoveu uma estabilização granulométrica do material, melhorando de forma significativa o comportamento do material, de forma que a mistura atingiu valores de CBR na ordem de 20%, o que habilita a utilização de algumas misturas em camadas finais de terraplenagem. Não obstante, quando as misturas são analisadas em relação ao comportamento dinâmico, apresentam um péssimo comportamento resiliente, incompatibilizando seu uso em camadas finais e camada de reforço de subleito. Dessa forma, a mistura solo/cinza pesada apenas poderia ser utilizada para rodovias de baixo volume de tráfegos. Com o acréscimo de cal, as misturas solo/cinza pesada melhoraram significativamente sua capacidade de suporte, alcançando valores de CBR próximos a 60%, podendo, dessa forma, serem utilizadas em camadas de sub-base. O resíduo é classificado ambientalmente como classe II- não inerte devido à elevada presença de ferro, manganês e alumínio, solubilizados em limites acima dos permitidos na norma para resíduos inertes.

Silveira (2010) apresentou um estudo sobre a caracterização e avaliação das potencialidades de dois resíduos finos provenientes do beneficiamento das rochas Micaxisto (pedreira Araguaia) e Granito (pedreira Anhanguera) em camadas de pavimento. Em conjunto com os resíduos, foi utilizado, para fins do estudo, um solo tropical da região de Goiânia/GO. Foram realizados estudos de caracterização física, mecânica, química e mineralógica dos dois resíduos, do solo natural, das misturas

(preparadas com adições de 10, 15 e 20% em massa de cada um dos resíduos. Foram executadas investigações baseadas na metodologia MCT através dos ensaios de Mini-MCV, Mini-CBR, expansão e perda de massa por imersão, ensaios de compressão simples, sucção utilizando a técnica do papel filtro e ensaios triaxiais cíclicos para avaliação do módulo de resiliência. Concluiu que o resíduo da pedraira Araguaia possui granulometria típica de silte arenoso, enquanto que o resíduo oriundo da pedraira Anhanguera um comportamento de areno-siltoso. Os dois resíduos foram considerados não plásticos, apesar de apresentarem porcentagens consideráveis de finos. O peso específico dos grãos do resíduo da pedraira Araguaia foi de 28,2 kN/m³, enquanto que o resíduo coletado na pedraira Anhanguera obteve valores na ordem de 27,4 kN/m³. O solo foi classificado como argila de baixa plasticidade (CL), solo argiloso (A-7-6) e solo argiloso laterítico (LG'), segundo respectivamente os sistemas de classificação do SUCS e MCT. Quanto ao peso específico dos grãos das misturas, observou que ao se incluir porcentagens do resíduo da pedraira Araguaia ocorreu um aumento do γ_s em relação ao γ_s do solo natural. Em contrapartida, o mesmo não ocorreu com o resíduo da pedraira Anhanguera, ocorrendo um decréscimo dos valores de γ_s em relação ao solo natural. No que tange a análise mineralógica, em ambos os resíduos foi verificada a presença de quartzo. Os ensaios de compactação em miniatura apresentaram, para os resíduos puros das pedreiras de Araguaia e Anhanguera, valores de γ_{dmax} e W_{ot} de 15,75 kN/m³ e 14,30% e 15,36 kN/m³ e 13,75%, respectivamente. Já o solo natural apresentou valores de 17,45 kN/m³ e 19%. A mistura com o resíduo de Araguaia, com 10%, apresentou o maior valor de γ_{dmax} , com valor na ordem de 18,00 kN/m³, e W_{ot} de 17,75%. Já a mistura com resíduo da pedraira Anhanguera apresentou resultados muito próximos, mais ainda prevalecendo a mistura com 10%, com valores de γ_{dmax} e W_{ot} de 17,75 kN/m³ e 18,16%. Quanto ao Mini-CBR, o resíduo de Micaxisto apresentou CBR de 9,39, 11,32 e 11,66% para os três CP moldados. O resíduo de Granito apresentou CBR um pouco mais baixo, com valores de 8,75, 9,33 e 7,07%. O solo, moldado na energia intermediária, obteve CBR na ordem de 30%, para os quatro CPs moldados. A mistura com resíduos da pedraira Araguaia, com 15 e 10% em massa, apresentaram os maiores resultados, com valores máximos da ordem de 26%. Por outro lado, a mistura com resíduos da pedraira Anhanguera obteve resultados bem inferiores, atingindo um valor máximo (apenas dois CPs) em torno de 20%, para a mistura com 15% em massa de resíduo. A

sucção obtida nas misturas com resíduos da pedra Araguaia sempre foi maior que os resultados obtidos para a mistura com a pedra Anhanguera. Entretanto, ambas apresentaram uma diminuição da sucção com o aumento do teor de resíduo. Quanto aos aspectos mecânicos, os resíduos de Micaxisto apresentaram resultados levemente superiores aos resíduos de rocha granítica. Silveira (2010) concluiu por fim que o trabalho apresentou uma alternativa ambientalmente relevante para transformar um resíduo em conjunto com um solo, em um material artificial com potencialidade de utilização em camadas de pavimentos rodoviários.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados, bem como a metodologia empregada para o desenvolvimento da pesquisa.

Os ensaios deste trabalho foram realizados no Laboratório de Engenharia de Materiais, na unidade de ensaios de FRX, e no Laboratório de Mecânica dos Solos, ambos localizados na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

O procedimento experimental foi desenvolvido em três etapas: a primeira etapa compreendeu os ensaios químicos. A segunda abrangeu a caracterização física. A terceira compreendeu os ensaios específicos da pavimentação, todas as etapas foram realizadas para o resíduo do minério de ferro e para o solo granular, além das diferentes misturas: 15% de resíduo de minério de ferro e 85% de solo granular, 25% de resíduo de minério de ferro e 75% de solo granular, 50% de resíduo de minério de ferro e 50% de solo granular.

A Tabela 3.1 resume as etapas e os ensaios realizados neste trabalho.

Tabela 3.1 - Ensaio realizados

Etapa	Ensaio	Norma	Número de ensaios
Caracterização Química	Ensaio de FRX		3
Caracterização Física	Massa específica dos sólidos	NBR 6508/1984	15
	Granulometria	NBR 7181/1984	15
	Limite de liquidez	NBR 6459/1984	5
	Limite de plasticidade	NBR 7180/1984	5
Ensaio de Pavimentação	Compactação	NBR 7182/1986	45
	CBR	NBR 9895/1987	30

O grupo MHAG Serviços e Mineração S/A, responsável pela exploração da mina do Bonito, foi o fornecedor do resíduo do minério de ferro para fins deste trabalho.

As amostras do resíduo do beneficiamento do minério de ferro foram coletadas em seu local de despejo, nas proximidades da mina. Devido à dificuldade com o transporte, o resíduo foi coletado em duas etapas diferentes, sendo a primeira coleta realizada no dia 20 de maio de 2014 e a segunda coleta no dia 16 de outubro de 2014. Através da Figura 3.1 é possível observar a grande quantidade de resíduo despejado a céu aberto.



Figura 3.1 - Depósito de resíduo do minério de ferro

O material foi devidamente identificado e acondicionado em sacos hermeticamente fechados, ficando armazenado no laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN, como se observa na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Amostra acondicionada

A jazida se localiza no município de Jucuturu, na microrregião do Vale do Açu, com localização geográfica de $6^{\circ}02'02''\text{S}$ e $37^{\circ}01'12''\text{W}$. A Figura 3.3 indica a

principal rodovia de acesso à mina do Bonito partindo de Natal, a capital do estado do Rio Grande do Norte.

Segundo informações repassadas pelo Grupo MHAG Mineração, não foi encontrado nenhum elemento químico em desacordo com as condições ambientais. Os resultados dos ensaios não foram divulgados, entretanto para a retirada da licença ambiental é necessária assegurar a ausência total de qualquer elemento radioativo, ficando assim, em conformidade com as recomendações da Organização Mundial da Saúde.

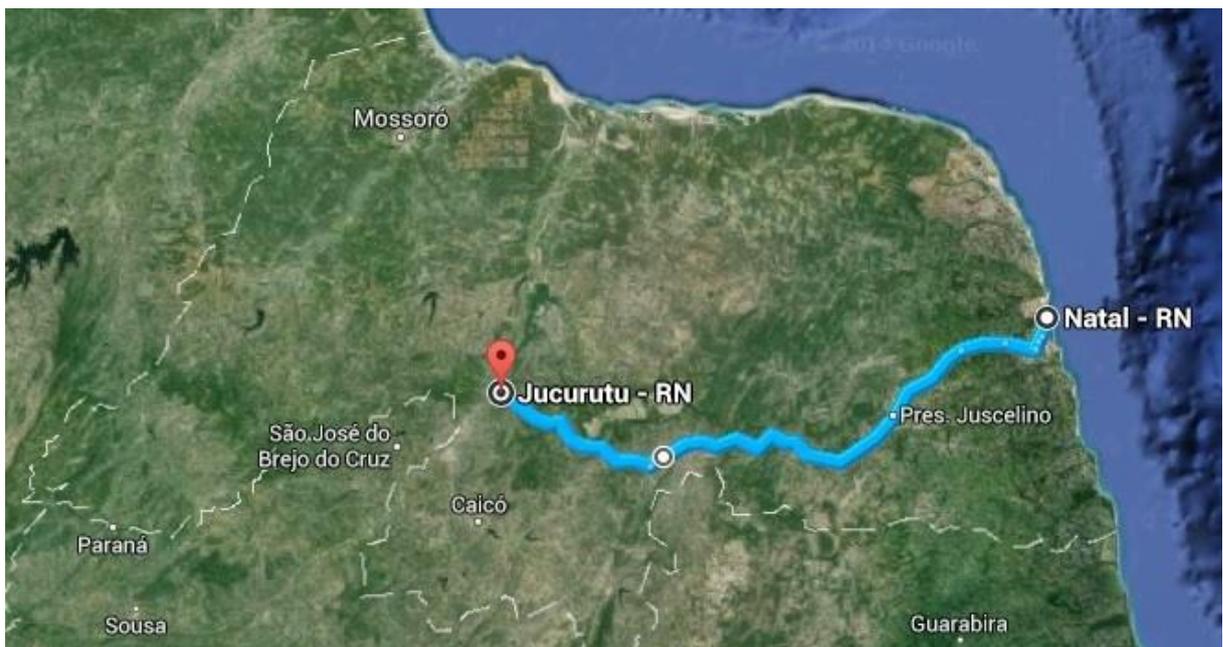


Figura 3.3 - Rodovias de acesso à mina do Bonito

Referente ao solo granular utilizado, a empresa SBS Engenharia, responsável pela duplicação da BR-304 no município de Macaíba no Rio Grande do Norte, foi a fornecedora do material para fins deste trabalho. As amostras de solo foram coletadas em uma única vez no dia 10 de junho de 2014 em um ponto específico localizado na marginal da própria estrada que será duplicada, conforme indica a Figura 3.4, à localização geográfica exata da jazida é $5^{\circ}53'00''S$ e $35^{\circ}28'06''W$.



Figura 3.4 – Trecho da BR-304 intitulado de Reta Tabajara

3.2 Caracterização química

Para o ensaio de fluorescência de Raios X (FRX), foi utilizando o equipamento EDX-720 da marca Shimadzu. Foram realizados três ensaios, sendo o primeiro referente à primeira coleta de resíduo de minério de ferro, o segundo correspondente a segunda coleta do resíduo e o terceiro ensaio referente à única coleta de solo granular. Para a avaliação da perda ao fogo, o material após seco em estufa por 24 h em temperatura de 110°C, foi aquecido até 1000°C por 60 minutos. A Figura 3.5 abaixo ilustra o equipamento utilizado.



Figura 3.5 – Equipamento EDX-720 para ensaio de FRX

3.3 Caracterização física

Esta etapa teve por objetivo a determinação de algumas características do resíduo do minério de ferro e do solo granular, além das suas três diferentes misturas. A granulometria, que consiste no peneiramento e na sedimentação, para se determinar o tamanho dos grãos. Os índices de consistências (limites de Atterberg) para conhecer a influência das partículas finas perante a água. E a massa específica real dos sólidos presentes no material coletado.

Foram executados três ensaios de massa específica dos sólidos, conforme a norma NBR 6508/1984, para o resíduo de minério de ferro, para o solo granular e para as três diferentes misturas de modo a minorar possíveis erros nos resultados obtidos. A Figura 3.6 abaixo ilustra o ensaio de massa específica dos sólidos.



Figura 3.6 – Ensaio de massa específica dos sólidos

Foram realizados quinze ensaios de granulometria baseados na norma NBR 7181/1984 tanto a parte do peneiramento (Figura 3.7), como a parte da

sedimentação (Figura 3.8), devida a 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.



Figura 3.7 – Granulometria por Peneiramento



Figura 3.8 – Granulometria por Sedimentação

Foram realizados cinco ensaios de limite de liquidez (Figura 3.9) e cinco ensaios de limite de plasticidade (Figura 3.10) conforme as normas NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984, sendo um ensaio de limite de plasticidade e um ensaio de limite de liquidez para o resíduo do minério de ferro, para o solo granular e para cada uma das três misturas.



Figura 3.9 – Determinação do limite de liquidez



Figura 3.10 – Determinação do limite de plasticidade

3.4 Ensaio de aplicação em pavimentação

Nessa etapa, foram executados ensaios de compactação Proctor (Figura 3.11), conforme a norma NBR 7182 (1986), e o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou, como também é conhecido, CBR (Califórnia Bearing Ratio), segundo a norma NBR 9895 (1987) como indica a Figura 3.12.



Figura 3.11 – Ensaio de Compactação



Figura 3.12 – Ensaio do Índice de Suporte Califórnia

Os ensaios de compactação e CBR são considerados os mais importantes da pesquisa, pois são os responsáveis por determinar os parâmetros mais relevantes no dimensionamento do pavimento, além de interferir diretamente na aceitabilidade do material como aplicação para pavimentação.

Foram realizados três ensaios de compactação para as energias normal, intermediária e modificada para o resíduo do minério de ferro, o solo granular e as três diferentes misturas, totalizando quarenta e cinco ensaios, sendo todos eles executados com reuso de material.

Foram utilizados aproximadamente quatro 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-304. Foi adicionada água, até se atingir o teor de umidade de 6%. 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, de forma que essa média passou a representar os critérios de $\gamma_{s,max}$ e W_{ot} dos corpos de prova a serem moldados nos ensaios de CBR. Foram realizados três ensaios de CBR na energia intermediária e três ensaios de CBR na energia modificada para o resíduo do minério de ferro, o solo granular e as três diferentes misturas.

Para cada ensaio CBR foram necessários aproximadamente 6 quilos de material, sendo ele puro ou nas diferentes misturas. Foi acrescentado água até atingir a umidade ótima. Antes de iniciar a compactação, foi colocado papel filtro na parte inferior do cilindro de modo a diminuir a saída excessiva de água durante a realização do ensaio. À medida que as camadas foram compactadas, o material em espera armazenado na bandeja foi coberto com papel filme, a fim de evitar a evaporação excessiva da água presente na amostra e com isso impedir a compactação do material com teores de umidades diferentes da umidade ótima.

Durante a realização do ensaio, foi coletada uma amostra referente à segunda camada a fim de identificar o teor de umidade real do material durante a realização do ensaio.

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

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Introdução

No presente capítulo é realizada a apresentação e discussão dos resultados obtidos na pesquisa.

Inicialmente apresentam-se os resultados e discussões da caracterização química do resíduo do minério de ferro e do solo granular. Os ensaios de granulometria, massa específica dos sólidos, limite de liquidez e limite de plasticidade são analisados logo após. Em seguida, são discutidos os resultados dos ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia.

Os resultados obtidos foram comparados com outros resultados para diferentes resíduos usados na pavimentação a fim de visualizar uma comparação entre os materiais e podendo assim fazer um levantamento da sua viabilidade técnica.

4.2 Resultados da caracterização química

A Tabela 4.1 evidencia as presenças dos óxidos no resíduo do minério de ferro, por meio do ensaio de FRX. Os resultados encontrados são referentes à primeira coleta.

Tabela 4.1 – Óxidos da primeira coleta do resíduo do minério de ferro

Óxido	(%)
Fe ₂ O ₃	80,063
SiO ₂	10,774
Al ₂ O ₃	8,264
MnO	0,758
P ₂ O ₅	0,142

Os resultados da caracterização química indicam altos teores de minério de ferro no próprio resíduo.

Os óxidos Fe₂O₃ (80%), SiO₂ (10%) e Al₂O₃ (8,0%) se apresentam como principais componentes, correspondendo a 98% do total dos compostos apresentados.

A Tabela 4.2 evidencia as presenças dos óxidos no resíduo do minério de ferro, através do ensaio de FRX. Os resultados encontrados são referentes à segunda coleta.

Tabela 4.2 – Óxidos da segunda coleta do resíduo do minério de ferro

Óxido	(%)
Fe ₂ O ₃	80,004
SiO ₂	10,802
Al ₂ O ₃	8,272
MnO	0,761
P ₂ O ₅	0,161

Os resultados da segunda coleta são praticamente idênticos aos resultados encontrados na primeira coleta. Comprovando assim a grande quantidade de minério de ferro no próprio resíduo.

Os óxidos Fe_2O_3 (80%), SiO_2 (10%) e Al_2O_3 (8,0%) também se apresentam como principais componentes, correspondendo a 98% do total dos compostos apresentados.

A Tabela 4.3 evidencia as presenças dos óxidos no solo granular da Reta Tabajara em Macaíba no Rio Grande do Norte, através do ensaio de FRX. Os resultados encontrados são referentes à única coleta.

Tabela 4.3 – Óxidos da única coleta do solo granular

Óxido	(%)
SiO_2	40,720
Al_2O_3	29,755
Fe_2O_3	21,252
TiO_2	4,521
ZrO_2	3,752

Os resultados da caracterização química indicam altos teores de sílica, alumina e óxido de ferro III.

Os óxidos SiO_2 (40%), Al_2O_3 (29%) e Fe_2O_3 (21%) se apresentam como principais componentes, correspondendo a 90% do total dos compostos apresentados.

4.3 Resultados da caracterização física

O resíduo do minério de ferro puro apresentou ρ_s (g/cm³) de 4,011, 4,023 e 3,955 para os três ensaios realizados. Atingindo um valor médio de massa específica dos sólidos na ordem de 3,996 g/cm³. Essa alta massa específica dos sólidos acontece devida a grande quantidade de minério de ferro presente no próprio resíduo.

Para a mistura em massa de 50% de resíduo de minério de ferro e 50% de solo granular, os três ensaios de massa específica dos sólidos apresentaram os seguintes resultados, ρ_s (g/cm³) 3,206, 3,194, 3,238 atingindo um valor médio de 3,213 g/cm³.

Para a mistura em massa de 25% de resíduo de minério de ferro e 75% de solo granular, os três ensaios de massa específica dos sólidos apresentaram os seguintes resultados, ρ_s (g/cm³) 2,901, 2,903, 2,887 atingindo um valor médio de 2,897 g/cm³.

Para a mistura em massa de 15% de resíduo de minério de ferro e 85% de solo granular, os três ensaios de massa específica dos sólidos apresentaram os seguintes resultados, ρ_s (g/cm³) 2,794, 2,776, 2,767 atingindo um valor médio de 2,767 g/cm³. Evidenciando assim que à medida que o solo granular ia sendo acrescentando à mistura a massa específica dos sólidos do material ia diminuindo gradativamente, pois o solo granular que possui uma menor densidade passou a ocupar o lugar do minério de ferro que possui uma maior densidade.

Por fim, os três ensaios de massa específica realizados para o solo granular puro apresentaram os seguintes resultados, ρ_s (g/cm³) 2,498, 2,491, 2,542 atingindo um valor médio da ordem de 2,510 g/cm³.

A Figura 4.1 revela os resultados obtidos nos ensaios de massa específica dos sólidos.

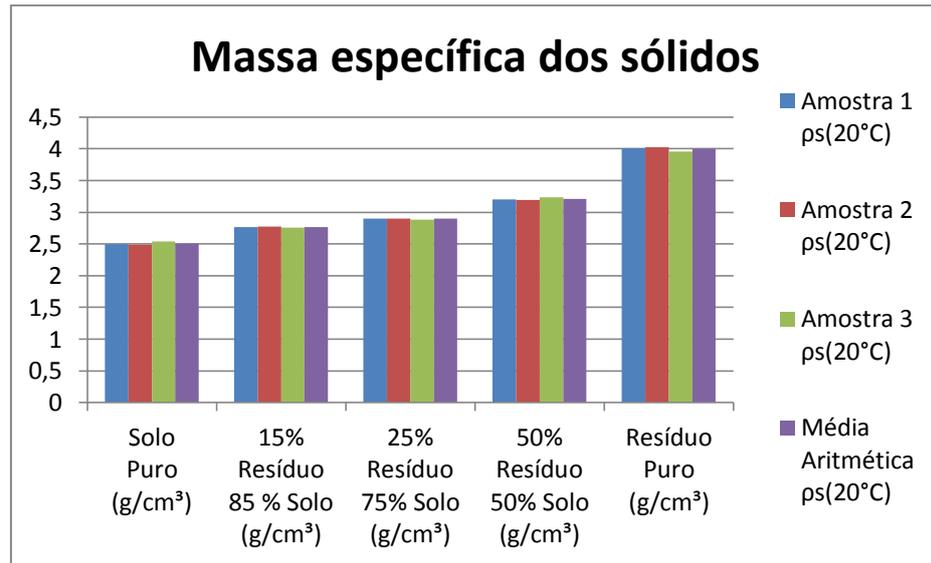


Figura 4.1 – Resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos

Comparando-se os resultados com outros materiais, Castro (2008) obteve a ρ_s para o RFC 2,66 g/cm³. Já Costa (2006) encontrou valores na ordem de 2,59 g/cm³ como resultado para o rejeito do beneficiamento do caulim. Pereira (2012) obteve a ρ_s , para a cinza de lodo de esgoto, de 2,52 g/cm³. Com a adição de solo e cimento, na proporção de 81% de solo, 9% de cimento e 10% de cinza, atingiu o valor de 2,68 g/cm³. Se comparados aos valores encontrados neste trabalho, tanto o resíduo de minério de ferro puro como as três diferentes misturas apresentaram valores bastante elevados para a massa específica dos sólidos.

Em relação aos ensaios granulométricos, os resultados são apresentados nas figuras seguintes. A Figura 4.2 apresenta o valor médio correspondente aos três ensaios de granulometria para o resíduo do minério de ferro puro.

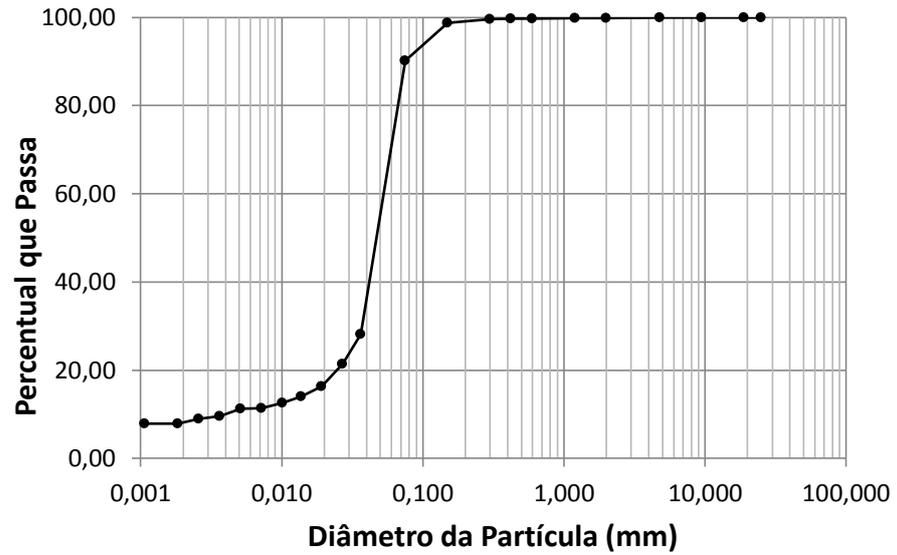


Figura 4.2 – Curva granulométrica para o resíduo do minério de ferro puro

A Figura 4.3 apresenta o valor médio correspondente aos três ensaios de granulometria para a mistura com 50% de resíduo de minério de ferro e 50% de solo granular.

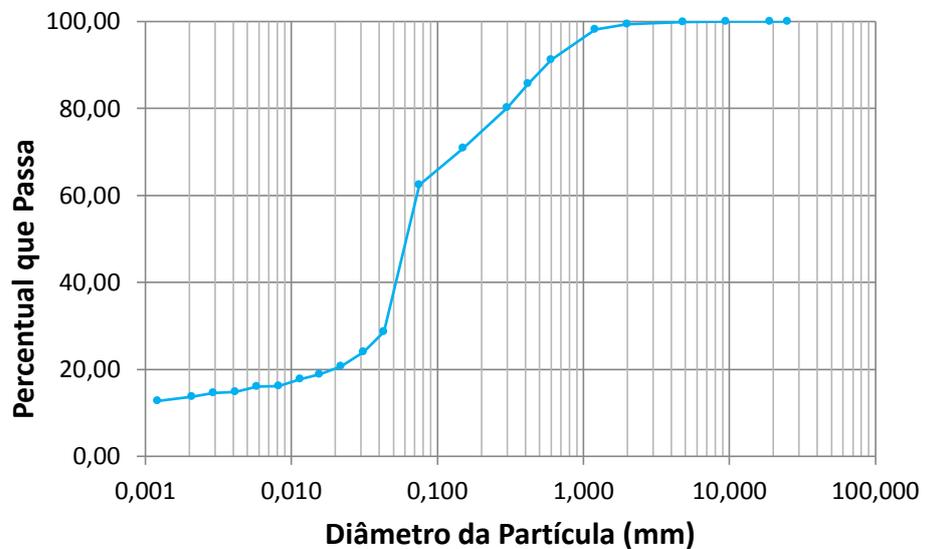


Figura 4.3 – Curva granulométrica para a mistura com 50% de resíduo de minério de ferro e 50% de solo granular

A Figura 4.4 apresenta o valor médio correspondente aos três ensaios de granulometria para a mistura com 25% de resíduo de minério de ferro e 75% de solo granular.

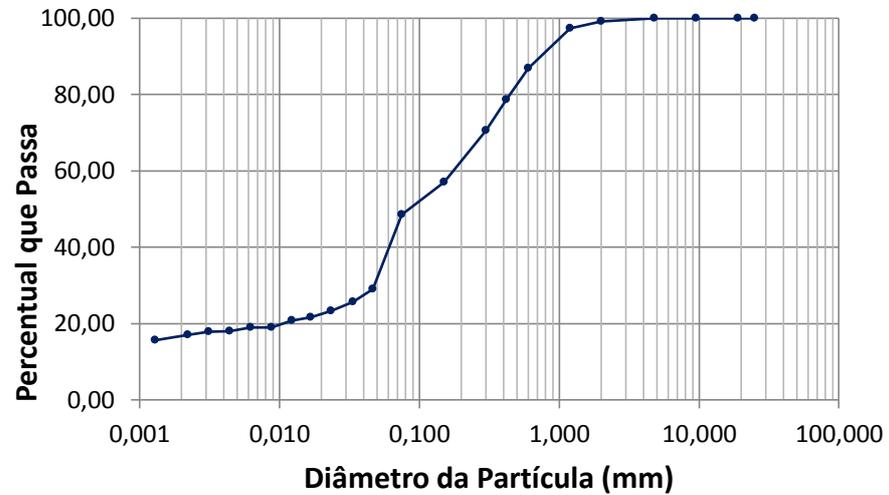


Figura 4.4 – Curva granulométrica para a mistura com 25% de resíduo de minério de ferro e 75% de solo granular

A Figura 4.5 apresenta o valor médio correspondente aos três ensaios de granulometria para a mistura com 15% de resíduo de minério de ferro e 85% de solo granular.

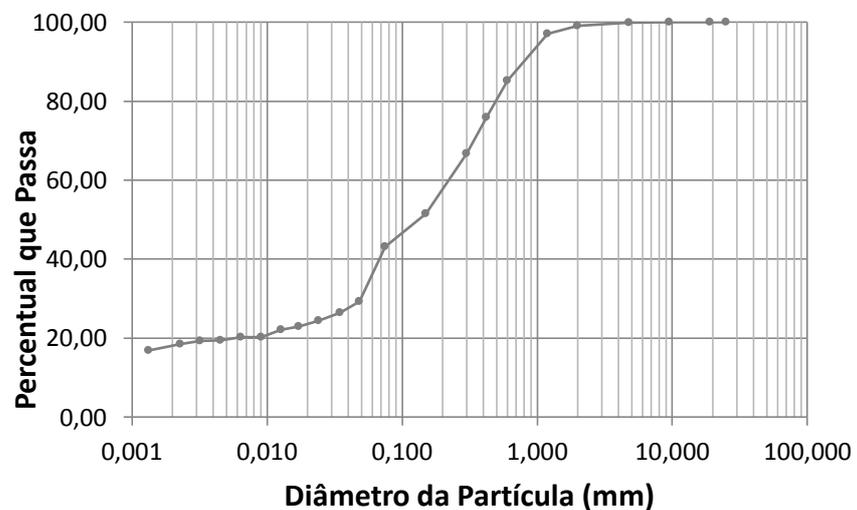


Figura 4.5 – Curva granulométrica para a mistura com 15% de resíduo de minério de ferro e 85% de solo granular

A Figura 4.6 apresenta o valor médio correspondente aos três ensaios de granulometria para o solo granular puro.

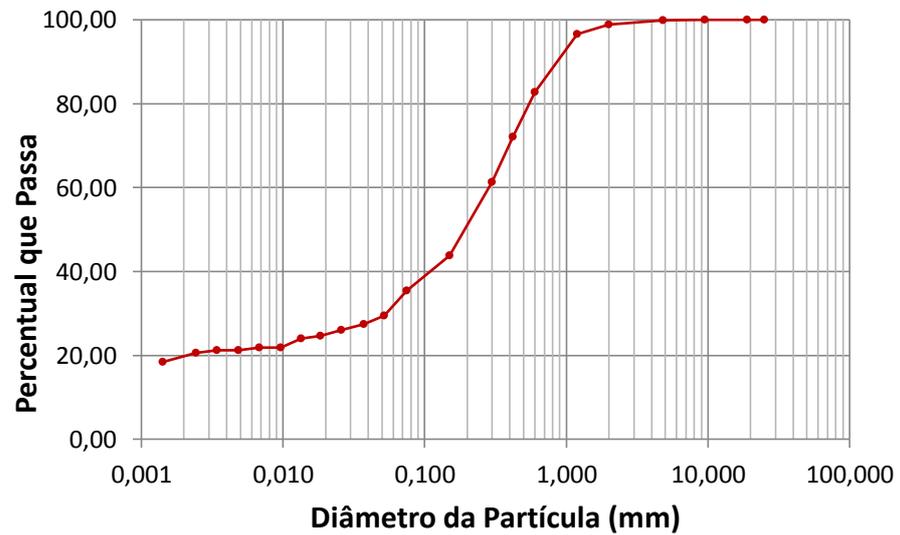


Figura 4.6 – Curva granulométrica para o solo granular puro

Por fim, a Figura 4.7 compila todas as curvas granulométricas em um único gráfico.

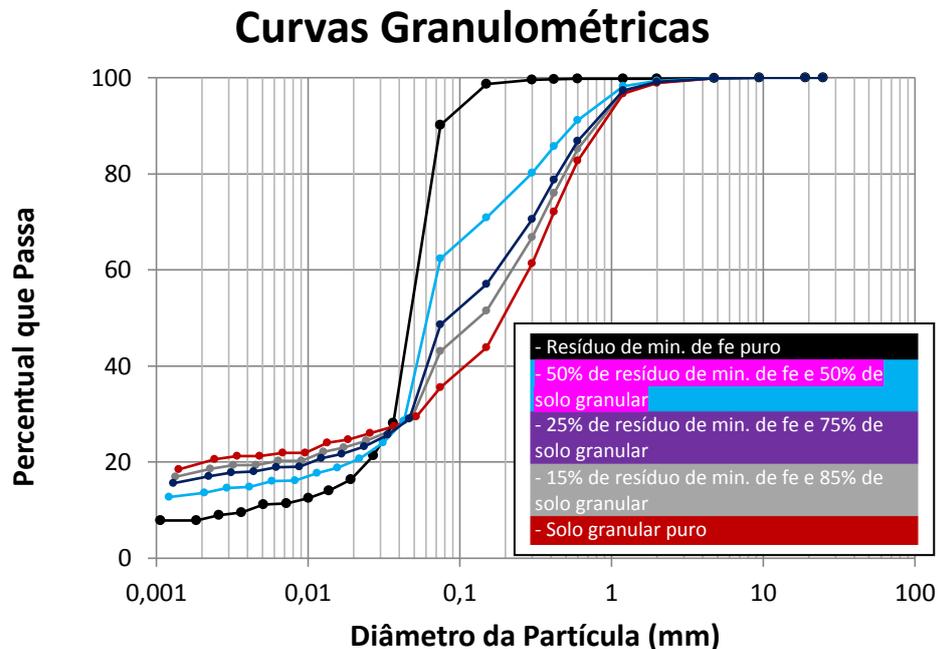


Figura 4.7 – Compilação das curvas granulométricas

A análise dos resultados obtidos mostra que tanto o resíduo do minério ferro como o solo granular são compostos essencialmente pelas frações granulométricas areia e silte. Apresentando assim um grande teor de finos, teor esse que influencia diretamente no comportamento da amostra.

Foram realizados ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade para o resíduo do minério de ferro puro, o solo granular e as três diferentes amostras. O resíduo do minério de ferro e as três diferentes amostras se comportaram como materiais não plásticos. Já o solo granular 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 6%.

Segundo os resultados obtidos, o resíduo de minério de ferro foi classificado como uma argila siltosa e o solo granular foi classificado como uma areia siltosa conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). De acordo com o sistema de classificação rodoviário (HBR), o resíduo é classificado, segundo os ensaios de granulometria, como A-7 (solo argiloso), não plástica, de uso não

recomendado para subleitos, o solo granular foi classificado como A-6 (solo argiloso) e também não sendo recomendado para subleitos.

As Figuras 4.8 a 4.13 mostram as faixas granulométricas, segundo a norma do DNIT 141/2010 – Especificação de Serviço, exigidas para bases estabilizadas granulometricamente, e as curvas granulométricas das amostras ensaiadas. Para o ensaio 01, ensaio 02, ensaio 03, ensaio 04 e ensaio 05, têm-se, resíduo de minério de ferro, 50% de resíduo de minério de ferro e 50% de solo granular, 25% de resíduo de minério de ferro e 75% de solo granular, 15% de resíduo de minério de ferro e 85% de solo granular, solo granular, respectivamente. Todos os pontos das faixas granulométricas de A até F estão representadas na Tabela 4.4 abaixo.

Tabela 4.4 – Granulometria do material das faixas de A até F conforme DNIT
(NORMA DNIT 141/2010 – ES)

Tipos	Para N > 5 X 10 ⁶				Para N < 5 X 10 ⁶		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	± 5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

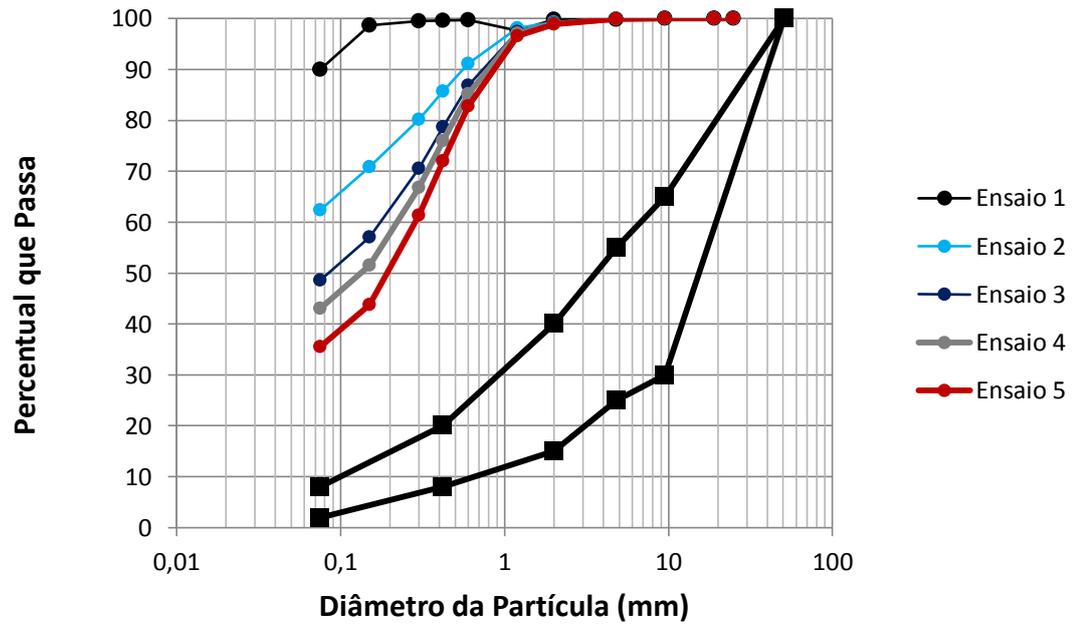


Figura 4.8 - Curvas granulométricas- Faixa A (NORMA DNIT 141/2010 – ES)

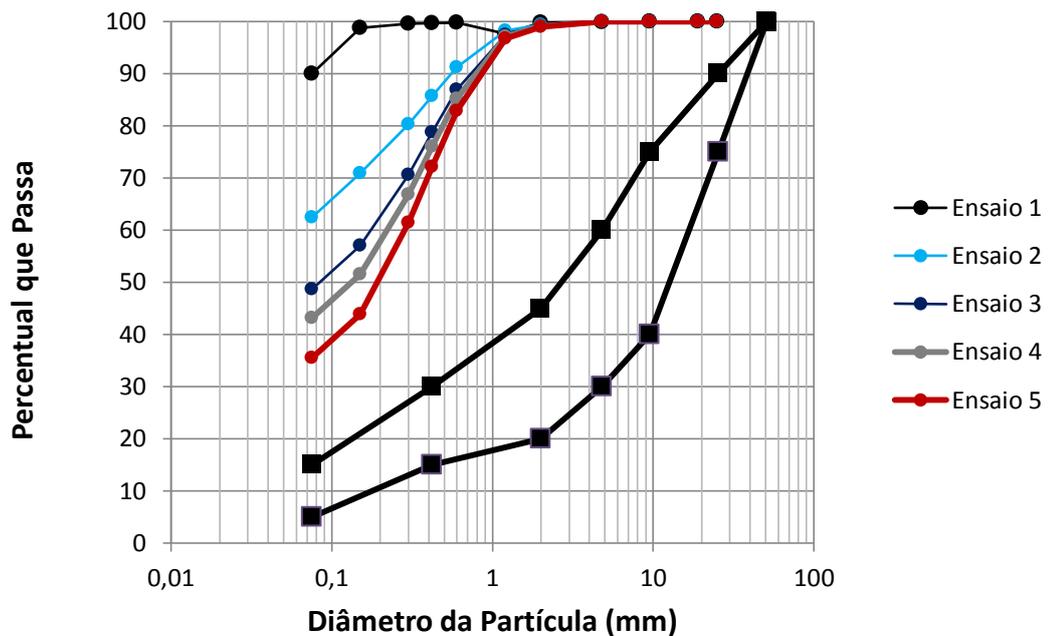


Figura 4.9 - Curvas granulométricas- Faixa B (NORMA DNIT 141/2010 – ES)

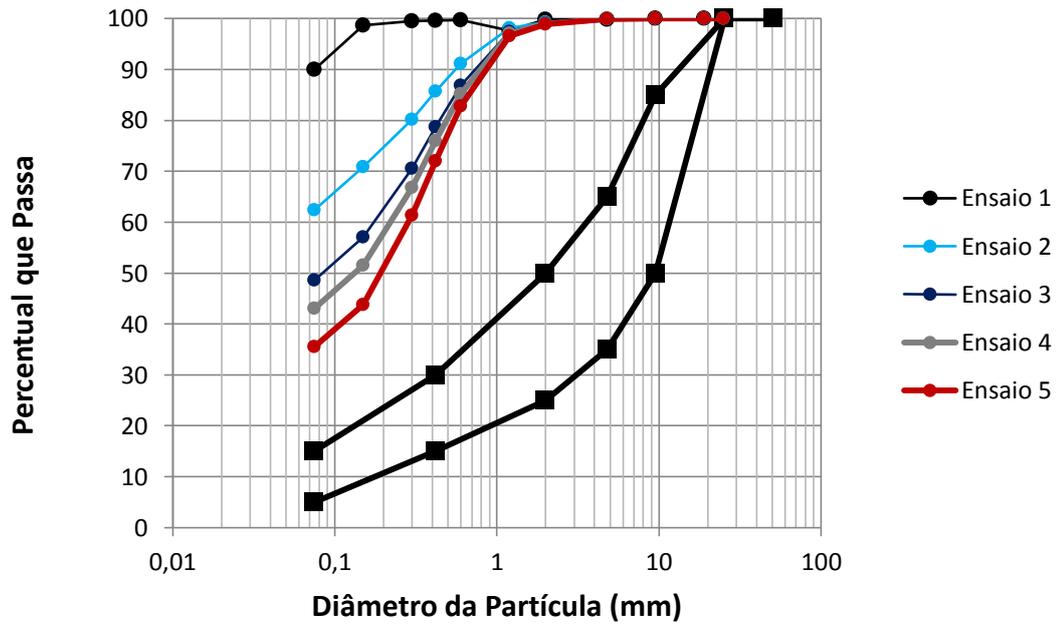


Figura 4.10 - Curvas granulométricas- Faixa C (NORMA DNIT 141/2010 – ES)

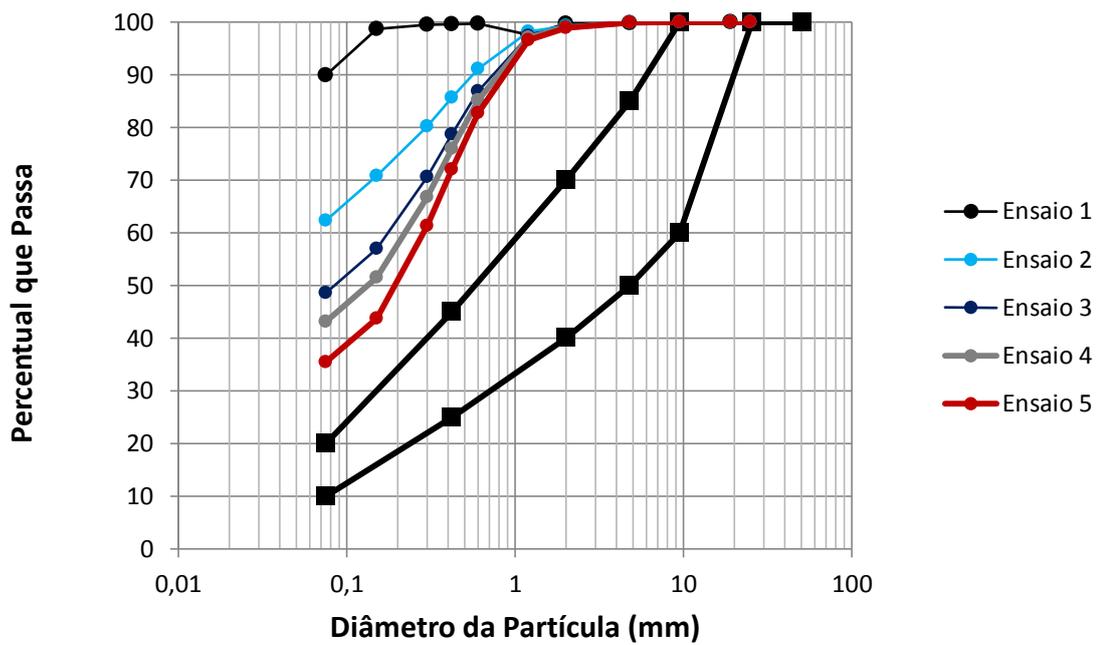


Figura 4.11 - Curvas granulométricas- Faixa D (NORMA DNIT 141/2010 – ES)

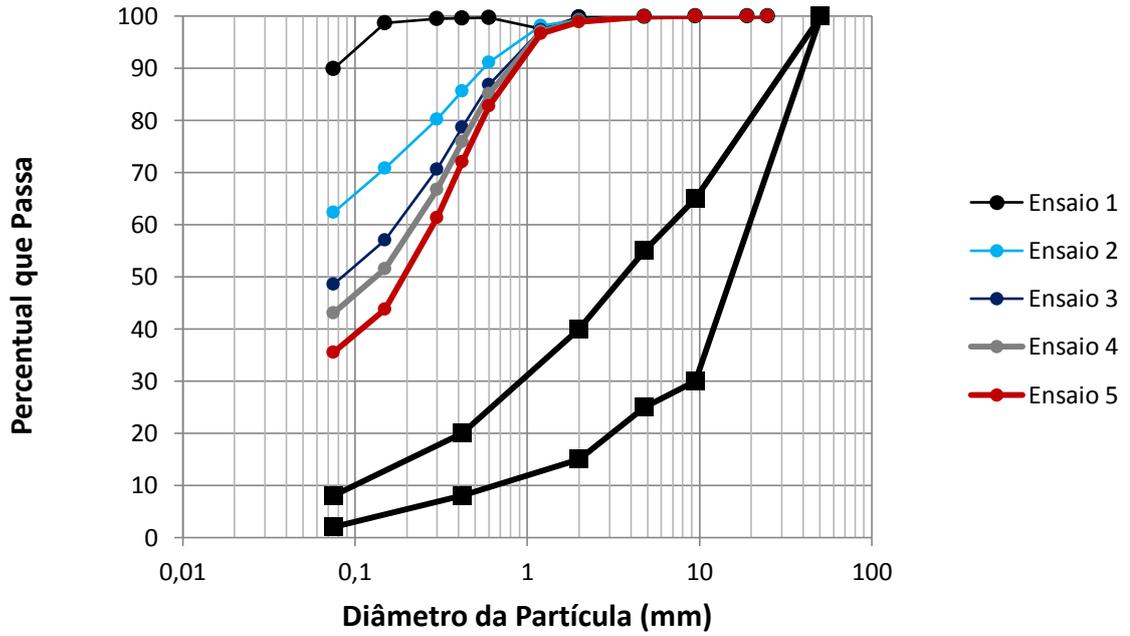


Figura 4.12 - Curvas granulométricas- Faixa E (NORMA DNIT 141/2010 – ES)

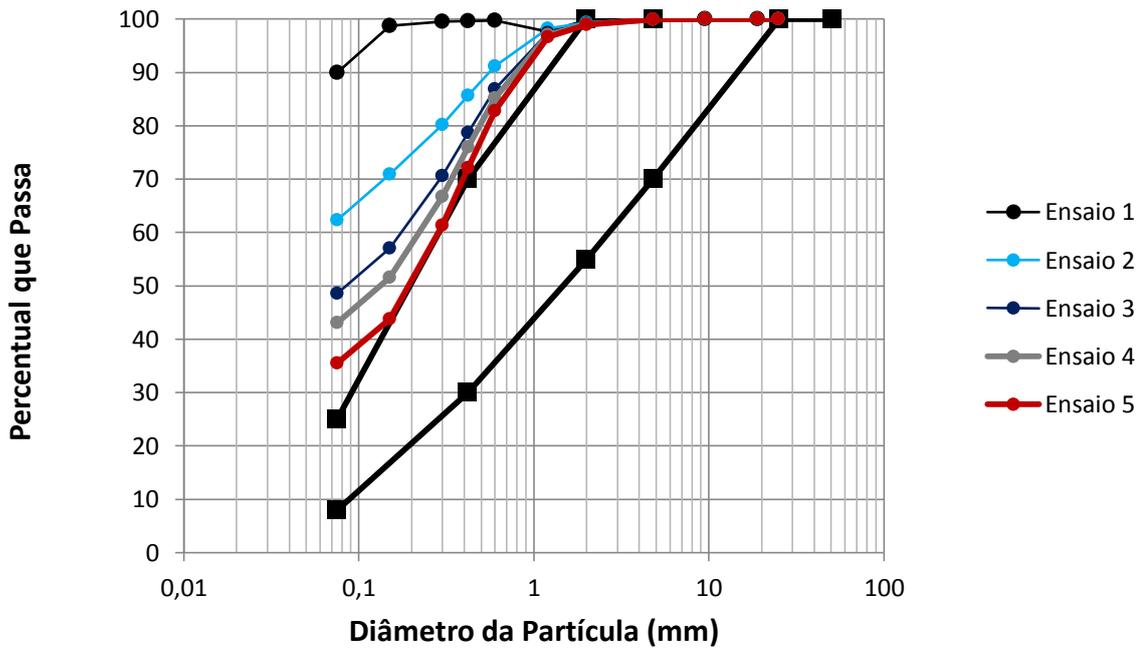


Figura 4.13 - Curvas granulométricas- Faixa F (NORMA DNIT 141/2010 – ES)

De acordo com as Figuras 4.14 a 4.18, as amostras ensaiadas não atendem a nenhuma faixa granulométrica exigida por norma para utilização como base estabilizada granulometricamente. Dessa forma, os materiais, segundo critérios granulométricos, não podem ser utilizados como materiais de base de pavimentos. Entretanto, para utilização como material de sub-base não existe restrição granulométrica quanto a sua utilização.

4.4 Resultados dos ensaios de pavimentação

Os resultados dos ensaios de compactação Proctor energia normal, intermediário e modificado, e as respectivas massas específicas aparente secas e teores de umidade ótimos são apresentados conforme as Figuras de 4.14 a 4.18.

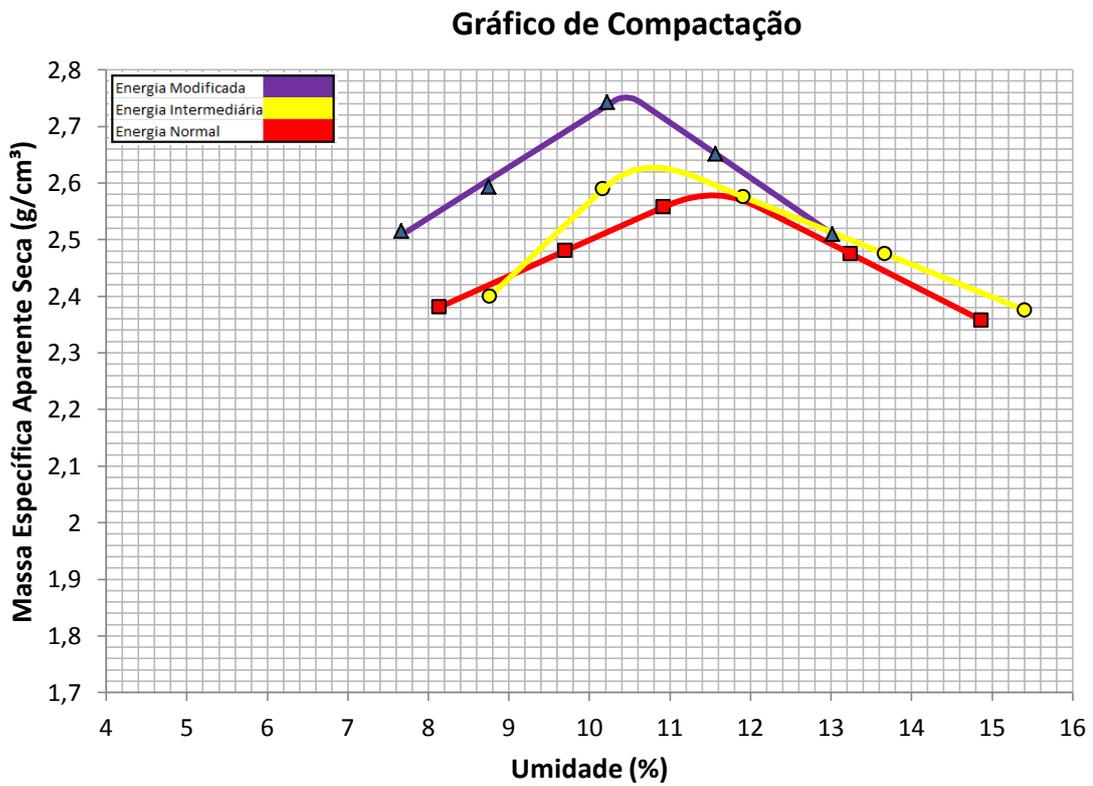


Figura 4.14 – Compactação nas três energias para o resíduo do minério de ferro puro

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de compactação para o resíduo do minério de ferro puro

Energia	Ensaio de Compactação	
	Ensaio	Média
Normal	W(%)	11,53
	pd (g/cm³)	2,58
Intermediária	W(%)	10,49
	pd (g/cm³)	2,60
Modificado	W(%)	10,46
	pd (g/cm³)	2,75

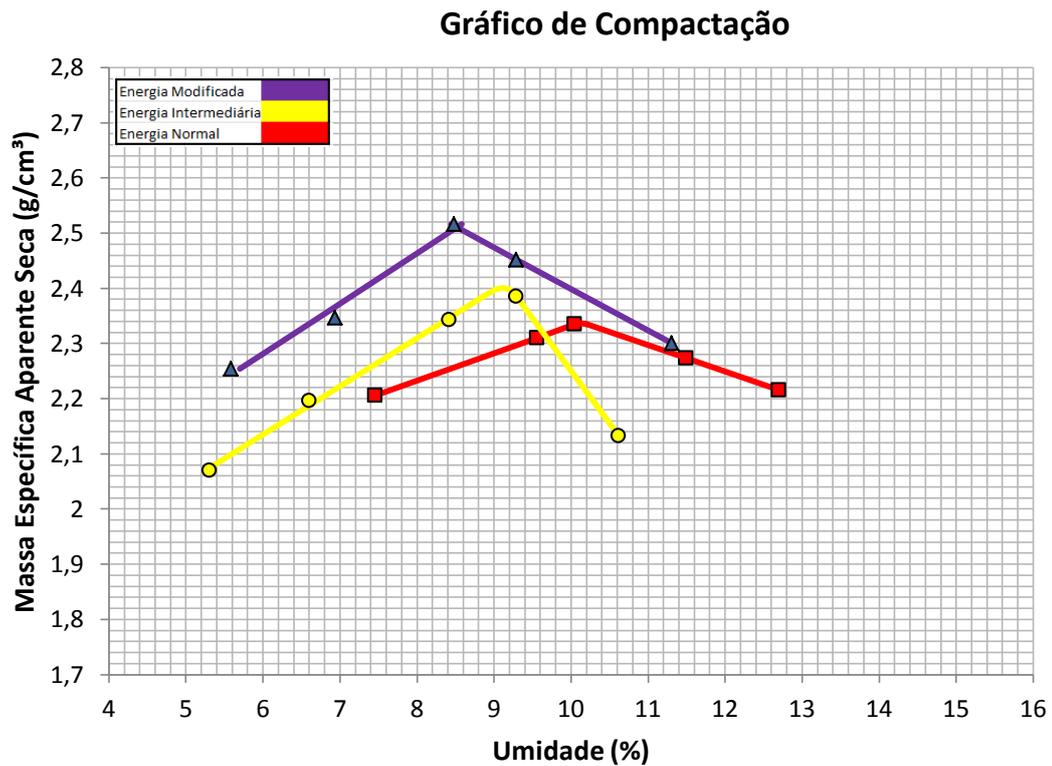


Figura 4.15 – Compactação nas três energias para 50% de resíduo de minério de ferro e 50% de solo granular

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de compactação para 50% de resíduo de minério de ferro e 50% de solo granular

Energia	Ensaio de Compactação	
	Ensaio	Média
Normal	W(%)	10,13
	pd (g/cm ³)	2,34
Intermediária	W(%)	9,11
	pd (g/cm ³)	2,40
Modificado	W(%)	8,48
	pd (g/cm ³)	2,52

Gráfico de Compactação

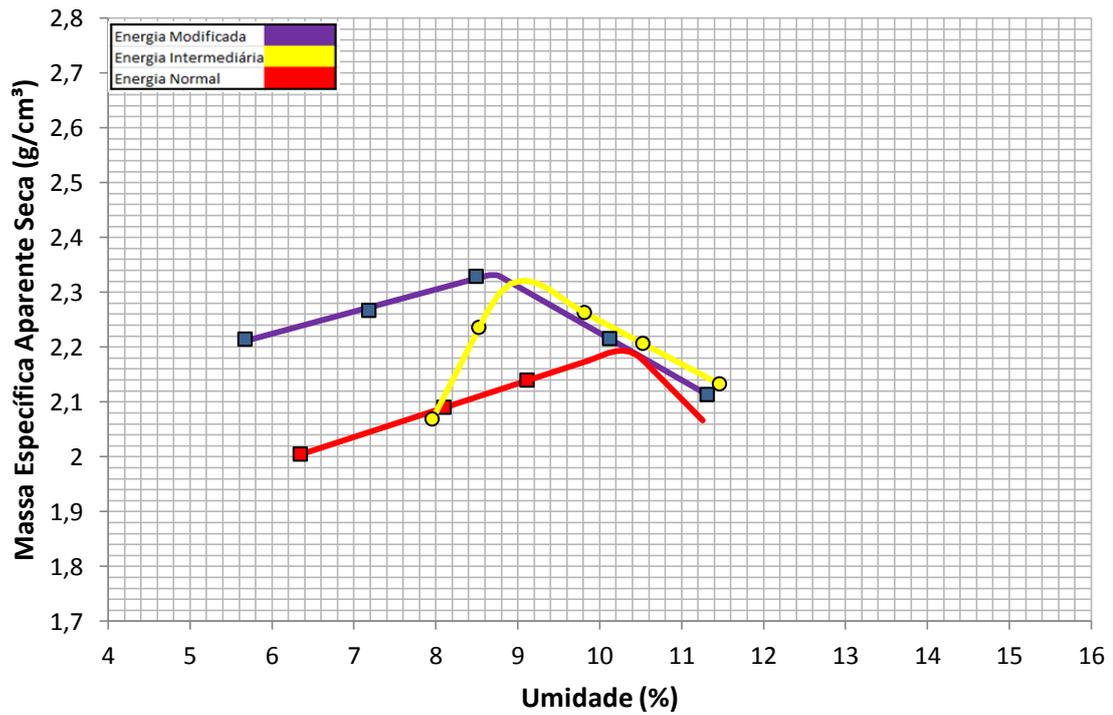


Figura 4.16 – Compactação nas três energias para 25% de resíduo de minério de ferro e 75% de solo granular

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de compactação para 25% de resíduo do minério de ferro e 75% de solo granular

Energia	Ensaio de Compactação	
	Ensaio	Média
Normal	W(%)	10,27
	pd (g/cm³)	2,19
Intermediária	W(%)	9,07
	pd (g/cm³)	2,32
Modificado	W(%)	8,70
	pd (g/cm³)	2,33

Gráfico de Compactação

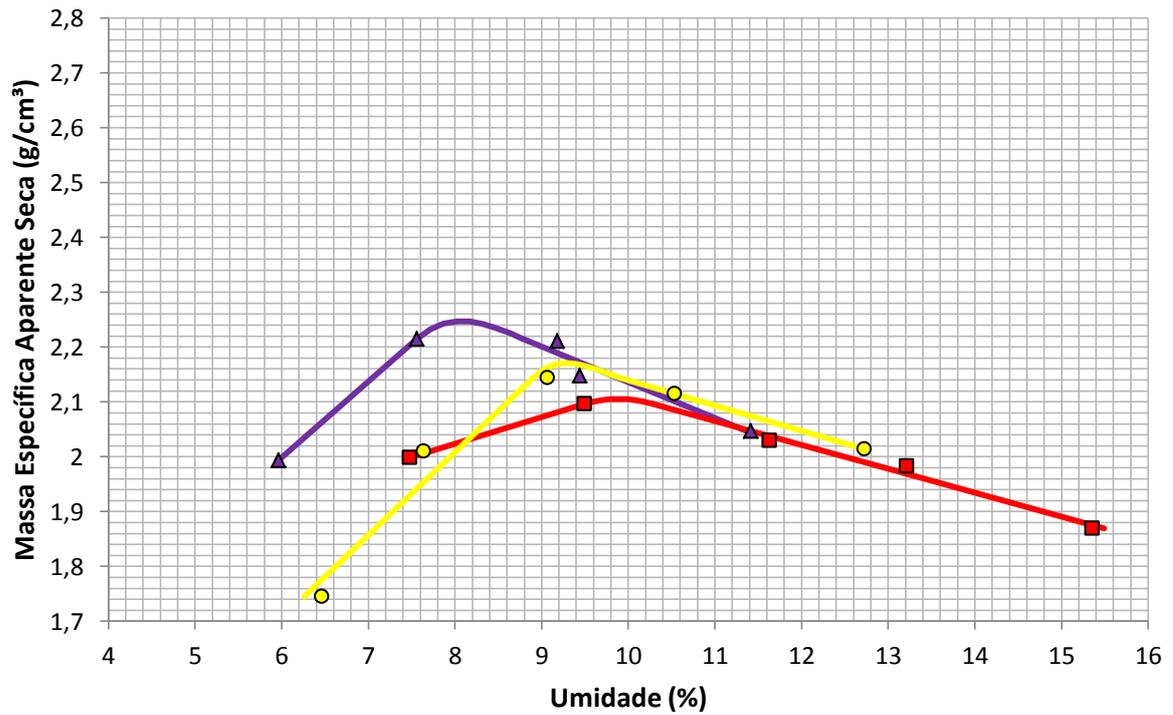


Figura 4.17 – Compactação nas três energias para 15% de resíduo de minério de ferro e 85% de solo granular

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de compactação para 15% de resíduo de minério de ferro e 85% de solo granular

Energia	Ensaio de Compactação	
	Ensaio	Média
Normal	W(%)	9,88
	pd (g/cm³)	2,11
Intermediária	W(%)	9,29
	pd (g/cm³)	2,17
Modificado	W(%)	8,07
	pd (g/cm³)	2,25

Gráfico de Compactação

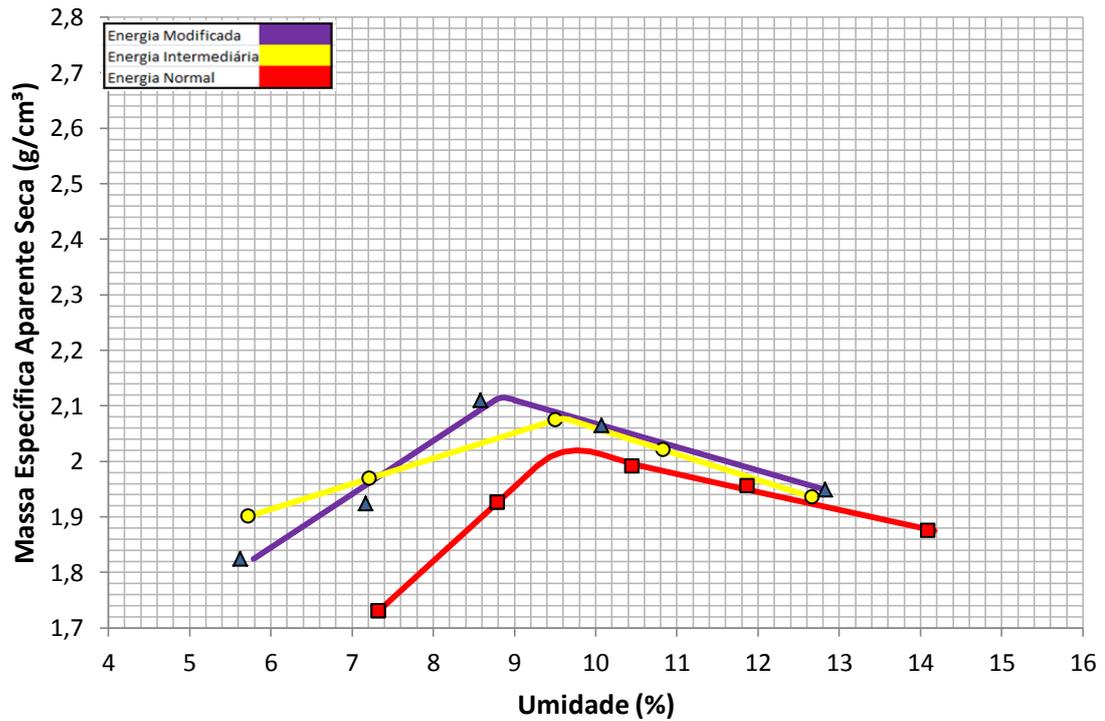


Figura 4.18 – Compactação nas três energias para o solo granular puro

Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios de compactação para o solo granular puro

Energia	Ensaio de Compactação	
	Ensaio	Média
Normal	W(%)	9,76
	pd (g/cm³)	2,02
Intermediária	W(%)	9,59
	pd (g/cm³)	2,08
Modificado	W(%)	8,86
	pd (g/cm³)	2,11

Conforme o resultado dos ensaios percebe-se que as curvas de compactação, através das Figuras 4.14 a 4.18, à medida que se aumenta a energia aplicada na compactação, a curva se desloca para esquerda e para cima. Assim, o aumento da energia de compactação provoca o aumento da massa específica seca, apesar de em pequena magnitude, e a diminuição do teor de umidade ótima. Este é o comportamento compatível com solos de uma forma geral.

Pereira (2012), utilizando mistura de solo-cimento, compactado em energia modificada, com teores de 3%, 6% e 9%, obteve massas específicas secas de 1,745g/cm³, 1,77 g/cm³ e 1,78 g/cm³ respectivamente.

Nóbrega e Melo (2009), usando resíduos da construção civil em substituição a agregados para pavimentação, obtiveram massa específica seca de 1,818 g/cm³ e w_{ot} de 14,3%. Já Pereira (2012) encontrou valores de ρ_{dmax} de 1,65g/cm³, 1,67 g/cm³ e 1,68 g/cm³, respectivamente para os teores de cimento de 3%, 6% e 9%.

Castro (2008) encontrou massa específica seca da ordem de 1,96 g/cm³ para o solo puro e 1,93 g/cm³, 1,905 g/cm³ e 1,876 g/cm³ respectivamente para os teores de SR_{caulim} de 10%, 20% e 30% de caulim.

Os resultados analisados se mostraram bastante satisfatórios, pois materiais, com massas específicas aparentes secas elevadas, tendem a apresentar bons comportamentos quando sujeito a solicitações, com resistências elevadas e baixa compressibilidade, próprio para materiais de pavimentação.

As Tabelas 4.10 a 4.14 fornecem os resultados dos ensaios de CBR para as duas energias estudadas, conforme se observa adiante.

Tabela 4.10 – Valor de CBR médio para o resíduo de minério de ferro puro

Energia Intermediária	
Teor de umidade (%)	10,49
Massa específica seca (g/cm ³)	2,60
CBR(%)	19,38
Expansão(%)	0,076
Energia Modificada	
Teor de umidade (%)	10,46
Massa específica seca(g/cm ³)	2,75
CBR(%)	37,17
Expansão(%)	0,050

A amostra, compactada na energia intermediária, apresentou CBR na ordem de 19%, e expansão 0,076%, conforme é extraído da Tabela 4.10, estando apta, segundo preconiza o DNIT (2006), a ser utilizada como material de reforço de subleito e subleito de pavimentos.

A amostra, compactada na energia modificada, apresentou CBR na ordem de 37%, e expansão 0,050%, de acordo com a Tabela 4.10, estando apta, segundo preconiza o DNIT (2006), a ser utilizada como material de sub-base, reforço de subleito e subleito de pavimentos.

Tabela 4.11 - Valor de CBR médio para 50% de resíduo de minério de ferro e 50% de solo granular

Energia Intermediária	
Teor de umidade (%)	9,11
Massa específica seca (g/cm ³)	2,40
CBR(%)	23,46
Expansão(%)	0,045
Energia Modificada	
Teor de umidade (%)	8,48
Massa específica seca(g/cm ³)	2,52
CBR(%)	29,91
Expansão(%)	0,069

A amostra, compactada na energia intermediária, apresentou CBR na ordem de 23%, e expansão 0,045%, conforme é extraído da Tabela 4.11, estando apta, segundo preconiza o DNIT (2006), a ser utilizada como material de sub-base, reforço de subleito e subleito de pavimentos.

A amostra, compactada na energia modificada, apresentou CBR na ordem de 29%, e expansão 0,069%, de acordo com a Tabela 4.11 estando apta, segundo preconiza o DNIT (2006), a ser utilizada como material de sub-base, reforço de subleito e subleito de pavimentos.

Tabela 4.12 - Valor de CBR médio para 25% de resíduo de minério de ferro e 75% de solo granular

Energia Intermediária	
Teor de umidade (%)	9,07
Massa específica seca (g/cm ³)	2,32
CBR(%)	30,53
Expansão(%)	0,065
Energia Modificada	
Teor de umidade (%)	8,70
Massa específica seca(g/cm ³)	2,33
CBR(%)	57,68
Expansão(%)	0,036

A amostra, compactada na energia intermediária, apresentou CBR na ordem de 30%, e expansão 0,065%, conforme é extraído da Tabela 4.12, estando apta, segundo preconiza o DNIT (2006), a ser utilizada como material de sub-base, reforço de subleito e subleito de pavimentos.

A amostra, compactada na energia modificada, apresentou CBR na ordem de 57%, e expansão 0,036%, de acordo com a Tabela 4.12, estando apta, segundo preconiza o DNIT (2006), a ser utilizada como material de sub-base, reforço de subleito e subleito de pavimentos.

Tabela 4.13 - Valor de CBR médio para 15% de resíduo de minério de ferro e 85% de solo granular

Energia Intermediária	
Teor de umidade (%)	9,29
Massa específica seca (g/cm ³)	2,17
CBR(%)	23,72
Expansão(%)	0,039
Energia Modificada	
Teor de umidade (%)	8,07
Massa específica seca(g/cm ³)	2,25
CBR(%)	52,26
Expansão(%)	0,09

A amostra, compactada na energia intermediária, apresentou CBR na ordem de 23%, e expansão 0,039%, conforme é extraído da Tabela 4.13, estando apta, segundo preconiza o DNIT (2006), a ser utilizada como material de sub-base, reforço de subleito e subleito de pavimentos.

A amostra, compactada na energia modificada, apresentou CBR na ordem de 52%, e expansão 0,09%, de acordo com a Tabela 4.13, estando apta, segundo preconiza o DNIT (2006), a ser utilizada como material de sub-base, reforço de subleito e subleito de pavimentos.

Tabela 4.14 - Valor de CBR médio para o solo granular puro

Energia Intermediária	
Teor de umidade (%)	9,59
Massa específica seca (g/cm ³)	2,08
CBR(%)	16,50
Expansão(%)	0,12
Energia Modificada	
Teor de umidade (%)	8,86
Massa específica seca(g/cm ³)	2,11
CBR(%)	25,02
Expansão(%)	0,12

A amostra, compactada na energia intermediária, apresentou CBR na ordem de 16%, e expansão 0,12%, conforme é extraído da Tabela 4.14, estando apta, segundo preconiza o DNIT (2006), a ser utilizada como material de reforço de subleito e subleito de pavimentos.

A amostra, compactada na energia modificada, apresentou CBR na ordem de 25%, e expansão 0,12%, de acordo com a Tabela 4.14, estando apta, segundo preconiza o DNIT (2006), a ser utilizada como material de sub-base, reforço de subleito e subleito de pavimentos.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente capítulo são apresentadas as conclusões acerca da pesquisa realizada e algumas recomendações futuras para trabalhos da mesma ordem do tema.

De acordo com os ensaios realizados, concluiu-se que:

- Segundo os resultados da caracterização química foram encontrados altos teores de minério de ferro no próprio resíduo. Provocando a alta densidade do material, os altos teores do minério de ferro foram encontrados devido à falta de tecnologia da mineradora no processo de beneficiamento, não conseguindo extrair todo minério da rocha. Os óxidos Fe_2O_3 (80%), SiO_2 (10%) e Al_2O_3 (8,0%) se apresentam como principais componentes, correspondendo a 98% do total dos compostos apresentados, tanto na primeira coleta como na segunda coleta. Para o solo granular foram encontrados altos teores de sílica, alumina e óxido de ferro III, sendo esses os principais compostos encontrados totalizando 90% do material.
- O resíduo de minério de ferro, a mistura em massa de 50% de resíduo de minério de ferro e 50% de solo granular, a mistura em massa de 25% de resíduo de minério de ferro e 75% de solo granular, a mistura em massa de 15% de resíduo de minério de ferro e 85% de solo granular, solo granular puro, apresentaram massa específica real (g/cm^3) de 3,996, 3,213, 2,897, 2,767, 2,510 respectivamente, o que caracteriza todas as amostras como resultados relativamente elevados.
- Conforme o SUCS, o resíduo do minério de ferro pode ser classificado como argila siltosa e o solo granular como areia siltosa. Já o HRB classifica o resíduo do minério de ferro como material A-7 (solo argiloso), não plástica e o solo granular como A-6 (solo argiloso), ambos não são recomendados para subleitos.
- Todas as amostras apresentaram granulometria fora das faixas granulométricas exigidas pelos órgãos responsáveis para utilização como camada de base.

- Segundo os ensaios de compactação na energia normal para todas as amostras, houve uma variação na umidade ótima de 9,76% até 11,53% e na massa específica aparente seca de 2,02 até 2,58.
- Segundo os ensaios de compactação na energia intermediária para todas as amostras, houve uma variação na umidade ótima de 9,07% até 10,49% e na massa específica aparente seca de 2,08 até 2,60.
- Para os ensaios de compactação na energia modificada para todas as amostras, houve uma variação na umidade ótima de 8,07% até 10,46% e na massa específica aparente seca de 2,11 até 2,75.
- Todos os ensaios de compactação atingiram o objetivo que era de diminuir a umidade ótima à medida que aumenta a massa específica aparente seca e aumenta a energia de compactação;
- O material estudado, conforme os ensaios de Índice de Suporte Califórnia apresentou uma variação, para o CBR referente às três diferentes misturas em massa de 23,46% até 30,53% para a energia intermediária e a expansão variou de 0,039% até 0,065%. Para a energia modificada a variação do CBR foi de 29,9% até 57,68% e a variação da expansão foi de 0,05% até 0,09%.
- Para o resíduo do minério de ferro puro, o valor médio encontrado para o CBR na energia intermediária foi de 19,38% e a expansão de 0,076%. Para a energia modificada o valor médio do CBR encontrado foi de 37,17% e a expansão de 0,05%.
- Para o solo granular puro, o valor médio encontrado para o CBR na energia intermediária foi de 16,50% e a expansão de 0,12%. Para a energia modificada o valor médio do CBR encontrado foi de 25,02% e a expansão de 0,12%.
- Ficando o material estudado podendo ser usado até no máximo em camadas de sub-base através do método que utiliza o ensaio CBR;

Em estudos futuros, recomendo que:

- Sejam realizados ensaios mecânicos de cisalhamento direto;
- Sejam realizados ensaios tri-axiais para melhor compreender o comportamento da amostra perante as tensões cisalhantes de ruptura;
- Sejam realizados ensaios de permeabilidade a carga constante a fim de observar a capacidade de drenagem do material;
- Sejam adicionados teores de cimentos a fim de melhorar algumas características do resíduo para que possa ser utilizado como material de base de pavimentos, já que, a exceção do revestimento, é a camada mais nobre do pavimento, e conseqüente a que mais onera a obra;
- Avaliar a aplicação do uso de resíduo de minério de ferro em camadas de revestimento como agregado a misturas asfálticas;
- Utilizar misturas com solos de maiores granulometrias;
- Realizar ensaios de módulo de resiliência;

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 6459/1984**: Solo - Determinação do limite de liquidez. [S.I.], 1984.

_____. **NBR 6502/95**: Rochas e solos. [S.I.], 1995.

_____. **NBR 6508/1984**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm- Determinação da massa específica. [S.I.], 1984.

_____. **NBR 7180/1984**: Solo: determinação do limite de plasticidade. [S.I.], 1984.

_____. **NBR 7181/1984**: Solo: análise granulométrica. [S.I.], 1984.

_____. **NBR 7182/1986**: Solo: ensaio de compactação. [S.I.], 1986.

_____. **NBR 9780/1987**: Peças de concreto para pavimentação – Ensaio de compressão. [S.I.], 1987.

_____. **NBR 9895/1987**: solo: índice de suporte Califórnia. [S.I.], 1987.

BARRETO, M. L. **Desenvolvimento Sustentável**. Desafios para o Brasil. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001.

BALANÇO MINERAL BRASILEIRO. Ministério de Minas e Energia. Ano base 2001.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.

CASTRO, S. F. **Incorporação de resíduo de caulim em solo cimento para construções civis**. 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

COSTA, C. G. **Incorporação do resíduo oriundo do beneficiamento de caulim em concreto asfáltico**. 2006. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006.

CPRM. **Programa Geologia do Brasil: mapeamento geológico: integrações geológicas regionais**. Recife, 2006.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7. ed. São Paulo: CENGAGE, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Anuário mineral brasileiro**. Parte II- estatística federação. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM-ME 080/94 - **Solo** - Análise granulométrica por peneiramento. .[s.l.: s.n.], 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ES 301/97: Pavimentação: sub-base estabilizada granulometricamente**. .[s.l.: s.n.], 1997b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ES 303/97: Pavimentação: base estabilizada granulometricamente**. Rio de Janeiro, 1997a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
Manual de Implantação Básica. 3. ed. Rio de Janeiro: [s.n], 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
Manual de pavimentação. 3. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006.

DIAS, E. G. C. S. **Avaliação de Impacto Ambiental de Projetos de Mineração no Estado de São Paulo: a etapa de acompanhamento**. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) Universidade de São Paulo, 2001.

DUBOIS, V.; ABRIAK, N. E.; ZENTAR, R.; BALLIVY, G. The use of marine sediments as a pavement base material. **Waste Management**, v. 29, p. 774 – 782, 2008.

DUTRA, R. **Beneficiamento de minerais industriais**. São Pedro, SP, Brasil: 49º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2005.

ESPÓSITO, J. M; ASSIS, A. **Método probabilístico acoplado ao método observacional aplicado a Barragens de Rejeito**. In: 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. P. 187-194, 1999.

FADANELLI, L. A.; WIECHETECK, G. K. Estudo da utilização do lodo de estação de tratamento de água em solocimento para pavimentação rodoviária. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, p 31 – 37, 2010.

FARIAS, C. E.G. **Mineração e meio ambiente do Brasil**. Relatório para o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Programa das Nações Unidas para o desenvolvimento (PNUD), 2002.

FARIAS, E. R. **A utilização de misturas de solo/cinza pesada na pavimentação – Análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental.** 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

FERNANDES, F. R. C.; MATOS, G. M. M.; CASTILHOS, Z. C.; LUZ, A. B. **Tendências Tecnológicas Brasil 2015, Geociências e Tecnologia Mineral.** Cetem/mct. 380p. 2007.

FOGGIATTO, B; LIMA, J. R. B. **Análise Macroeconômica dos Principais Bens Minerais Brasileiros.** In: 11º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP SIlcusp, 2004.

HOOD, R. S. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação.** 2006. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

IBGE. **Estados@:** Rio Grande do Norte. Disponível em:<<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=rn#>>. Acesso em: 20 dez. 2014.

IMTEAZ, M. A. Possible environmental impacts of recycled glass used as a pavement base material. **Waste Management & Research**, v. 30, n. 9, p. 917 – 921; 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações e análises da economia mineral brasileira.** 7. ed. Brasília, 2012. Disponível em: <www.ibram.org.br>. Acesso em: 10 out.2013.

LIMA, A. H. S.; SILVA, P. E. D.; MUSSE, N. S. A situação atual do setor mineral do Rio Grande do Norte e suas perspectivas de futuro. In: CONGRESSO NORTE E NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 7. 2012, Tocantins. **Anais...Tocantins**, 2012.

MACHADO, F. B. **Banco de Dados de Minerais e Rochas do Museu “Heinz Ebert”**, 2009.

MACHADO, I. F. **Recursos minerais, política e sociedade**. São Paulo: Edgard Brucher, 1989.

MINERAL MINER'S, 2008. Disponível em : <http://www.mineralminers.com/html/hemmins.stm> Acesso em: 05 de janeiro de 2014.

MASSAD, Faíçal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

MHAG MINERAÇÃO S.A. **Visão Geral**. Disponível em: <<http://www.mhag.com.br>>. Acesso em: 17 de dezembro 2014.

MILONAS, J. G. **Análise do processo de reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de barragens de rejeitos de minério de ferro em aterro hidráulico**. Dissertação (Departamento de Engenharia Civil e Ambiental) Universidade de Brasília, 2006.

NÓBREGA, R. D.; MELO, R. A. Uso de agregados de resíduos da construção civil na pavimentação urbana em João Pessoa. In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2009, Feira de Santana. **Anais... Feira de Santana**, 2012.

PAGNUSSAT, D. T. **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.

PEREIRA, K. L. A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos.** 2012. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

RIBEIRO, R. A. C. **Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de resíduos industriais metal-mecânicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) Universidade Federal do Paraná, 2008.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SANTOS, C. R.; FILHO, J. R. A.; SCHNEIDER, I. A. H.; TUBINO, R. M. C. **Produção de agregados miúdos para concreto com rejeito da mineração de carvão.** Rio Grande do Sul, UFRGS/Laboratório de Estudos Ambientais para Metalurgia e Laboratório de Tecnologia Mineral e Estudos Ambientais, [20--].

SILVA, J. P. S. **Impactos ambientais causados por mineração.** Revista Espaço da Sophia, nº8, 2007.

SILVEIRA, N. P. O. S. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de dois resíduos finos de pedreira para utilização em pavimentos rodoviários.** 2010. 161 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, 2010.