



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

André Tabosa Fernandes de Santa Cruz Gerab

**UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO GROSSO DO BENEFICIAMENTO DA
SCHEELITA EM APLICAÇÕES RODOVIÁRIAS**

NATAL/ MAIO

2014

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Catálogo da Publicação na Fonte

Gerab, André Tabosa Fernandes de Santa Cruz

Utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita em aplicações rodoviárias / André Tabosa Fernandes de Santa Cruz Gerab. – Natal, RN, 2014.

106 f. : il.

Orientadora: Prof^a. Maria Del Pilar Durante Ingunza.

Co-orientador: Prof. Olavo Francisco dos Santos Junior.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Instituto de Química. Programa de Pós-Graduação em Química.

1. Pavimentação - Dissertação. 2. Resíduo - Dissertação. 3. Scheelita - Dissertação. I. Ingunza, Maria Del Pilar Durante. II. Santos Junior, Olavo Francisco dos. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM
693.75

CDU

ANDRÉ TABOSA FERNANDES DE SANTA CRUZ GERAB

**UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO GROSSO DO BENEFICIAMENTO DA
SCHEELITA EM APLICAÇÕES RODOVIÁRIAS**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em engenharia civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN, como requisito parcial à obtenção do título de mestre.

Professor (a) Orientador (a): Maria Del Pilar Durante Ingunza

Professor Coorientador: Olavo Francisco dos Santos Junior

NATAL/ MAIO

2014

ANDRÉ TABOSA FERNANDES DE SANTA CRUZ GERAB

**UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO GROSSO DO BENEFICIAMENTO DA
SCHEELITA EM APLICAÇÕES RODOVIÁRIAS**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em engenharia civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN, como requisito parcial à obtenção do título de mestre.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Junior- Coorientador (UFRN)

Prof. Dr. Luis Fernando Martins Ribeiro- Examinador Externo à Instituição (UNB)

Prof. Dr. Ricardo Nascimento Flores Severo- Examinador Externo à Instituição
(UFRN)

Natal, 30 de Maio de 2014.

À minha Família, a meus
colegas de curso, à minha
professora orientadora, a meu
professor coorientador e a
todos os professores que nos
acompanharam ao longo do
curso.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir ter saúde a fim de poder realizar os meus sonhos.

A meus Pais, Ricardo Gerab e Adriana Gerab, por sempre acreditar em mim, apoiando-me em minhas decisões e ajudando-me em minhas dificuldades.

À minha família, à minha madrinha tia Adria, a meus irmãos Ricardo e Rodrigo, à minha avó Júlia e às inesquecíveis vovó Lúcia e Tia Lulu, sempre presentes em todos os momentos.

À minha professora orientadora Maria Del Pilar e a meu professor coorientador Olavo Francisco dos Santos Junior, por suas imensuráveis ajudas na elaboração deste trabalho.

Aos colegas de curso por todos os momentos vividos durante esses quase dois anos e meio de convivência.

Aos professores, tanto do mestrado quanto da graduação, por nos transmitirem valiosos ensinamentos que levaremos para toda a vida.

Aos técnicos de laboratório Paulo Leite e Sr. Batista pela grande ajuda na orientação e execução dos ensaios.

Aos bolsistas: Felipe Magnus, Danilo Alencar e Lucas Lima, do laboratório de mecânica dos solos, pela grande ajuda na realização dos ensaios.

Ao motorista Kennedy, por nos levar a Mina Brejuí em duas oportunidades, além de ajudar na coleta do material.

Ao grupo de mineração Tomaz Salustino pela disponibilização do material e pela confiança no trabalho a ser desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC) por ofertar cursos de mestrados, e dessa forma possibilitar o desenvolvimento de pesquisas na área de engenharia.

À universidade Federal do Rio Grande do Norte por nos 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 seriam bem mais complicada.

RESUMO

A mineração é uma atividade de grande valor econômico e social, auxiliando no desenvolvimento do país. Entretanto, pode ser extremamente danosa ao meio ambiente caso não exista um adequado estudo de gestão de resíduo como medida mitigadora de seus efeitos. Exemplo de alguns desses efeitos nocivos são as poluições: das águas, através da infiltração do resíduo no lençol freático; do solo; da fauna e da flora; sonora (em virtude dos ruídos das máquinas); visual, devido ao resíduo estocado a céu aberto, modificando a paisagem local; e do ar.

Uma das formas de amenizar os impactos ambientais gerados pela mineração é a gestão adequada de seus resíduos por meio da sua utilização em rodovias.

Com esse intuito, este trabalho propõe a dar uma destinação adequada ao resíduo grosso oriundo do beneficiamento da scheelita, decorrente da atividade mineradora do grupo de mineração Tomaz Salustino, na mina Brejuí, localizada no município de Currais Novos, no estado do Rio Grande do Norte.

O presente trabalho foi desenvolvido em quatro etapas. A primeira englobou os ensaios químicos e mineralógicos, de DRX e FRX em que se buscou descobrir a composição do material estudado. A etapa seguinte compreendeu a caracterização física do resíduo, por meio de ensaios de granulometria e massa específica dos sólidos, LL e LP. A terceira etapa contemplou os ensaios específicos aplicados à pavimentação, com o ensaio de compactação e o ensaio de Índice de Suporte Califórnia. Por fim, a quarta etapa compreendeu a caracterização mecânica, representado pelos ensaios de cisalhamento direto, tanto na condição inundada quanto na condição não inundada.

Foi verificada a viabilidade técnica da utilização do resíduo grosso compactado na energia modificada em camadas de sub-base. Nas energias intermediária e normal é viável a sua utilização como camadas menos nobres, como o subleito.

A incorporação dos resíduos em camadas de pavimentos rodoviários proporcionará uma alternativa ao uso de agregados convencionalmente utilizados na pavimentação, possibilitando uma destinação adequada dos resíduos da scheelita, como também a preservação ambiental.

Palavras-chaves: Scheelita; Resíduo; Pavimentação.

ABSTRACT

Mining is an activity of great economic and social value, assisting in the development of the country. However, it can be extremely harmful to the environment if no proper waste management study exists as mitigation measure its effects. Sample some of these harmful effects are pollution: water, through the seepage of waste into the groundwater; soil; of fauna and flora; sound (due to the noise of machines); visual from the residue stored in the open, changing the local landscape; and air.

One way to mitigate environmental impacts caused by mining is the proper management of their waste through their use on highways.

To that end, this paper proposes to give an appropriate destination to grit coming from the beneficiation of scheelite, due to mining activity from mining group Tomaz Salustino in Brejuí mine, located in the city of Currais Novos in the state of Rio Grande do Norte.

This work was developed in four stages. The first comprised the chemical and mineralogical tests, DRX and FRX in which they sought to discover the composition of the material studied. The next step involved the physical characteristics of the waste by means of specific tests and grinding the solid mass, LL and LP. The third stage included the specific tests applied to the pavement, with the compaction test and test Index Support California. Finally, the fourth stage was the mechanical characterization, represented by direct shear tests, both in the flooded condition and not in flooded condition.

The technical feasibility of using the modified energie compacted in layers of sub-base power has been verified. In normal and intermediate energies is feasible to use less noble as layers as the subgrade.

The incorporation of the waste in layers of road pavements provide an alternative to conventionally used in paving aggregates, providing a proper disposal of tailings from scheelite, as well as environmental preservation.

Keywords : Scheelite ; residue ; Paving.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1- Empresas mineradoras no Brasil	4
Figura 2.2- Representação da mineração no Brasil e no mundo.....	5
Figura 2.3- Principais depósitos minerais no Brasil	5
Figura 2.4- Principais produtos exportados no Brasil	6
Figura 2.5- O Rio Grande do Norte	9
Figura 2.6- Reservas minerais do RN	10
Figura 2.7 - Acesso à mina Brejuí	11
Figura 2.8- Localização do município de Currais novos	13
Figura 2.9- Galerias da mina Brejuí	13
Figura 2.10- Fluxograma simplificado do beneficiamento da scheelita.....	17
Figura 2.11- A grelha	18
Figura 2.12- Chegada ao britador	18
Figura 2.13- A "gamela"	19
Figura 2.14- O moinho de martelo	19
Figura 2.15- Vista externa do jigge	20
Figura 2.16- Scheelita coletada abaixo do jigge (granulado).....	20
Figura 2.17- Mesas de concentração.....	21
Figura 2.18- As três parcelas do material nas mesas de concentração	22
Figura 2.19- Classificador	23
Figura 2.20- Secagem artesanal da scheelita	24
Figura 2.21- Scheelita queimada em direção ao eletroimã	24
Figura 2.22- Impurezas da scheelita	25
Figura 2.23 - Limites de consistência	27
Figura 2.24- Gráfico de plasticidade	35
Figura 2.25- Classificação dos solos (HRB).....	36
Figura 2.26- O pavimento flexível	38
Figura 2.27- O pavimento semi-rígido.....	38
Figura 2.28- O pavimento rígido	39
Figura 2.29 - Tipos de bases e sub-bases	41
Figura 3.1 - Fluxograma dos ensaios.....	55
Figura 3.2 - Depósito de Resíduo Grosso de Scheelita.....	56
Figura 3.3 - Amostra acondicionada	56
Figura 3.4 - Rodovias de acesso à mina Brejuí.....	57
Figura 4.1 - Compostos	63
Figura 4.2 - Curvas granulométricas.....	65

Figura 4.3 - Curvas granulométricas- Faixa A.....	66
Figura 4.4 - Curvas granulométricas- Faixa B.....	67
Figura 4.5 - Curvas granulométricas- Faixa C.....	67
Figura 4.6 - Curvas granulométricas- Faixa D.....	68
Figura 4.7 - Curvas granulométricas- Faixa E.....	68
Figura 4.8 - Curvas granulométricas- Faixa F.....	69
Figura 4.9 - Curvas de compactação.....	70
Figura 4.10 - Curvas de compactação representativa das energias.....	71
Figura 4.11 - Resultado dos ensaio de CBR.....	75
Figura 4.12 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para energia normal.....	76
Figura 4.13 - (Tensão σ / Tensão z) da amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para energia normal.....	76
Figura 4.14- Variação de deslocamentos verticais e horizontais da amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para a energia normal.....	77
Figura 4.15 - Envoltórias de ruptura e residual na condição para amostra moldada e ensaiada na condição de umidade ótima – Energia normal.....	79
Figura 4.16 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para energia intermediária.....	80
Figura 4.17 - (Tensão σ / Tensão z) da amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para energia Intermediária.....	80
Figura 4.18 - Variação de deslocamentos verticais e horizontais da amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para a energia intermediária.....	81
Figura 4.19 - Envoltórias de ruptura e residual na condição para amostra moldada e ensaiada na condição de umidade ótima – Energia intermediária.....	82
Figura 4.20 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para energia modificada.....	83
Figura 4.21 - (Tensão σ / Tensão z) da amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para energia Intermediária.....	84
Figura 4.22 - Variação de deslocamentos verticais e horizontais da amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para a energia modificada.....	84
Figura 4.23 - Envoltórias de ruptura e residual na condição para amostra moldada e ensaiada na condição de umidade ótima – Energia modificada.....	86
Figura 4.24 - Efeito da energia de compactação sobre as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para o ensaio com $\sigma_n = 100$ kPa, na wot.....	87
Figura 4.25 - Efeito da energia de compactação sobre as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para o ensaio com $\sigma_n = 200$ kPa, na wot.....	87

Figura 4.26 - Efeito da energia de compactação sobre as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para o ensaio com $\sigma_n = 300$ kPa, na wot.....	88
Figura 4.27 - Efeito da energia de compactação sobre as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para o ensaio com $\sigma_n = 600$ kPa, na wot.....	88
Figura 4.28 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para amostra moldada no wot e ensaiada na condição inundada na energia normal.....	89
Figura 4.29 - (Tensão σ / Tensão z) da amostra ensaiada no wot na condição inundada para energia normal.....	89
Figura 4.30 - Variação de deslocamentos verticais e horizontais da amostra ensaiada no wot na condição inundada para a energia normal.....	89
Figura 4.31 - Envoltórias de ruptura e residual da amostra ensaiada no wot na condição inundada – Energia normal.....	91
Figura 4.32 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para amostra moldada no wot e ensaiada na condição inundada na energia intermediária.....	92
Figura 4.33 - (Tensão σ / Tensão z) da amostra ensaiada no wot na condição inundada para energia intermediária.....	92
Figura 4.34-Variações de deslocamentos verticais e horizontais da amostra ensaiada no wot na condição inundada para a energia intermediária.....	92
Figura 4.35 - Envoltórias de ruptura e residual da amostra ensaiada no wot na condição inundada – Energia intermediária.....	94
Figura 4.36 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para amostra moldada no wot e ensaiada na condição inundada na energia modificada.....	95
Figura 4.37 - (Tensão σ / Tensão z) para energia modificada inundada.....	95
Figura 4.38 - Variação de deslocamentos verticais e horizontais da amostra ensaiada no wot na condição inundada para a energia modificada.....	95
Figura 4.39 - Envoltórias de ruptura e residual da amostra ensaiada no wot na condição inundada – Energia modificada.....	97
Figura 4.40 - Efeito da energia de compactação sobre as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para o ensaio com $\sigma_n = 100$ kPa, wot na condição inundada.....	98
Figura 4.41 - Efeito da energia de compactação sobre as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para o ensaio com $\sigma_n = 200$ kPa, wot na condição inundada.....	98
Figura 4.42 - Efeito da energia de compactação sobre as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para o ensaio com $\sigma_n = 300$ kPa, wot na condição inundada.....	99
Figura 4.43 - Efeito da energia de compactação sobre as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para o ensaio com $\sigma_n = 600$ kPa, wot na condição inundada.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Participação da exportação de minérios no Brasil.....	6
Tabela 2.2 - IDH de estados e municípios brasileiros	7
Tabela 2.3 - Exportações brasileiras.....	8
Tabela 2.4 - Principais minérios e problemas gerados pela sua exploração	14
Tabela 2.5 - Frações de solos.....	27
Tabela 2.6 - Requisito das camadas.....	30
Tabela 2.7 - Valores típicos de ângulos de atrito segundo.....	33
Tabela 2.8 - Valores típicos de ângulos de atrito segundo.....	33
Tabela 2.9 - Faixas granulométricas.....	42
Tabela 3.1 - Ensaio realizados.....	54
Tabela 4.1 - Óxidos	63
Tabela 4.2- Índices granulométricos	65
Tabela 4.3 - Porcentagem de partículas existentes	65
Tabela 4.4 - Resultados dos ensaios de compactação	72
Tabela 4.5 - CBR para o corpo-de-prova moldado na energia normal	73
Tabela 4.6 - CBR para o corpo-de-prova moldado na energia intermediária.....	74
Tabela 4.7 - CBR para o corpo-de-prova moldado na energia modificada.....	74
Tabela 4.8 - Teor de umidade real da amostra	74
Tabela 4.9 - Resistências máximas e residuais para amostra moldada e ensaiada na condição de umidade ótima - Energia normal	78
Tabela 4.10 - Resultados das envoltórias de ruptura e residual na condição para amostra moldada e ensaiada na condição de umidade ótima – Energia normal.....	79
Tabela 4.11 - Resistências máximas e residuais para amostra moldada e ensaiada na condição de umidade ótima - Energia intermediária	81
Tabela 4.12 - Resultados das envoltórias	83
Tabela 4.13 - Resistências máximas e residuais para amostra moldada e ensaiada na condição de umidade ótima - Energia modificada.....	85
Tabela 4.14 - Resultados das envoltórias	86
Tabela 4.15 - Resistências máximas e residuais para amostra moldada no wot e ensaiada na condição inundada - Energia normal.....	90
Tabela 4.16 - Resultados das envoltórias	91
Tabela 4.17 - Resistências máximas e residuais para amostra moldada no wot e ensaiada na condição inundada - Energia intermediária	93
Tabela 4.18 - Resultados das envoltórias	94

Tabela 4.19 - Resistências máximas e residuais- Energia intermediária na condição inundada.....	96
Tabela 4.20 - Resultados das envoltórias	97
Tabela 4.21- Resumo de resultados	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BGS	Brita Graduada Simples
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
BRICs	Brasil, Rússia, Índia e China
Ca	Cálcio
CaWO ₄	Scheelita
CBR	Califórnia Bearing Ration
C _c	Coeficiente de curvatura
cm	Centímetros
C _u	Coeficiente de não uniformidade
CPRM	Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais
CTGás	Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difração de raios-X
EGF	Escória granulada de fundição
ETA	Estação de tratamento de águas
EUA	Estados Unidos da América
FRX	Fluorescência de raios-X
GO	Goiás
HRB	Highway Research Board
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e estatística
IBRAM	Instituto Brasileiro de mineração
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MG	Minas Gerais
NBR	Norma Brasileira

PA	Pará
PB	Paraíba
PIB	Produto Interno Bruto
R\$	Reais
RCD	Resíduo de construção e demolição
RFC	Resíduo fino de caulim
RGC	Resíduo grosso de caulim
RN	Rio Grande do Norte
US\$	Dólares
UNPA	Unidade de Pesquisa Aplicada e Transferência de Tecnologia
USCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
WO ₃	Trióxido de Tungstênio
W _{ot}	Umidade ótima
$\rho_{d,max}$	Massa específica seca máxima
DNER	Departamento nacional de estradas de rodagem
IPR	Instituto de pesquisas rodoviárias
SR _{caulim}	Solo resíduo de caulim
ρ_s	Massa específica dos sólidos

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Contexto atual do setor minerador.....	4
2.1.1 A mineração no Brasil	4
2.1.2 A mineração no Rio Grande do Norte.....	8
2.1.3 A mina Brejuí.....	11
2.1.4 Impactos ambientais oriundos da mineração.....	13
2.1.5 A scheelita	15
2.1.6 O beneficiamento da scheelita	16
2.2 Ensaio de Caracterização	25
2.2.1 Ensaio de granulometria	25
2.2.2 Limites de Consistência.....	27
2.2.3 Ensaio de Massa Específica dos sólidos	28
2.2.4 Ensaio de compactação.....	29
2.2.5 Ensaio de CBR.....	30
2.2.6 Ensaio de DRX e FRX.....	31
2.2.7 Ensaio de cisalhamento direto	31
2.3 Classificação dos solos.....	34
2.4 O pavimento.....	37
2.4.1 As camadas que compõem o pavimento	39
2.4.2 As bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas.....	40
2.4.3 Bases e sub-bases rígidas	44
2.5 Uso de resíduos na pavimentação	44
CAPÍTULO 3- MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
3.1 Introdução	54
3.2 Caracterização química e mineralógica.....	57
3.3 Caracterização física do resíduo.....	58
3.4 Ensaio de Pavimentação	58
3.5 Caracterização Mecânica	59
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1 Introdução.....	62

4.2	Resultados da caracterização química	62
4.3	Resultados da caracterização física.....	64
4.4	Resultados dos ensaios de pavimentação.....	69
4.5	Resultados da caracterização mecânica.....	76
4.5.1	Amostras moldadas e ensaiadas no teor de umidade ótimo	76
4.5.2	Amostras moldadas no teor de umidade ótimo e ensaiadas na condição inundada.....	88
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....		101
REFERÊNCIAS.....		103

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

O Seridó, região interestadual nordestina, abrangendo os estados da Paraíba (PB) e do Rio grande do Norte (RN), é uma área riquíssima em reservas minerais, dentre elas se podem citar o caulim, o calcário, os minérios de ferro, o feldspato e a scheelita.

O início do ciclo de mineração de scheelita no Seridó se deu por volta da segunda guerra mundial, período marcado pelo esgotamento das reservas dos EUA. Os americanos sempre possuíam uma reserva de tungstênio, mas devido à guerra viram suas reservas diminuir ao mesmo tempo em que ficaram sem suas fontes nas minas da Ásia e Europa. Dessa forma, eles se voltaram para o nordeste brasileiro, mas precisamente ao Seridó Norte-Riograndense (MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO S.A., 2013).

O município de Currais Novos, onde se localiza a mina Brejuí, se desenvolveu em torno basicamente da pecuária, e a partir de meados do século 20, da extração mineral. Isso fica evidenciado, por exemplo, na construção de escolas, emissora de rádio, hospitais, cinema, a casa do idoso e o Hotel Tungstênio que é um marco turístico da cidade, todos construídos na época áurea extrativista mineral.

Desde a década de 40, paralisada por um breve período em 1997 até 2003, o grupo de mineração Tomaz Salustino - explorador da Mina Brejuí - opera até os dias atuais, e por muitos anos foi detentor do título de maior exportador de scheelita do hemisfério sul. A scheelita é explorada com vistas à obtenção do metal tungstênio, de uso difundido mundialmente em produção de lâmpadas incandescentes, tubos de raios-x e superligas. Segundo estimativas do grupo de mineração, a mina Brejuí possui ainda uma lavra explorável de aproximadamente 20 anos.

Em se tratando de sustentabilidade e preservação ambiental, um dos maiores desafios ambientais enfrentados pela população mundial é a gestão adequada dos resíduos sólidos, em decorrência do aumento da produção e da diminuição de locais de depósitos. O aumento do número de exigências das leis ambientais para com a preservação do meio ambiente é um dos motivos da diminuição de localidades de bota-foras, tornando, dessa forma, cada vez mais difícil de encontrar um local ecologicamente correto para a sua destinação.

A preocupação ambiental advém da constatação de que os recursos naturais são limitados. Daí resulta que o meio ambiente não tem a capacidade de absorver a quantidade atual de resíduos sem que haja um desequilíbrio ambiental.

O resíduo do beneficiamento da scheelita é simplesmente depositado em montes a céu aberto, com estimativa atual da ordem de sete milhões de toneladas. Essa política de depósitos acarreta impactos ambientais na região de descarte, através do visual negativo promovido pelos montes estocados. Além disso, afeta a saúde dos trabalhadores diretamente envolvidos na atividade mineradora e da população residente próximo ao local de depósito, que sofrem com a dispersão do pó através do vento, ocasionando problemas respiratórios e visuais. Dessa forma, o aproveitamento desses resíduos, como por exemplo, na construção de rodovias e aterros rodoviários, representa uma alternativa a fim de contornar esse problema.

Corroborando com a ideia do aproveitamento de resíduos em execução de rodovias é a que a busca por materiais convencionais a serem utilizados em camadas de pavimento que obedeçam as exigências das normas rodoviárias representa um grande obstáculo aos órgãos competentes. Em variadas localidades não existem os materiais requisitados, ou sua localização dista muitos quilômetros do local de aplicação, tornando inviável sua utilização.

1.1 Objetivo

O objetivo principal do trabalho é avaliar o potencial de aproveitamento do resíduo grosso do beneficiamento do scheelita em camadas de base, sub-base, reforço de subleito e subleito de rodovias, e na construção de aterros rodoviários, de modo a possibilitar uma alternativa aos agregados convencionalmente utilizados. Ainda, tem por objetivo proporcionar uma destinação adequada ao resíduo grosso, promovendo a preservação da flora e da fauna local, dos corpos d'água, do lençol freático e do solo.

1.2 Objetivos específicos

O trabalho tem por objetivos específicos:

- Caracterização química e mineralógica do resíduo;

- Caracterização geotécnica;
- Classificação do resíduo quanto ao uso em pavimentação e em aterros rodoviários;

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Contexto atual do setor minerador

2.1.1 A mineração no Brasil

Segundo 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 quanto o regime de Licenciamento. A Figura 2.1 mostra a divisão dessas mineradoras por estado da federação:

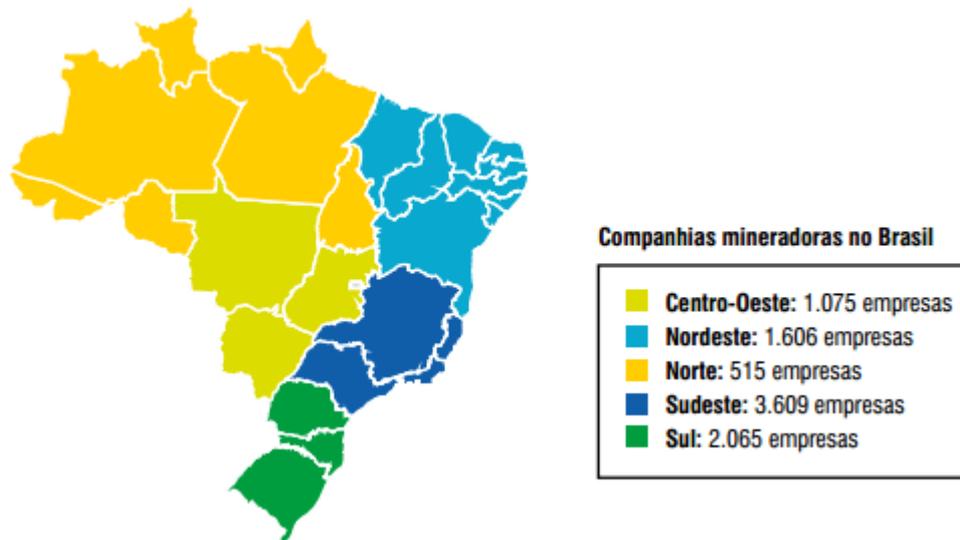


Figura 2.1- Empresas mineradoras no Brasil

Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (2012)

De acordo com o IBRAM (2012) a Indústria Mineral Brasileira registrou ao longo da última década um crescimento vigoroso decorrente das profundas mudanças socioeconômicas e de infraestrutura que o Brasil tem vivenciado. Entretanto, a atividade mineral sofreu uma redução em suas expectativas em razão da crise mundial.

O 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), tem alavancado esse crescimento, conforme se observa na Figura 2.2.

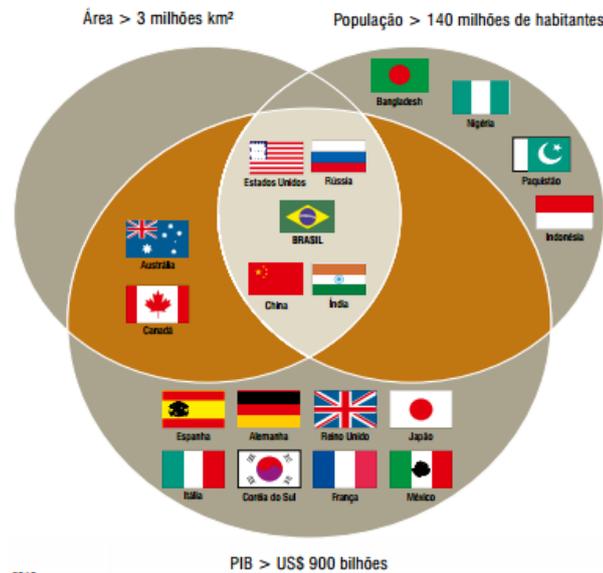


Figura 2.2- Representação da mineração no Brasil e no mundo
Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (2012)

A Figura 2.3 apresenta os principais depósitos minerais do Brasil como o cobre, ouro, alumínio, estanho e agregados. Eles se encontram em praticamente todos os estados, com destaque maior para os estados do Pará (PA), Minas Gerais (MG) e Goiás (GO).

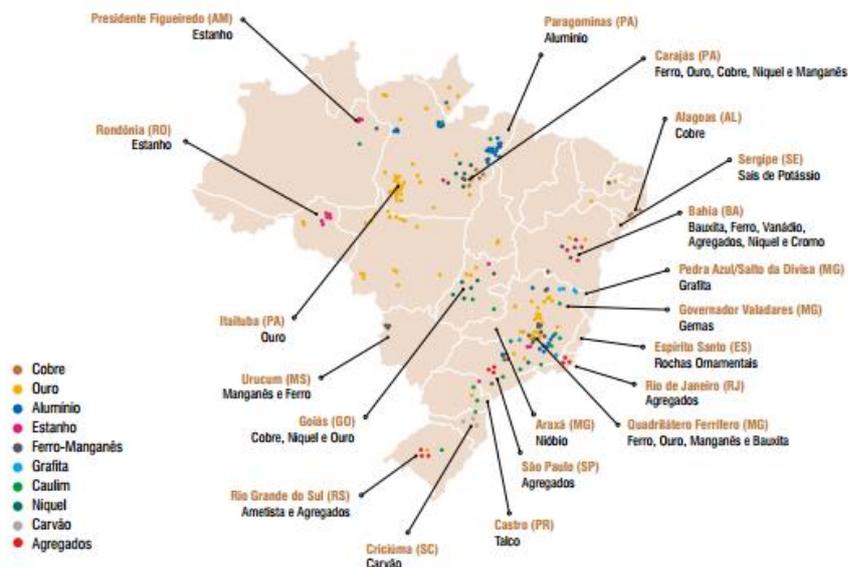


Figura 2.3- Principais depósitos minerais no Brasil
Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (2012)

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

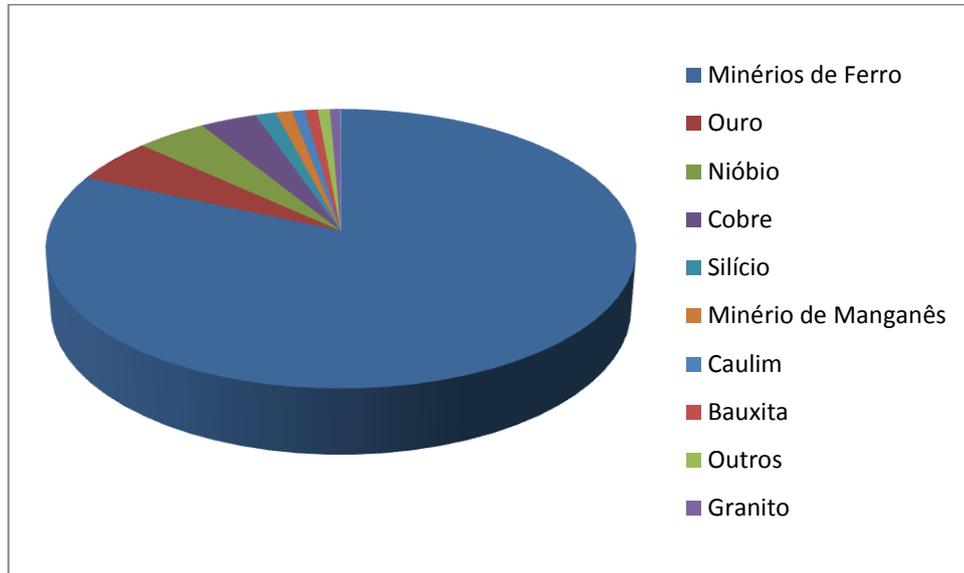


Figura 2.4- Principais produtos exportados no Brasil

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 extremamente importante para os municípios beneficiados conforme evidencia o IBRAM (2012), ao afirmar que índice de desenvolvimento humano das cidades mineradoras é maior que o índice dos respectivos estados. Independente de estarem localizados distante dos grandes centros urbanos ou até mesmo em regiões de nível social baixo, os empreendimentos de mineração proporcionam um efetivo desenvolvimento regional.

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
Orximiná – PA	Bauxita	0,720	0,769
Presidente Figueiredo – AM	Cassiterita	0,713	0,742

Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (2012)

O Brasil é um importante elemento do cenário mundial, 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% do 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. Destaque se dá ao 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 3.373.959 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

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

Atualmente, o estado se destaca no cenário nacional como principal produtor de sal marinho, segundo produtor 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 as 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 tungstênio, quartzo, calcário, gipsita, mármore, mica, sal, petróleo e etc. Porém, cerca de vinte e dois desses cinquenta minerais é explorada, 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)

De acordo com o CPRM (2006), a província scheelitífera do Seridó incluída nos estados da Paraíba (PB) e Rio Grande do Norte (RN) é o mais importante depósito de minério de tungstênio do Brasil. O tungstênio é um material estratégico, pois possui uma ampla aplicação cotidiana, especialmente nas indústrias elétricas, bélica e espacial.

Ainda, o maior depósito, situado no município de Currais Novos, inclui as quatro principais minas da província scheelitífera: a mina Brejuí (Figura 2.7), Barra Verde, Boca de Laje e Zangarelhas. Desde a sua descoberta, ocorrida em 1943, esse depósito foi o responsável por 65% da produção nacional e detém cerca de

70% das reservas da província, atualmente avaliadas em 9.130 t de tungstênio (WO_3).



Figura 2.7 - Acesso à mina Brejuí

Em relação à scheelita, de acordo com o IBRAM (2012), um total de U\$S 4,0 milhões foram investidos no ano de 2012 em sua exploração no município de Bodó, região Seridó do Rio Grande do Norte (RN), a 180 km de Natal. Existe a expectativa de que o capital investido seja multiplicado por 18 até o ano de 2020, e até o fim de 2014 mais de R\$ 2 bilhões serão investidos no setor da mineração em todo o RN.

2.1.3 A mina Brejuí

A mina Brejuí, localizada no município de Currais Novos, de clima semiárido, é considerada a maior mina de scheelita da América do Sul. Suas atividades se iniciaram no ano de 1943, data da descoberta do minério no estado do RN. Somente em 1954, a mina Brejuí foi constituída em empresa com o nome de Mineração Tomaz Salustino S.A, sendo concessionário o Desembargador Tomaz Salustino Gomez de Melo.

O método de extração da Scheelita é a lavra subterrânea que vai a uma profundidade de mais de 900m dividido em oito níveis, com 65 km de túneis por toda a mina e variação de temperatura de 19°C a 43°C.

A mina possui uma boa parte das suas galerias inundadas, principalmente em épocas chuvosas onde a água sobe em média 60 cm por dia.

A mineração no município de Currais Novos teve seu apogeu durante a segunda guerra mundial, quando eram exportadas grandes quantidades de minérios para as indústrias de aço. Porém, a partir dos anos 80, do século XX, iniciou-se o declínio da mineração em decorrência da oscilação dos preços internacionais da scheelita e da utilização de outros minérios para a fabricação de artefatos industriais e tecnológicos, levando a Mina Brejuí a reduzir suas atividades de extração mineral e buscar novas alternativas econômicas (MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO S.A., 2013).

A partir do fim da década de 90 foram retomadas as atividades mineradoras não só na mina Brejuí como em todo o município de Currais Novos, e a Mina Brejuí detém, hoje, o título de maior parque temático do Rio Grande do Norte, recebendo visitantes diariamente de todo o Brasil.

O Grupo Tomaz Salustino prefere extrair a scheelita e simplesmente vende-la para seus parceiros comerciais, para que estes, por conta própria, realizem o processo de beneficiamento de tungstênio, já que esta atividade é bastante onerosa e demandaria um alto investimento à empresa.

A Figura 2.8 indica a localização do município de Currais Novos, local da mina, no estado do Rio Grande do Norte. Já a Figura 2.9 mostra a galeria de entrada da mina Brejuí.

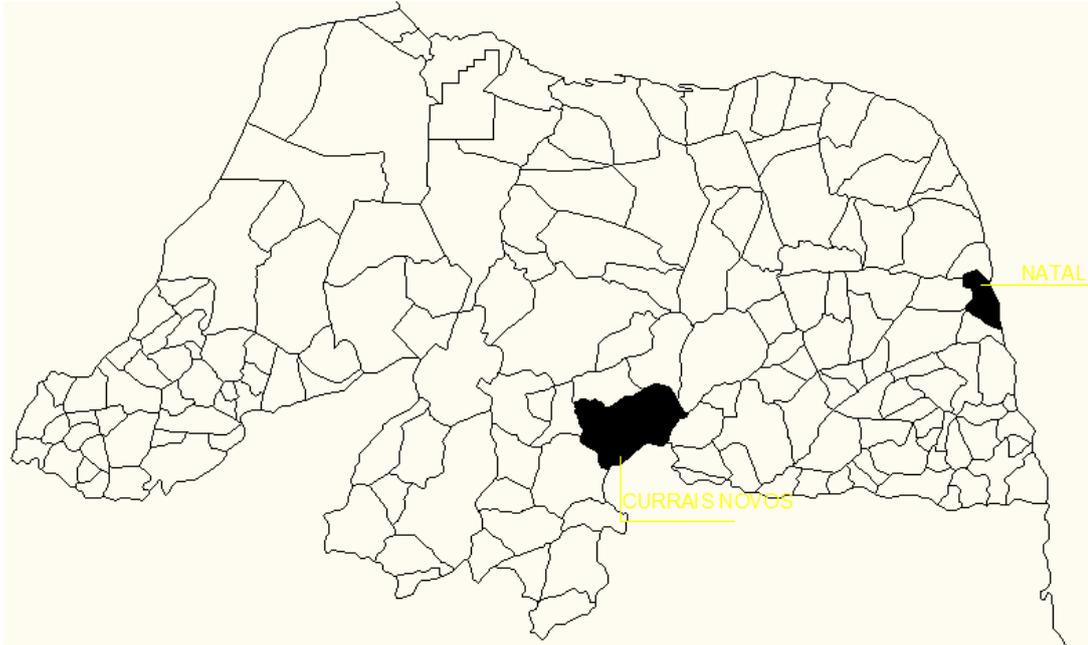


Figura 2.8- Localização do município de Currais novos



Figura 2.9- Galerias da mina Brejuí

2.1.4 Impactos ambientais oriundos da mineração

A atividade mineradora naturalmente é uma atividade que agride o meio ambiente, e se realizada sem o atendimento as políticas ambientais vigentes, as

consequências podem ser muito mais severas. Os principais problemas gerados pela atividade mineradora podem ser divididos em quatro categorias, a saber: Poluição da água, poluição do ar, poluição sonora e subsidência do terreno.

Bitar (1997) conceitua externalidade como sendo um conjunto de efeitos certamente não desejados oriundos da mineração. O autor exemplifica algumas dessas externalidades como: alterações ambientais, depreciação de imóveis circunvizinhos, transtornos de tráfegos urbanos, conflito de uso do solo, geração de áreas degradadas, ocupação desordenadas de áreas degradadas.

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 2.4.

Tabela 2.4 - 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 causados pelo 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, ultra-lançamentos, 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.

2.1.5 A scheelita

A scheelita é um mineral que pertence à classe dos tungstatos. É um tungstato de cálcio que tem por composição: CaWO_4 (Ca 19,4% e WO_3 80,6%). O nome “scheelita” foi dado em homenagem ao descobridor do Tungstênio Karl Wilhelm Schelle (DANA, 1978).

Segundo Dana (1978), a scheelita tem por características físicas:

- Clivagem extraordinariamente alta para um mineral com brilho não metálico;
- Brilho vítreo a adamantino
- Cor: branco, amarelo, verde, castanho.
- Translúcida (alguns espécimes são transparentes)

A scheelita é encontrada nos pegmatitos graníticos, nos depósitos metamórficos de contato e nos filões de minérios de alta temperatura que estão associados com rochas graníticas (DANA, 1978). Em certos lugares, a scheelita é encontrada juntamente com o ouro.

A scheelita é explorada a fim de se obter o tungstênio de uso difundido na produção de lâmpadas e canetas, na indústria metalúrgica, bélica, petrolífera, dentre outras.

2.1.6 O beneficiamento da scheelita

A percepção da preservação ambiental com o manejo adequado de resíduos é o fator imprescindível para uma vida saudável e duradoura para as gerações atuais e futuras.

O grupo de mineração Tomaz Salustino exerce a atividade extrativista mineral com responsabilidade, ciente dos riscos ambientais gerados pela extração do minério tungstênio, tomando as medidas cabíveis a fim de reduzi-los ou minimiza-los (MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO S.A, 2014).

Ainda, conforme a mesma fonte, as principais consequências ambientais geradas com a extração da scheelita estão relacionadas ao solo, com a erosão, à flora, com a abertura de acessos, ao ar, com os efeitos da britagem e detonações, à poluição sonora, através do uso de marteletes pneumáticos, aos gases, com a ustulação da pirita (aquecimento em presença de oxigênio), e a poluição visual, devido às pilhas dos resíduos.

O beneficiamento da scheelita é um processo bastante rustico, abrangendo muitas etapas. A exceção de alguns equipamentos que foram modernizados, basicamente a essência do procedimento não se alterou desde a década de 40. O beneficiamento é realizado por equipamentos que trabalham por processos gravimétricos, dentre os quais, os mais importantes são as mesas vibratórias e os jigues. Em nenhuma etapa do beneficiamento são utilizados efluentes químicos.

Segundo dados do grupo de mineração, aproximadamente 99,2% do material que é extraído e tratado na indústria de beneficiamento da scheelita são desperdiçados, sendo apenas 0,8 % do total extraído representativo da scheelita.

Estima-se que exista um acúmulo de resíduo do beneficiamento da scheelita na ordem 4,5 milhões de toneladas do resíduo grosso e 2,5 milhões do resíduo fino.

A Figura 2.10 apresenta em forma de fluxograma, elaborado pelo autor, o processo do beneficiamento da scheelita realizado na mina Brejuí.

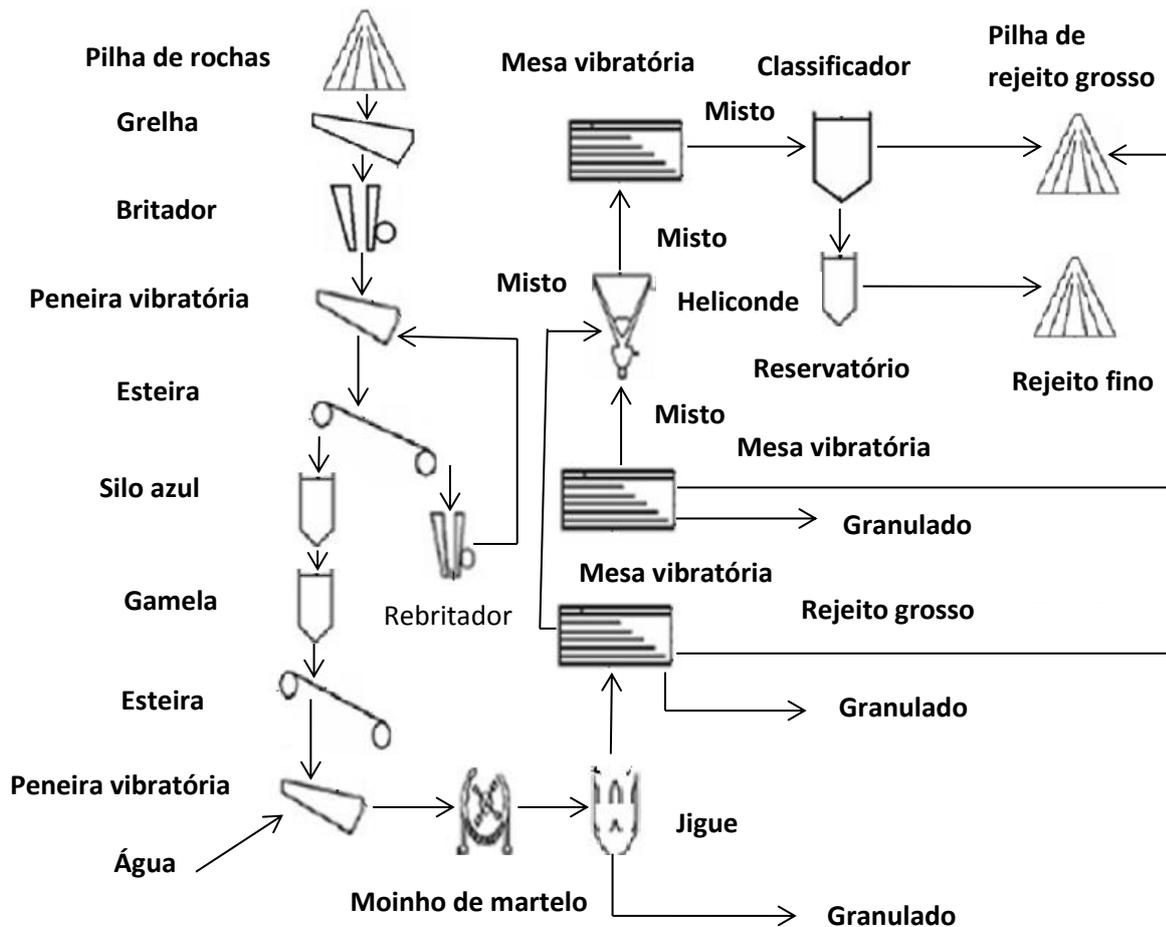


Figura 2.10- Fluxograma simplificado do beneficiamento da scheelita

Inicialmente ocorrem as detonações, com uso de explosivos, no interior da mina. Os fragmentos das rochas são levados, então, através de caminhões basculantes, ao topo do engenho, na qual são depositados em um tipo de grelha, a fim de separar a areia das rochas maiores e das menores, conforme se observa na Figura 2.11.

Existe o cuidado de não permitir a passagem de rochas de elevados diâmetros, na grelha, para não acarretar problemas no britador.

Alguns fragmentos não passantes na grelha são fragmentados manualmente, com uso de marteletes. Os que tiveram reduzidos seus diâmetros a fim de possibilitar a passagem na grelha, são passados, portanto. Aqueles que muito duros, que não foram reduzidos são depositados em local de descarte.



Figura 2.11- A grelha

Ao passar pela grelha, as rochas são transportadas, através de esteiras, para o britador, que irá quebrar os fragmentos passantes na grelha.

A Figura 2.12 permite observa o caminho de entrada das rochas a serem fragmentadas no britador.



Figura 2.12- Chegada ao britador

Em seguida, o material, já de granulometria reduzida, é transferido para as peneiras vibratórias, que tem por função separar as partículas com granulometria mais fina (partículas arenosas) das pedras que irão ser rebitadas.

O material rebitado e o material bitado inicialmente vão ser depositados em um silo azul, a fim de ser estocados. Do silo azul, o material é transportado a um novo silo, de cor amarela, chamado pelos operadores de “gamela”, também para ser estocado, conforme Figura 2.13.



Figura 2.13- A "gamela"

O material que sai da gamela é depositado nas esteiras de alimentação, e em seguida se dirige às peneiras vibratórias. Finalizada esta etapa, o material peneirado é conduzido para o moinho de martelo, sendo após o material transferido para uma tubulação em direção ao jigue.

As Figuras 2.14 e 2.15 apresentam o moinho de martelo e o jigue utilizados no processo de beneficiamento da scheelita, respectivamente.



Figura 2.14- O moinho de martelo

O processo de jigagem promove uma separação hidráulica. Ocorrem repetidas expansões e contrações verticais de um leito de partículas pelo movimento de pulsação da água. Como resultado, tem-se a separação das partículas em

camadas, de densidades diferentes, na qual as partículas de maior densidade se depositam no fundo (SAMPAIO e TAVARES, 2005).

O granulado (scheelita decantada no fundo do jigue) é coletado por um orifício na parte inferior do equipamento, como se demonstra na Figura 2.16.



Figura 2.15- Vista externa do jigue



Figura 2.16- Scheelita coletada abaixo do jigue (granulado)

A mistura então, ao passar pelo jigue, segue em direção às mesas vibratórias para promover a separação da mistura. Várias mesas são dispostas a fim de receber a mistura oriunda do jigue (Figura 2.17).



Saída
inferior do
jigue para
as mesas

Figura 2.17- Mesas de concentração

As mesas de vibratórias são formadas por uma superfície plana, de formato retangular, chamada de deque. É coberta total ou parcialmente por rifles, apresentando um comportamento diferencial na direção destes. A água de lavagem é distribuída pelo deque junto à alimentação, formando uma película que escoar perpendicularmente aos rifles (SAMPAIO e TAVARES, 2005).

O minério se distribui em toda porção do deque, devido às agitações oriundas das oscilações e do escoamento da água de lavagem. A Figura 2.18 apresenta as três parcelas cujas mesas promovem a separação:

- A scheelita propriamente dita, de cor branca, chamada ainda de granulado;
- O chamado “misto”, formado por resíduo mais scheelita (que será reaproveitado) e;
- O resíduo, composto apenas de partículas de granulometria arenosa (será descartado). Esse é o chamado resíduo grosso, na qual este trabalho se propõe a dar uma destinação tecnicamente adequada.



Figura 2.18- As três parcelas do material nas mesas de concentração

A scheelita (de cor branca) é captada nesse momento. O misto é capturado, sendo então transportado ao “heliconde” (um tipo de depósito em formato de cone). Em seguida, é levado a novas mesas de concentração (denominadas mesas de retorno), localizados em um nível topográfico inferior ao das mesas de concentração.

A scheelita separada pelo processo vibratório das mesas de retorno (granulado) é então captada. O misto retorna por tubulações ao “heliconde” para que seja repetido o processo de modo a se obter o mínimo desperdício de scheelita.

Quando não mais se conseguir retirar parcelas de scheelita existente no misto, ele então é transferido para o equipamento chamado classificador, que é mostrado na Figura 2.19.



Figura 2.19- Classificador

O classificador tem a função de separar da “lama” (partículas finas e água) das partículas grossas, presente no misto. O resíduo separado (de aparência granular) será depositado á céu aberto. Este é o mesmo resíduo já descartado na etapa de separação nas mesas de concentração.

A lama separada é conduzida a um reservatório de coloração azul chamado de espaçador, que tem por objetivo melhorar a turbidez da água lamacenta, pois essa água será reaproveitada para novos processos de beneficiamentos. A água separada é transferida para um novo espaçador, a fim de se diminuir ainda mais a sua turbidez, para enfim ser reaproveitada.

A lama bem mais seca é levada por tubulações e depositada a céu aberto. Esta, ao secar, é chamada de resíduo fino do beneficiamento da scheelita.

A scheelita pura, captada pelo processo de beneficiamento, é espalhada e seca ao sol, por um processo de forma rudimentar, conforme se observa na Figura 2.20.



Figura 2.20- Secagem artesanal da scheelita

Após seca, a scheelita é levada a depósitos onde será estocada para posterior queima em fornos.

Na Figura 2.21 é possível observar um carrinho de mão contendo a scheelita já queimada, apresentando uma coloração mais escura do que ao ser captada nas mesas vibratórias.



Figura 2.21- Scheelita queimada em direção ao eletroímã

A scheelita, por fim, é transportada à uma máquina chamada “eletroímã”, que tem por função a retirada de impurezas, como é possível observar na Figura 2.22.

Dentre as impurezas mais comuns presente na scheelita, o ferro se destaca com a maior participação.



Figura 2.22- Impurezas da scheelita

Finalizado o processo de separação das impurezas, a scheelita então está pronta para ser ensacada e comercializada.

2.2 Ensaios de Caracterização

2.2.1 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 atravessa uma série de peneiras colocadas em ordem decrescente de abertura das malhas, no sentido mais alto para o mais baixo, sendo a peneira de número 200, de abertura 0,075 mm a última a ser passada pelo material peneirado, 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 na água, uma amostra de material é dispersa em água, de forma que

as partículas sedimentam em velocidades, de acordo com a sua forma, tamanho, peso e viscosidade da água (DAS, 2012).

Basicamente o ensaio de granulometria fornece três coeficientes. O diâmetro efetivo (D_{10}), que é o diâmetro na qual 10% do material possui diâmetro menor que ele. 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).

O SUCS, conforme ensina Pinto (2006) considera que pedregulhos, para serem classificados como bem-graduado quando o CNU é maior que 4, e uma areia bem graduada, acima de 6.

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;

D_{10} : Diâmetro que, na curva granulométrica, corresponde à porcentagem que passa igual a 10%.

D_{30} : Diâmetro que, na curva granulométrica, corresponde à porcentagem que passa igual a 30%.

D_{60} : 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 pode-se observar na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Frações de solos

Fração	Limites definidos pela ABNT
Bloco de rocha	$x > 1\text{m}$
Matação	200 mm a 1m
Pedregulho	2 mm a 60 mm
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)

2.2.2 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 2.23: Sólido, Semissólido, Plástico e Líquido.

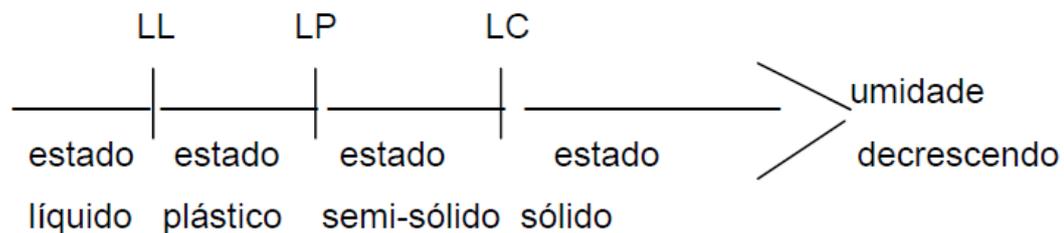


Figura 2.23 - Limites de consistência

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 chamando de aparelho de Casagrande, que consiste essencialmente de uma concha metálica que, acionado por uma manivela, golpeia a base do citado aparelho. É definido como o teor de umidade do solo com o qual uma ranhura nele feita requer 25 golpes para se fechar (PINTO, 2006). O procedimento de ensaio é padronizado no Brasil pela ABNT NBR 6459/84.

Ademais, o limite de plasticidade é definido como o menor teor de umidade como qual se consegue moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro, rolando-o com a palma das mãos sobre uma placa de vidro rugosa. A norma NBR 7180/84 rege os ensaios de LP.

2.2.3 Ensaio de Massa Específica dos sólidos

O ensaio de 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.

O peso específico dos grãos sólidos varia pouco entre os variados solos. Os valores situam-se em torno de 27 kN/m³ quando não se conhece os valores reais da amostra. Grãos de quartzo (areias) apresentam, em regra, valores na ordem de 26,5 KkN/m³. Já as argilas lateríticas, valores da magnitude de 30 kN/m³.

2.2.4 Ensaio de compactação

Conforme Pinto (2006), a compactação é 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, p.147) 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 e 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 ($\gamma_{s,m\acute{a}x}$), 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 $\gamma_{s,m\acute{a}x}$ baixa, da magnitude de 1,5 a 1,4 kg/dm³ 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).

2.2.5 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), 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 2.6.

Tabela 2.6 - Requisito das camadas

Camada	Expansão (%)	C.B.R (%), LL (%), IG e IP (%)
Subleito	≤ 2	C.B.R ≥ 2
Reforço de subleito	≤ 1 (com sobrecarga de 10lb)	C.B.R Maior que Subleito
Sub-base	≤ 1 (com sobrecarga de 10lb)	C.B.R ≥ 20 , IG=0
Base	$\leq 0,5$ (com sobrecarga de 10lb)	C.B.R ≥ 80 , LL $\leq 25\%$, IP $\leq 6\%$

Fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2006)

2.2.6 Ensaios de DRX e FRX

O intuito da caracterização química e mineralógica é conhecer a existência dos elementos e a concentração destes na amostra, pois segundo informações do fornecedor do resíduo, existe uma gama de diferentes tipos de compostos nas pilhas estocadas.

Por meio da técnica da Difração de raios-X (DRX) é possível verificar as fases cristalinas e amorfas do composto. Este procedimento tem por vantagem ser uma avaliação do tipo não-destrutivo.

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.

2.2.7 Ensaios de cisalhamento direto

Conforme Das (2012, p. 331), “A resistência ao cisalhamento de uma massa de solo é a resistência interna por área unitária que essa massa é capaz de resistir a rupturas e a deslizamentos ao longo de qualquer plano em seu interior”.

A análise da resistência ao cisalhamento é fundamental, visto que proporciona uma avaliação dos problemas oriundos de estabilidade dos solos, como estabilidade de taludes, capacidade de carga e pressão lateral em estruturas de contenção (DAS, 2012).

O ensaio de cisalhamento direto é realizado conforme a norma ASTM /D3080M - 11 “Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions”, por não haver norma brasileira pertinente ao assunto.

“O ensaio de cisalhamento direto é o mais antigo procedimento para a determinação da resistência ao cisalhamento e se baseia diretamente no critério de Coulomb” (PINTO, 2006).

Segundo Ortigão (2007), o ensaio foi utilizado por Coulomb em 1776, e permite o estudo da resistência em um único plano de ruptura, que é imposto durante a realização do ensaio.

O ensaio é muito utilizado devido a sua simplicidade, porém não é tão preciso e completo quanto os ensaios triaxiais e cisalhamentos simples.

Conforme Das (2012), algumas deficiências são conhecidas do ensaio de cisalhamento direto como:

- Não é permitido que o solo se rompa no plano mais frágil, já que ele é forçado a romper no plano horizontal de separação da caixa;
- A distribuição da resistência ao cisalhamento sobre a superfície do corpo-de-prova não é uniforme.

Ortigão (2007) complementa ainda que, no ensaio de cisalhamento direto, há a impossibilidade de controle de drenagem do corpo-de-prova, pois a caixa de cisalhamento não tem um sistema de vedação adequado.

Pinto (2006) destaca ainda que com a aplicação das forças T (tangencial), o plano horizontal que representava os planos principais de tensões acaba por sofrer uma rotação. As tensões são conhecidas apenas em um único plano. Destaca-se ainda que, por mais que se imponha que o cisalhamento ocorra no plano horizontal, poderá haver rupturas internas em outras direções previamente.

Pinto (2006) revela no mais que o ensaio de cisalhamento direto não permite a determinação de parâmetros de deformabilidade do solo, nem mesmo o módulo de cisalhamento, haja vista que não se conhece a distorção. Seria dessa forma então necessária a realização de ensaios de cisalhamento simples, que são de difícil execução.

Apesar dessas deficiências, por sua simplicidade, ele é muito útil quando se pretende conhecer apenas a resistência, e principalmente, a resistência residual (PINTO, 2006).

O ângulo de atrito varia conforme o tipo de solo, e seu estado de compactação. Areias fofas possuem menores ângulos de atrito que areias compactas. Na Tabela 2.7 podem-se observar alguns valores de ângulos de atrito para variados tipos de solos.

Tabela 2.7 - Valores típicos de ângulos de atrito segundo

Valores típicos do ângulo de atrito drenado para areias e siltes	
Tipo de solo	Ângulo de atrito (°)
Areia: Grãos arredondados	
Fofa	27-30
Média	30-35
Compacta	35-38
Areia: Grãos angulares	
Fofa	30-35
Média	35-40
Compacta	40-45
Pedregulho com alguma areia	
	34-48
Siltes	
	26-35

Fonte: Das (2012)

Segundo Pinto (2006) os valores típicos dos ângulos de atrito, para tensões de 100 a 200 kPa, que é a ordem de grandeza das tensões que ocorrem em obras comuns de engenharia civil, são observados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Valores típicos de ângulos de atrito segundo

Estado	Fofa	a	Compacto
Areias bem-graduadas			
de grãos angulares	37°	a	47°
de grãos arredondados	30°	a	40°
Areias mal-graduadas			
de grãos angulares	35°	a	43°
de grãos arredondados	28°	a	35°

Fonte: Pinto (2006)

2.3 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 do problema (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 (USCS) (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 por meio 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.
- Solo de granulometria fina, na qual 50 % do material ou mais passa na peneira número 200. Nesse caso, os símbolos começam com as letras M, de silte inorgânico, O para matéria orgânica e C para argila inorgânica.

Outros símbolos usados, como caracterização complementar são:

W- Bem graduado

P- Mal graduado

L- Baixa plasticidade

H- Alta plasticidade

O USCS fornece, a partir dos resultados da curva granulométrica, os coeficientes de não uniformidade (CNU), coeficiente de curvatura (CC), e os limites de Atterberg, conforme equações 2.1 e 2.2.

A Figura 2.24 mostra a classificação da USCS em relação ao índice de plasticidade e o limite de liquidez.

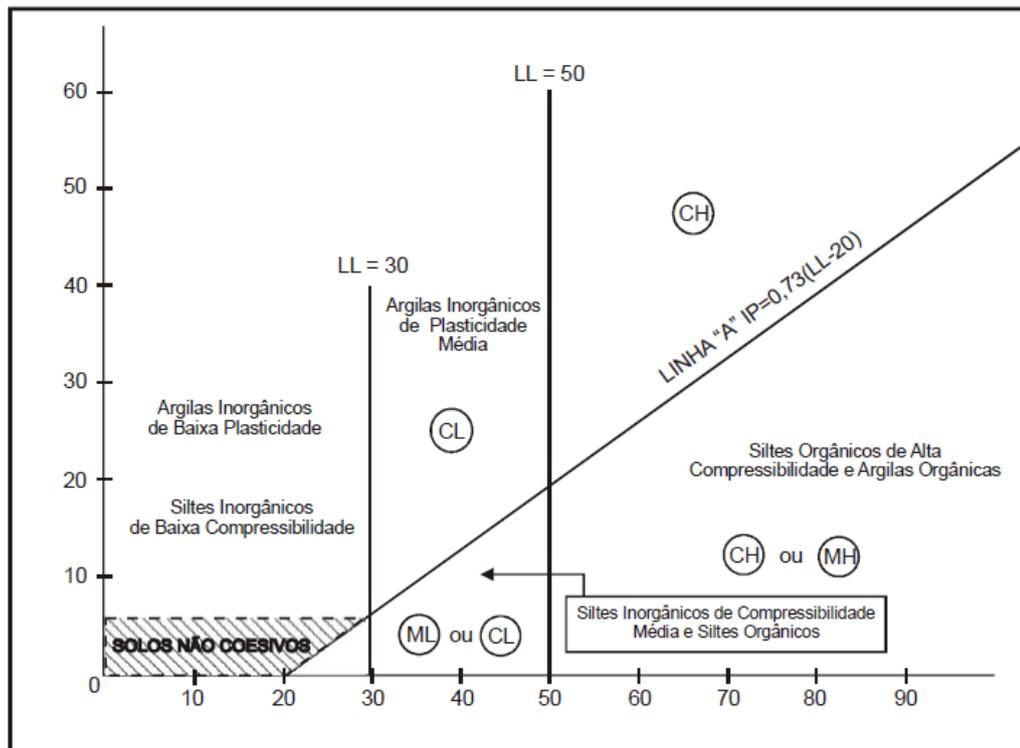


Figura 2.24- Gráfico de plasticidade

Fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2006)

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 2.25, e a equação 2.4 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 siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos		
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

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

Figura 2.25- Classificação dos solos (HRB)

Fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2006)

$$IG = 0,2a + 0,05ac + 0,01bd \quad (2.4)$$

Em que:

- a: sendo a porcentagem que passa na peneira nº 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 nº 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).

2.4 O pavimento

De acordo como o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006): Pavimento de uma rodovia é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço considerada teoricamente como infinito – a infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito.

Ainda, segundo Souza (1980), pavimento é uma estrutura construída após o processo de terraplenagem por meio de camadas de diferentes materiais de diferentes características de resistência e deformabilidade. Esta estrutura, assim constituída, apresenta um elevado grau de complexidade no que se refere ao cálculo das tensões e deformações.

Segundo Bernucci et al. (2010), o pavimento é a estrutura constituída após a execução da movimentação de terra, e tem por destinação técnica e econômica, simultaneamente, ao seu conjunto:

- Resistir e distribuir ao subleito do pavimento os esforços verticais oriundo do tráfego;
- Resistir aos esforços horizontais que nele atuam, como aqueles oriundos da frenagem de veículos;
- Melhorar as condições de rolamento em relação a segurança e comodidade.

Os pavimentos, segundo o DNIT (2006), são classificados em: Flexível, semirrígido e rígido.

O pavimento flexível é constituído por camadas que não trabalham à tração, exceção feita ao revestimento que pode ou não suportar esse tipo de esforço. São aqueles em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui entre camadas de forma equivalentes.

Em geral, esse tipo de pavimento está associado aos pavimentos asfálticos (revestimento flexível), apoiada sobre camada de base, de sub-base e de reforço de subleito, constituída por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem adição de agentes cimentantes.

As Figuras 2.26, 2.27 e 2.28 mostram a representação de um exemplo típico de pavimento flexível, semi-rígido e rígido, respectivamente.

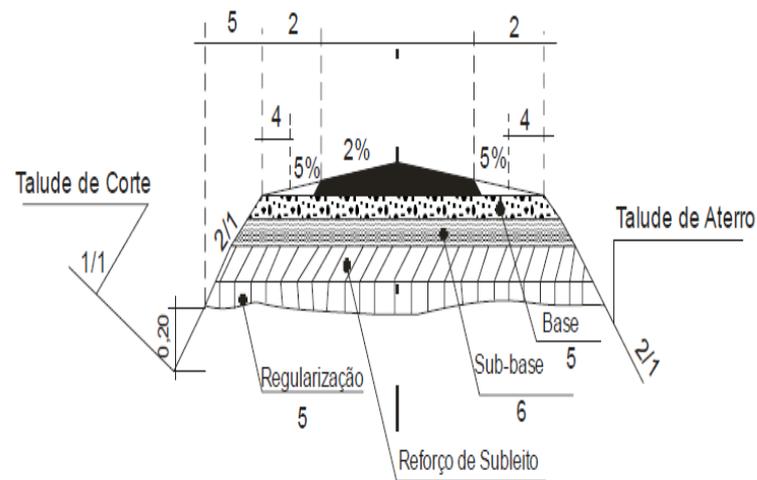


Figura 2.26- O pavimento flexível

Fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2010)

Os pavimentos semi-rígidos tem por característica possuir uma base cimentada por algum aglutinante com propriedade cimentícias, como por exemplo, por alguma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica, conforme se observa na Figura 2.27.



Figura 2.27- O pavimento semi-rígido

Fonte: Bernucci et al. (2010)

Já os pavimentos rígidos são aqueles em que o revestimento tem uma elevada rigidez em comparação às camadas inferiores, absorvendo dessa forma praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado, conforme Figura 2.28.

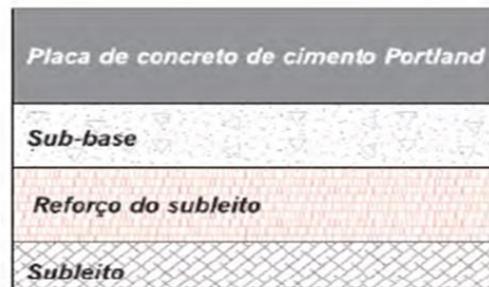


Figura 2.28- O pavimento rígido

Fonte: Bernucci et al. (2010)

2.4.1 As camadas que compõem o pavimento

O pavimento, de uma forma geral, pode ser considerado como uma estrutura composta de base e revestimento, sendo que a base poderá ou não ser complementada pela sub-base e pelo reforço do subleito.

Cada camada deverá ser executada com solos escolhidos, que apresentem características físicas para atender as especificações do projeto.

A concepção da estrutura do pavimento e a seleção dos materiais a serem empregados dependem principalmente dos seguintes fatores:

- do tráfego (volume e composição) e vida ou período de projeto;
- da disponibilidade de materiais da região;
- do relevo e das condições climáticas da região; e
- da geometria e das condições de drenagem da via.

De acordo com o DNIT (2006), as camadas do pavimento são definidas como:

- **Subleito**: É o terreno de fundação onde será apoiado todo o pavimento. Os solos podem ser classificados segundo suas propriedades e seu comportamento. O método mais utilizado é o Índice de Suporte Califórnia (CBR ou Califórnia Bearing Ratio).

Requisitos de utilização: Materiais que apresentem C.B. $R \geq 2\%$ e expansão $\leq 2\%$.

- **Regularização do subleito**: é a camada construída acima do subleito, destinada a conformá-lo transversal e longitudinalmente de acordo com as especificações. A regularização não é considerada uma camada que compõe o

pavimento. Ela possui espessura variável e poderá ou não existir, dependendo das condições do leito.

➤ **Reforço do subleito:** Esta camada serve para melhorar a qualidade do subleito e regularizar a espessura da sub-base. Possui espessura constante, diferentemente da regularização, utilizada por circunstâncias técnico-econômicas, acima da desta, com características geotécnicas inferiores ao material usado na camada que lhe for superior, porém melhores que o material do subleito.

➤ **Sub-base:** Camada complementar à base e com suas mesmas funções. Deve ser utilizada quando não for aconselhável executar a base diretamente sobre o leito regularizado ou sobre o reforço do subleito, devido a circunstâncias técnico-econômicas. Pode também ser usada para regularizar a espessura da base.

Requisitos de utilização: Materiais que apresentem C.B.R $\geq 20\%$, IG =0 e expansão $\leq 1\%$.

➤ **Base:** Camada destinada a resistir e distribuir ao subleito os esforços oriundos do tráfego e sobre a qual se construirá o revestimento. Pode ser executada de solo-cimento, BGS, BGTC e macadame, dentre outras, conforme as características geológicas da região.

Requisitos de utilização: Materiais que apresentem C.B.R $\geq 80\%$ e expansão $\leq 0,5\%$ (medida com sobrecarga de 10 lb), limite de liquidez (LL) $\leq 25\%$ e Índice de plasticidade (IP) $\leq 6\%$.

2.4.2 As bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas

De acordo com o DNIT (2006), as bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas podem ser divididas, segundo Figura 2.29:



Figura 2.29 - Tipos de bases e sub-bases

Fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2006)

2.4.2.1 Bases e sub-bases granulares

a) Estabilização granulométrica

As bases estabilizadas granulometricamente são as camadas composta por solos, britas de rochas, de escória de alto forno, ou mesmo pela mistura desses materiais. Estas camadas são puramente granulares, sempre flexíveis e estabilizadas granulometricamente pela compactação de um material ou de mistura de materiais que apresentem uma granulometria adequada e índices geotécnicos específicos.

As base e sub-bases do tipo solo-brita são obtidas utilizando de pedra britada com mistura natural. Em contrapartida, as bases e sub-bases de brita graduada e brita corrida são obtidas com uso exclusivo de produtos de britagem.

Segundo o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER- ES 303, 1997a), os materiais estabilizados granulometricamente devem possuir composição granulométrica satisfazendo algumas faixas de granulometria, de acordo com o número N de tráfego do DNER.

A Tabela 2.9 revela as faixas granulométricas exigidas dos materiais pétreos a serem usados em camadas de base.

Tabela 2.9 - Faixas granulométricas

Tipos	Para $N > 5 \times 10^6$				Para $N < 5 \times 10^6$		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 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

Fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1997a)

De acordo com o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER-ES 301, 1997b), que trata das sub-bases estabilizadas granulometricamente, não há exigências quanto às faixas granulométricas do material. Existem, apenas, alguns requisitos de aceitação, como por exemplo, $IG = 0$ quando submetidos aos ensaios de caracterização seguintes:

- Fração retida na peneira nº 10 (ensaio de granulometria) deve possuir partículas duras, isentas de fragmentos moles, materia orgânica ou outras substâncias prejudiciais;
- $ISC \geq 20$, ou de acordo com especificações de projeto, e expansão $\leq 1,0\%$.

b) Macadame hidráulico

É uma camada de brita de graduação aberta, também chamada de brita macadame, que após a compressão, tem os vazios preenchidos pelo material de enchimento, constituído por finos de britagem (pó de pedra ou *filler*). O fino de britagem é penetrado através do espalhamento na superfície, varredura, compressão, com ou sem vibração, e irrigação, se caso tratar-se de macadame hidráulico.

2.4.2.2 Bases e sub-bases estabilizadas (com aditivos)

a) Solo-cimento

É uma mistura compactada de solo, aglomerante (cimento Portland) e água. A mistura deve possuir certos requisitos de densidade, durabilidade e resistência, dando como resultado uma camada cimentada, de elevada rigidez à flexão. O teor de cimento da ordem de 6 a 10%.

b) Solo melhorado com cimento

A diferença básica do solo melhorado com cimento para o solo-cimento é o teor de cimento incorporado à mistura. No caso do solo melhorado, esse teor varia de 2% a 4%, em peso. Tem por objetivo primordial a modificação do solo no que se refere à sua plasticidade e sensibilidade à água. Sem cimentação acentuada, são consideradas camadas flexíveis.

c) Solo-cal

O solo-cal é uma mistura de solo, cal e água e, em alguns casos específicos, a cinza volante. O teor de cal utilizado é da ordem de 5 a 6% (DNIT, 2006).

d) Solo melhorado com cal

E a mesma ideia do solo-cal, porém neste caso há predominância dos fenômenos que produzem modificações do solo, no que se refere a sua plasticidade e sensibilidade a água, não oferecendo a mistura características acentuadas de resistência e durabilidade. As bases feitas desta maneira são também consideradas flexíveis.

e) Solo-betume

O solo-betume é uma mistura de solo, água e material betuminoso. Essa mistura é considerada flexível (DNIT, 2006).

f) Bases betuminosas diversas

Camadas de revestimento de pavimentos utilizadas como camadas de base e sub-base, como por exemplo, o macadame betuminoso.

2.4.3 Bases e sub-bases rígidas

Conforme o DNIT (2006), estas camadas são, caracteristicamente, as de concreto de cimento. Esses tipos de base e sub-base têm acentuada resistência à tração. Existem dois tipos de concreto para se utilizar em sua formação:

Concreto plástico: São aqueles concretos de alta trabalhabilidade, para serem adensados por vibração manual ou mecânica;

Concreto magro: Concreto com baixo consumo de cimento, porém com consistência apropriada à compactação com equipamentos rodoviários.

2.5 Uso de resíduos na pavimentação

A busca constante por um meio ambiente mais saudável 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 de resíduos, conforme se evidenciará adiante, 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 resíduo grosso formado no processo de beneficiamento do caulim, em substituição parcial, ou mesmo total aos agregados normalmente empregados em mistura convencional.

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 obteve 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 levá-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 em seu ramo seco, em umidade 2% abaixo da umidade ótima. O CBR para esta umidade foi, 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 ([20--]) 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 mostra-se bastante atraente 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% o ganho de resistência em comparação ao corpo-de-prova de referência. Constatou ainda que houve um aumento de resistência considerável dos corpos de prova após o 56° 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.

Concluiu, 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 et al (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 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 reciclados estavam 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.

Ainda, as amostras de lodo, mesmo após a 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 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 lodo 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, variando 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 aumentava 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. Contudo, para os intervalos de análises 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 $\rho_{d,max}$ 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: 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 $\rho_{d,max}$ 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 $\rho_{d,max}$ (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). Ainda, 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 pedreira Araguaia possui granulometria típica de silte arenoso, enquanto que o resíduo oriundo da pedreira 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 pedreira Araguaia foi de 28,2 kN/m³, enquanto que o resíduo coletado na pedreira 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, TRB e MCT.

Quanto ao peso específico dos grãos das misturas, observou que ao se incluir porcentagens do resíduo da pedreira 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 pedra 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 $\gamma_{d,max}$ 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 $\gamma_{d,max}$, com valor na ordem de 18,00 kN/m³, e w_{ot} de 17,75%. Já a mistura com resíduo da pedra Anhanguera apresentou resultados muito próximos, mais ainda prevalecendo a mistura com 10%, com valores de $\gamma_{d,máx}$ 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 pedra Araguaia, com 15 e 10% e massa, apresentaram os maiores resultados, com valores máximos da ordem de 26%. Por outro lado, a mistura com resíduos da pedra 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 Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis (CTGás), na unidade de Pesquisa Aplicada e Transferência de Tecnologia-UNPA, no Laboratório de Ensaio de Materiais em Natal/RN e no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

O procedimento experimental foi desenvolvido em quatro etapas: A primeira etapa compreendeu os ensaios químicos e mineralógicos. A segunda abrangeu a caracterização física do resíduo. A terceira compreendeu os ensaios específicos da pavimentação, e a quarta etapa consistiu da caracterização mecânica.

A Tabela 3.1 e a Figura 3.1 resumem as etapas e os ensaios realizados neste trabalho.

Tabela 3.1 - Ensaio realizados

Etapa	Ensaio	Norma	Nº de ensaios
Caracterização Química e Mineralógica	Ensaio de DRX		1
	Ensaio de FRX		1
Caracterização Física	Massa específica dos sólidos	NBR 6508/1984	3
	Granulometria	NBR 7181/1984	3
	Limite de liquidez	NBR 6459/1984	5
	Limite de plasticidade	NBR 7180/1984	5
Ensaio de Pavimentação	Compactação	NBR 7182/1986	9
	CBR	NBR 9895/1987	3
Caracterização mecânica	Cisalhamento direto	ASTM D3080M-11	12
	Cisalhamento direto inundado	ASTM D3080M-11	12

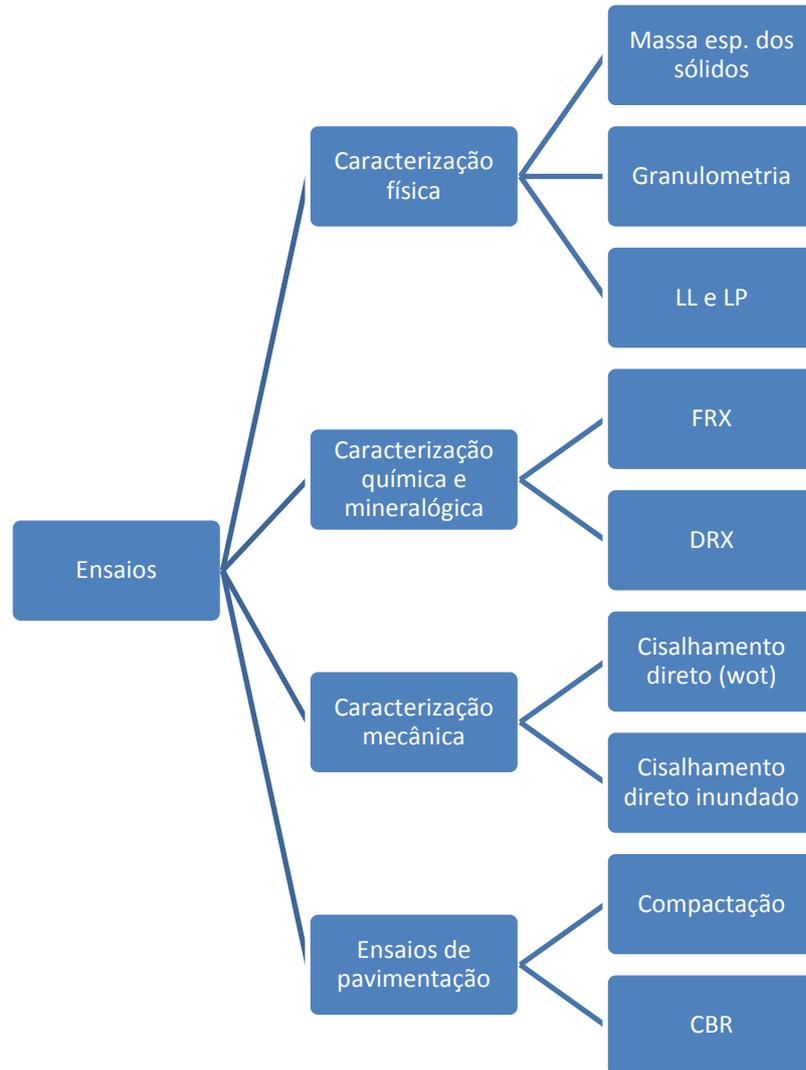


Figura 3.1 - Fluxograma dos ensaios

O grupo de mineração Tomaz Salustino, explorador da mina Brejuí, foi o fornecedor do resíduo para a realização deste trabalho. As amostras do resíduo grosso do beneficiamento de scheelita foram coletadas em seu local de despejo, nas proximidades da mina. Através da Figura 3.2 é possível observar os montes de resíduos grossos de scheelita depositados a céu aberto.

Foram coletadas apenas amostras do resíduo grosso. 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 3.3.



Figura 3.2 - Depósito de Resíduo Grosso de Scheelita



Figura 3.3 - Amostra acondicionada

A jazida se localiza no município de Currais Novos, no Seridó Norte-Riograndense, com localização geográfica de $6^{\circ}19'32''\text{S}$ e $36^{\circ}32'55''\text{W}$. A Figura 3.4 indica as principais rodovias de acesso à mina Brejuí.

3.3 Caracterização física do resíduo

Esta etapa teve por objetivo a determinação de algumas características intrínsecas do resíduo, como sua granulometria, ou seja, qual o tamanho dos grãos do resíduo, a influência das partículas finas perante a água, através dos índices de consistências (limites de Atterberg), 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, de modo a minorar possíveis erros nos resultados obtidos.

Foram realizados três ensaios de granulometria baseado na norma NBR 7181/1984 (apenas a etapa de peneiramento, pois as porcentagens de finos presentes na amostra eram insignificantes) a fim de obter uma melhor representatividade dos resultados além de possibilitar uma melhor identificação da heterogeneidade do material.

Apesar da aparência granular do material, e dessa forma, com possível ausência de coesão, foram realizados cinco ensaios de limite de liquidez e cinco ensaios de limite de plasticidade, conforme as normas NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984.

3.4 Ensaio de aplicação em pavimentação

Nessa etapa, foram executados ensaios de compactação Proctor, 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).

Esses ensaios são os alicerces da pesquisa, visto que nortearão as escolhas dos critérios dos demais ensaios, além de inferir na aceitabilidade do material como material de pavimentação.

Foi programada a execução de três ensaios de compactação para as energias normal, intermediária e modificada, de forma a evitar ao máximo possíveis erros na execução do procedimento.

Conforme indica a norma de compactação, foram utilizados aproximadamente 3 quilos do resíduo para cada ensaio de compactação. O material, acondicionado nos sacos hermeticamente fechados, continham um teor de umidade inicial de

aproximadamente 1%, oriundo no local onde estava depositado nos arredores da mina. Foi adicionada água, por sua vez, até se atingir o teor de umidade de 4%. Esse foi o valor de umidade inicial para a realização do ensaio. A cada novo ponto, adicionou-se uma quantidade de água, que correspondeu a 2% em peso de material. A mistura do material a ser compactado se deu em cima de uma bancada de concreto, dentro de uma bandeja de alumínio a fim de se evitar a perda de água por absorção do concreto. Além disso, enquanto o material era compactado no cilindro, o restante permanecia dentro da bandeja, vedado com papel filme para que a água contida na mistura não evaporasse. Entre cinco a seis 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 $\gamma_{d,max}$ e w_{ot} dos corpos de prova a serem moldados nos ensaios de CBR.

Através do $\rho_{d,max}$ e do w_{ot} foi calculado o peso do resíduo a ser compactado dentro do cilindro de CBR e a quantidade de água a ser adicionada. Antes de iniciar a compactação, foi colocado papel filtro na parte inferior do corpo de prova de modo a minorar a saída excessiva de água durante a realização do ensaio. Com o início da compactação das camadas, o material em espera para ser compactado nas demais camadas foi coberto com papel filme, e os aparelhos de ar-condicionado foram desligados, com intuito de evitar a evaporação excessiva da água presente no resíduo e com isso impedir a compactação do material com teores de umidades diferentes do planejado.

Durante a realização das compactações, foi coletada uma amostra do material durante a compactação da segunda camada a fim de identificar o teor de umidade real do material durante a realização do ensaio.

Foi realizado um ensaio de CBR para cada energia de compactação estudada.

3.5 Caracterização Mecânica

Foram programados duas séries de ensaios de cisalhamento direto. Para a primeira, as amostras foram moldadas no teor de umidade ótimo e submetido ao cisalhamento sem imersão do corpo de prova. Na segunda série as amostras foram

moldadas da mesma forma que na primeira, no entanto, antes do cisalhamento as amostras foram inundadas. Em ambas as séries, os corpos de provas foram moldados de acordo com os parâmetros de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima, obtidos nos ensaios de compactação Proctor.

Com auxílio de um paquímetro, foi medida a altura do molde a ser colocado dentro da caixa de cisalhamento, e então dividiu-se a altura em três parcelas. A altura média obtida foi de 3,40 cm com 1,13 cm para suas três parcelas. Com a medição do diâmetro do molde (5,97 cm) foi calculado o volume do material a ser depositado (aproximadamente 95,12 cm³). Em seguida, através dos resultados de $\rho_{d,max}$ e w_{ot} obtidos no ensaio de compactação, juntamente com o volume do molde, foi calculada a massa do material (ρ) a ser compactado dentro do molde, através da equação 3.1.

A massa foi dividida em três porções, depositadas em três recipientes diferentes, vedados com papel filme de modo a evitar a perda de água por evaporação enquanto não eram utilizadas. A primeira porção então foi depositada no molde e compactada até se atingir a altura desejada. Ranhuras foram criadas, com uso de laminas para criar aderência com a próxima camada a ser depositada. O procedimento foi repetido para as demais camadas a serem compactadas.

$$\rho = \rho_d (1+w) \quad (3.1)$$

Onde:

ρ = peso específico natural

ρ_d = peso específico seco

w = umidade

Conforme Gerscovich (2010), a variação da velocidade no ensaio de cisalhamento direto para o caso de materiais granulares (arenosos) não afeta o valor final do ângulo de atrito. Foi adotada a velocidade de cisalhamento de 0,067 mm/min.

Os ensaios foram realizados, tanto na condição de w_{ot} como inundada, para as energias de compactação normal, intermediária e modificada. Foram utilizadas tensões verticais de 100, 200, 300 e 600 kPa.

De posse dos resultados foi traçada a envoltória de tensão cisalhante de ruptura e tensão residual para os três níveis de energia analisados. Assim, obtiveram-se os parâmetros de resistência de pico e residual do material para as três energias de compactação.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Introdução

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

Alguns resultados obtidos foram comparados com os resultados encontrando por alguns autores citados no item 2.6 deste trabalho utilizando outros tipos de resíduos aplicados na pavimentação. Devido à impossibilidade de comparar os resultados encontrados nesta pesquisa com outros estudos de aplicação de scheelita em pavimentos, optou-se por confronta-los com os resultados obtidos para resíduos diferentes a fim de visualizar as diferenças entre os materiais e compreender melhor a viabilidade técnica da utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita.

Inicialmente apresentam-se os resultados e discussões da caracterização química do resíduo. Os ensaios de granulometria e massa específica dos sólidos são analisados logo após. Em seguida, são discutidos os resultados dos ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia. Por fim a caracterização mecânica por meio dos ensaios de cisalhamento direto.

4.2 Resultados da caracterização química

A Figura 4.1 apresenta os resultados obtidos no ensaio de DRX. A Tabela 4.1 mostra as presenças dos óxidos no resíduo, através do ensaio de FRX.

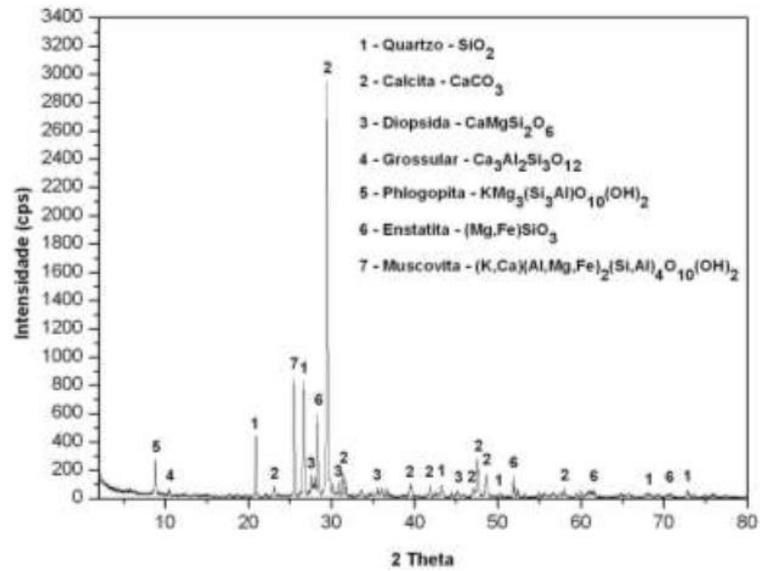


Figura 4.1 - Compostos

Tabela 4.1 - Óxidos

Óxido	(%)
SiO ₂	30,97
CaO	28,99
Al ₂ O ₃	13,13
MgO	4,94
Fe ₂ O ₃	3,53
K ₂ O	0,69
MnO	0,23
SO ₃	0,22
TiO ₂	0,16
SrO	0,09
WO ₃	0,03
MoO ₃	0,01
CuO	0,01
ZnO	0,01
PF	16,99

Os resultados da caracterização química e mineralógica indicam altos teores de sílica e cálcio nas amostras estudadas, condizentes com a composição mineralógica das rochas encaixantes de scheelita.

Os óxidos SiO_2 (31%), CaO (29%) e AlO_3 (13,1%) se apresentam como principais componentes, correspondendo a 73% do total dos compostos apresentados.

Estes resultados, conforme a Tabela 4.1 e a Figura 4.1, apresentam como principais minerais a Calcita, Quartzo, Micas (Muscovita e Flogopita), Silicatos do grupo de Granada (Grossulária) e Silicatos do grupo dos Piroxénios (Diopissídio e Enstatita), esses últimos de ocorrência comum em sedimentos metamorfizados ricos em Cálcio.

4.3 Resultados da caracterização física

O resíduo apresentou ρ_s (g/cm^3) de 2,844, 2,843 e 2,847 para os três ensaios realizados. O valor médio é igual a 2,84 g/cm^3 .

Essa alta massa específica dos sólidos possivelmente se deve à heterogeneidade da composição mineralógica do resíduo utilizado.

Castro (2008) obteve a ρ_s para o RFC e RFC de 2,66 g/cm^3 e 2,67 g/cm^3 . Já Costa (2006) encontrou valores na ordem de 2,59 g/cm^3 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/cm^3 . 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/cm^3 . Se comparados aos valores encontrados neste trabalho, o resíduo grosso da scheelita apresentou resultados bastante elevados.

Em relação aos ensaios granulométricos, os resultados são apresentados na Figura 4.2 e nas Tabelas 4.2 e 4.3. A Figura 4.2 apresenta as três curvas obtidas através dos ensaios realizados. A Tabela 4.2 compila os índices granulométricos extraídos dos três ensaios realizados. A Tabela 4.3 mostra as porcentagens das partículas existentes no resíduo para os três ensaios realizados.

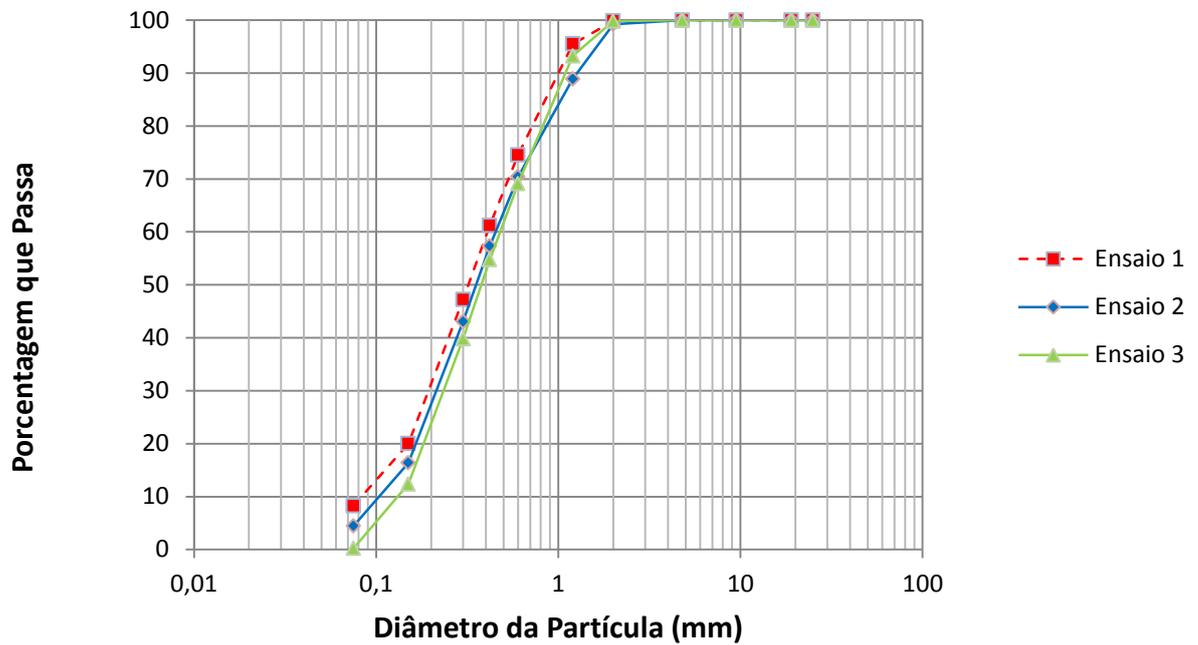


Figura 4.2 - Curvas granulométricas

Tabela 4.2- Índices granulométricos

Amostra	Porcentagem que passa			C_u	C_c	D_{10}	$D_{máx}$
	# 10	# 40	# 200				
1	99,85	60,99	7,5	4,71	1,17	0,09	1,2
2	99,2	7,33	4,45	4,5	1,3	0,1	1,2
3	99,82	54,73	0,22	4,17	1,12	0,12	1,2

Tabela 4.3 - Porcentagem de partículas existentes

Amostra	Porcentagem					
	Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
1	0,00	25,00	45,00	22,25	0,00	0,00
2	0,00	30,00	42,00	23,55	0,00	0,00
3	0,00	32,00	46,00	21,78	0,00	0,00

A análise dos resultados obtidos mostra que o material é composto essencialmente pela fração granulométrica areia. O material não apresenta

partículas com diâmetro de pedregulhos. Por outro lado, o resíduo apresentou uma porcentagem menor que 5% (a exceção da amostra dois, que apresentou 7,5) passante na peneira número 200, portanto, seu teor de finos não influencia no comportamento da amostra.

O diâmetro efetivo do material, representado pelo índice D_{10} , variou entre os três ensaios realizados, em um intervalo de 0,091 a 0,12 mm. O formato da curva granulométrica é típico de materiais uniformes com coeficiente de não uniformidade (C_u) variando de 1,12 a 1,30.

O material, conforme realização dos cinco ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade, foi classificado como material não-plástico.

Segundo os resultados obtidos, as amostras podem ser classificadas como areia mal graduada (SP) conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). De acordo com o sistema de classificação rodoviária (HRB), o resíduo é classificado, segundo os ensaios de granulometria, como A-3 (areia fina), não plástica, de uso para subleitos como de excelente a bom, com $IG = 0$.

As Figuras 4.3 a 4.8 mostram as faixas granulométricas, segundo o DNER 303 (1997), exigidas para bases estabilizadas granulometricamente, e as curvas granulométricas das amostras ensaiadas.

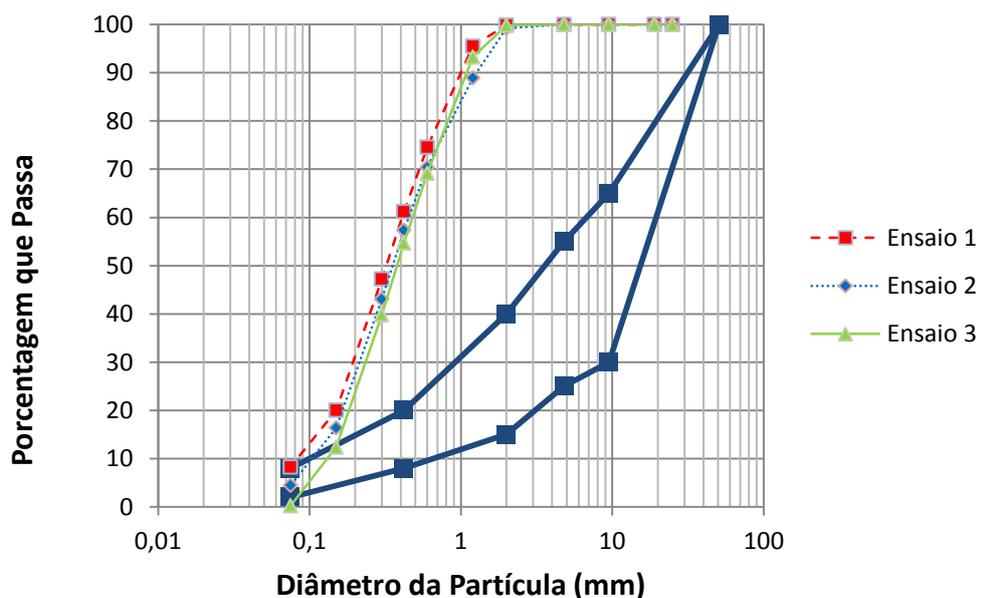


Figura 4.3 - Curvas granulométricas- Faixa A

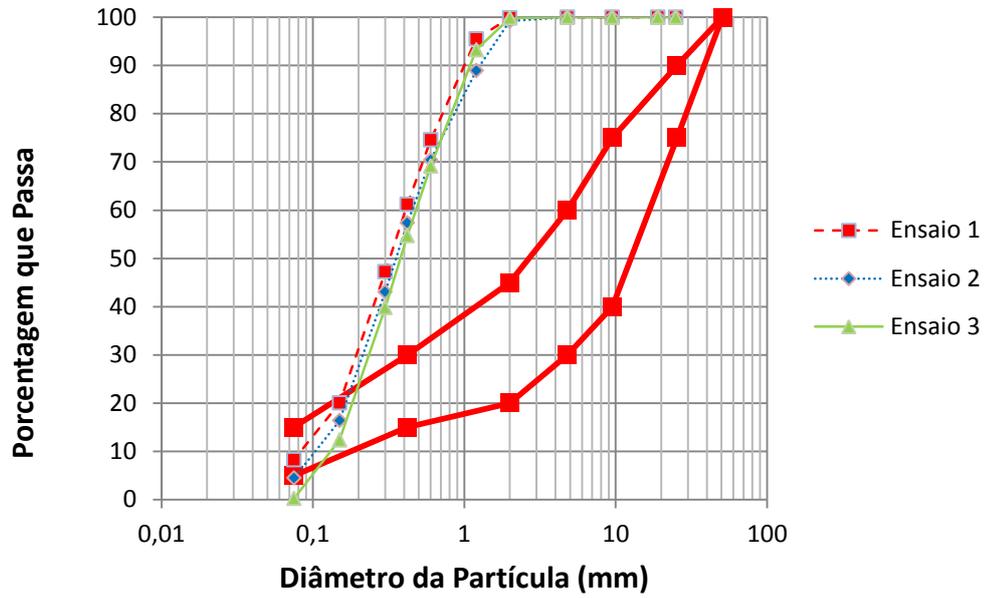


Figura 4.4 - Curvas granulométricas- Faixa B

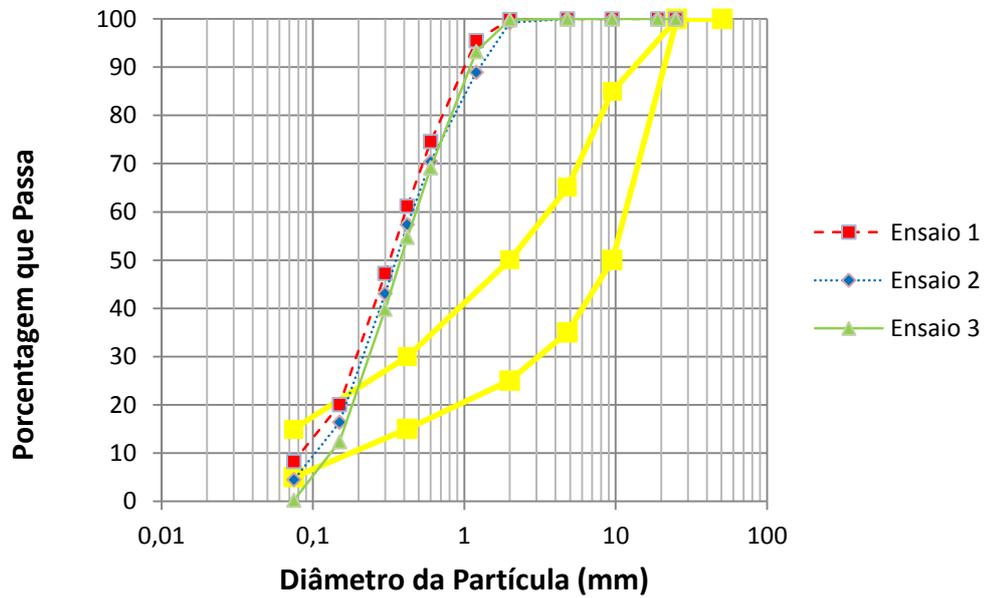


Figura 4.5 - Curvas granulométricas- Faixa C

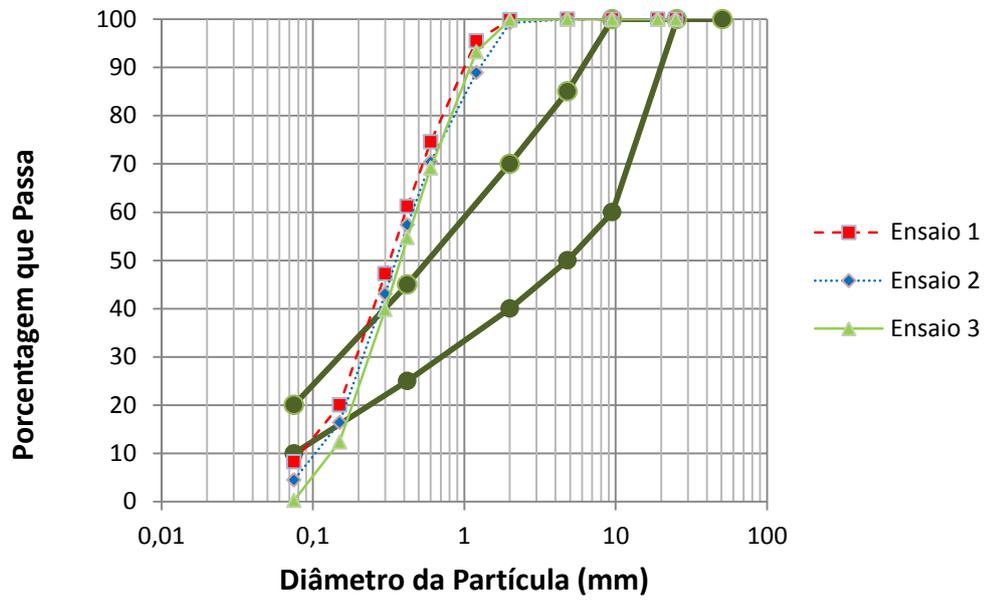


Figura 4.6 - Curvas granulométricas- Faixa D

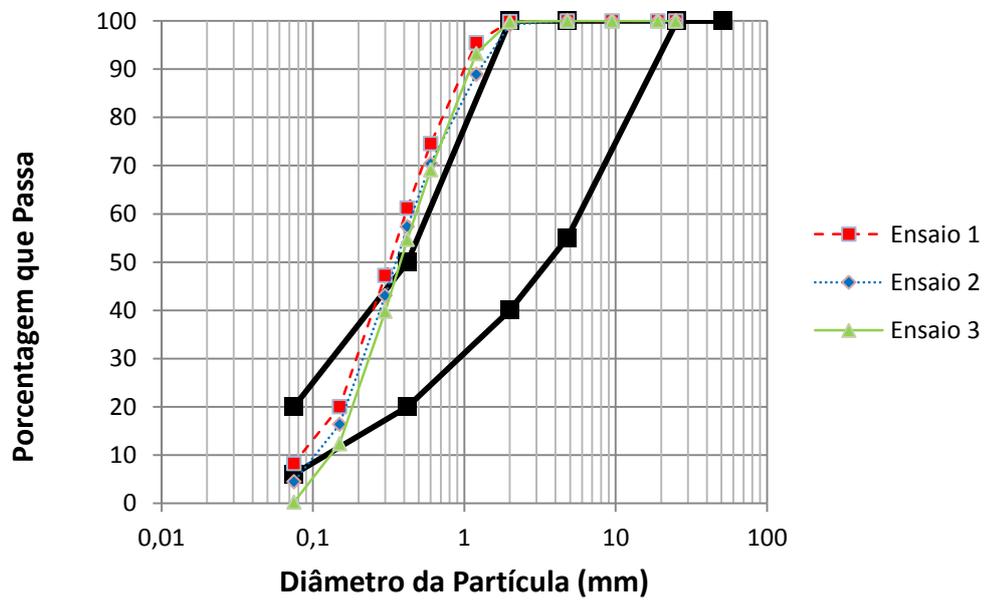


Figura 4.7 - Curvas granulométricas- Faixa E

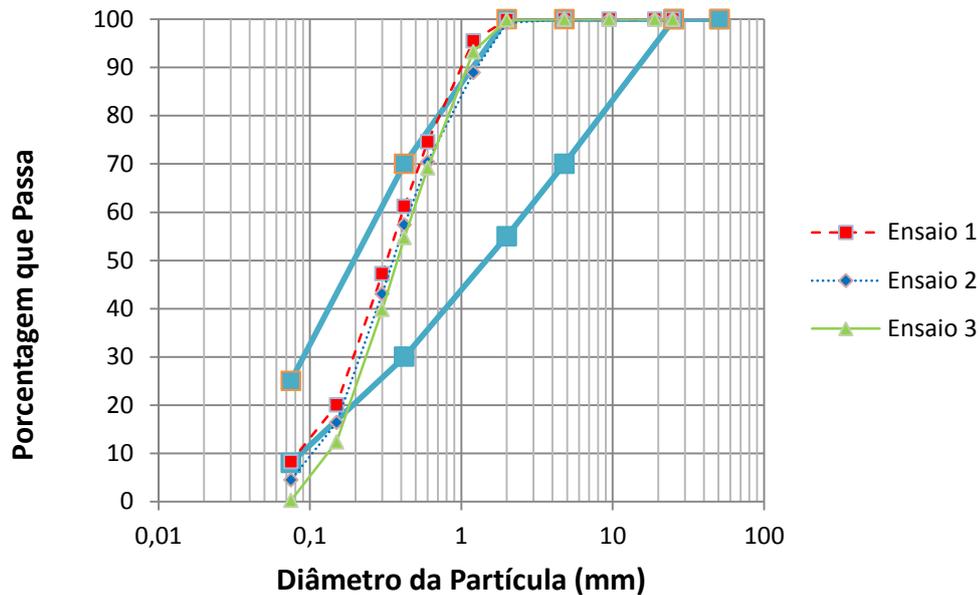


Figura 4.8 - Curvas granulométricas- Faixa F

De acordo com as Figuras 4.3 a 4.8, as amostras ensaiadas não atendem a nenhuma faixa granulométrica exigida pela norma DNER 303 (1997) para utilização como base estabilizada granulometricamente. Dessa forma, o material, segundo critérios granulométricos, não pode ser utilizado como material 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 normal, intermediário e modificado, e as respectivas massas específicas aparente secas e teores de umidade ótimos são apresentados na Figura 4.9.

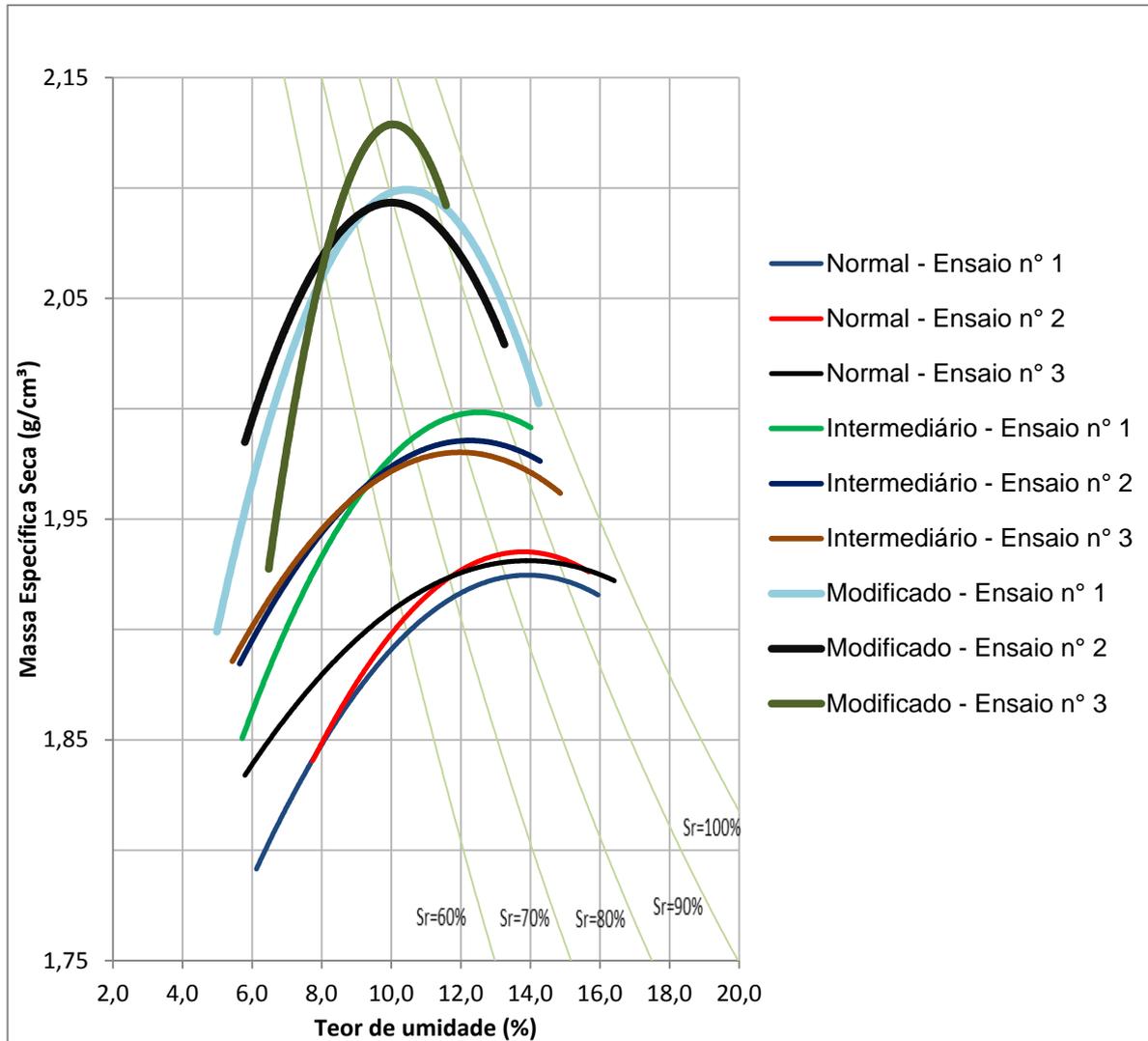


Figura 4.9 - Curvas de compactação

De acordo com a Figura 4.9, o resíduo, após ser compactado na energia Proctor normal, apresentou para as amostras nº1, nº2 e nº3, massa específica seca de 1,93 g/cm³, 1,94 g/cm³, 1,93 g/cm³ e teor de umidade ótimo de 13,8%, 13,7% e 13,6%, respectivamente.

Para a os corpos de prova moldados segundo a energia intermediária, o resíduo apresentou, para as amostras nº1, nº2 e nº3, massa específica seca de 2,00g/cm³, 1,99 g/cm³, 1,98 g/cm³ e teor de umidade ótimo na ordem de 12,4%, 12,3% e 12,0%, respectivamente.

As amostras, compactadas na energia modificada, apresentaram massa específica seca de 2,10g/cm³, 2,09 g/cm³, 2,12 g/cm³ e teor de umidade na ordem de 10,5%, 10,0% e 10,0%.

Pode-se observar que com o aumento da energia de compactação aplicada, a variação da ρ_d é muito pequena, da ordem de $0,17 \text{ g/cm}^3$. Possivelmente a adoção da compactação por vibração, própria para solos arenosos, acarretaria uma maior variação dos resultados obtidos em virtude da melhor acomodação das partículas granulares.

A Figura 4.10 mostra a melhor representação das curvas de compactação obtidas neste trabalho para as três energias estudadas.

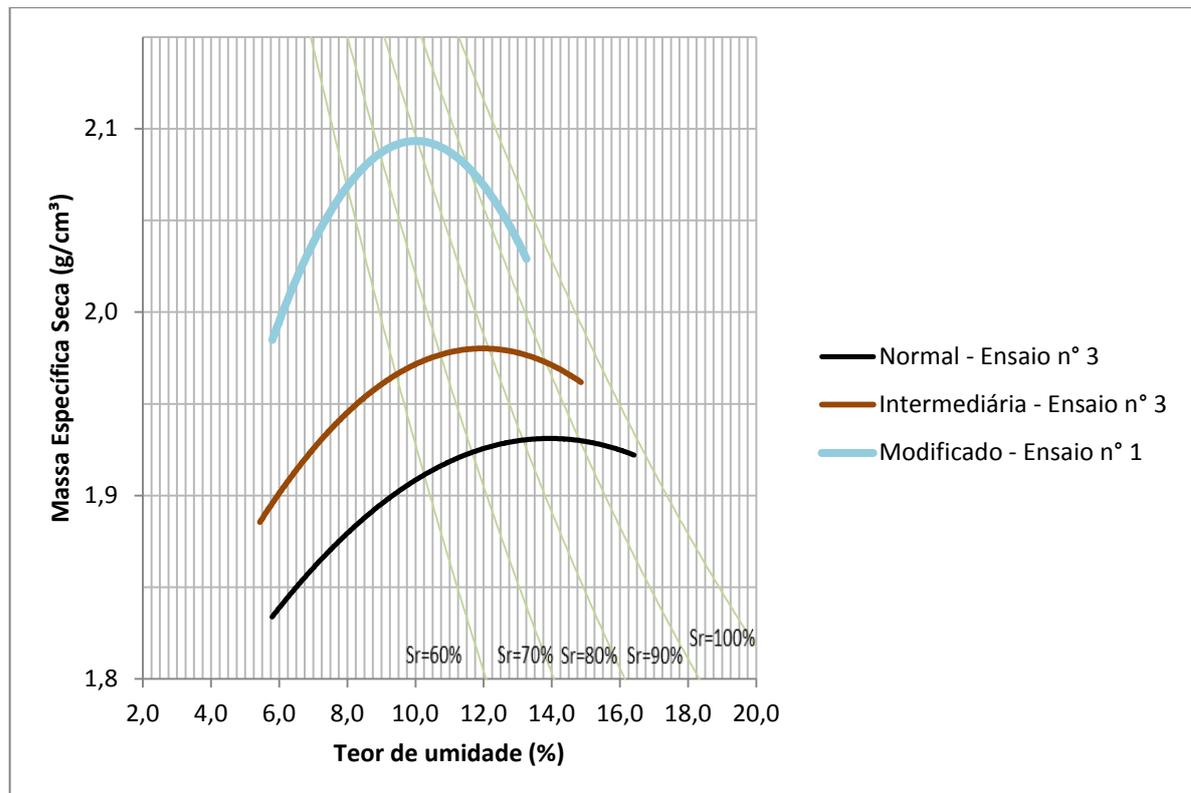


Figura 4.10 - Curvas de compactação representativa das energias

Finalizado a realização dos ensaios de compactação, e a fim de moldar os corpos de provas para execução do ensaio de Índice de Suporte Califórnia e ensaios de cisalhamento direto, a média obtida dos valores de teor de umidade ótima e massa específica aparente seca é apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultados dos ensaios de compactação

Energia	Ensaio de Compactação				
	Ensaio	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Média
Normal	W(%)	13,8	13,7	13,6	13,7
	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	1,93	1,94	1,93	1,93
Intermediária	W(%)	12,45	12,3	12,0	12,25
	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	2,0	1,99	1,98	1,99
Modificado	W(%)	10,5	10,0	10,0	10,17
	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	2,10	2,09	2,12	2,10

Conforme o resultado dos ensaios percebe-se que as curvas de compactação (Figuras 4.9 e 4.10), 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 ótimo. Este é o comportamento compatível com os solos de uma forma geral. Percebe-se também, a exceção das curvas referentes à energia modificada, uma maior inclinação do ramo seco e uma menor quantidade de pontos plotados no ramo úmido da curva.

A amostra apresentou massa específica seca na ordem de 2,10 g/cm³ para a energia modificada, conforme Tabela 4.4. Esse é um valor bastante alto se comparado aos solos argilosos (1,5 a 1,4 g/cm³), aos solos arenosos (2,0 g/cm³) e até mesmo a pedregulho bem graduado pouco argiloso (2,05 g/cm³).

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.

Compactado na energia intermediária, a amostra apresentou massa específica seca de $1,99 \text{ g/cm}^3$, como pode ser observar na Tabela 5.3. Nobrega e Melo (2009), usando resíduos da construção civil em substituição a agregados para pavimentação, obtiveram massa específica seca de $1,818 \text{ g/cm}^3$ e w_{ot} de 14,3%. Já Pereira (2012) encontrou valores de $1,65 \text{ g/cm}^3$, $1,67 \text{ g/cm}^3$ e $1,68 \text{ g/cm}^3$, respectivamente para os teores de cimento de 3%, 6% e 9%.

Conforme ensaio Proctor para energia normal, a amostra obteve massa específica seca $1,93 \text{ g/cm}^3$ e $w_{ot} = 13,7\%$, na qual é evidenciado na Tabela 4.4.

Castro (2008) encontrou massa específica seca da ordem de $1,96 \text{ g/cm}^3$ para o solo puro e $1,93 \text{ g/cm}^3$, $1,905 \text{ g/cm}^3$ e $1,876 \text{ g/cm}^3$ respectivamente para os teores de SR_{caulim} de 10%, 20% e 30% de caulim, valores bem próximos ao obtido para o rejeito de scheelita compactado na energia normal.

Pereira (2012) encontrou valores na magnitude de $1,62 \text{ g/cm}^3$, $1,64 \text{ g/cm}^3$ e $1,65 \text{ g/cm}^3$, bem inferior aos obtidos neste trabalho.

Os resultados analisados se mostraram bastante satisfatórios, pois solos, 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 4.5 a 4.7 fornecem os resultados dos ensaios de CBR para as três energias estudadas, conforme se observa adiante.

Tabela 4.5 - CBR para o corpo-de-prova moldado na energia normal

Energia Normal	
Teor de umidade (%)	13,7
Massa específica seca (g/cm^3)	1,93
CBR(%)	12,4
Expansão	0,0

Tabela 4.6 - CBR para o corpo-de-prova moldado na energia intermediária

Energia Intermediária	
Teor de umidade (%)	12,2
Massa específica seca (g/cm ³)	1,99
CBR(%)	17,7
Expansão	0,0

Tabela 4.7 - CBR para o corpo-de-prova moldado na energia modificada

Energia Modificada	
Teor de umidade (%)	10,2
Massa específica seca(g/cm ³)	2,10
CBR(%)	42,0
Expansão	0,0

A Tabela 4.8 indica os valores de umidade real dos corpos de provas moldados para os ensaios de CBR realizados.

Tabela 4.8 - Teor de umidade real da amostra

Teor de umidade real da amostra	
Ensaio de CBR	
Energia	Teor umidade (%)
Normal	13,40
Intermediária	11,90
Modificada	9,94

A Figura 4.11 mostra, em forma de gráfico, o crescimento do valor do CBR, à medida que se aumenta a energia aplicada.

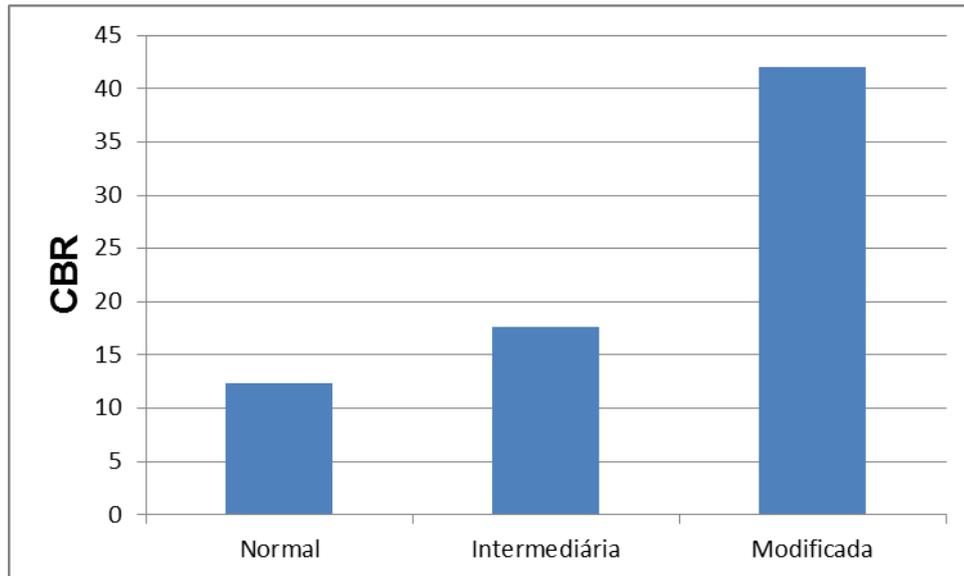


Figura 4.11 - Resultado dos ensaios de CBR

A amostra, compactada na energia normal, apresentou CBR na ordem de 12%, e expansão 0,0%, segundo se observa na Tabela 4.5, estando apta, segundo preconiza o DNIT (2006), a ser utilizada como material de reforço de subleito e subleito de pavimentos.

Farias (2005), para uma mistura de 50% de solo e 50% de cinza, em peso, atingiu CBR de 22,6% e expansão 0,0%. Ao acrescentar um teor de cal de 3%, houve um significativo aumento no CBR, alcançando o valor de 35,7 e mantendo a expansão nula. Pereira (2012) obteve, para variados teores de umidade, o valor máximo no CBR de 6,13%, para uma hot de 18,10%.

A amostra, compactada na energia intermediária, apresentou CBR na ordem de 18%, e expansão 0,0%, conforme é extraído da tabela 4.6, estando apta, segundo preconiza o DNIT (2006), a ser utilizada como material de reforço de subleito e subleito de pavimentos.

Nóbrega e Melo (2009), utilizando resíduos oriundos da construção civil obtiveram CBR da ordem de 40%, com expansão de 0,23%. O resultado se mostra bem acima dos requisitos exigidos para sua utilização como material de sub-base de pavimentos.

A amostra, compactada na energia modificada, apresentou CBR na ordem de 42%, e expansão 0,0%, de acordo com a Tabela 4.7, estando apta, segundo preconiza o DNIT (2006), a ser utilizada como material de sub-base, reforço de subleito e subleito de pavimentos.

4.5 Resultados da caracterização mecânica

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto são apresentados conforme Figura 4.12 a 4.43 e Tabelas 4.9 a 4.21.

4.5.1 Amostras moldadas e ensaiadas no teor de umidade ótimo

Os resultados para as amostras moldadas na condição de w_{ot} na energia normal são mostrados nas Figuras 4.12 a 4.15 e Tabelas 4.9 e 4.10.

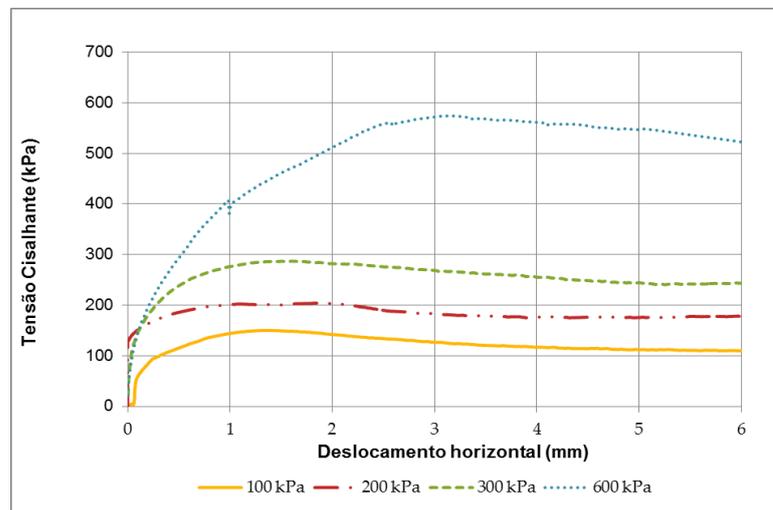


Figura 4.12 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para energia normal

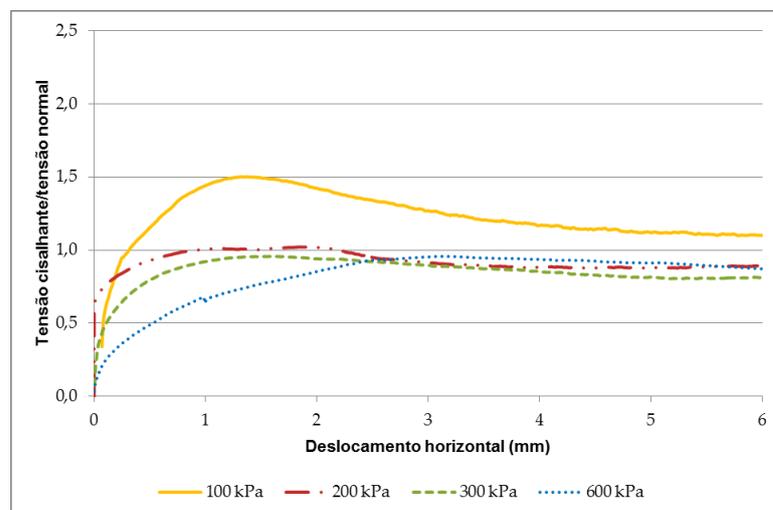


Figura 4.13 - (σ / σ_z) da amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para energia normal

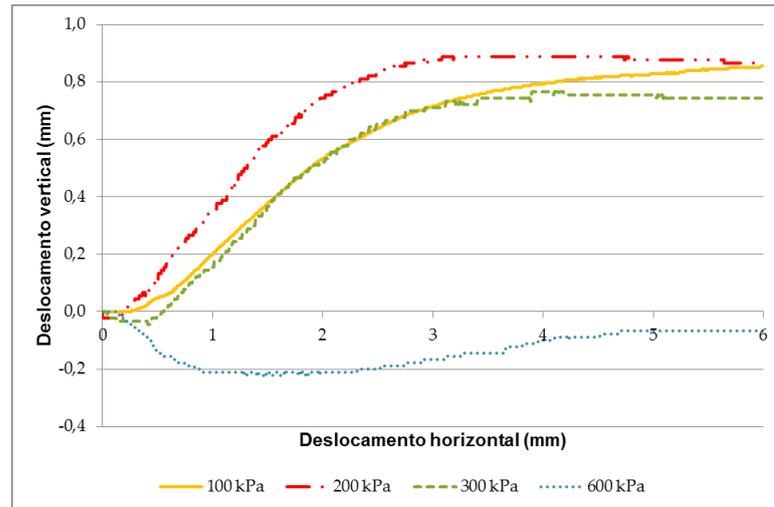


Figura 4.14- Variação de deslocamentos verticais e horizontais da amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para a energia normal

Conforme se observa na Figura 4.12, as curvas da tensão cisalhante, após atingirem o valor máximo, chamado de tensão de pico, tendem a um valor constante, chamado de resistência residual. Esse comportamento é bastante evidente ao se analisar as curvas para tensões normais de 100, 200 e 300 kPa. A curva referente a 600 kPa não apresentou, após o pico de resistência, um comportamento semelhante às demais curvas de tensões mais baixas. Entretanto, ainda sim, se pode notar a diminuição da resistência após atingir seu valor máximo.

Percebe-se que o deslocamento horizontal, correspondente à tensão de ruptura é de aproximadamente 1,5 mm, para as três tensões normais mais baixas. Ao se analisar o resultado referente à curva de 600 kPa, a amostra deslocou 3 mm antes de ocorrer a ruptura. Uma possível justificativa para o maior deslocamento horizontal antes da ruptura seja a quebra de grãos.

Os valores das tensões máximas de ruptura e tensões residuais, para as quatro tensões normais estudadas, são mostrados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Resistências máximas e residuais para amostra moldada e ensaiada na condição de umidade ótima - Energia normal

Tensão Normal (kPa)	Resistência máxima (kPa)	Resistência residual (kPa)
100	150,0	110,1
200	204,2	178,1
300	290,5	243,5
600	574,5	522,5

A Figura 4.13 mostra a tendência das curvas de convergirem ao mesmo ponto após ocorrer à ruptura da amostra, em torno de 1,0. Nota-se, portanto que, independentemente da tensão vertical σ atuante no material, o resíduo tende a uma mesma tensão residual após sua ruptura. Observa-se ainda que a curva referente à tensão de 100 kPa possui o pico mais pronunciado dentre as demais curvas, haja vista que foi a condição cuja amostra alcançou o maior valor de tensão cisalhante em comparação as tensões normais a que ela estava sujeita. Esse é um comportamento típico de areias compactas.

A Figura 4.14 apresenta a variação de deslocamento vertical dos corpos de prova quando sujeito as tensões normais aplicadas. Há a tendência das amostras inicialmente se contraírem para pequeno deslocamento horizontal, e após um dado momento começar a expandir, conforme se observa nas curvas referentes às tensões normais de 100, 200 e 300 kPa. Este comportamento é característico das areias compactas, sujeita a baixas tensões normais.

A variação de deslocamento vertical para as tensões de 100, 200 e 300 kPa se estabilizou na ordem de 0,8 mm.

Conforme Ortigão (2007), para o caso de areias compactas, à medida que se eleva as tensões atuantes, tende a ocorrer apenas à compressão do material, diferentemente do que ocorre quando sujeita a tensões mais baixas. É exatamente o que se observa na curva referente à tensão de 600 kPa, na Figura 4.14.

A Figura 4.15 exhibe as envoltórias de tensão de ruptura e tensão residual. Já a Tabela 4.10 apresenta os resultados extraídos destas curvas.

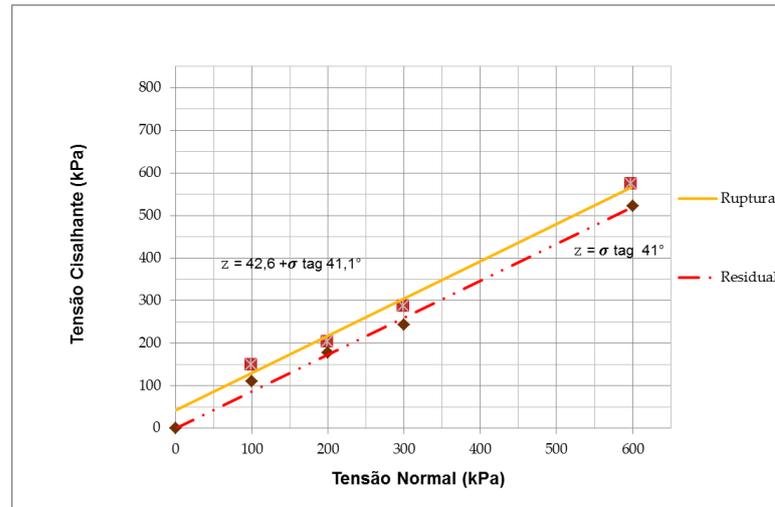


Figura 4.15 - Envoltórias de ruptura e residual na condição para amostra moldada e ensaiada na condição de umidade ótica – Energia normal

Tabela 4.10 - Resultados das envoltórias de ruptura e residual na condição para amostra moldada e ensaiada na condição de umidade ótica – Energia normal

Envoltória	Índices	Valor
Ruptura	Ângulo de atrito (°)	41,15
	Coesão (kPa)	42,6
	R ²	0,9942
Residual	Ângulo de atrito (°)	40,9
	Coesão (kPa)	0,0
	R ²	0,9945

De acordo com a Tabela 4.10 é possível observar o elevado ângulo de atrito de pico e residual obtido pelo resíduo. Esses resultados de ângulos de atrito são equivalentes aos ângulos de atrito de areias compactas com grãos angulares, segundo Das (2012). Os altos valores obtidos na coesão não indicam que a amostra per si tenha coesão entre as partículas. Esse valor representa apenas um ajuste gráfico da curva, chamado de intercepto de coesão.

As Figuras 4.16 a 4.19 e as Tabelas 4.11 e 4.12 apresentam os resultados obtidos para o resíduo moldado na condição de w_{ot} compactado na energia

intermediária. A Figura 4.16 exibe as tensões cisalhantes máximas atingidas por cada tensão normal atuante.

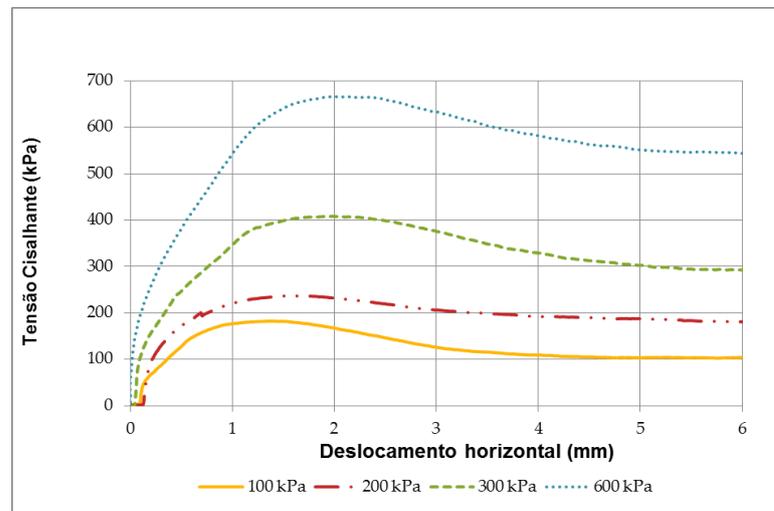


Figura 4.16 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para energia intermediária

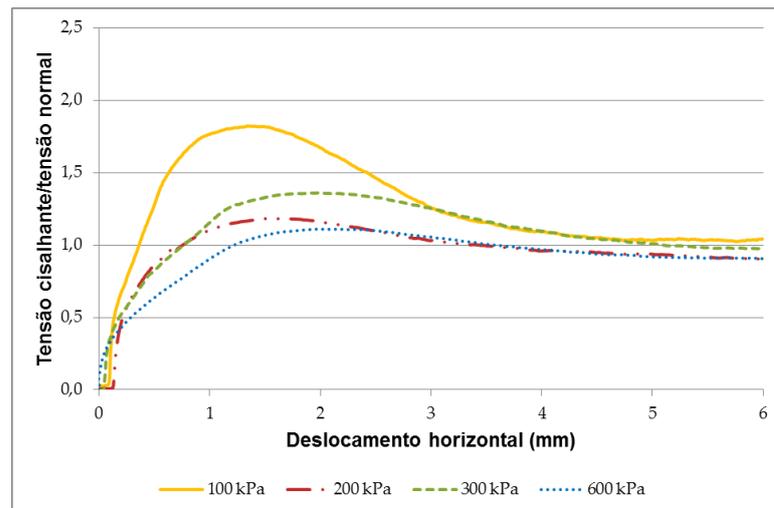


Figura 4.17 - (σ / Tensão z) da amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para energia Intermediária

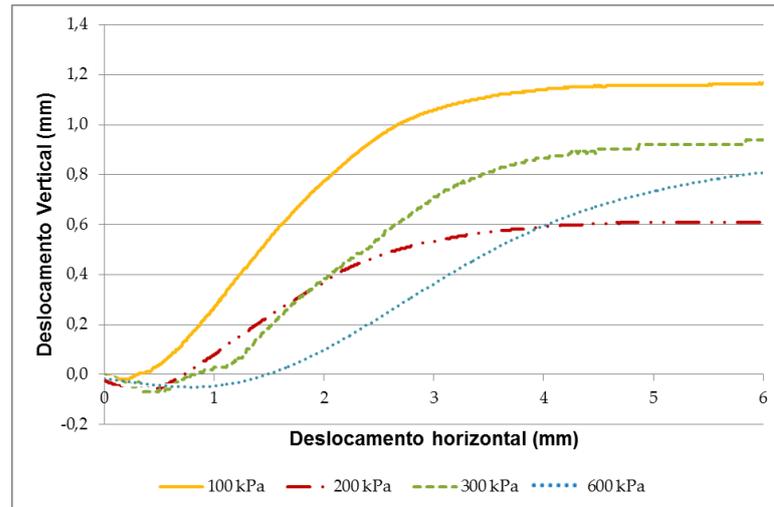


Figura 4.18 - Variação de deslocamentos verticais e horizontais da amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para a energia intermediária

O material, compactado na energia intermediária, conforme se observa na Figura 4.16, atingiu valores de resistência ao cisalhamento mais alto na energia intermediária do que moldado na energia normal, para cada tensão normal analisada. Esse comportamento era esperado, pois conforme Ortigão (2007), quanto mais compacto o material, maior o ângulo de atrito e conseqüentemente maior a resistência ao cisalhamento.

Percebe-se um que o deslocamento horizontal, para a tensão de ruptura, de aproximadamente 1,6 mm, para as tensões normais de 100 e 200 KPa. Ao se analisar o resultado referente à curva de 300 e 600 KPa, a amostra deslocou em torno de 2 mm antes de ocorrer a ruptura. Para o caso das tensões verticais mais elevadas, pode ter havido a quebra de grãos.

A amostra, conforme figura 4.16, apresentou os seguintes resultados de tensões máximas de ruptura e tensões residuais, para as quatro tensões normais estudadas, detalhados na Tabela 4.11:

Tabela 4.11 - Resistências máximas e residuais para amostra moldada e ensaiada na condição de umidade ótima - Energia intermediária

Tensão (kPa)	Resistência máxima (kPa)	Resistência residual (kPa)
100	182,3	104,0
200	236,7	180,5
300	408,1	291,8
600	666,2	543,7

A Figura 4.17, tal qual a Figura 4.13, mostra a tendência das curvas de convergirem ao mesmo ponto após ocorrer à ruptura da amostra (representado pelo pico), em torno de 1,0. Nota-se, portanto que, independentemente da tensão σ atuante no material, o resíduo tende a uma mesma tensão residual após sua ruptura. Observa-se ainda que a curva referente à tensão de 100 KPa possui o pico mais pronunciado dentre as demais curvas, haja vista que foi a condição cuja amostra alcançou o maior valor de tensão cisalhante em comparação as tensões normais a que ela estava sujeita. Esse é um comportamento típico de areias compactas.

Segundo se observa na Figura 4.18, as amostras inicialmente se contraem e após um período, começam a dilatar, o que é característica das areias compactas.

A curva da tensão normal de 600 KPa, diferentemente da energia normal, apresentou comportamento semelhante as demais, pois, como a energia de compactação se elevou, houve um deslocamento para cima da curva, acarretando uma dilatação após o trecho inicial de contração (imbricamento).

A Figura 4.19 exhibe as envoltórias de tensão de ruptura e tensão residual. Já a Tabela 4.11 apresenta os resultados extraídos destas curvas.

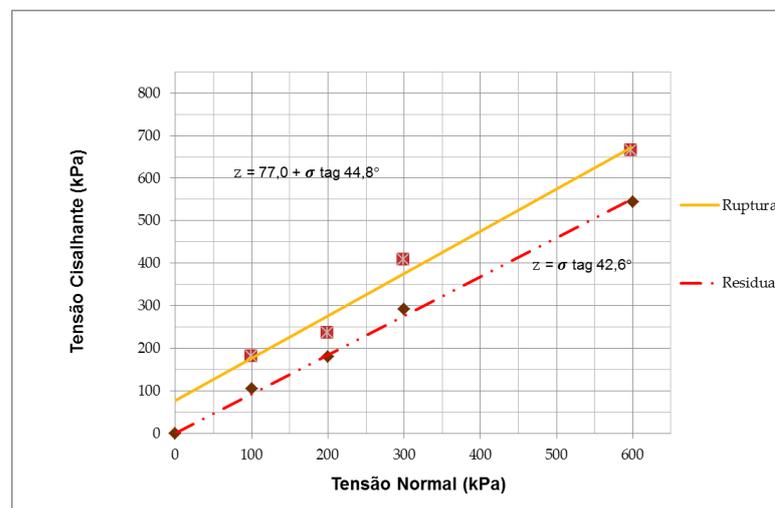


Figura 4.19 - Envoltórias de ruptura e residual na condição para amostra moldada e ensaiada na condição de umidade ótima – Energia intermediária

A amostra, conforme a figuras 4.19 apresentou os seguintes resultados, exposto na Tabela 4.12:

Tabela 4.12 - Resultados das envoltórias

Envoltória	Índices	Valor
Ruptura	Ângulo de atrito (°)	44,8
	Coesão (kPa)	77,0
	R ²	0,9871
Residual	Ângulo de atrito (°)	42,6
	Coesão (kPa)	0,0
	R ²	0,9973

Em comparação com a energia normal, a coesão (intercepto de coesão) aumentou consideravelmente. As Figuras 4.20 a 4.23 e as Tabelas 4.13 e 4.14 apresentam os resultados obtidos para o resíduo moldado na condição de w_{ot} compactado na energia modificada. A Figura 4.20 exhibe as tensões cisalhantes máximas atingidas por cada tensão normal atuante.

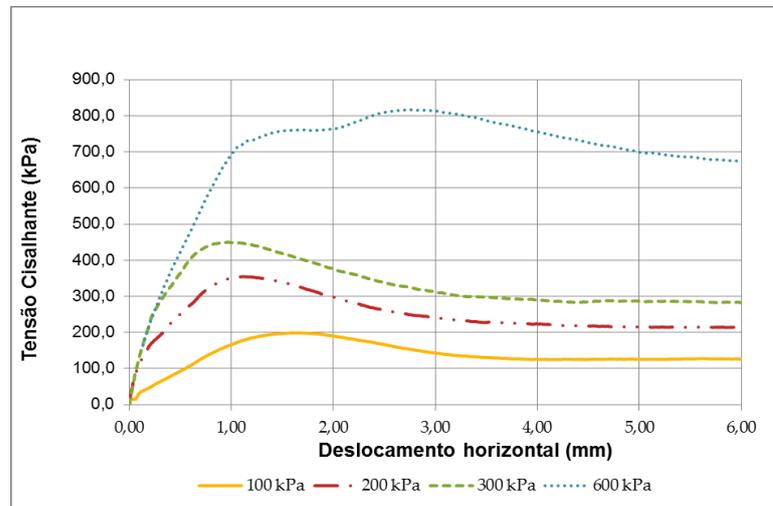


Figura 4.20 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para energia modificada

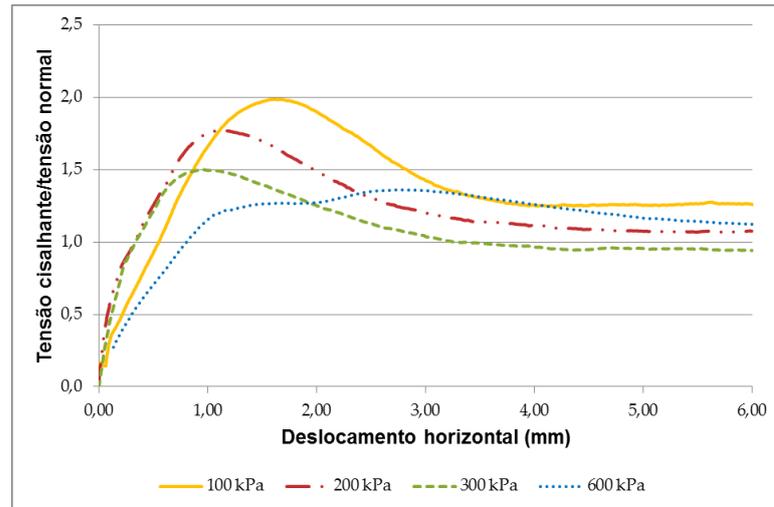


Figura 4.21 - (Tensão σ / Tensão z) da amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para energia Intermediária

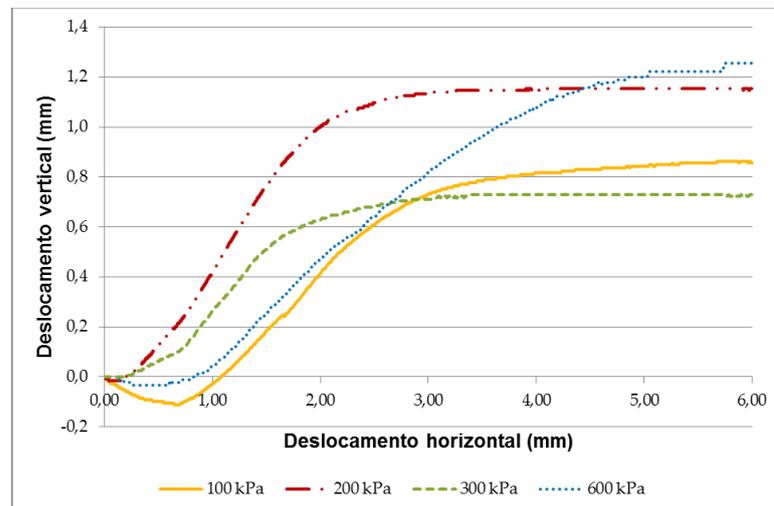


Figura 4.22 - Variação de deslocamentos verticais e horizontais da amostra ensaiada no teor de umidade ótimo para a energia modificada

Percebe-se, através da Figura 4.20, que a curva referente à tensão de 600 kPa não apresentou um pico evidente quanto as demais curvas de tensões confinantes inferiores. Esse comportamento é esperado para areias compactas sujeitas a altas tensões, pois à medida que se aumenta a tensão normal atuante, o pico de tensão cisalhante máximo fica menos evidente.

Tais quais as curvas obtidas para energia intermediária terem valores superiores as da energia normal, as curvas obtidas para a energia modificada tem valores superiores aos obtidos na energia intermediária para as tensões verticais estudadas.

Em relação às tensões de 100, 200 e 300 kPa, os deslocamentos horizontais até a ruptura foram inferiores as curvas das demais energias de compactação já avaliadas, com valores entre 0,9 mm para tensão de 300 kPa e 1,5 mm para a tensão de 100 kPa. A curva de 600 kPa, assim como nas demais energias, apresentou deslocamento horizontal até a ruptura superior às demais curvas analisadas.

A amostra, conforme figura 4.20, apresentou os seguintes resultados para tensões máximas de ruptura e tensões residuais, para as quatro tensões normais estudadas, segundo revela a tabela 4.13:

Tabela 4.13 - Resistências máximas e residuais para amostra moldada e ensaiada na condição de umidade ótima - Energia modificada

Tensão (kPa)	Resistência máxima (kPa)	Resistência residual (kPa)
100	198,7	125,8
200	354,3	251,0
300	449,9	282,4
600	816,5	673,7

Conforme a figura 4.21 nota-se, tais quais os resultados das demais energias de compactação estudadas, que a curva referente a 100 KPa, como era de se esperar, apresentou pico mais evidente que as demais. Importante, ainda, é observar a convergência das curvas para um valor residual em torno de 1,0.

Por meio da Figura 4.22 observa-se, para as curvas de deslocamento vertical x deslocamento horizontal, todas as tensões normais estudadas, um comportamento semelhante. Inicialmente ocorre uma contração do volume do material, devido ao efeito do imbricamento. Em seguida começa a dilatar. Esse comportamento é semelhante ao ocorrido em areias compactas sujeitas a baixas tensões cisalhantes. Semelhante ao ocorrido quando a amostra foi compactada na energia intermediária, a curva de 600 KPa apresentou uma leve contração seguida de uma acentuada dilatação em razão da elevada energia de compactação a qual o material foi submetido.

A Figura 4.23 exhibe as envoltórias de tensão de ruptura e tensão residual. Já a Tabela 4.14 apresenta os resultados extraídos destas curvas.

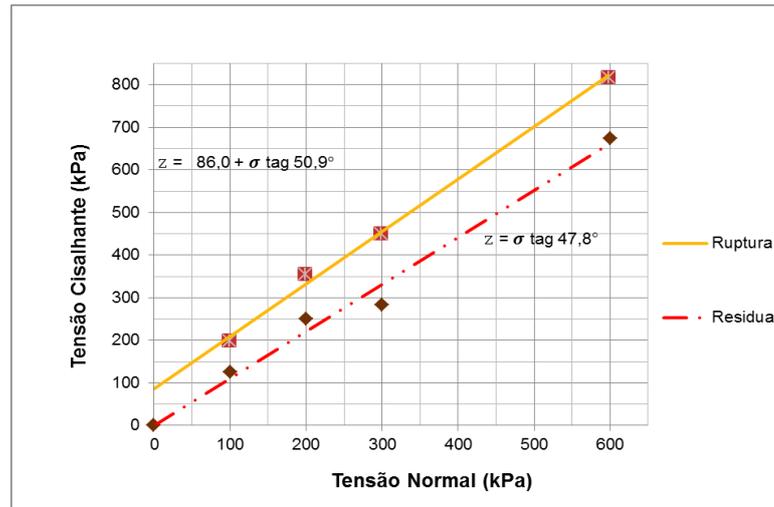


Figura 4.23 - Envoltórias de ruptura e residual na condição para amostra moldada e ensaiada na condição de umidade ótima – Energia modificada

A amostra, conforme a Figuras 4.23 apresentou os seguintes resultados, exposto na tabela 4.14:

Tabela 4.14 - Resultados das envoltórias

Envoltória	Índices	Valor
Ruptura	Ângulo de atrito (°)	50,9
	Coesão (kPa)	86,0
	R ²	0,9978
Residual	Ângulo de atrito (°)	47,8
	Coesão (kPa)	0,0
	R ²	0,9858

O valor da coesão aumentou para o ordem de 86 kPa, atingindo mais que o dobro da coesão obtida para o ensaio realizado na energia normal de compactação.

As figuras 4.25 a 4.28 mostram a comparação dos picos das tensões cisalhantes de ruptura e os deslocamentos horizontais até a ruptura para cada tensão normal atuante, nas três energias estudadas.

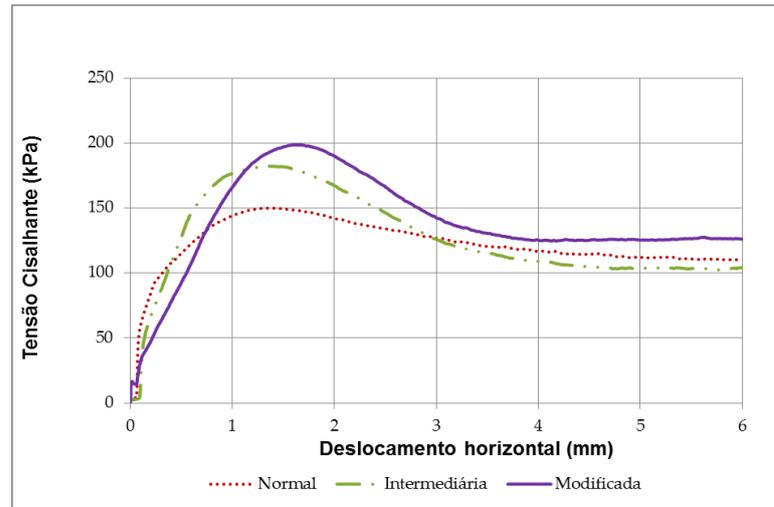


Figura 4.24 - Efeito da energia de compactação sobre as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para o ensaio com $\sigma_n = 100$ kPa, na w_{ot}

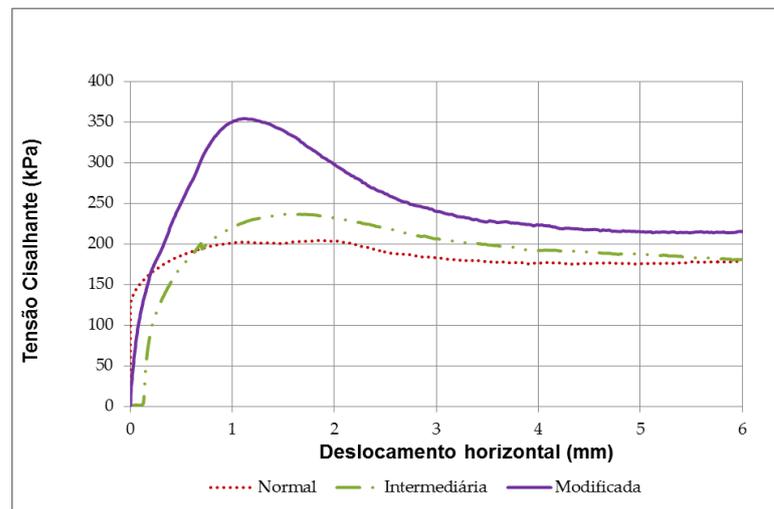


Figura 4.25 - Efeito da energia de compactação sobre as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para o ensaio com $\sigma_n = 200$ kPa, na w_{ot}

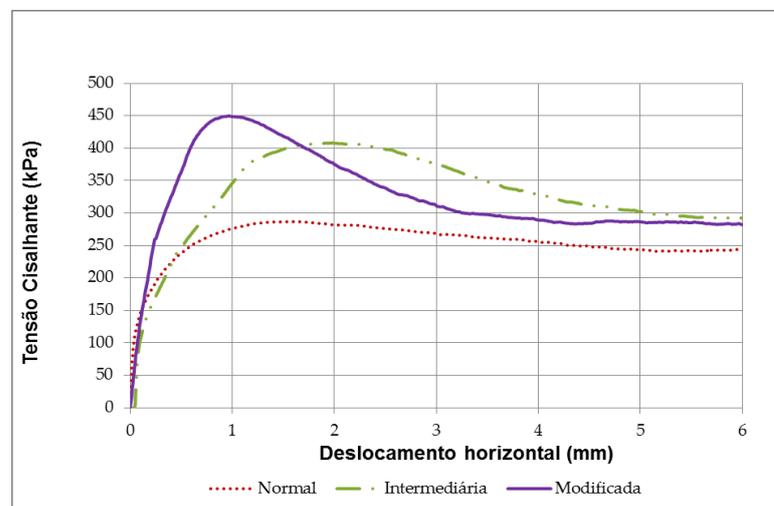


Figura 4.26 - Efeito da energia de compactação sobre as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para o ensaio com $\sigma_n = 300$ kPa, na w_{ot}

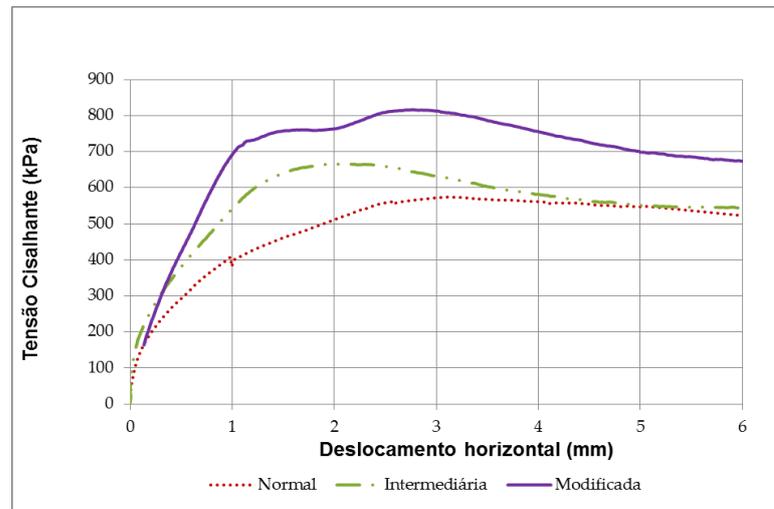


Figura 4.27 - Efeito da energia de compactação sobre as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para o ensaio com $\sigma_n = 600$ kPa, na w_{ot}

Conforme se observa nas Figuras 4.24 a 2.27, independentemente da energia de compactação aplicada para cada tensão normal atuante, o valor residual de resistência ao cisalhamento tende ao mesmo valor. Ainda, é possível extrair das Figuras que, à medida que se aumentam as tensões normais e a energia de compactação aplicada, aumentam-se as tensões máximas de cisalhamento.

4.5.2 Amostras moldadas no teor de umidade ótimo e ensaiadas na condição inundada

As Figuras 4.28 a 4.31 e as Tabelas 4.15 e 4.16 apresentam os resultados obtidos na condição inundada na energia normal. A Figura 4.31 apresenta as tensões cisalhantes máximas obtidas pela amostra sujeita as tensões normais atuantes.

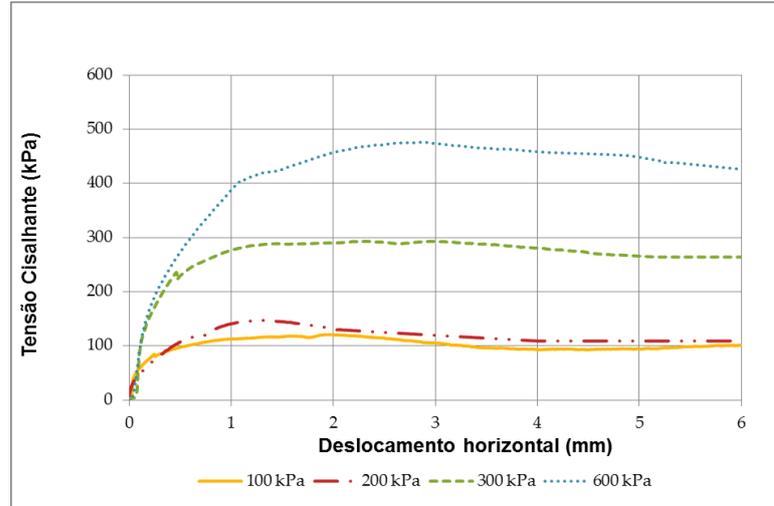


Figura 4.28 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para amostra moldada no w_{ot} e ensaiada na condição inundada na energia normal

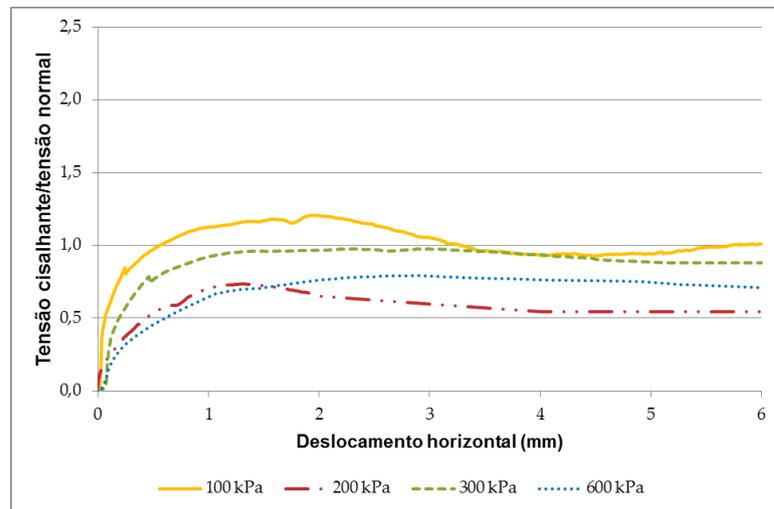


Figura 4.29 - (Tensão σ / Tensão z) da amostra ensaiada no w_{ot} na condição inundada para energia normal

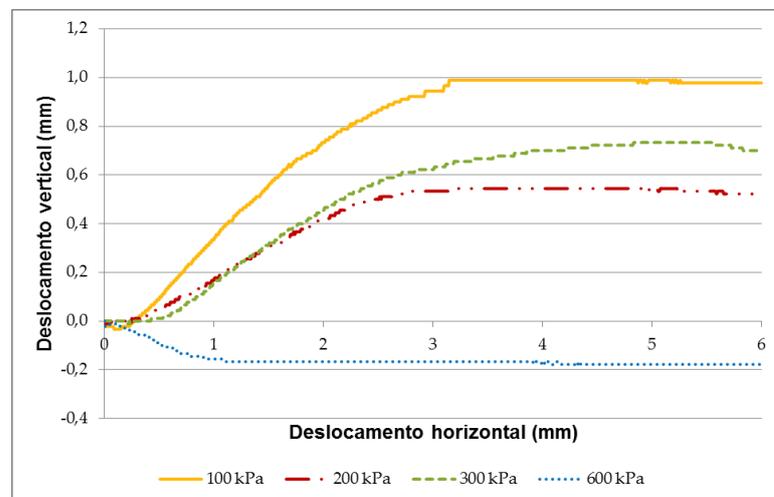


Figura 4.30 - Variação de deslocamentos verticais e horizontais da amostra ensaiada no w_{ot} na condição inundada para a energia normal

É possível perceber, segundo a Figura 4.31, que as curvas apresentaram tensões de picos um pouco inferiores (ou praticamente iguais, como no caso da tensão normal de 300 kPa) que as tensões obtidas na condição de w_{ot} . O resultado é esperado, pois, apesar de na condição inundada ocorre à lubrificação das partículas, ocasionando uma melhor disposição das partículas, a saturação leva a perda da poro-pressão negativa, chamada de sucção, que proporciona uma pequena diminuição na resistência.

Assim como nas amostras moldadas no w_{ot} na energia normal, a curva referente a 600 kPa apresentou o maior deslocamento horizontal até a ruptura, na ordem de 2,9 mm.

A amostra, conforme Figura 4.31, apresentou os seguintes resultados de tensões máximas de ruptura e tensões residuais, para as quatro tensões verticais estudadas, que são mostrados na Tabela 4.15:

Tabela 4.15 - Resistências máximas e residuais para amostra moldada no w_{ot} e ensaiada na condição inundada - Energia normal

Tensão (kPa)	Resistência máxima (kPa)	Resistência residual (kPa)
100	120,8	100,0
200	147,3	109,0
300	293,2	264,0
600	476,3	426,1

Tais quais os resultados obtidos na condição de umidade ótima, a Figura 4.29 revela o comportamento semelhante, no que tange a convergência das curvas de tensão para o ponto de resistência residual, o pico mais evidente é o da curva de menor tensão normal estudada.

Semelhante ao ocorrido no ensaio de cisalhamento, na condição de w_{ot} para a energia Proctor normal e tensão de 600 kPa, a curva, presente na Figura 4.30, referente a variação de deslocamento vertical x deslocamento horizontal na condição inundada para tensão normal de 600 kPa não obteve expansão, ocorrendo apenas contração da altura do corpo de prova.

A Figura 4.31 exhibe as envoltórias de tensão de ruptura e tensão residual. Já a Tabela 4.15 apresenta os resultados extraídos destas curvas.

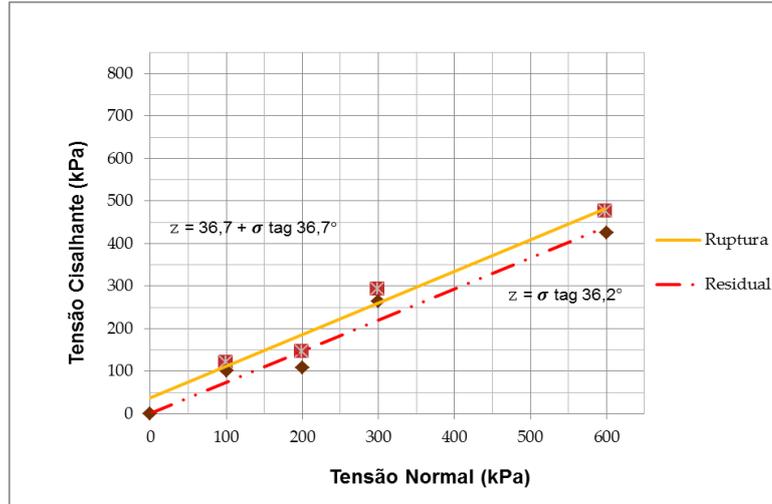


Figura 4.31 - Envoltórias de ruptura e residual da amostra ensaiada no w_{ot} na condição inundada – Energia normal

A amostra, conforme a Figuras 4.31 apresentou os seguintes resultados, exposto na Tabela 4.16:

Tabela 4.16 - Resultados das envoltórias

Envoltória	Índices	Valor
Ruptura	Ângulo de atrito (°)	36,7
	Coesão (KPa)	36,6
	R ²	0,9773
Residual	Ângulo de atrito (°)	36,2
	Coesão (kPa)	0,0
	R ²	0,9618

Conforme se observa na Tabela 4.16, em comparação ao ensaio com a amostra moldada e ensaiada no teor de umidade ótima, na energia normal de compactação, a coesão encontrada é inferior 6 kPa.

As Figuras 4.36 a 4.39 e as Tabelas 4.16 e 4.17 apresentam os resultados obtidos na condição inundada na energia intermediária.

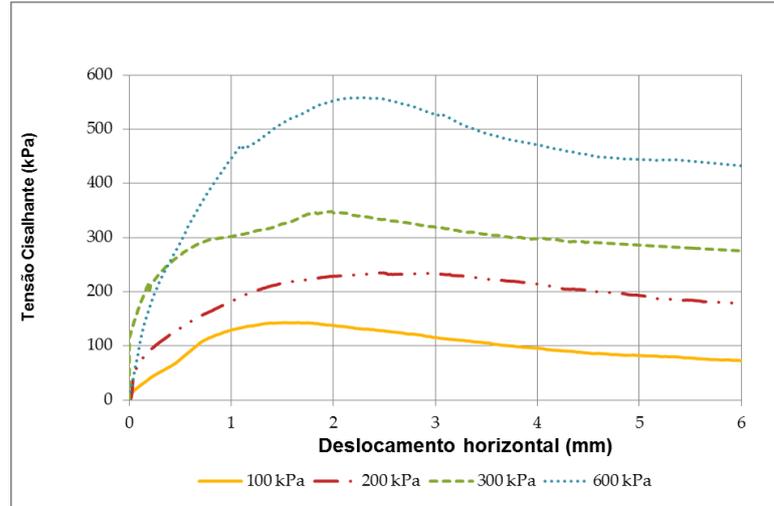


Figura 4.32 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para amostra moldada no w_{ot} e ensaiada na condição inundada na energia intermediária

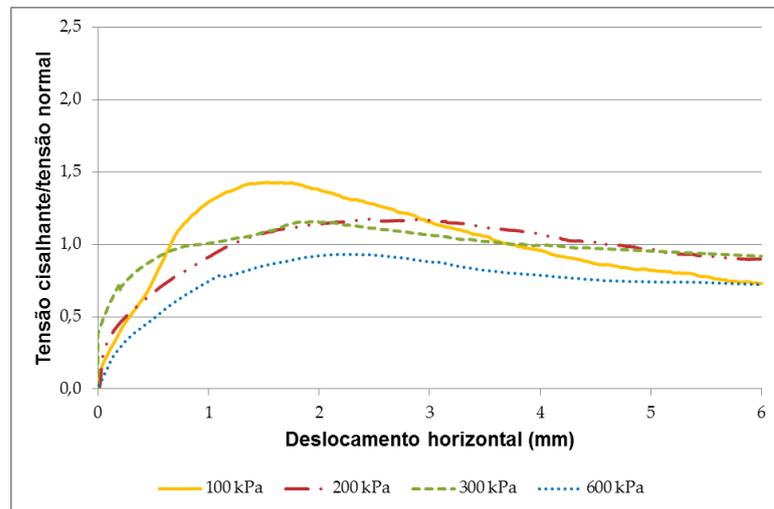


Figura 4.33 - (σ / z) da amostra ensaiada no w_{ot} na condição inundada para energia intermediária

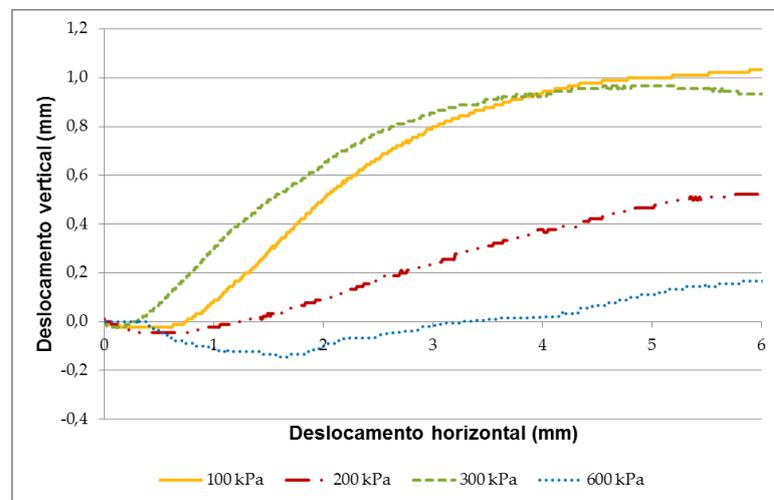


Figura 4.34-Variações de deslocamentos verticais e horizontais da amostra ensaiada no w_{ot} na condição inundada para a energia intermediária

Através da Figura 4.32 observam-se os picos de tensões atingidos pelas curvas referentes às diversas tensões normais atuantes. Verifica-se que os valores são inferiores aos obtidos para o resíduo na condição de w_{ot} compactado na energia intermediária. Ainda, os valores são superiores aos alcançados na condição inundada compactados na energia normal.

O maior deslocamento horizontal até a ruptura, assim como os demais ensaios apresentados, é obtido na curva de 600 kPa, com valor aproximado de 2,4 mm.

A amostra, conforme Figura 4.32, apresentou os seguintes resultados de tensões máximas de ruptura e tensões residuais, para as quatro tensões verticais estudadas, como se observa na Tabela 4.17:

Tabela 4.17 - Resistências máximas e residuais para amostra moldada no w_{ot} e ensaiada na condição inundada - Energia intermediária

Tensão (kPa)	Resistência máxima (kPa)	Resistência residual (kPa)
100	142,8	73,0
200	234,8	178,5
300	347,9	275,4
600	558,5	432,4

Assim como os resultados já apresentados para as demais energias, a Figura 4.33 mostra a convergência das curvas a uma tensão residual, sendo o pico de maior valor, próximo a 1,5, para a curva de tensão normal de 100 kPa.

Segundo se observa na Figura 4.34, as amostras inicialmente contraíram-se, e após um período ocorreu uma expansão, que é característica das areias compactas.

A Figura 4.35 exhibe as envoltórias de tensão de ruptura e tensão residual. Já a Tabela 4.18 apresenta os resultados extraídos destas curvas.

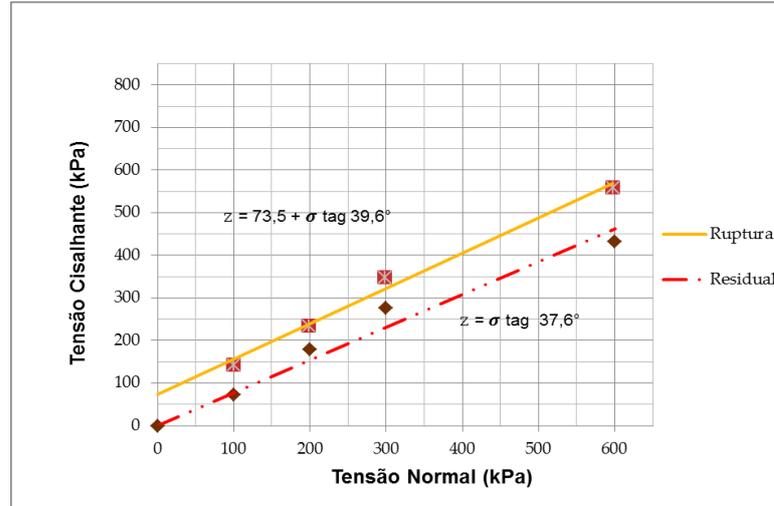


Figura 4.35 - Envoltórias de ruptura e residual da amostra ensaiada no w_{ot} na condição inundada – Energia intermediária

A amostra, conforme a Figura 4.35, apresentou os seguintes resultados, exposto na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 - Resultados das envoltórias

Envoltória	Índices	Valor
Ruptura	Ângulo de atrito (°)	39,6
	Coesão (kPa)	73,5
	R ²	0,9931
Residual	Ângulo de atrito (°)	37,6
	Coesão (kPa)	0,0
	R ²	0,9702

A coesão encontrada, conforme Tabela 4.18, foi bem próxima do valor encontrado para a mesma energia de compactação, para a amostra moldada e ensaiada no teor de umidade ótima, mais ainda inferior.

As Figuras 4.36 a 4.39 e as Tabelas 4.18 e 4.19 apresentam os resultados obtidos na condição inundada para o resíduo compactado na energia modificada.

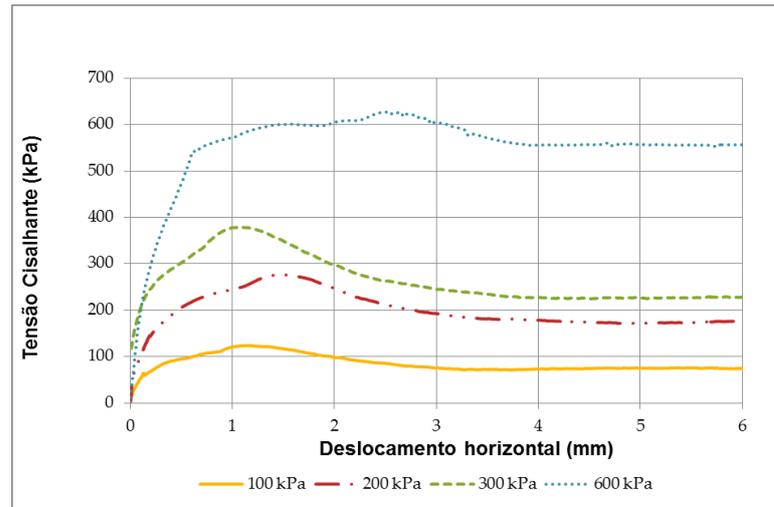


Figura 4.36 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para amostra moldada no w_{ot} e ensaiada na condição inundada na energia modificada

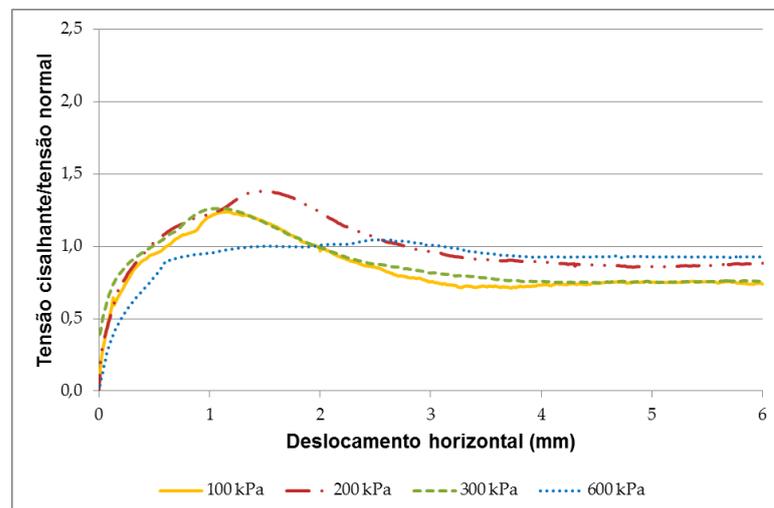


Figura 4.37 - (Tensão σ / Tensão z) para energia modificada inundada

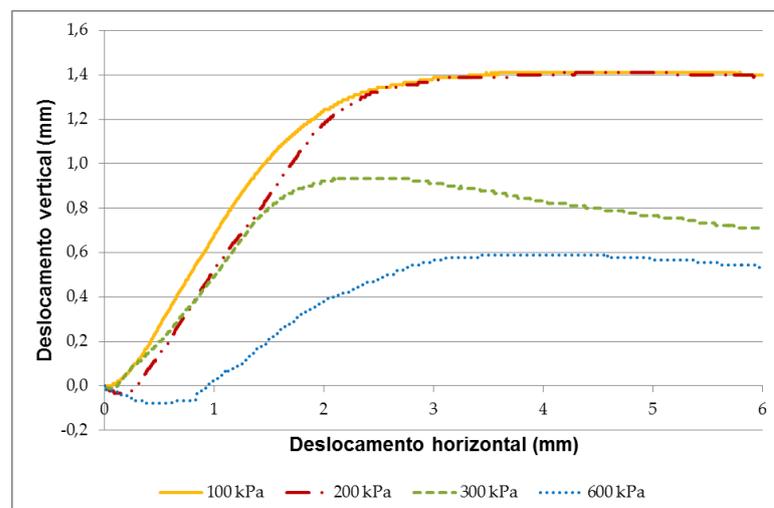


Figura 4.38 - Variação de deslocamentos verticais e horizontais da amostra ensaiada no w_{ot} na condição inundada para a energia modificada

Através da figura 4.36 observam-se os picos de tensões atingidos pelas curvas referentes às diversas tensões normais atuantes. Verifica-se que os valores são inferiores aos obtidos para o resíduo na condição de w_{ot} compactado na energia modificada. Ainda, os valores são superiores aos alcançados na condição inundada compactados na energia intermediária.

A amostra, conforme Figura 4.36, apresentou os seguintes resultados de tensões máximas de ruptura e tensões residuais, para as quatro tensões verticais estudadas, observando-se a tabela 4.19:

Tabela 4.19 - Resistências máximas e residuais- Energia intermediária na condição inundada

Tensão (kPa)	Resistência máxima (kPa)	Resistência residual (kPa)
100	124,0	74,0
200	276,0	176,5
300	378,4	228,1
600	627,1	556,2

Diferentemente dos demais resultados apresentados, a Figura 4.37 não exibiu a curva de 100 kPa com o pico mais alto. Isso possivelmente se deveu a baixa tensão cisalhante atingida pela tensão normal (124 kPa) em frente as demais, como para a tensão de 200 kPa que obteve mais que o dobro da tensão cisalhante obtida pela curva de 100 kPa. Provavelmente pode ter havido alguma deficiência no ensaio realizado para a tensão vertical de 100 kPa, na condição inundada.

Segundo se observa na Figura 4.38, as amostras se contraíram, e após um dado período começaram a dilatar, comportamento já observado nos ensaios anteriormente realizados.

Conforme se verificou nos ensaios na condição de w_{ot} , a exceção do ensaio de cisalhamento para a energia normal, a curva de tensão 600 kPa apresentou comportamento semelhante as demais.

A Figura 4.39 exhibe as envoltórias de tensão de ruptura e tensão residual. Já a Tabela 4.20 apresenta os resultados extraídos destas curvas.

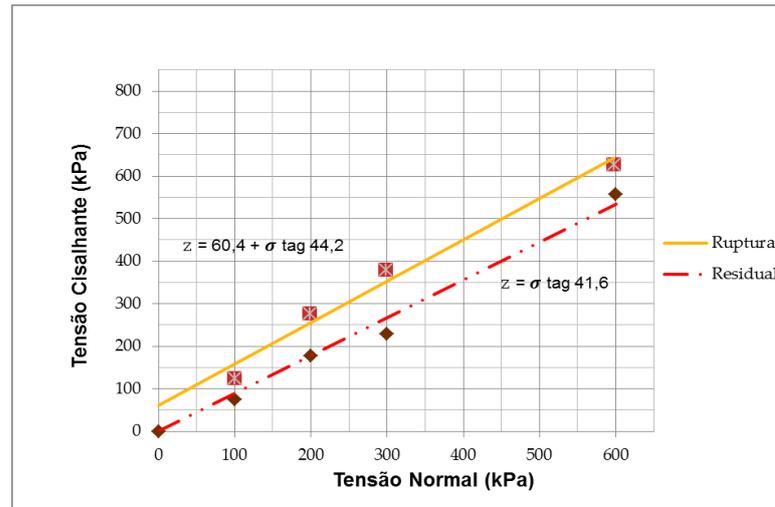


Figura 4.39 - Envoltórias de ruptura e residual da amostra ensaiada no w_{ot} na condição inundada – Energia modificada

A amostra, conforme as Figuras 4.38, apresentou os seguintes resultados, exposto na tabela 4.20:

Tabela 4.20 - Resultados das envoltórias

Envoltória	Índices	Valor
Ruptura	Ângulo de atrito (°)	44,2
	Coesão (kPa)	60,4
	R ²	0,9874
Residual	Ângulo de atrito (°)	41,6
	Coesão (kPa)	0,0
	R ²	0,9879

Conforme a Tabela 4.20, percebe-se que à medida que se aumentou a energia de compactação, maior a coesão encontrada. Entretanto, os valores de coesão para as amostras moldadas e ensaiadas no teor de umidade ótimo foram superiores aos valores encontrados para as amostras ensaiadas na condição inundada.

As Figuras 4.40 a 4.43 mostram a comparação dos picos das tensões cisalhantes de ruptura para cada tensão normal atuante, nas três energias estudadas.

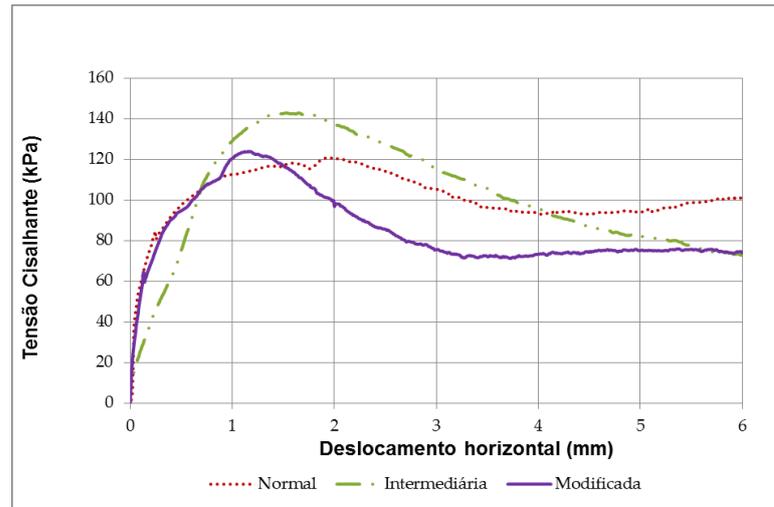


Figura 4.40 - Efeito da energia de compactação sobre as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para o ensaio com $\sigma_n = 100$ kPa, w_{ot} na condição inundada

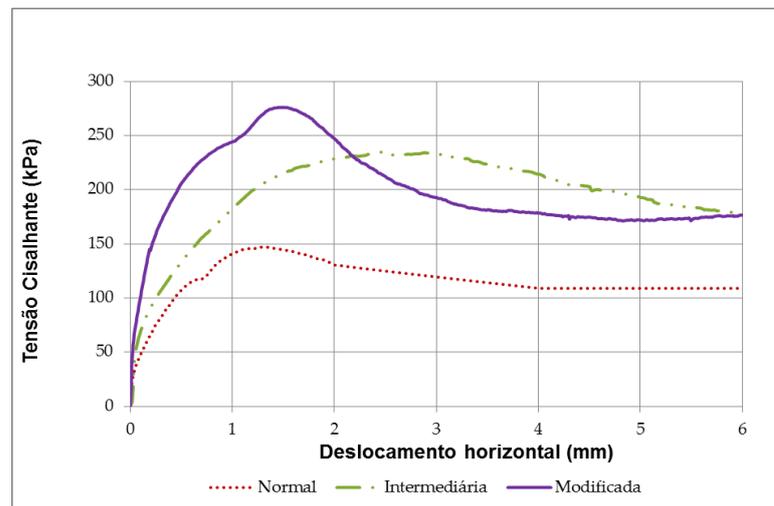


Figura 4.41 - Efeito da energia de compactação sobre as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para o ensaio com $\sigma_n = 200$ kPa, w_{ot} na condição inundada

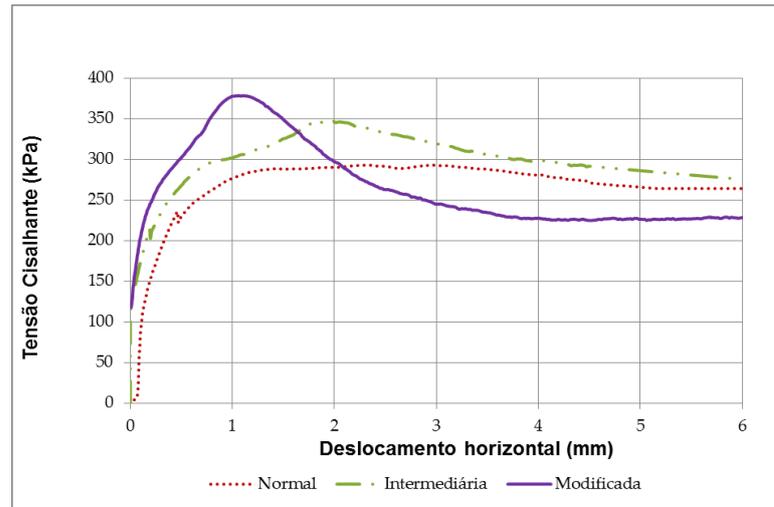


Figura 4.42 - Efeito da energia de compactação sobre as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para o ensaio com $\sigma_n = 300$ kPa, w_{ot} na condição inundada

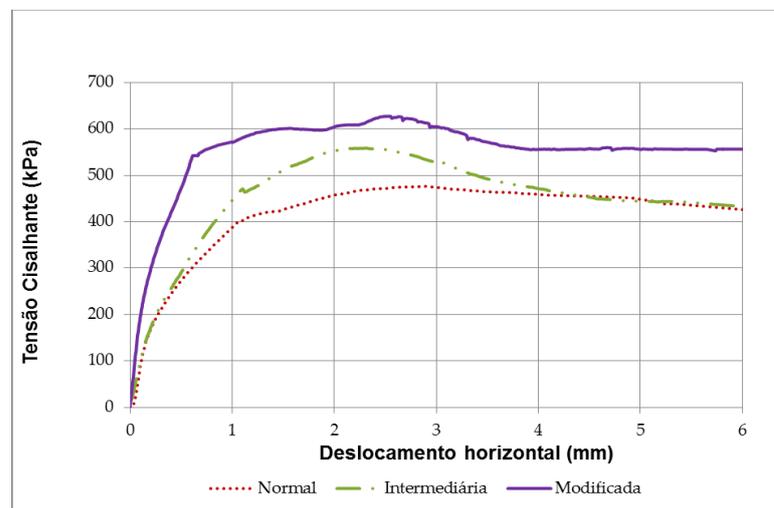


Figura 4.43 - Efeito da energia de compactação sobre as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal para o ensaio com $\sigma_n = 600$ kPa, w_{ot} na condição inundada

Por meio da Figura 4.40, percebe-se que os valores da tensão cisalhante obtidos para tensão de 100 kPa, na condição inundada, são muito próximos, de forma que a energia de compactação aplicada não influenciou na resistência ao cisalhamento obtida para este nível de tensões.

A amostra moldada nas energias normal, intermediária e modificada, tanto nas condições inundadas quanto na w_{ot} , apresentou ângulos de atrito bastante elevados, se comparado aos demais solos arenosos, atingindo valores na ordem de 50° para energia modificada.

A Tabela 4.21 compila os resultados encontrados nos ensaios de cisalhamento direto, no que tange aos ângulos de atrito de pico e residual, bem como as respectivas coesões.

Tabela 4.21- Resumo de resultados

Energia/Condição de moldagem	Envoltória de ruptura		Envoltória residual	
	Ângulo de atrito-pico (°)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito-residual (°)	Coesão (kPa)
Normal/ umidade ótima	41,15	42,6	40,9	0,0
Normal/ inundada	36,70	36,6	36,2	0,0
Intermediária/ umidade ótima	44,8	77,0	42,60	0,0
Intermediária/inundada	39,60	73,5	37,60	0,0
Modificada/ umidade ótima	50,9	86,0	47,8	0,0
Modificada/ inundada	44,20	60,4	41,6	0,0

Conforme se observa na Tabela 4.21, tanto o ângulo de atrito quanto a coesão (intercepto de coesão) são superiores para as amostras moldadas e ensaiadas no teor de umidade ótimo e à medida que se aumenta a energia de compactação aplicada.

Pode-se notar que, independente da condição do ensaio, mesmo na situação mais desfavorável que é a inundada, os valores de ângulo de atrito permanecem bastantes elevados, assim como a coesão.

Percebe-se ainda que a variação do ângulo de atrito entre duas condições de ensaios para uma mesma energia se deu por volta de 5 a 6° de diferença.

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 o ensaio de FRX, os óxidos SiO_2 (31%), CaO (29%) e Al_2O_3 (13,1%) se apresentam como principais componentes do resíduo, correspondendo a 73% do total dos compostos apresentados. O ensaio de DRX indica como principais minerais a Calcita, Quartzo, Micas (Muscovita e Flogopita), Silicatos do grupo de Granada (Grossulária) e Silicatos do grupo dos Piroxénios (Diopissídio e Enstatita), esses últimos de ocorrência comum em sedimentos metamorfozados ricos em Cálcio.
- O resíduo apresentou massa específica dos sólidos de $2,84 \text{ g/cm}^3$.
- Conforme o SUCS, o resíduo pode ser classificado como areia mal-graduada. Já o HRB classifica o material como A-3 (areia fina), não plástica, de uso para subleitos como de excelente a bom, com $\text{IG} = 0$.
- O material apresentou granulometria fora das faixas granulométricas exigidas pelos DNIT para utilização como camada de base;
- Segundo os ensaios de compactação, o resíduo apresentou w_{ot} e massa específica seca média de 13,7% e $1,93 \text{ g/cm}^3$, 12,25% e $1,99 \text{ g/cm}^3$, 10,17% e $2,10 \text{ g/cm}^3$ para as energias normal, intermediária e modificada, respectivamente.
- O material estudado, conforme ensaios de Índice de Suporte Califórnia, CBR e expansão de 12,4% e 0,0%, 17,65% e 0,0%, 42% e 0,0%, para as energias normal, intermediária e modificada, respectivamente.
- O resíduo estudado, compactado na energia modificada, apresentou CBR superior ao valor exigido pela norma do DNIT para ser utilizado como camadas de sub-base, reforço de subleito e subleito de pavimentos;
- O resíduo estudado, compactado na energia normal e intermediária, apresentou CBR superior ao valor exigido pela norma do DNIT, para ser utilizado como camadas de reforço de subleito e subleito de pavimentos;

➤ O resíduo apresentou ângulos de atrito bastante elevados, além de altos valores de resistência ao cisalhamento tanto a amostra moldada e ensaiada no w_{ot} quanto moldada no w_{ot} e ensaiada na condição inundada, podendo, dessa forma, ser utilizado como camadas de aterros rodoviários.

Em estudos futuros, recomenda-se que:

- Sejam realizados ensaios tri-axiais para melhor compreender o comportamento da amostra perante as tensões cisalhantes atuantes;
- 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, por exemplo, possa ser utilizado com 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;
- Realizar mistura do resíduo com solos, a fim de adequar a mistura às faixas granulométricas exigidas pelo DNIT.
- Avaliar a aplicação do uso do resíduo em camadas de revestimento como agregado a misturas asfálticas;

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 180/1984**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. [S.l.], 1984.

_____. **NBR 6459/1984**: Solo – Determinação do limite de liquidez. [S.l.], 1984.

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

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

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

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

ASTM. **D3080M** - Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, 2008.

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

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 4. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.

BITAR, O. Y. **Avaliação da recuperação de áreas degradadas por mineração na região metropolitana de São Paulo**. 1997. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas) – Universidade de São Paulo.

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.

DANA, J. D. **Manual de mineralogia**. Rio de Janeiro: LTC, 1978.

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

DEPARTAMENTO 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.

DUBOIS, V.; et al. The use of marine sediments as a pavement base material. **Waste Management**, v. 29, p. 774 – 782, 2008.

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**, v. p 31 – 37, 2010.

FARIAS, C. E.G. **Mineração e meio ambiente do Brasil**. Relatório preparado para a CGEE, 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.

GERSCOVICH, D. M. S. **Resistência ao cisalhamento**. Disponível em:< <http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/resistenciacisalhamento.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

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: 01 jun. 2013.

IMTEAZ, M. A.; et al. 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.

LEITE, J.Y.P.: et al. **Análises das plantas de concentração de scheelita no estado do RN.** II Jornada Nacional da Produção Científica em Educação Profissional e Tecnológica. São Luís, 2007.

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

MARTINS, T. A.; SANTOS, A. A. **Caracterização física, química e mecânica de resíduo de beneficiamento de feldspato e quartzo, visando aplicação em pavimentos.** In: Curso de Engenharia Civil da UNESC, 2012.

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

MINA BREJUI. 2014. Disponível em:< <https://maps.google.com.br/>>. Acesso em: 20 out.2013.

MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO S.A. **História.** Disponível em:< <http://minabreju.com.br/site/historia/> >. Acesso em: 23 jul. 2013.

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.

ORTIGÃO, J.A.R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos.** 3.ed. Terratek, 2007.

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.

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

SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. N. **Beneficiamentos gravimétricos:** Uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade. Porto Alegre: Ed da UFRGS, 2005.

SANTOS, Cassiano Rossi et al. **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--].

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

SOUZA, Maria Laura. **Pavimentação rodoviária.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos ed., 1980.