

Universidade Federal do Pará

POTENCIAL PARA A UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE
BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE COBRE SULFETADO
EM PAVIMENTAÇÃO

João Guilherme Mota de Sousa

2017



POTENCIAL PARA A UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE COBRE SULFETADO EM PAVIMENTAÇÃO

João Guilherme Mota de Sousa

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza.

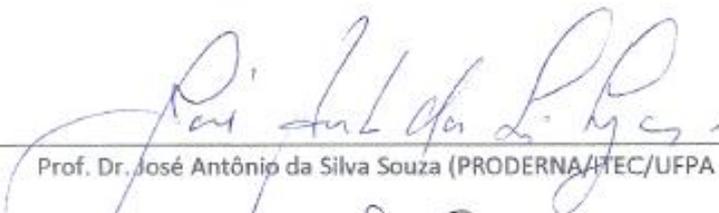
Belém
Novembro de 2017

**POTENCIAL PARA A UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE
BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE COBRE SULFETADO EM
PAVIMENTAÇÃO**

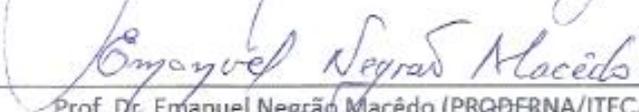
JOÃO GUILHERME MOTA DE SOUSA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA - PRODERNA/ITEC/UFPA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

Aprovada por:



Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza (PRODERNA/ITEC/UFPA – ORIENTADOR)



Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo (PRODERNA/ITEC/UFPA – EXAMINADOR)



Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo (PPGEC/ITEC/UFPA – EXAMINADOR)



Prof. Dr. Edilson Marques Magalhães (PPGEP/ITEC/UFPA – EXAMINADOR)



Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço (PPGEC/ITEC/UFPA – EXAMINADOR)

Belém, PA - Brasil
Novembro de 2017

ANEXO IV

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sousa, João Guilherme Mota de, 1958-

Potencial para a utilização do resíduo de beneficiamento de minério de cobre sulfetado em pavimentação /João Guilherme Mota de Sousa.- 2017.

Orientador: José Antonio da Silva Sousa

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Belém, 2017

1. Beneficiamento de minério 2. Minérios de cobre
3. Pavimentos 4. Resíduos industriais- Aspectos ambientais I. Título

CDD 22.ed.622.7

À

Decíola, esposa

Ivana, filha.

AGRADECIMENTOS

A Força Maior do Universo.

Aos meu pais, meus orientadores nesta vida e meus primeiros professores.

Ao professor orientador José Antônio da Silva Souza por ter me aceito como aluno.

Aos professores que aceitaram compor a banca examinadora: Prof. Dr. Emanuel Negrão Macedo, Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macedo, Prof. Dr. Marcelo de Souza Picancio, Prof. Dr. Edilson Marques Magalhães, Prof^a. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso e Prof^a. Dra. Laura Maria Gorette da Motta.

Ao professor Ricardo Bentes Kato pelas sugestões, parceria no laboratório - LEMA e artigos.

Ao professor José Augusto Nunes Fernandes pela leitura e contribuição.

Aos professores, funcionários e alunos dos laboratórios: Geotecnia e Pavimento - COPPE/UFRJ, Mecânica dos Pavimentos - DET/UFC, Engenharia Química / UFPA, Eco-compósitos, Engenharia Mecânica /UFPA, Geotecnia – FEC/UFPA.

Às empresas que permitiram a coleta do resíduo e solo.

A professora Terezinha Campos Corrêa (*in memoriam*).

Ao professor Silvio Samuel M. Aflalo (*in memoriam*).

Aos professores e técnicos da Universidade Federal do Pará.

A todos que acreditam em mim.

*“Aconteça o que acontecer na sua vida, nunca
pare de caminhar”.*

Christina Rickardsson.
Vindeln – Suécia, março 2017.

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFGA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

POTENCIAL PARA A UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE COBRE SULFETADO EM PAVIMENTAÇÃO

João Guilherme Mota de Sousa

Novembro/2017

Orientador: José Antônio da Silva Souza

Área de Concentração: Transformação de Recursos Naturais

A atividade de exploração mineral no Estado do Pará gera milhões de toneladas de resíduo depositado a céu aberto retido através de barragem. O resíduo de minério de cobre sulfetado aumenta a cada ano e o rompimento da barragem apresenta risco de contaminação ao meio ambiente. A lavra da rocha para extração e processamento de cobre localizada em Sossego, Canaã dos Carajás, Estado do Pará, Brasil, de 2012 a 2016, deixou mais de 112 milhões de toneladas de resíduo de minério de cobre sulfetado. O custo para a deposição do resíduo agregado a despesa para construção de barragens e a manutenção, além do risco permanente ao ambiente são apresentados no trabalho. O objetivo principal neste trabalho é comprovar que o resíduo do cobre sulfetado combinado com solo fino laterítico é apto para construção de camadas de pavimento. O projeto de mistura do resíduo com solo variou entre 30% e 50%. O estudo geotécnico e físico-químicos serviram para caracterizar o resíduo de cobre, solos e misturas. Os resultados obtidos por meio do Módulo Resiliente para o resíduo puro e mistura com solo fino laterítico foram de 191 MPa e 829 MPa estes valores mostram ser positivo utilizar o resíduo com qualidade técnica e econômica para a construção de camadas do pavimento. O potencial de utilização do resíduo tem conclusão benéfica quanto ao aspecto tecnológico, ambiental e econômico. A pavimentação das vias urbanas nas sedes dos municípios nesta região com o total de 3.699 km, o consumo do resíduo chegaria a 4.497.614 toneladas e para construção de camadas de base e sub-base de vias rurais e urbanas seria de 6.983.261 toneladas. Isto seria um consumo total de 11 milhões de toneladas do resíduo.

Palavra-Chave: Resíduo do cobre. Pavimento. Meio ambiente.

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFGA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

POTENTIAL FOR THE USE OF COPPER TAILINGS IN PAVEMENT

João Guilherme Mota de Sousa

November/2017

Advisor: José Antônio da Silva Souza, Dr. Eng.

Research Area: Use and Transformation of Natural Resources

The mineral exploration activity in the Pará State generates millions of tons of waste deposited exposed to open air retained through a dam. The copper mine tailings increases every year and the possible rupture of the dam presents a risk of contamination to the environment. Rock mining for the extraction and processing of copper located in Sossego, Canaã dos Carajás, Pará State, Brazil, from 2012 to 2016, left more than 112 million tons of copper mine tailings of sulfated copper. The cost for the deposition of the waste added to the expense for construction of dams and the maintenance, besides the permanent risk to the environment are presented in this work. The main objective in this work is to verify that the residue of sulfated copper combined with laterite fine soil is suitable for the construction of layers of pavement. The soil mixing project varied between 30 and 50%. The geotechnical and physicochemical study served to characterize the residue of copper, soils and mixtures. The results obtained by means of the resilient modulus for the pure residue and mixed with laterite fine soil were 191 and 829 MPa, these values are positives to use the residue with technical and economical quality for the construction of layers of the pavement. The potential for the use of waste has a beneficial conclusion on the aspects technological, environmental and economic. The pavement of urban roads in cities in this region sum total 3,699 km, the waste consumption would reach 4,497,614 tons and for construction of base and sub-base layers for rural and urban roads would be 6,983,261 tons. This would be a total consumption of 11 million tons of waste.

Key Word: Copper tailings. Pavement. Environment.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2 O PROBLEMA	13
1.3 HIPÓTESES	13
1.4 MOTIVAÇÃO.....	14
1.5 OBJETIVO PRINCIPAL	14
1.6 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS	14
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 PEDOLOGIA: CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS	17
2.2 CLASSIFICAÇÃO MCT	20
2.3 CAMADAS DO PAVIMENTO: MR e ISC	24
2.4 PRINCIPAIS RESÍDUOS APLICADOS EM PAVIMENTAÇÃO	28
2.5 O RESÍDUO DE COBRE SULFETADO: RCS	30
2.6 EXPLORAÇÃO DO SOLO E MINÉRIO A CÉU ABERTO.....	32
2.7 PRINCIPAIS RESÍDUOS GERADOS NA REGIÃO DE ESTUDO.....	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1. O SOLO E A JAZIDA PESQUISADA.....	40
3.2 O RESÍDUO DO COBRE SULFETADO	43
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	46
3.4. PREPARO DOS SOLOS, RCS E MISTURA	46
3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	48
3.5.1 Análise Granulométrica.....	49
3.5.2 Índices físicos	49
3.5.3 Ensaio de compactação e Índice de Suporte Califórnia	51
3.5.4 Classificação MCT	53
3.5.5 Módulo de Resiliência (MR) – Ensaio Triaxial de cargas repetidas	53
3.5.6 Ensaio Difração de Raios X e Grau de Acidez - pH	56
3.5.7 Ensaio Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	58
3.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESCOLHA DOS MATERIAIS.....	58
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	60
4.1 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	60
4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	60
4.2.1 Granulometria.....	61

4.2.2. Análise granulométrica do material para construção de sub-base e base.....	63
4.2.3 Limites de Atterberg.....	66
4.2.4 Densidade real, Umidade higroscópica e Equivalente de areia.....	67
4.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO.....	70
4.4 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA E EXPANSÃO.....	72
4.5 MÓDULO RESILIENTE - MR.....	74
4.6 CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL DOS MATERIAIS.....	77
4.7 RESULTADO DA CLASSIFICAÇÃO MCT.....	79
4.8 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X E GRAU DE ACIDEZ - PH.....	81
4.8.1 Difratomia de Raios X.....	82
4.8.2 Determinação do grau de acidez – pH.....	85
4.9 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	86
4.10 ELEMENTOS DA ESTRUTURA DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO.....	92
4.11 MATERIAIS ALTERNATIVOS NO ESTADO DO PARÁ.....	92
4.11.1 Construção de base e sub-base.....	93
4.11.2 Construção de pavimento em Santarém do Pará.....	93
4.12 REGIÃO DO ESTADO DO PARÁ: VIAS RURAIS E URBANAS.....	95
4.13 REVESTIMENTO COM USO DO RCS.....	98
4.14 CAMADAS DE BASE E SUB-BASE COM USO DE RCS.....	99
4.15 ANÁLISE TÉCNICA/ECONÔMICA COM USO DO RCS.....	99
4.16 EXPLORAÇÃO DE SOLO COM PROCEDIMENTO DE MINERAÇÃO.....	102
4.16.1 – Serviço de exploração de jazida.....	102
4.16.2 Proposta de exploração de jazida de solo.....	103
4.16.3 Característica geométrica das cavas para lavra de jazida com solo fino.....	106
4.16.4 Instruções normativas: Federal e Estadual.....	108
5 CONCLUSÃO.....	109
5.1 OBJETIVO REALIZADO.....	109
5.2 RECOMENDAÇÕES.....	110
5.3 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	111
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	112
REFERÊNCIAS.....	113
ANEXO A.....	119
AMPARO LEGAL PARA A EXPLORAÇÃO DE JAZIDA.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Exemplo para a legenda.	16
Figura 2.2	Local dos pesquisados citados nesta revisão bibliográfica, com adaptações.	17
Figura 2.3	Proposta de ábaco classificatório MCT.	24
Figura 2.4	Horizontes A, B e C na jazida de coleta.	33
Figura 2.5	Produção de minérios no Estado do Pará em 2011 – 2016.	35
Figura 2.6	Mina do Sossego: Depósito do RCS.	38
Figura 2.7	Principais resíduos no Estado do Pará em 2011 a 2016.	39
Figura 3.1	Representação das camadas da jazida de coleta dos solos.	40
Figura 3.2	Jazida Begot, Marituba - Pará. Local de coleta do solo.	41
Figura 3.3	Desmonte com retroescavadeira e coleta de solo.	42
Figura 3.4	Coordenadas geodésicas para a jazida Begot.	42
Figura 3.5	Situação geográfica: Projeto S11D.	43
Figura 3.6	Etapas do beneficiamento do minério de cobre.	44
Figura 3.7	Solo SHC secagem ao ar.	45
Figura 3.8	Solo SHB secagem ao ar.	45
Figura 3.9	O RCS no processo de secagem ao ar.	46
Figura 3.10	Solo SHC: Secagem ao ar, desagregado no almofariz e depositado no balde.	46
Figura 3.11	Procedimento manual para o quarteamento dos materiais.	47
Figura 3.12	Amostra (a) SHC e (b) RCS em bandejas para execução dos ensaios.	49
Figura 3.13	Verificação dos limites para o RCS, não plástico.	50
Figura 3.14	O SHB no agitador de proveta.	50
Figura 3.15	Ensaio com o material SHB.	50
Figura 3.16	Corpo de prova do RCS (a) Compactação e (b) Moldagem completa.	51
Figura 3.17	Corpo de prova (a) RCS e (b) SHC.	51
Figura 3.18	Mistura 1 (50SHC+50RCS): Perda de Massa por Imersão.	52
Figura 3.19	Ensaio triaxial (a) Corpo de prova do RCS e (b) após o ensaio.	53
Figura 3.20	Fluxograma para determinação do MR.	53
Figura 3.21	Amostras dos materiais para análise DRX e pH.	54
Figura 3.22	Equipamento Bruker, modelo D2.	55
Figura 3.23	pHmetro utilizado no laboratório.	55
Figura 3.24	Amostra em descanso: (a) SHC 1 e 2, (b) SHB.	55
Figura 3.25	Amostra em descanso: (a) RCS 1 e 2, (b) 50SHB+50RCS 1 e 2.	56
Figura 3.26	Equipamento para Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.	56
Figura 4.1	Curvas granulométricas de materiais e misturas.	60
Figura 4.2	Fração comparativa dos materiais e misturas.	60
Figura 4.3	Densidade real para solos, misturas e RCS.	65
Figura 4.4	Destaca a fração dos materiais e a variação da densidade.	66
Figura 4.5	EA para os materiais puros: SHC, SHB e RCS.	67

Figura 4.6	EA: 50SHC+50RCS e SHB.	67
Figura 4.7	Curvas de compactação dos solos e resíduo de cobre sulfetado.	68
Figura 4.8	Varição da Meas e Umidade (Ho) dos materiais e misturas.	69
Figura 4.9	Barras representativas para ISC e Expansão dos materiais.	70
Figura 4.10	Deformação total nos corpos de prova.	73
Figura 4.11	Guia para subgrupamento de classes de textura, diagrama trilinear.	74
Figura 4.12	Resultado MCT para a Mistura 50SHC+50RCS – COPPE/UFRJ.	76
Figura 4.13	Classificação da mistura 70SHB+30RCS no ábaco MCT – LMP/UFC.	77
Figura 4.14	Classificação da mistura 50SHB+50RCS no ábaco, MCT – LMP/UFC.	77
Figura 4.15	O DR-X dos solos SHB e SHC.	78
Figura 4.16	O solo puro SHB apresenta intensidade média de 700 cps.	79
Figura 4.17	DRX para o RCS adaptado com destaque a indicação da intensidade média 320.	79
Figura 4.18	DRX da mistura 50SHB+50RCS compactada, a intensidade de 200 cps.	80
Figura 4.19	Comparativo dos resultados obtidos em duplicata.	81
Figura 4.20	Imagens ampliadas 600X: a) SHC, b) SHB.	82
Figura 4.21	Imagens 1000X: a) SHC com poros menores, b) SHB poros maiores.	82
Figura 4.22	Análise das dimensões dos solos com imagem 1.000X.	83
Figura 4.23	Imagem ampliada 600X: a) RCS, b) 50SHB+50RC após compactação.	84
Figura 4.24	Imagem ampliada 1000X (c) o RCS e (d) 50SHB+50RC após compactação.	84
Figura 4.25	Resultados comparativo presentes no RCS de Canaã dos Carajás.	86
Figura 4.26	Camadas típicas de um pavimento asfáltico.	87
Figura 4.27	Jazida para extração da tabatinga em Santarém – Pará.	88
Figura 4.28	A tabatinga no local para execução da sub-base.	89
Figura 4.29	Sub-base executada com tabatinga.	89
Figura 4.30	Execução de base com laterita (piçarra).	90
Figura 4.31	Base com laterita à espera da imprimação e revestimento.	90
Figura 4.32	5° Núcleo Regional do Estado do Pará	91
Figura 4.33	Estimativa para o quantitativo de vias urbanas.	91
Figura 4.34	Destaca o resultado do procedimento: solo B misturado com solo C.	98
Figura 4.35	Ação para extração de solo em tiras “Strip Mine” conforme os horizontes.	100
Figura 4.36	O sistema “Strip Mine” utilizado em exploração mineral a céu aberto.	101
Figura 4.37	Forma geométrica da cava.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Principais produtos exportados no Estado do Pará.	35
Tabela 2.2	Principais resíduos gerados com a indústria de mineração do Pará.	39
Tabela 3.1	Preposição dos materiais, misturas e símbolos.	47
Tabela 3.2	Parâmetros e método de ensaio de caracterização.	48
Tabela 4.1	Composição granulométrica dos grãos passantes nas peneiras.	59
Tabela 4.2	Características granulométrica dos materiais e misturas.	59
Tabela 4.3	Granulometria do material faixa “F” DNIT 141/2010 – ES.	61
Tabela 4.4	Especificação de serviço com SAFL no Estado do Paraná.	62
Tabela 4.5	Especificação para base com SFL no Estado do Paraná.	62
Tabela 4.6	Especificação de serviço com SLF no Estado de São Paulo.	63
Tabela 4.7	Base estabilizada com solo laterítico. Especificação de serviço DNIT.	63
Tabela 4.8	Especificação de serviço com SAFL no Estado do Paraná.	64
Tabela 4.9	Resultados comparativos entre o SHC e SHB e fontes bibliográficas.	64
Tabela 4.10	Valores do aumento da densidade com RCS em relação ao solo puro.	65
Tabela 4.11	Umidade higroscópica, E. A. dos materiais e misturas.	66
Tabela 4.12	Fração, Meas e Ho dos materiais e misturas.	68
Tabela 4.13	Características para o ISC e Expansão.	70
Tabela 4.14	Valores obtidos para ISC e Expansão dos materiais.	70
Tabela 4.15	Variação do Módulo de Resiliência (MPa).	72
Tabela 4.16	Deformação total dos materiais.	73
Tabela 4.17	Resultado de granulometria de peneiramento e sedimentação.	74
Tabela 4.18	Resultado da classificação grupamento textural segundo Embrapa 2013.	75
Tabela 4.19	Caraterísticas estabelecidas segundo o critério MCT.	75
Tabela 4.20	Parâmetros e classificação MCT das misturas.	76
Tabela 4.21	Compostos dos solos e posicionamento DRX.	78
Tabela 4.22	Compostos RCS e posicionamento 2 θ DRX.	79
Tabela 4.23	Compostos determinados em 50SHB+50RCS e o posicionamento.	80
Tabela 4.24	Resultados obtidos em duplicata nas análises de acidez das amostras.	81
Tabela 4.25	Medidas dos grãos do solo, resíduo e mistura após compactação.	84

Tabela 4.26	Concentração dos elementos químico em peso (%) dos solos.	85
Tabela 4.27	Concentração dos 9 elementos químico (%) do RCS e mistura 50SHB+50RCS.	85
Tabela 4.28	Compostos químicos do RCS obtidos na Malásia, mina do Sossego e Chile.	86
Tabela 4.29	Total de vias urbanas localizadas próximas a mina S11D.	92
Tabela 4.30	Transporte por trem com distância entre a mineração S11D e as cidades.	93
Tabela 4.31	Dimensionamento da espessura do pavimento segundo SisPav.	93
Tabela 4.32	Determinação das camadas para solicitação de tráfego $N=1 \times 10^7$.	94
Tabela 4.33	Consumo de resíduo para pavimentação das vias da 5ª Regional.	95
Tabela 4.34	Resultado experimental: Consumo do resíduo.	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AASHTO - American Association of State Highway Officials and Transportation

CVRD - Companhia Vale do Rio Doce

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DRX - Difração de raios x

EA - Equivalente de areia

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

MEV - Microscopia eletrônica de varredura

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IP - Índice de Plasticidade

ISC - Índice de Suporte Califórnia

LL - Limite de Liquidez

LP - Limite de plasticidade

Meas - Massa específica aparente seca (g/cm^3)

MCT - Miniatura Compactado Tropical

MR - Módulo de Resiliência

pH – Potencial hidrogeniônico

RCS - Resíduo do beneficiamento de minério de cobre sulfetado

RMB - Região Metropolitana de Belém

SAFL - Solo arenoso fino laterítico

SFL - Solo fino laterítico

SHB - Solo do horizonte B ou segunda camada

SHC - Solo do horizonte C ou terceira camada

SiBCS - Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

TRB - Transportation Research Board

USCS - Sistema Unificado de Classificação de solos

H_o (%) - Umidade ótima

50SHC+50RCS - 50% de solo do horizonte C + 50% RCS

70SHB+30RCS - 70% de solo do horizonte B + 30% RCS

50SHB+50RCS - 50% de solo do horizonte B + 50% RCS

γ (g/cm^3) - Densidade máxima

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os objetivos deste trabalho de tese desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA), do Instituto de Tecnologia (ITEC), da Universidade Federal do Pará (UFPA), seguiu uma das metas para desenvolver a pesquisa, o aprofundamento dos estudos técnicos e científicos relacionados ao uso e transformação de recursos naturais; e assim contribuir para o desenvolvimento científico e tecnológico da Amazônia.

A ideia principal buscou dar continuidade a pesquisa com o a utilização do Resíduo do beneficiamento de minério de Cobre Sulfetado (RCS) desenvolvida em trabalhos anteriores, com a fabricação de elementos pré-moldados e concreto para construção civil, ainda de baixo consumo, quando comparado à construção de pavimento e pode ser uma alternativa para consumir milhões de toneladas do RCS.

O problema decorrente da exploração de minas e a ocupação de áreas com barragens para depositar a céu aberto o resíduo derivado do ato de lavra, pode contaminar o meio ambiente no momento do rompimento, ocasionado devido ao acúmulo comumente avaliado em milhares de toneladas por ano.

A Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), em Canaã dos Carajás-Pará, colocou em operação a mina do Sossego em 2004 e produziu 109 mil toneladas de cobre em 2016. A barragem forma uma lagoa com 20 milhões de metros cúbicos de água, que recebe o resíduo do beneficiamento de minério de cobre sulfetado, constituído de uma mistura de água e rocha triturada com baixos teores de cobre. A lagoa de rejeitos tem aproximadamente 90 milhões de toneladas de RCS, com teor de 0,07% de cobre (VASCONCELOS, 2012 e SIMINERAL, 2017).

Utilizar o solo misturado com RCS em camadas do pavimento asfáltico pode ser alternativa para mitigar o impactado ao meio ambiente. Porém é preciso determinar o benefício e custo para a construção do pavimento com qualidade técnica. A construção de uma rodovia não deve ser apenas um depósito para resolver o problema de mineração, mas possuir materiais alternativos de qualidade, baixo custo e preservação dos recursos naturais.

A extração nas jazidas de solo deve seguir procedimento com o menor impacto ambiental possível. Logo, a construção de camadas do pavimento pode ser uma possibilidade de aproveitar o resíduo de mineração com redução de custo, sem perda da qualidade técnica.

Um exemplo é o estudo que comprovou a viabilidade para utilização do RCS em concreto asfáltico, visto que as propriedades mecânicas das misturas ficaram constantes, ou melhoraram com a adição do mesmo. Dentre os destaques existe o desempenho da fadiga melhorado para a adição de 10%, 20% e 25% de RCS (KATO, 2016).

A **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002**, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil e cita que os geradores de resíduos de construção civil são pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos devem ser responsáveis pelos resíduos das atividades de construção, reforma, reparos e demolições de estruturas e estradas, bem como por aqueles resultantes da remoção de vegetação e escavação de solos, por Lei, conforme Anexo A.

O consumo do resíduo de mineração do cobre de forma sustentável diminui o risco de acidentes com rompimento de barragem, como o acidente ocorrido na mineradora SAMARCO, Mariana em Minas Gerais, em 05 de novembro de 2015, que derramou 60 milhões de metros cúbicos de rejeito, com impactos ambientais sobre a população, a fauna e a flora local.

1.2 O PROBLEMA

A exploração de minério de cobre na mina do Sossego, no município de Canaã dos Carajás, no Estado do Pará, acumula milhões de toneladas do resíduo o que gera um custo para manter estocado e neste processo com risco de impactos ao meio ambiente.

O problema que motivou a pesquisa desta tese é que o resíduo de cobre sulfetado (RCS) é pouco aproveitado como agregado na construção civil. Aliado a este problema está a coleta do agregado cada dia mais distantes das áreas urbanas com um custo de transporte maior para a construção civil.

1.3 HIPÓTESES

A análise de dois solos misturados com RCS para serem utilizados em construção de pavimento nos permite formular duas hipóteses:

- a) Emprego dos solos finos lateríticos misturados com o RCS serve para construção de pavimento;
- b) Ensaio e análise de resultados do solo e mistura de solo com RCS através do Módulo de Resiliência (MR) maior que 200 MPa comprovam a utilização em reforço de subleito, sub-base e base de pavimentos.

1.4 MOTIVAÇÃO

A primeira motivação é devido à falta de pesquisa para construção de pavimento com solos tropicais e o RCS possuir qualidade durante a vida útil, com menor custo e maior benefícios ao usuário de transporte.

O segundo motivador é que são raras as publicações direcionadas para utilizar o RCS em camadas de pavimentos a nível nacional e estrangeira, que trate do tema abordado com uso de solo laterítico.

Essas motivações têm base quando OLUWASOLA *et al.* (2014, p. 254) destacam em pesquisa recente, e utilizo a citação dos pesquisadores encontradas sobre o uso RCS: *“É preocupante que, apesar da enorme quantidade desses materiais (RCS), os potenciais e a possibilidade de usá-los como materiais rodoviários não tenham sido o suficiente estudados”*.

1.5 OBJETIVO PRINCIPAL

A restauração ecológica com a recuperação de locais explorados e desativados são componentes importantes das estratégias de desenvolvimento sustentável em muitos países (LEI *et al.*, 2016). Este trabalho tem como objetivo principal “verificar se a utilização do resíduo do cobre sulfetado (RCS) puro ou misturado com solo laterítico serve para construção de pavimento”.

1.6 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) Classificar os dois Solos Finos Lateríticos (SFL) solo do horizonte C ou terceira camada (SHC) e solo do horizonte B ou segunda camada (SHB), de acordo com a metodologia Miniatura Compactado Tropical (MCT) e especificações técnicas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT);
- b) Apresentar estudos preliminares da mistura de SHC e SHB com RCS, e da mistura de solo SHC com RCS e cimento Portland;

c) Incentivar a lavra do solo de acordo com que dispõe sobre procedimentos e critérios, no âmbito do Meio Ambiente do Estado do Pará (PARÁ, 2014) para o licenciamento ambiental, referente à extração de minério areias, cascalhos, saibros e o beneficiamento associado, para utilização imediata na construção civil;

d) Sugerir ação para extração de solo conforme os horizontes pedológicos, por meio do sistema de tiras *Strip Mine*.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do trabalho é de 5 capítulos e 1 anexo.

Capítulo 1 é composto de: considerações iniciais, o problema, hipóteses, motivação, objetivo principal e objetivos secundários.

Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, para análise das contribuições disponíveis na literatura internacional e nacional, sobre:

- Pedologia: Classificação de solos;
- Classificação MCT;
- Camadas do pavimento: MR e ISC;
- Principais resíduos aplicados em pavimentação;
- O resíduo de cobre sulfetado: RCS;
- Exploração do solo e minério a céu aberto;
- Principais resíduos gerados na região de estudo;
- Considerações.

Capítulo 3 descreve materiais e métodos sobre a escolha dos SFL SHC, SHB, RCS e relata: procedimento experimental e ensaios realizados.

Capítulo 4 apresenta e discute os resultados dos ensaios realizados de caracterização dos solos SHC, SHB, umidade de compactação para energia intermediária e MR: primeira verificação para cada material separado. Segunda verificação para mistura de SHC, SHB com RCS. Terceira verificação quando acrescentado 1% de cimento Portland ao SHC. É incluído neste capítulo a proposta sobre a possibilidade de construção de camadas do pavimento asfáltico com SFL e revestimento asfáltico quando adicionado o RCS.

Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas sobre a possibilidade de construção de camadas do pavimento asfáltico, recomendações e sugestões para trabalhos futuros com adição do RCS.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, com base em periódicos nacionais e internacionais, no que diz respeito à utilização de resíduo de mineração de cobre em misturas com Solos Finos Lateríticos (SFL) tropical, destinado à construção de base e sub-base de pavimentos. Os periódicos selecionados foram dos anos de 2007, 2014, 2015, 2016 e 2017, os documentos fora deste intervalo de tempo, são os artigos de SIMON *et al.* (1973) e MAHALINGA e WILLIAMS (1994), para exemplificar e registrar os trabalhos de pesquisa com solo tropical laterítico realizados no século XX e foram divididos nos itens:

- 2.1. Pedologia: Classificação de Solos;
- 2.2. Classificação Miniatura Compactado Tropical (MCT);
- 2.3. Camadas do pavimento: Módulo de Resiliência (MR) e Índice de Suporte Califórnia (ISC);
- 2.4. Principais resíduos aplicados em pavimentação;
- 2.5. Resíduo de cobre sulfetado(RCS);
- 2.6. Exploração do solo e minério a céu aberto.
- 2.7. Principais resíduos gerados na região de estudo.

A legenda (Figura 2.1, Tailândia: 1, 2,3) indica o item do periódico citado. Por exemplo temos: Os pesquisadores com trabalhos na Tailândia são citados em Pedologia (item 2.1), Classificação de Solos MCT (2.2); Camadas do pavimento: MR e ISC (2.3).

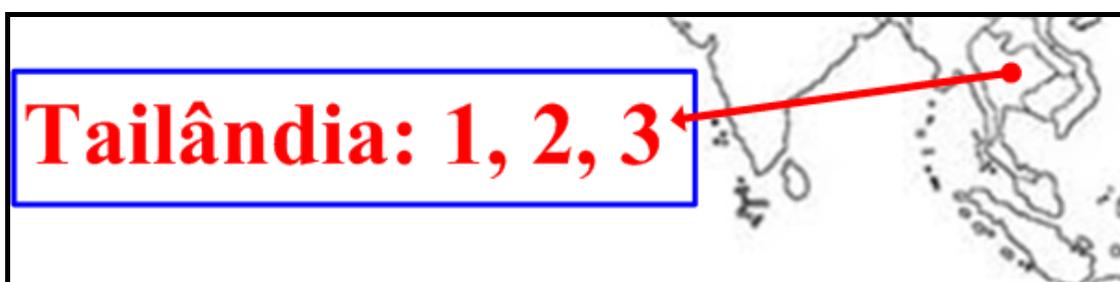


Figura 2.1 – Exemplo para a legenda.

A Figura 2.2 representa com adaptações os países em seus continentes para destacar o local dos pesquisadores citados nesta revisão bibliográfica.

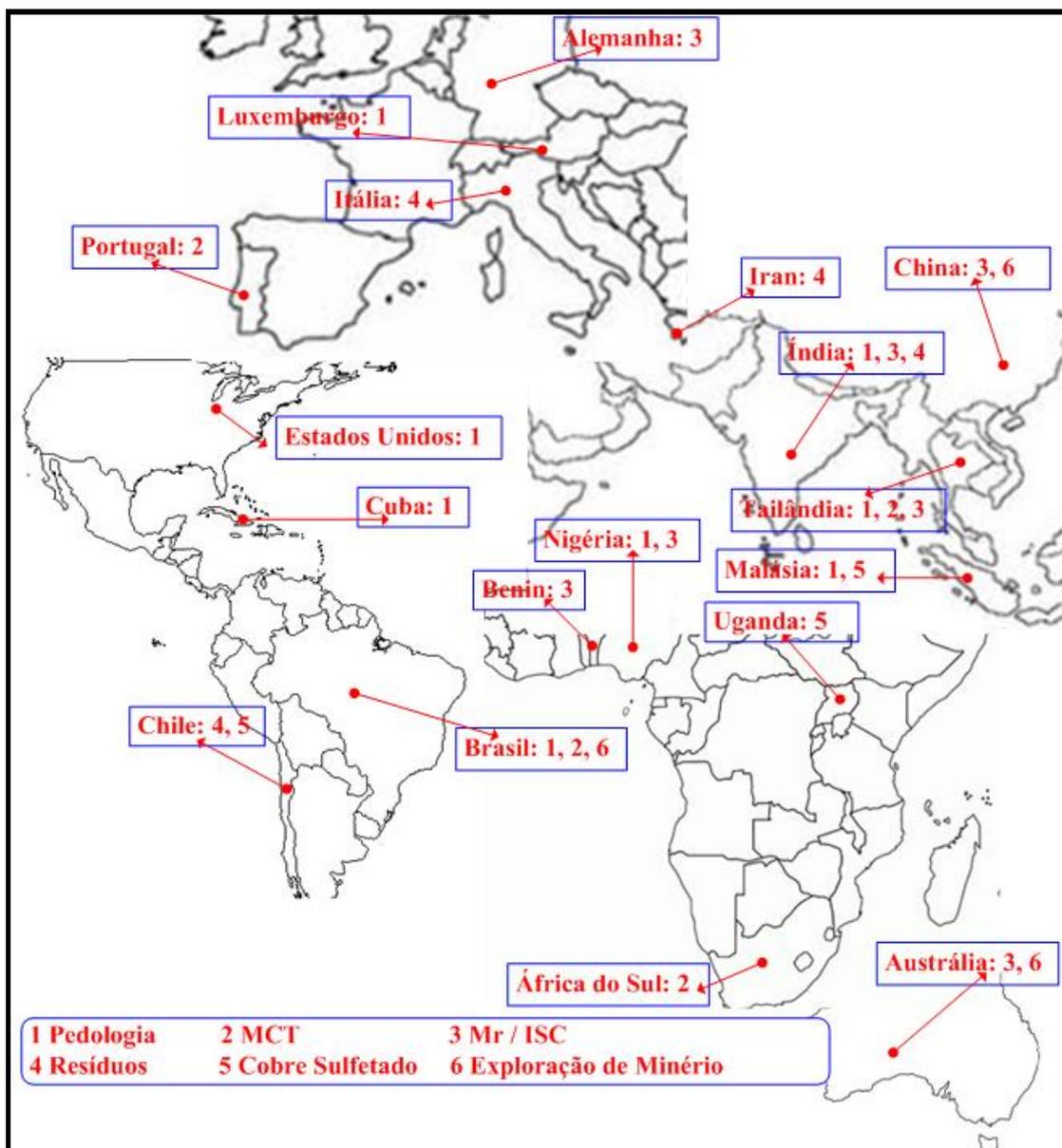


Figura 2.2 – Local pesquisados e citados nesta revisão bibliográfica, com adaptações.

A revisão bibliográfica buscou os periódicos de países nos continentes diferentes do planeta Terra para ter uma representação diversificada de pesquisadores sobre a técnica e materiais utilizados em trabalhos.

2.1 PEDOLOGIA: CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

Os artigos foram selecionados para acompanhar a origem dos solos, os processos de formação e degradação física, química, caracterização e perfil, em regiões tropicais, ou em trabalhos publicados, em busca de esclarecimentos sobre novas tecnologias para classificação dos solos, para definir e buscar resolver o problema estabelecido neste trabalho, com novas metodologias e critérios que possam ser aplicadas com solos da

Região do Estado do Pará. Neste item constam os artigos com trabalhos relacionados à classificação e técnicas desenvolvidas em alguns países como: Cuba, Tailândia, Luxemburgo, Nigéria, Estados Unidos, Brasil, Malásia e Índia.

As propriedades do solo no oeste de Cuba foram pesquisadas por MEDINA *et al.* (2017), que realizaram uma análise em uma região tropical, onde o clima é caracterizado por duas estações bem definidas.

Os Cambissolos Pardos apresentaram o menor teor de argila e a maior concentração média de cátion. Os Ferralíticos possuem os menores teores de cálcio e magnésio, sendo que o grau de acidez (pH) variou de 5,6 a 7,5. O teor de cálcio revelou ser crucial ao funcionamento destes solos pois apresentam o pH médio elevado e atinge fortemente a estrutura e a agregação dos solos.

MOONJUN *et al.* (2017) descreveram o estudo de caso da Tailândia, com aplicação de imagens aéreas obtidas com raios gama para auxiliar a pesquisa de solo. A área é resultado de processos tectônicos ativos, denudação e sedimentação, com fisiografia composta de vales e terraços quaternários ao longo dos rios Pa Sak (leste) e Numpung (oeste), composto de pedregulho montanhoso e encostas mais baixas das montanhas circundantes. O clima é tropical úmido.

Os pesquisadores utilizaram 32 amostras de solos para determinar distribuição do tamanho de partícula, por meio de peneiramento e sedimentação. A análise de difração de raios x (DR-X) determinou a composição mineral das amostras. Entre os solos tropicais estudados estão: cascalho, areia, silte, argila e laterita.

MORAGUES-QUIROGA *et al.* (2017) e JUILLERET *et al.* (2016) pesquisaram a Região de Luxemburgo e publicaram o artigo *Genesis and evolution of regoliths: Evidence from trace and major elements and Sr-Nd-Pb-U isotopes*. Em um sentido amplo o regolito, engloba todo o material da rocha fresca à atmosfera. Regolito, horizonte C, é a camada principal da zona crítica onde os fluxos da água, da energia, dos solutos e da matéria ocorrem.

O estudo considerou um perfil de regolito poligênico, típico de um planalto remanescente da parte ocidental do maciço do Reno e permitiu distinguir três horizontes distintos. Suas características geoquímicas e mineralógicas apresentam evoluções contrastantes, que podem estar relacionadas a diferentes eventos de deposição atmosférica e à dinâmica sazonal de saturação de água.

O trabalho concluiu que a combinação dos principais elementos Estrôncio (Sr) – Neodímio (Nd) – Chumbo (Pb) – Urânio (U) e de oligoelementos e das análises da razão

isotópica Sr-Nd e Pb-U parece ser uma abordagem extremamente poderosa para a compreensão da evolução dos sistemas regolíticos poligênicos. Este procedimento ofereceu a possibilidade de caracterizar, identificar as ligações genéticas e acompanhar a evolução geológica do regolito.

ANDE *et al.* (2016) caracterizaram os solos de várzea no Centro Norte da Nigéria, província de Savanna. Onde o clima é tropical. A cobertura vegetal é constituída por floresta secundária de vegetação escassa, característica da savana guineense.

O solo arenoso varia entre 80% e 90%. A descrição morfológica mostra o efeito da gleização nos solos superficiais devido à formação de lagoas com variação de cor acinzentada. O subsolo varia de castanho acinzentado a castanho, o que indica que o subsolo contém fraca expressão ferruginosa.

Os pesquisadores identificaram a concentração de nutrientes químicos na superfície devido a preparação da terra e a inundação anual. As condições ácidas e anaeróbias nos perfis em profundidade são resultadas da formação de concreções maciças de ferro (Fe) e manganês (Mn) com alguns pedons.

A pesquisa de BREVIK *et al.* (2016) considerou os registros dos Estados Unidos sobre o mapeamento, classificação e modelagem pedológica do solo. O trabalho citou os pesquisadores brasileiros, proponentes de novas abordagens sobre a origem do solo por meio de aspectos geológicos e climáticos.

Métodos de espectrometria de reflexão difusa recentemente foram aplicados à predição espacial da variação do solo para auxiliar a classificação no Brasil. Os resultados mostraram que os solos foram classificados corretamente com aproveitamento de 92% do tempo e válidos em um nível de 67%.

O estudo desenvolvido por REICHERT *et al.* (2016): Efeitos do uso da terra em solo subtropical e arenoso sob processos de desertificação no Estado do Rio Grande do Sul - Brasil, fornece inúmeras características sobre solo arenoso e inclui dados com base nos solos arenosos da Amazônia.

Os solos arenosos são caracterizados por agregação fraca, baixa capacidade de retenção de água, elevada permeabilidade. A lixiviação de nutrientes em solos arenosos é alta, e a maioria dos cátions em locais de troca coloidal são ocupados por alumínio. Os solos em regiões tropicais têm baixa reserva de nutrientes, toxicidade de alumínio e forte acidez. Em uma revisão sobre a toxicidade do alumínio em plantas, afirmam que cerca de 50% das terras aráveis no mundo são ácidas (pH <5,5), (REICHERT *et al.*, 2016).

UMAR *et al.* (2016), os pesquisadores do Estado de Johor na Malásia, estudaram o processo biológico para melhorar o solo para a construção civil, com a adição de calcita induzida microbiana. A técnica utiliza processos microbianos do solo, para lhe introduzir o carbonato de cálcio em sua matriz. O carbonato de cálcio produzido ligou as partículas do solo, melhorou a resistência e reduziu a sua condutividade hidráulica.

O trabalho revelou que a calcita adicionada no solo melhorou em 96% a resistência de cisalhamento e reduziu a permeabilidade, quando a concentração é de 0,5 mol dos reagentes de cimentação no, entanto, a melhoria da resistência foi retardada para uma concentração de 1 mol do reagente.

O estudo concluiu que a calcita induzida microbiana pode ser considerada uma técnica praticável que melhora as estruturas novas e as existentes, podendo ser usada em muitas aplicações de engenharia geotécnica, como a estabilização de taludes e reforço de subleito.

TRIPATHI e RAJAMANI (2007) analisaram, segundo a Geoquímica, a origem de nódulos ferruginosos em gnaisses granodiorito degradados no planalto de Mysore, ao sul da Índia. A região é de clima tropical semiárido a subúmido.

A análise química revelou para os nódulos ferruginosos degradados vários elementos do perfil de intemperismo e sua reprecipitação. Os agregados de nódulos mostram um acúmulo de ferro (Fe), titânio (Ti), cromo (Cr), níquel (Ni) e vanádio (V). E, embora as concentrações de alumínio (Al) sejam menores nos nódulos em relação aos saprolitos e rocha mãe, minerais ricos em alumínio (caulinita e gibbsita).

O estudo de TRIPATHI e RAJAMANI (2007) concluiu que o teor de titânio, alumínio aumentou com a intempérie, particularmente em rochas altamente degradadas, devido à remoção química e física de outros elementos. No entanto a perda de alumínio torna o pH do quartzo com baixo valor, ou seja, um solo ácido.

2.2 CLASSIFICAÇÃO MCT

Neste item há ênfase às características ambientais dos solos e a pesquisa bibliográfica constou de artigos para a classificação dos solos tropicais com ênfase na metodologia – MCT, com trabalhos desenvolvidos para a África do Sul, Índia e Brasil.

NOGAMI e VILLIBOR (1995) desenvolveram a metodologia MCT, com procedimentos adaptados às condições ambientais, pois grande parte das características dos solos tropicais é atribuída às condições climáticas vigentes nas áreas em que os solos estão situados, ou estavam na ocasião de sua evolução. Alguns solos tropicais ocorrem,

atualmente, em áreas de climas não tipicamente tropicais, portanto, em fase de transformação para adaptação às novas condições climáticas.

Vários problemas geotécnicos, específicos das áreas de ocorrência de solos tropicais, estão relacionados ao clima quente e úmido, típico da região tropical. NOGAMI e VILLIBOR caracterizaram o solo de ambiente tropical úmido e compararam com os solos existentes em lugares de clima temperado e frio, onde desenvolveram grande parte dos procedimentos adotados nas obras viárias existente. Só após melhor familiaridade com eventuais diferenças ambientais, será possível desenvolver procedimentos mais apropriados para as regiões tropicais úmidas.

MEDINA e MOTTA (2015) citam os elementos básicos de clima, a temperatura atmosférica e a altura de chuva, considerados os valores médios anuais e mensais e os extremos diários – máximo e mínimo de temperatura e mensais de chuva. São fatores do clima: latitude geográfica, altitude e base sólida ou líquida, inclinação da base sólida em relação ao horizonte, cobertura vegetal e presença ou não de gelo ou neve.

O clima tropical úmido é caracterizado pelas altas temperaturas médias anuais, geralmente superiores a 20 °C, sem ocorrência de congelamento do subsolo, e elevada pluviosidade, isto é, superior a 1000 mm/ano. Para fins comparativos, caracteriza-se essa condição mediante o uso de classificações climáticas (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

PAIGE-GREEN *et al.* (2015), são pesquisadores da África do Sul e reconheceram os pesquisadores do Brasil ao trabalharem com uma revisão das especificações dos solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego, onde consideraram que a maioria dos solos lateríticos não estavam em conformidade com as especificações tradicionais para construção de camadas de pavimentos asfálticos, e declaram ser este um problema particular quando os materiais são necessários para estradas com baixo volume de tráfego.

A experiência com muitos materiais lateríticos, mostrou que eles podem ser utilizados com sucesso de acordo com as especificações consideradas não tradicionais. Uma revisão de várias especificações concluiu que as especificações utilizadas no Brasil são, provavelmente, aquelas baseadas em pesquisas mais pertinentes e detalhadas.

Os autores estudaram a ampla gama de especificações sugeridas internacionalmente para materiais lateríticos, e compararam as propriedades de um número de solos lateríticos utilizados com sucesso em estradas em países da África, segundo as especificações brasileiras, e sugerem que sejam aplicadas para os países localizados ao sul do continente africano.

Em resumo a conclusão de PAIGE-GREEN *et al.* (2015, p. 97) é que: a especificação bem-sucedida e aplicada para solos lateríticos finos no Brasil é a metodologia MCT.

DUTRA e VALE (2016), com pesquisa desenvolvida em laboratório do Porto, Portugal, afirmaram não ser fácil caracterizar as propriedades dos solos finos tropicais em laboratório, pelo fato de serem solos difíceis de se ter amostras em Portugal, daí que as propriedades destes materiais são normalmente determinadas *in situ*.

Ao realizarem a pesquisa com solos lateríticos do Brasil, África e Índia os autores verificaram a diversidade de características, apesar de apresentarem algumas em comum, tais como, baixa fração argilosa, cimentação das partículas do solo, elevados valores de coesão e ângulo de atrito.

Os autores consideraram a Metodologia MCT muito útil para identificar solos com comportamento laterítico e concluíram que a utilização das lateritas em pavimentos parece ser uma alternativa econômica e sustentável, para as camadas de sub-base e de base do pavimento.

O estudo de EMMERT e PEREIRA (2016) para caracterizar e classificar o SFL e solo granular (HA), foi realizado com a finalidade de atender à construção de estradas de terra, em áreas florestais no município de Niquelândia, Goiás, Brasil.

O Solos Finos Lateríticos (SFL) apresentou a predominância da fração de areia fina e baixa plasticidade. Em relação à resistência a compressão, quanto maior a energia de compactação maior a tensão suportada. Esse solo pertenceu aos grupos A-6 (Silte Argiloso) segundo a classificação AASHTO, antes chamada de classificação *Highway Research Board* (HRB) e *Transportation Research Board* (TRB), e Laterítico Arenoso (LA) segundo a classificação MCT.

Para o solo granular (HA), a fração predominante foi de pedregulho fino, classificando no grupo A-1 (Granular), segundo AASHTO.

Os solos estudados apresentaram comportamento satisfatório a excelente para aplicação em estradas de terra quando compactados corretamente, indicando o solo SFL para construção de subleito e o HA para a construção de base ou revestimento primário.

O trabalho de FERREIRA *et al.* (2014) aconteceu para verificar a viabilidade técnica e ambiental da incorporação de areia descartada de fundição (ADF) na estabilização granulométrica de um solo, coletado no campus da Unicamp – Limeira, SP, laterítico argiloso para aplicação em pavimentos. Primeiro foram estudadas misturas de solo laterítico argiloso + ADF com 20 a 80% de substituição.

O aumento do teor de ADF nas misturas alterou consideravelmente as características do solo laterítico argiloso (LG') a partir do teor de 60%, onde a mistura de solo + ADF passou a ser classificada como Laterítico Arenoso (LA') pela classificação MCT.

A incorporação de ADF ao solo laterítico argiloso mostrou ser viável no teor de 70% para utilização como sub-base de um pavimento flexível, considerando a viabilidade técnica (classificação e ISC) e os parâmetros ambientais (classificação ambiental e toxicidade). Para estudos posteriores os autores indicam que deve ser realizado o dimensionamento de um pavimento conforme método mecanístico-empírico, com adição de estabilizante químico para se obter um melhor desempenho e determinar a durabilidade do material em um pavimento.

NOGAMI e VILLIBOR (1995) desenvolveram a metodologia MCT, tendo em vista que nenhuma das propostas para corrigir os índices tradicionais, ou substituí-los por outros mais significativos, teve o desejável sucesso para os solos tropicais.

A metodologia foi iniciada com a introdução do ensaio Mini-CBR, para SFL, com base no procedimento desenvolvido pela Iowa State University, e posteriormente ampliado, sobretudo para possibilitar o melhor aproveitamento de solos arenosos finos lateríticos em pavimentação, considerando a capacidade de suporte em várias condições: sem imersão em água, contração, permeabilidade e infiltrabilidade.

VERTAMATTI (1988) propôs e apresentou (Figura 2.3) modificações para a Classificação MCT, definida com base no estudo do comportamento geotécnico dos solos superficiais da Amazônia.

Com base em sua pesquisa sugeriu a introdução de grupos denominados de transicionais ou intermediários (T): TA' (Arenoso), TA'G' (Arenosos Argiloso), TG' (Argiloso) e LA'G' (Laterítico Arenoso Argiloso).

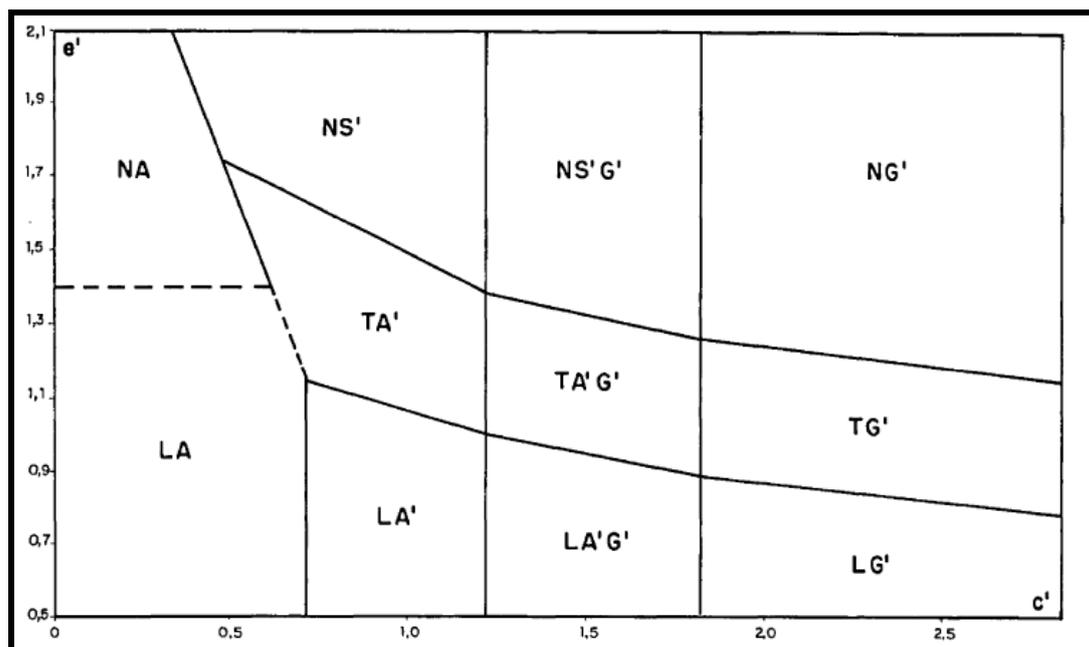


Figura 2.3 - Proposta de ábaco classificatório MCT. Fonte: VERTAMATTI, 1988.

A pesquisa de VERTAMATTI (1988) destacou os resultados alcançados, que além de propiciarem uma visão global das características e propriedades dos solos típicos da Amazônia, permitem o estabelecimento de novos padrões de comportamento geotécnico e critérios MCT/Resiliente adaptados para a seleção adequada desses materiais, com vistas a seu uso racional em camadas de pavimentos.

2.3 CAMADAS DO PAVIMENTO: MR e ISC

Os artigos citados neste item (2.3) são voltados para a construção de camadas de base e sub-base dos pavimentos com a utilização de materiais ou resíduos alternativos, com destaque ao MR e ISC. Os trabalhos são apresentados com o local de origem na seguinte ordem: Austrália, China, Nigéria, Alemanha, Índia e Tailândia.

O estudo de MOHAMMADINIA *et al.* (2017) em Melbourne, Austrália considerou a cinza volante derivada do carvão mineral quando misturada com resíduo de tijolo cerâmico e utilizado para construção de base e sub-base, de pavimento com asfáltico fresado reciclado.

As propriedades geotécnicas da mistura do resíduo de tijolo e asfalto fresado reciclado estabilizadas, com diferentes proporções de cinza volante, foram apresentadas e comparadas com as normas rodoviárias locais.

Os resultados da investigação geotécnica nesta pesquisa mostraram um aumento considerável no MR e foram considerados viáveis para utilização de materiais para construção de base e sub-base de pavimento, uma vez que a sua resistência, durabilidade

e estabilidade aumentou com a inclusão de cinza volante. As seguintes conclusões podem ser feitas a partir desta pesquisa:

a) As concentrações de 15% de resíduo de tijolo, 15% de asfalto fresado reciclado estabilizadas com 15% de cinza volante foram as proporções melhores para a construção de base e sub-base do pavimento quando adicionada ao solo;

b) A cura por 7 dias, com temperatura de 40 °C das misturas estabilizadas de resíduo de tijolo e asfalto fresado reciclado, devido ao cálcio-silicato-hidrato e aluminato de cálcio que envolve as partículas de cinza volante no processo de hidratação aumentou o MR $100 < \text{MPa} < 600$.

ZHANG *et al.* (2017) verificaram a estabilização de solo siltoso com lignina para aplicação em construção de subleito de rodovia. A lignina é um resíduo da indústria do papel que resulta do beneficiamento da madeira e não é totalmente utilizada tanto nos países desenvolvidos como nos países em desenvolvimento. Os testes de campo foram realizados ao longo da Via expressa Fu-Jian situada na cidade de Yancheng, província de Jiangsu, China.

A conclusão é que as correlações observadas com a mistura de lignina e solo siltoso é consistente como a relatada na literatura para o subleito de solos lateríticos. A pesquisa com base nos resultados obteve as seguintes conclusões:

a) O silte (solo) estabilizado com lignina a 12% apresentou maior resistência e capacidade de suporte em relação ao estabilizado com 8% de calcário;

b) O silte estabilizado com lenhina a 12% apresentou um MR e compactação superior em relação ao silte estabilizado com calcário após 15 dias de cura.

c) A secção de ensaios com 12% de estabilização de lignina atingiu um resultado no ensaio do cone de penetração dinâmica ligeiramente superior logo após a construção, mas verificou-se que cresceu rapidamente e ultrapassou os solos estabilizados com cal viva após 15 dias de cura.

Avaliação geotécnica e ambiental realizada por OJURI *et al.* (2017) com as misturas de resíduo do minério de ferro mais solo laterítico estabilizadas com a cal para construção de rodovias no Estado de Kogi, na Nigéria.

A adição do resíduo de minério de ferro diminuiu a fração fina e os valores limite de Atterberg ficaram dentro do aceite pelas normas da Nigéria.

Os valores do ISC aumentaram tanto com a adição dos resíduos de ferro como da cal para a mistura com 70% de solo laterítico, 30% de resíduo do minério de ferro com 8% de cal e resultou o valor mínimo de ISC de 80% para o solo de curso de base.

Na Alemanha LEISCHNER *et al.* (2016) pesquisaram o revestimento asfáltico com camada igual ou menor que 50 mm, com objetivo de analisar pavimentos flexíveis finos, que é amplamente utilizado em países subdesenvolvidos, mas não é utilizado na Alemanha, porém não existe nenhum método executivo de pavimento asfáltico com camadas abaixo de 5 mm.

Com os resultados da caracterização do material para base, e a experiência em diversos países, o estudo concluiu ser possível ter estruturas de pavimento com camadas de asfalto inferior a 50 mm para um volume de tráfego menor que 100.000 eixos-padrão.

As misturas devem ser preparadas com agregados de alta qualidade com alta resistência à fragmentação, desgaste e polimento, para garantir aderência e conforto de condução adequados. A camada de base pode ser construída com materiais cuja capacidade de suporte seja suficiente em condições normais e estabilizada com aditivos químicos não tradicionais para reduzir a sua suscetibilidade à umidade para compensar a perda de rigidez durante o período de gelo e degelo.

BISWAL *et al.* (2016) caracterizaram os solos lateríticos granulares disponíveis em região oriental da Índia com a finalidade de aplicar o material em pavimentação. O programa de ensaios laboratoriais foi conduzido em solos graníticos lateríticos para determinar as propriedades básicas do solo.

O objetivo principal foi caracterizar os solos lateríticos granulares em laboratório para elaborar modelos de módulo resiliente não linear adequados para os solos granulares e o desenvolvimento de correlações adequadas entre o módulo resiliente e os parâmetros do solo, como as propriedades ISC.

Em suas pesquisas, BISWAL *et al.* (2016) coletaram 28 amostras de solo laterítico em região tropical da Índia e com estudo mineralógico, identificaram que a maioria das amostras contém quantidade substancial de quartzo com alguma hematite, biotita, goethita e feldspato.

As amostras de solo possuem caulinita como mineral principal de argila e baixo índice de plasticidade, enquanto a illita nos solos como mineral principal de argila tem maior índice de plasticidade devido à maior afinidade à água. Os solos lateríticos granulados são ricos em sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) e também contém óxido de magnésio (MgO), titânio (Ti), potássio (K), sódio (Na) e cálcio (Ca).

NGUYEN e MOHAJERANI (2016) trabalharam com oito amostras de solos finos diferentes coletados nos subúrbios de Melbourne, Austrália, e propuseram um

método simples de ensaio e cálculo para determinar um valor médio do módulo resiliente para construção de pavimento.

Neste estudo foram realizados ensaios triaxiais de carga repetida. Os solos foram compactados em diferentes teores de umidade ótima para cada tipo de solo o método de ensaio padrão da AASHTO T307-99.

Os pesquisadores concluíram que os valores do MR são altamente dependentes do teor de umidade e, à medida que o teor de umidade aumenta, o MR diminui. O maior valor de MR pode ser visto no ramo seco do teor de umidade ótima.

Os resultados apresentados neste trabalho baseiam-se no número limitado de solos experimentais de grãos fino utilizados neste estudo. Para a verificação do método simplificado proposto, recomenda-se uma investigação adicional utilizando diferentes tipos de solos de grão fino e diferentes propriedades físicas.

DONRAK *et al.* (2016) estudaram o solo laterítico para construção de rodovia coletado no distrito de Maung, província de Sakonnakhon, Tailândia, e adicionaram o resíduo de melamina, ($C_3H_6N_6$) com a qual são fabricadas resinas sintéticas para revestimentos, laminados, tratamento de tecidos e couro.

Os ensaios de propriedades físicas incluíram: densidade real, absorção, limites de Atterberg, abrasão Los Angeles (LA) e análise granulométrica. Os ensaios de propriedades mecânicas foram: ISC e expansão.

A análise granulométrica do solo mostrou que predomina: 21,7% de fino, 25,6% de cascalho e 31% de areia. Os resultados indicaram a Melamina como material não-plástico, e pode ser usado como agregado médio e aumenta a resistência à abrasão das partículas do solo, reduz o LL e o IP.

A mistura com 20% de Melamina e 80% de solo satisfazem perfeitamente a especificação para camada de base enquanto a mistura com de 50% de Melamina mostrou estar no limite para execução de sub-base.

MAHALINGA e WILLIAMS (1994) pesquisaram a adequação de um solo laterítico desenvolvido do basalto olivina, rocha ígnea de grão fino dominado por silicato de magnésio com óxido de ferro, no Oeste de Queensland, na Austrália, para a construção de pavimento. O solo laterítico apresentou caulinita e hematite, com 19,5% de Fe_2O_3 , (óxido de ferro), 35,5% de SiO_2 (óxido de silício) e 26% de Al_2O_3 (óxido de alumínio) e uma proporção de sílica / sesquióxido de 0,78%.

A curva granulométrica e o IP do solo não estiveram em conformidade com a especificação clássica para materiais de pavimentação. No entanto, o solo tem uma alta

resistência ao cisalhamento em condições “*in situ*”. A contração volumétrica do solo não constitui um problema, pois é baixa. A resistência “*in situ*” do pavimento construído com o solo laterítico, aumentou com o tempo e com a passagem de tráfego desde a sua construção.

SIMON *et al.* (1973) relataram a utilização de solo laterítico para a construção de rodovia ao norte de Daomé, República Popular do Benin foi construída na década de 1950, em pista simples com largura de 3,50 m por faixa, tratamento superficial duplo e camada de areia asfáltica. A plataforma tem a largura média de 8,00 m.

O rápido aumento do transporte de carga ultrapassou a capacidade de suporte da via, e as deteriorações decorrentes do tráfego levaram a constantes recuperação do pavimento.

A exploração geotécnica mostrou uma excelente oportunidade para estudar as propriedades dos solos lateríticos encontrados na região. A primeira análise aprovou a condição de suporte de carga com o solo laterítico, no entanto as análises indicaram que os solos só poderiam ser identificados como laterítico em virtude de conter hematita. Os solos foram classificados de acordo com a American Association of State Highway Officials and Transportation - AASHTO.

Os resultados revelaram que a maioria dos solos disponíveis eram impróprio para a construção da estrada, devido à sua elevada plasticidade. A estabilização com a adição de cimento Portland melhorou a plasticidade e os ensaios de laboratório mostraram que o solo laterítico encontrado ao norte de Daomé, poderia ser uma solução técnica e economicamente viável para a execução do projeto.

2.4 PRINCIPAIS RESÍDUOS APLICADOS EM PAVIMENTAÇÃO

A exploração de recursos minerais resulta em destruição de vasta quantidade de terra causando problemas ambientais sérios. Em razão disto a restauração ecológica e a recuperação dos locais de mineração são componentes importantes das estratégias de desenvolvimento sustentáveis de muitos países.

Aproveitar os resíduos de mineração em construção de camadas de pavimento é uma oportunidade de diminuir o passivo ambiental e contribui para a redução de explorações de novas jazidas de solo. Os artigos pesquisados neste trabalho mostram os resíduos investigados na área de pavimentação no Chile, Itália, Índia e Iran.

RAPOSEIRAS *et al.* (2016) pesquisaram o comportamento mecânico de mistura asfáltica com adição de escória de cobre e pavimento asfáltico fresado. O Chile maior produtor de cobre do mundo e cada tonelada deste metal gera mais de 50 milhões de toneladas de escória de cobre. A escória de cobre substituiu o agregado graúdo e miúdo com 15, 25 e 35% e o pavimento fresado com 40, 30, 20% para a mistura asfáltica.

Para as misturas asfálticas com escória de cobre a resistência à tração aumentou em média 8% o que mostra a susceptibilidade térmica do comportamento deste material no concreto asfáltico. Para as adições de escória de cobre superiores a 25%, o resultado obtido do Ensaio Marshall é reduzido a valores muito próximos aos gerados por uma mistura tradicional.

O uso de 35% escórias de cobre em misturas com 20% de pavimento asfáltico fresado melhorou o desempenho da mistura asfáltica sem a necessidade de aditivos especiais ou produtos rejuvenescedores, o que aumentou a estabilidade e a resistência à tração.

AUTELITANO e GIULIANI (2016) pesquisaram as propriedades mecânicas e a durabilidade de escória de alto forno para construção de estradas com adição de cimento Portland em camadas de base e sub-base. A Itália é o segundo país da Europa, depois da Alemanha em produção de aço e o resíduo escória de alto forno é problema para o meio ambiente. Entre as conclusões desses pesquisadores podemos citar:

a) Os agregados artificiais, derivados de escórias de fornos de arco elétrico, apresentaram excelentes propriedades físicas e químicas e mostraram bons resultados quando adicionado ao cimento Portland;

b) O procedimento de projeto da mistura, com base na Ho e nos testes mecânicos, determinou o resultado com teor de cimento em 3% para a Ho igual a 6%;

c) Estas misturas registraram ligeiras expansões volumétricas (cerca de 0,5%) e reduções nas resistências mecânicas muito próximas das medidas para a mistura tradicional (solo e cimento).

A pesquisa mostrou a necessidade de um projeto de mistura adequado para equilibrar a percentagem de substituição de agregados naturais e bem concebidas, estas misturas poderiam representar soluções adequadas e duráveis para camadas de base e sub-base, caracterizadas por excelentes desempenhos.

Pesquisa desenvolvida por PRASAD e RAMANA (2016) no Instituto de pesquisa Rodoviária em Nova Délhi na Índia mostrou a viabilidade da escória de cobre

como agregado em reforço de estrutura de solo, com a utilização de geogrelha para estabilizar taludes de corte e aterro. A escória de cobre é classificada como areia de cor escura e peso específico igual a $3,6 \text{ t/m}^3$, contém silicatos de ferro, óxido de cálcio e alumina, com pequenas quantidades de cobre, chumbo, zinco e outros metais.

Os resultados dos testes de esforço de tração com geogrelha incorporadas a escória de cobre indicam haver um potencial significativo para utilização como material de enchimento estrutural e substituir o material de enchimento convencional para estruturas de solo reforçadas. No entanto, devido à angularidade das partículas, é necessário avaliar os fatores de redução de resistência para evitar danos na geogrelha no ato de instalação.

BEHNOOD *et al.* (2015), no Iran, estudaram o revestimento de uma estrada em reconstrução e verificaram os efeitos da escória de cobre e do agregado de concreto reciclado nas propriedades das misturas com: emulsão asfáltica, cinzas de casca de arroz, cimento Portland e cinzas volantes.

Este estudo foi conduzido para investigar a viabilidade do uso de escória de cobre e agregado de concreto reciclado como substitutos do calcário na modificação da graduação de misturas e reciclagem no local frio (com emulsão). Além disso, foram investigados os efeitos de diferentes aditivos como o cimento Portland, cinzas volantes e cinza de casca de arroz nas propriedades mecânicas das misturas reciclagem no local frio com emulsão. Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, são destaques as seguintes conclusões:

- a) A utilização de agregado de concreto reciclado como substituto para o calcário diminui a estabilidade Marshall e a resistência à tração das misturas a frio (emulsão);
- b) Os resultados de Marshall e teste de resistência à tração mostram que o uso de escória de cobre aumenta a estabilidade de Marshall, massa específica aparente e resistência à tração;
- c) A estabilidade Marshall destas misturas pesquisadas foi superior a 8 kN, que é o valor mínimo aceitável para condições de carga pesada;
- d) Os resultados dos testes de MR mostraram que o uso de escória de cobre em misturas a frio melhora o MR da mistura.

2.5 O RESÍDUO DE COBRE SULFETADO: RCS

A intensão desta seção é buscar o conhecimento com as experiências de pesquisadores sobre RCS com objetivo de conhecer os subsídios científicos publicados e

diretamente ligado a problemas com o resíduo de mineração depositado a céu aberto e aproveitar este material para propor tecnologia para a construção de pavimento, que é objetivo do trabalho. Os estudos de casos destacado estão presentes nos seguintes países: Uganda, Chile e Malásia.

PAVEZ *et al.* (2016) pesquisaram o RCS em argamassas para a indústria de construção civil, a fim de reduzir o impacto sobre o meio ambiente na Região de Atacama, no Chile. A avaliação foi realizada por meio de uma comparação técnica entre argamassas preparadas com areia convencional e o RCS.

A análise química quantitativa do RCS, indicou a presença dos mesmos compostos químicos presentes na areia da região do Atacama, Chile. O resultado mostrou ser inerte o RCS.

Estes resultados confirmam que os resíduos aderem facilmente aos elementos com os quais eles têm contato. De acordo com os resultados obtidos neste estudo, a preparação de argamassas com resíduos de cobre substituindo a areia convencional é uma alternativa tecnicamente viável para a indústria de construção civil, o que reduziria o impacto com responsabilidade ambiental (PAVEZ *et al.*, 2016).

Segundo OLUWASOLA *et al.* (2016) a geração anual de resíduos industriais na Malásia é atualmente de aproximadamente 20 milhões de toneladas, que aumenta a uma taxa estimada de 4% ao ano. Cerca de 95% dos resíduos recolhidos são transportados para aterro, e os resíduos restantes são enviados para incineração. Aproximadamente 6% dos resíduos industriais são reciclados, mas o atual governo pretende atingir 25% de reciclagem até 2020.

O trabalho teve como objetivo estudar a adequação da escória de aço, o resíduo de cobre e o cimento asfáltico como materiais de pavimentação asfáltica. As seguintes conclusões específicas foram extraídas com base na análise e discussão dos resultados apresentados:

a) A escória de aço e o resíduo de mineração do cobre satisfazem às especificações para os trabalhos rodoviários da Malásia;

b) Os resultados do estudo mostraram que as amostras com escória de aço e o RCS apresentam baixa resistência à tração, no entanto, ficou claro que a susceptibilidade à umidade pareceu não ser um problema;

c) Os resultados de fluência dinâmica mostram que as misturas contendo escória de aço e resíduo de mineração do cobre são mais superiores e menos suscetíveis a deformação permanente;

d) Especificamente, a mistura com 80% de escória de aço e 20% de RCS apresentou maior resistência à deformação permanente para as amostras não envelhecidas e envelhecidas em comparação com a mistura convencional.

Os resultados promissores deste estudo mostraram que a utilização da escória de aço e o RCS são materiais adequados à pavimentação e podem promover a sustentabilidade de recursos naturais e não renováveis, seu uso reduzirá o custo de construção de estradas e, ao mesmo tempo preservará o meio ambiente.

OLUWASOLA *et al.* (2014) publicaram uma revisão bibliográfica sobre o potencial das aplicações sobre a escória e o resíduo de cobre. Os documentos são relativos ao período de 1978 a 2012.

A visão histórica da aplicação de escória inicia no Império Romano, quando esse agregado era obtido a partir do processamento de ferro bruto para ser usado na construção de estradas. Posteriormente a Inglaterra construiu em 1813 a primeira estrada moderna que utilizou a escória, e seu uso se espalhou mais tarde às Américas.

Os pesquisadores concluíram a revisão com recomendações do potencial de resíduos de escória de aço e o RCS em condições para serem aplicados na indústria e na construção civil e afirmaram ser preocupante que, apesar da enorme quantidade desses materiais, os potenciais e a possibilidade de usá-los como materiais rodoviários não tenham sido suficientemente estudados (OLUWASOLA *et al.*, 2014).

A reciclagem desses materiais, como um substituto do agregado na construção rodoviária, não só reduzirá resíduos sólidos e contaminação ambiental, mas também aumentará a sustentabilidade dos recursos naturais.

2.6 EXPLORAÇÃO DO SOLO E MINÉRIO A CÉU ABERTO

Explorar de maneira sustentável deve ser um princípio aplicado, sem exceção, a atividade de lavra em jazidas, seja mineral ou solo, e seja considerado os horizontes A, B e C, conforme a Figura 2.4, visto que a análise em laboratório é que determina a utilização do solo para camadas do pavimento. Os documentos citados neste item são dos pesquisadores da China, Brasil e Austrália.



Figura 2.4 – Horizontes A, B e C na jazida de coleta.

Segundo LEI *et al.* (2016) a exploração de recursos minerais resulta em destruição de vastas quantidades de terra e causa sérios problemas ambientais. A restauração ecológica e a recuperação de locais explorados e/ou desativados são componentes importantes das estratégias de desenvolvimento sustentável de muitos países. Para os autores, as mudanças na diversidade de espécies vegetais e a sucessão de propriedades físico-químicas do solo foram estudadas em depósitos reflorestados de várias idades (1995, 1998, 2003, 2005 e 2014) e um local nativo serviu de referência para a mina de carvão a céu aberto Heidaigou, localizada na Região Autônoma da Mongólia Interior, na China.

O resultado do reflorestamento mostrou que a recuperação do solo e a recuperação da vegetação são igualmente importantes nas atividades de eco restauração em áreas semiáridas, e a restauração do solo e da vegetação é, portanto, uma questão crucial para os gestores de terras e deve ser considerada no planejamento inicial para a exploração de recursos minerais.

PARADELLA *et al.* (2015) verificaram que instabilidades são comuns na mineração que se tem em Carajás. Movimentos de massas de rocha e deformações de superfície potencialmente levam à instabilidade, inclinação ou falhas da parede, devido às operações de mineração a céu aberto. O colapso de uma encosta pode causar risco para o pessoal e perda de equipamentos, interrompendo a programação com um aumento no custo de produção. Na área de estudo desses pesquisadores, a escavação profunda em rochas de baixa qualidade geotécnica, juntamente com detonação pesada, contribui para instabilidades. Segundo os autores, as instabilidades do solo são monitoradas por uma análise SAR (Synthetic Aperture Radar - DInSAR) integrado com base no dados-stack de 33 imagens Terra SAR-X.

ASAD *et al.* (2016) pesquisaram na Austrália e propuseram uma revisão de modelos para desmonte, com qualidade para exploração de mineração a céu aberto, devido à heterogeneidade da distribuição por tonelada, em diferentes graus de qualidade do depósito, e determinaram que todo o material disponível dentro dos limites de um poço aberto não seja processado no local e que os resíduos sejam claramente identificados.

Pesquisadores australianos realizaram uma investigação sobre o impacto ambiental e social no ato de fechamento de uma mina, o custo associado ao planejamento durante a lavra e a recuperação de recursos naturais, após sua desativação, é objeto de estudo de NEHRING e CHENG (2016) e mostraram que embora o processo ambiental e social após a exploração esteja bem documentado, muitas vezes não é dado o reconhecimento que merece durante as fases de planejamento de início da lavra. O trabalho procurou quantificar o custo que pode ser perdido, se o planejamento de encerramento não considerar, desde o início da fase de exploração e durante a fase de operação da mina, o custo para o seu fechamento.

2.7 PRINCIPAIS RESÍDUOS GERADOS NA REGIÃO DE ESTUDO

Neste estudo, o resíduo mineral é consequência da lavra em minas, então primeiro segue informações sobre a produção mineral no Estado do Pará, a segunda província mineral do Brasil em produtividade, e, conforme planejamento das empresas mineradoras, em 2022 assumirá o primeiro lugar.

Os 8 (oito) principais minérios exportados no Estado do Pará no período de 2012 a 2016 foram: Ferro, Bauxita, Caulim, Manganês, Cobre, Níquel, Silício e Ouro. A extração e processamento de ferro no Estado do Pará, de 2011 a 2016, chegou a 340 milhões de toneladas (Mt), e a extração de cobre totalizou 112 Mt.

As indústrias de mineração e de transformação mineral representaram 86,4% da exportação total do Pará em 2016 (SIMINERAL, 2017). O crescimento da exportação de ferro é destaque na Figura 2.5, de forma simbólica, comparado com outros minerais, ou seja, sem escala para mostrar o quanto é superior.

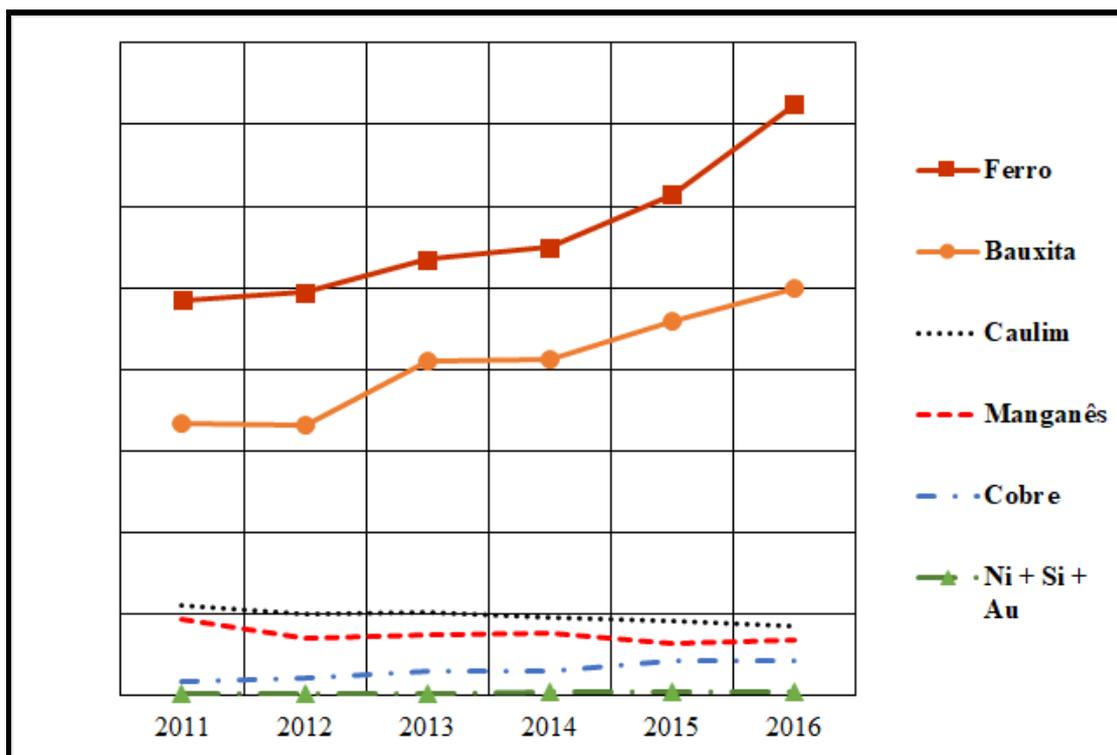


Figura 2.5 – Produção de minérios no Estado do Pará em 2011 – 2016.

Fonte: SIMINERAL, 2017.

A Tabela 2.1 apresenta os 5 principais minérios exportados do Estado do Pará no período de 2012 a 2016. O destaque é para o cobre, pois o resíduo é objeto desta pesquisa que, em 2012, a produção foi de 417 mil toneladas e no ano de 2016 alcançou 840 mil toneladas.

Tabela 2.1 - Principais produtos exportados no Estado do Pará.

	2012	2013	2014	2015	2016	Total	
Ferro	99,00	107,00	110,00	123,00	145,00	584,00	Milhões de toneladas
Bauxita	6,63	8,19	8,23	9,19	10,00	42,24	
Caulim	2,00	2,05	1,92	1,85	1,71	9,52	
Manganês	1,40	1,52	1,55	1,30	1,39	7,16	
Cobre	0,42	0,61	0,62	0,87	0,84	3,36	

Fonte: SIMINERAL, 2012 - 2017

A exportação dos 5 (cinco) principais minérios do Estado do Pará no período de 2012 a 2016 (Ferro, Bauxita, Caulim, Manganês, Cobre) aumentou de 109 milhões de toneladas (2012) para 159 milhões de toneladas (2016), isto representa um acréscimo de 45% (SIMINERAL, 2017), e gerou 472 milhões de toneladas de resíduos. Os resíduos, por mineral com maior exploração no Estado do Pará são:

I – Resíduo gerado devido à lavra de ferro;

Para cada tonelada de minério de ferro é gerado 0,5 toneladas de resíduo constituído principalmente, de rocha basáltica alterada, concreções lateríticas e jaspilito, ou rochas de hematita e sílica amorfa.

Os rejeitos da usina de beneficiamento são constituídos pelos finos do minério de ferro, e, neste processo, os constituintes predominantes são a hematita e a limonita. Os principais componentes são: Fe (65,14%), Al_2O_3 (1,75%), Mn (1%) e SiO_2 (0,52%). Não ocorre a utilização de reagente químico, e o material é depositado em barragem de contenção (SILVEIRA, 2008).

II – Resíduo devido à lavra de bauxita;

As operações em Porto Trombetas é uma das maiores instalações do planeta consistem na extração do minério, beneficiamento, transporte ferroviário, secagem e embarque de navios. A capacidade inicial de produção de bauxita era 3,35 milhões de toneladas anuais. Atualmente, temos uma capacidade de produção instalada de 18 milhões de toneladas ao ano (MRN, 2017).

Em 2017 estão em operação as minas Saracá V, Saracá W e Bela Cruz. O minério está a uma profundidade média de 8 m, coberto por uma vegetação densa e uma camada estéril, composta de: solo orgânico, argila, bauxita nodular e laterita ferruginosa.

Para ser lavrada, a bauxita é decapeada. Esta operação é executada em faixas regulares, onde o estéril de cobertura escavado é depositado na faixa adjacente àquela em que o minério fora anteriormente lavrado. Da lavra, o minério escavado é transportado por caminhões rodoviários até as instalações de britagem, onde é reduzido a uma granulometria de até três polegadas e segue por meio de correias transportadoras para as instalações de lavagem, ciclonação e filtração.

Do processo de beneficiamento, resulta aproximadamente 25% de massa sólida como resíduo de bauxita que após o beneficiamento, é depositada nos reservatórios construídos em áreas mineradas, no platô Saracá (MRN, 2017).

III – Resíduo devido à exploração do caulim;

Embora a atividade mineradora tenha uma grande importância na economia do Estado do Pará, as empresas instaladas na região, devido à produção, geram uma quantidade significativa de rejeito, que é depositado, de diversas formas, no meio ambiente. No Estado do Pará existem três indústrias de beneficiamento de caulim para papel (MAIA *et al.*, 2007).

No caso do beneficiamento de caulim, dois tipos de rejeitos são gerados: o primeiro é basicamente constituído de quartzo, proveniente da etapa de desareamento

(cerca de 10%); já no segundo tipo a quantidade resultante é mais significativa, em torno de 26% da produção bruta, devido ser originado das etapas de centrifugação, separação magnética, branqueamento e filtragem, sendo esse tipo armazenado em grandes lagoas de sedimentação (MAIA *et al.*, 2007).

IV – Resíduo gerado devido a lavra de manganês;

Normalmente, os fluxogramas brasileiros, tanto para o beneficiamento de minérios ricos, quanto para minérios complexos de manganês, consistem, basicamente, de fragmentação e classificação granulométrica, com o descarte da fração abaixo de 0,106 mm, entre 35 a 40% de resíduo (LIMA *et al.*, 2008).

Na composição foram identificados os seguintes minerais de Mn: espessartita (20%), tefroíta (15%), rodonita (5%) e rodocrosita, carbonatos (29%), minerais opacos (16%), micas (6%) e quartzo (4%).

Com a exaustão dos minérios de manganês de altos teores, as indústrias terão que beneficiar minérios cada vez mais complexos e reprocessar os rejeitos de lavagem de minérios ricos, que foram descartados no passado (LIMA *et al.*, 2008).

V – Local e geração do RCS.

O município de Canaã dos Carajás (IBGE, 2016) é o local onde está situada a exploração de cobre do Sossego denominada S11D, onde o beneficiamento do cobre gera o resíduo que é depositado no local com barragem de contenção. Canaã dos Carajás pertence a mesorregião no sudoeste do Estado do Pará, microrregião de Parauapebas. A Figura 2.6 indica a área urbana de Canaã dos Carajás igual a 11.330 m², com destaque para os 14.690 m² do local referente a mina de cobre S11D. A barragem para conter e depositar o rejeito, devido o beneficiamento do cobre, forma um lago equivalente a 8 mil piscinas olímpicas, segundo VALE (2016).



Figura 2.6 – Mina do Sossego: Depósito do RCS.

Fonte: Google maps, 2017.

Uma piscina olímpica mede 50 metros de comprimento e 25 metros de largura, logo, a área ocupada com o lago de rejeito é igual a 10.000.000 m², ou seja, 10 km² onde estão cerca de 112 milhões de toneladas do RCS com um teor de 0,07% de cobre. Conforme DNPM (2017) a altura total da barragem do Sossego é de 266,60 m para um volume total de 131.760.000 m³, em 2016, a altura ocupada por resíduo era de 42,10 m, com 20 milhões de metros cúbicos de dejetos.

A britagem primária é alimentada com os minérios provenientes das minas de Sossego e de Sequeirinho. O minério britado é conduzido, por intermédio de um sistema de transportadores de correia de longa distância até a pilha de estocagem de minério britado, que está localizada perto das instalações de beneficiamento.

No caso particular da mineração, um dos aspectos potencialmente causador de impactos ambientais relevantes é a geração de grandes volumes de rejeito, que comumente são dispostos no ambiente, em barragens ou “bacias”. A mina do Sossego, por exemplo, onde são beneficiados anualmente cerca de 11,5 milhões de toneladas de minério de cobre sulfetado, com teor médio em torno de 1%, e produzidos cerca de 450 mil toneladas de minério concentrado a 30%, a geração de rejeito é da ordem de 11 milhões de toneladas por ano (MULLER e CASTRO FILHO, 2008).

Os valores dos resíduos apresentados na Tabela 2.2 consideram a produção de cada minério no período de 2012 a 2016 (SIMINERAL, 2012 - 2017) estimado com o

índice gerador de resíduo obtido para os cinco principais minérios exportados no Estado do Pará: Ferro, Bauxita, Caulim, Manganês e Cobre.

Tabela 2.2 - Principais resíduos gerados com a indústria de mineração do Pará.

	2012	2013	2014	2015	2016	Total	
Ferro	49,50	53,50	55,00	61,50	72,50	340,50	Milhões de toneladas
Bauxita	1,66	2,05	2,06	2,30	2,50	12,22	
Caulim	0,72	0,74	0,69	0,67	0,62	4,22	
Manganês	0,56	0,63	0,62	0,52	0,56	3,65	
Cobre	12,57	18,29	18,78	26,31	25,32	112,26	
Total	65,00	75,21	77,14	91,29	101,49	472,85	

Fonte: SIMINERAL, 2013 - 2017.

Em 2012 o resíduo gerado com a exploração do cobre sulfetado foi de 12,57 milhões de toneladas, com o aumento de produção em 2016 o resíduo atingiu 25,32 milhões de toneladas. O total de resíduo sulfetado gerado no período de 2012 – 2016 foi estimado em 112,26 milhões de toneladas. A participação dos 5 principais resíduos é representada em porcentagem na Figura 2.7.

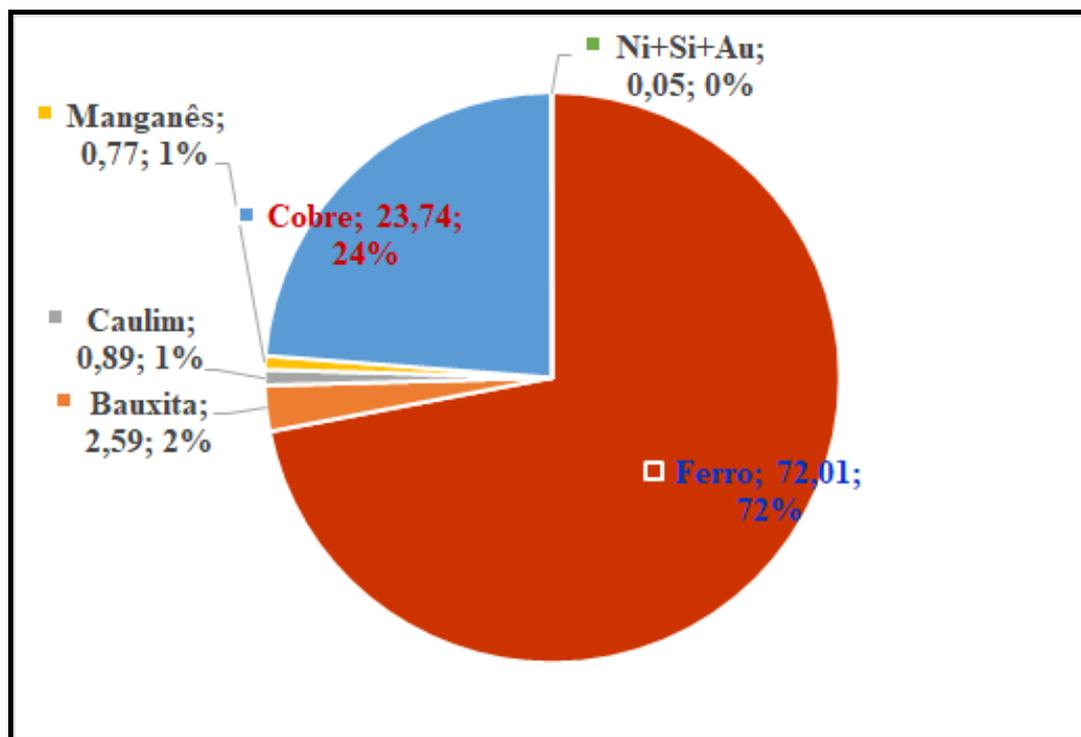


Figura 2.7 – Principais resíduos no Estado do Pará em 2011 a 2016.

Fonte: SIMINERAL, 2013 - 2017.

O crescimento dos cinco principais resíduos minerais no período de 2012 a 2016 aumentou de 65 milhões de toneladas (2012) para 101 milhões de toneladas (2016) isto representa um aumento estimado de 56% em 5 anos, ou seja, tem-se em média 82 milhões de toneladas por ano de resíduos depositados a céu aberto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é descrito como a escolha dos materiais e o procedimento experimental realizado sobre a mistura experimental de dois solos das camadas ou Solo do horizonte C ou terceira camada (SHC) e Solo do horizonte B ou segunda camada (SHB) com Resíduo do cobre sulfetado (RCS) destinados à construção de base e sub-base de pavimento asfáltico.

3.1. O SOLO E A JAZIDA PESQUISADA

Com objetivo de testar o comportamento de solo e determinar as características, foram realizadas coletas de solos SHC e SHB coletados da mesma jazida em função de sua coloração, da sua gênese e do horizonte a que pertencem. O solo SHB varia de um amarelo claro ao amarelo escuro e o solo SHC possui tom rosa.

O perfil do solo em que aconteceu a coleta de amostra para análise preliminar tem a representação esquemática na Figura 3.1.

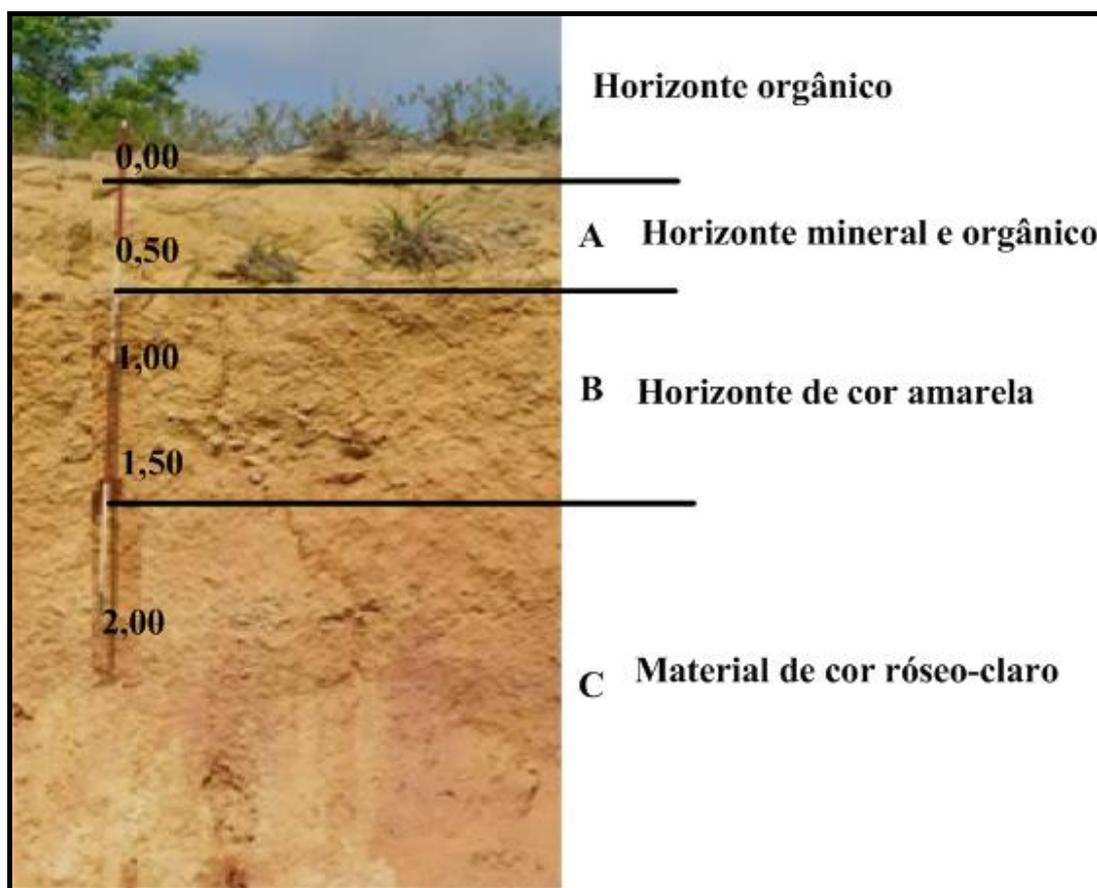


Figura 3.1 – Representação das camadas da jazida de coleta dos solos.

A jazida da Figura 3.1 é explorada pela empresa construtora como fonte de material de construção para sub-bases e bases.

O solo estudado neste trabalho (Figura 3.2) é oriundo da jazida denominada Begot, localizada no município de Marituba, Estado do Pará, Amazônia, Brasil. A distância por via terrestre pela BR - 316 entre o centro de Belém e a cidade de Marituba é de 23 km; sendo o acesso pela BR-316, via estrada da Pireli, de 3 km, próximo ao cemitério Parque das Palmeiras, até a entrada do ramal, e mais 1,3 km até a entrada do ramal à jazida (Figura 3.2).

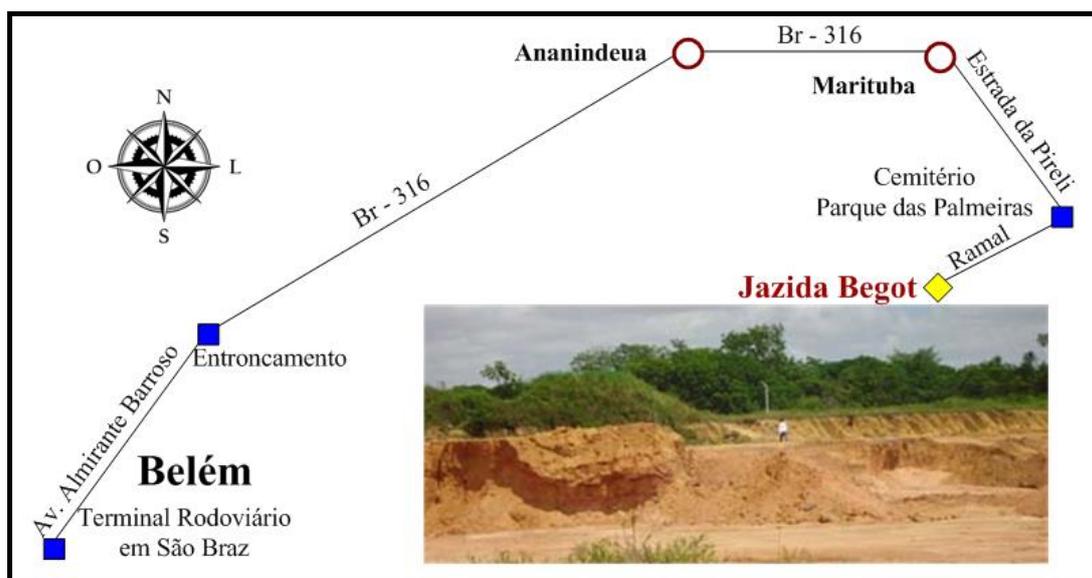


Figura 3.2 - Jazida Begot, Marituba - Pará. Local de coleta do solo.

Os fatores determinantes para a escolha da jazida Begot foram:

- A proximidade com a UFPA e o laboratório da UFPA para ter o menor custo de transporte e facilitar a coleta;
- O consentimento para a coleta do solo fornecido pela construtora e pelo proprietário da jazida;
- A mistura SHC de Marituba mais areia branca de cava é aplicada em camadas de sub-base de pavimentos na RMB.

A distinção dos horizontes na jazida aconteceu sem dificuldade e a classificação confirmada a partir da metodologia MCT para os solos finos lateríticos arenosos e argilosos. As amostras para o SHB foram recolhidas entre alturas que variaram de 1,00 a 1,50 metros, para o SHC entre as alturas de 2,00 a 2,50 metros a jazida estava e continua em exploração constante o que facilitou o desmonte com auxílio de retroescavadeira (Figura 3.3) cedida pela construtora responsável pela jazida.

Para a coleta e transporte do solo foram utilizados um veículo tipo caminhonete, pá, enxada, saco e balde plástico. As amostras dos solos SHC e SHB foram coletados em um total de 200 quilos para cada tipo de solo.



Figura 3.3 - Desmonte com retroescavadeira e coleta de amostra.

As amostras, de aproximadamente 30 kg em cada balde para facilitar o transporte e carga e descarga no veículo e manuseio no laboratório, foram ensacadas e identificadas e em seguida transportadas ao laboratório de Engenharia Civil - UFPA.

A posição da coordenada geográfica (Figura 3.4) foi obtida por meio de aparelho da marca Garmin, modelo GPS72 com auxílio de navegação do sistema *Global Positioning System* (GPS).

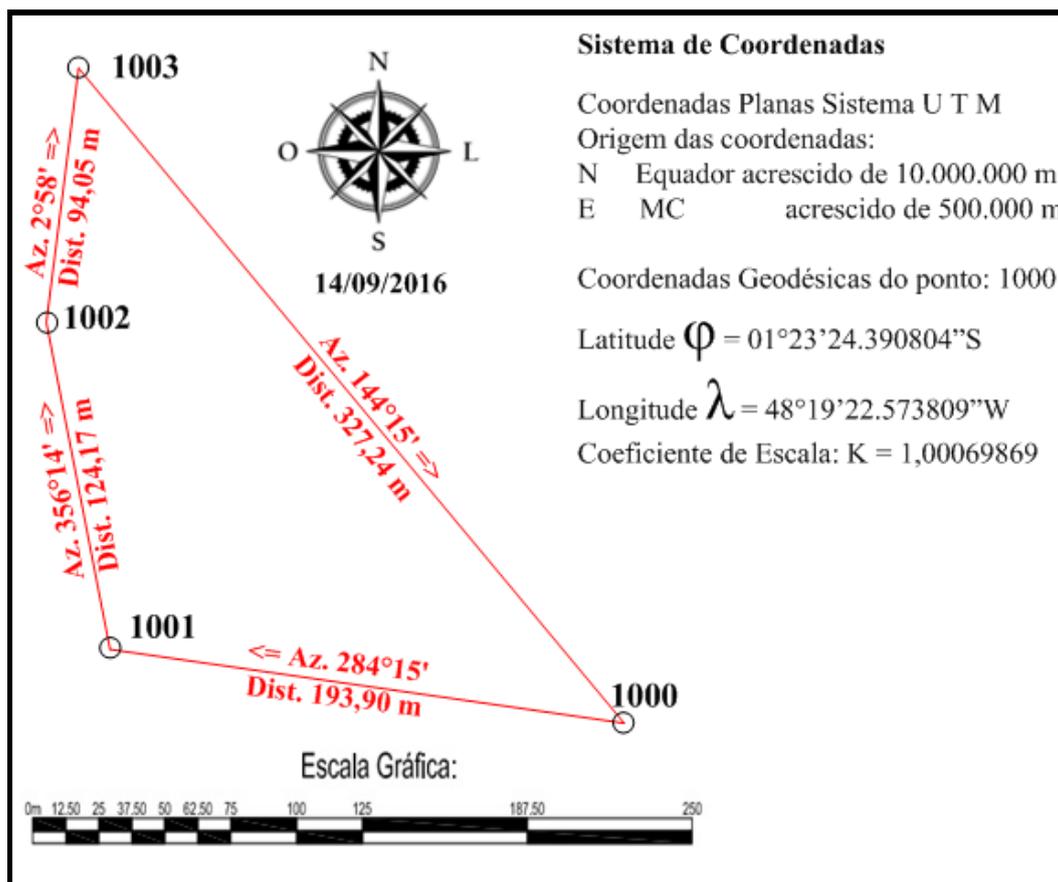


Figura 3.4 – Coordenadas geodésicas para a jazida Begot.

Fonte: AGUIAR, 2016.

As coordenadas do ponto inicial da jazida são: $01^{\circ}23'24.390804''S$ $48^{\circ}19'22.573809''W$. Após todos os pontos (1000, 1001, 1002 e 1003) serem identificados com suas coordenadas foi calculada a área da jazida em condições de exploração e fornecimento de solo para construção em $21.106,00 \text{ m}^2$. O volume estimado com espessura da camada de 1,00 m, para o solo SHB revelou ser de 21.106 m^3 e o volume para o solo do solo SHC com espessura de 1,50 m igual a 31.659 m^3 .

3.2 O RESÍDUO DO COBRE SULFETADO

O presente estudo utilizou o RCS com origem do projeto mineral S11D pertencente a Companhia Vale do Rio Doce, localizado no município de Canaã dos Carajás, Pará, Brasil (Figura 3.5), neste local a empresa atua na exploração do minério de cobre, processo de lavra a céu aberto.

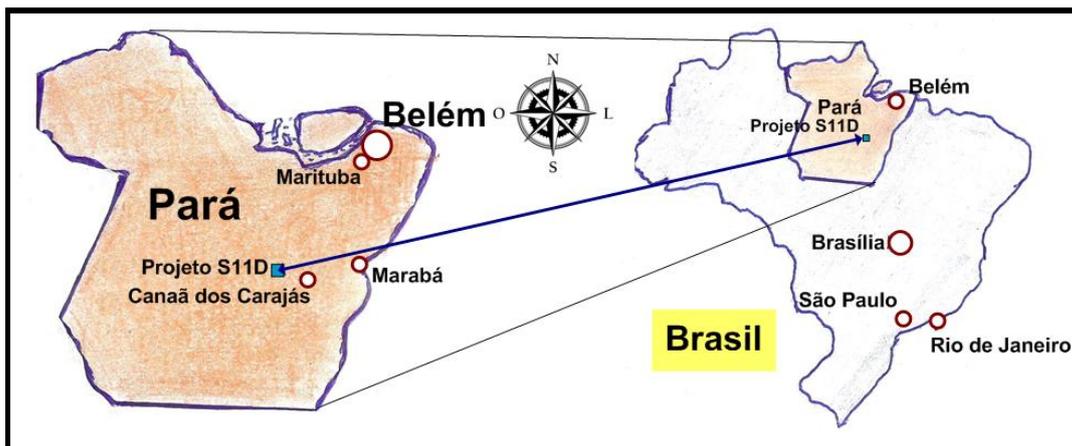


Figura 3.5 - Situação geográfica: Projeto S11D.

O resíduo da mineração de cobre resulta do processo de extração a céu aberto, em que a rocha é submetida à britagem, moagem, flotação e, para extrair o cobre existente nas rochas, as amostras são colocadas sobre uma base impermeabilizada a céu aberto, ligada a um sistema de drenagem.

A britagem primária é alimentada com os minérios provenientes da mina do Sossego. O minério britado é conduzido para a usina, através de um sistema de transportadores de correia de longa distância até a pilha de estocagem de minério britado, que está localizada perto das instalações de beneficiamento (MULLER e CASTRO, 2008).

As instalações de beneficiamento consistem em um circuito de cominuição (moagem primária SAG, rebitagem e moagem de bolas), flotação (células mecânicas para a flotação *rougher* e flotação *scavenger* do *cleaner* e colunas para a flotação *cleaner*), remoagem do concentrado *rougher* (moinhos verticais), espessamento e filtragem do concentrado, sistema de estocagem de concentrado (pilha cônica com de cerca de 5.000 t, em galpão fechado). As etapas do beneficiamento do minério de cobre são ilustradas na Figura 3.6, após a lavra.

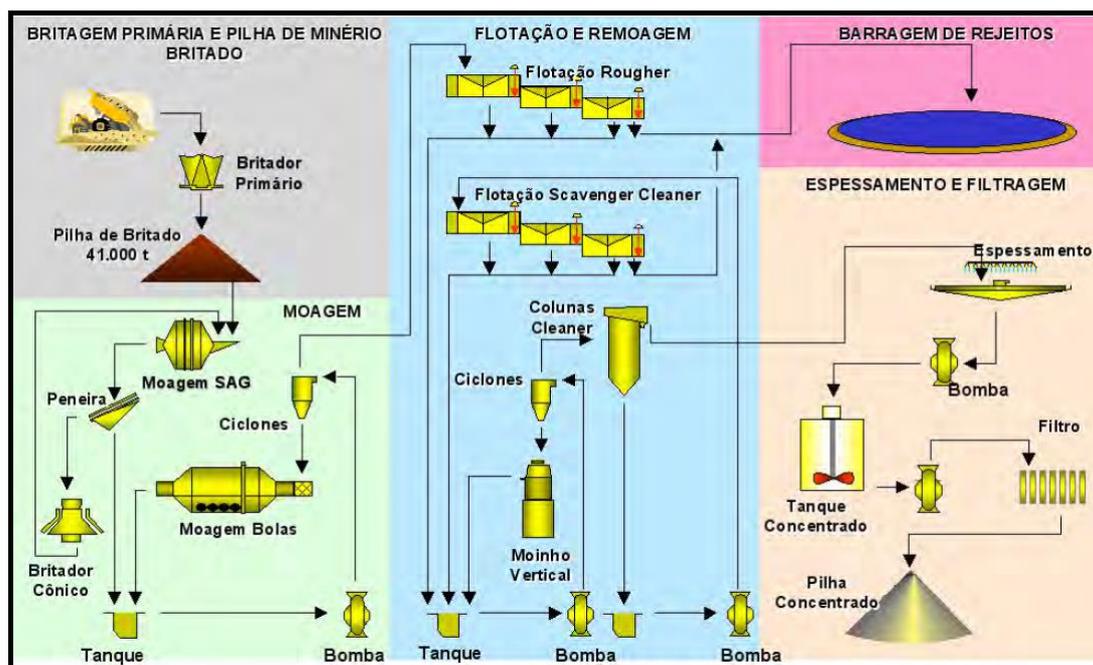


Figura 3.6 - Etapas do beneficiamento do minério de cobre.

Fonte: SHIMIZU, 2012.

O material proveniente da mineração do cobre sulfetado como um resíduo sólido, que resulta de atividade de origem industrial cujo lançamento na rede pública de esgoto é inviável e deve ser depositado a céu aberto. Segundo a mesma norma técnica o resíduo utilizado nesta pesquisa é o de nível classe II-B (inerte).

Uma solução de água com ácido sulfúrico é lançada sobre as rochas, resulta na obtenção de 1% de cobre, portanto, 99% de resíduo que resta da rocha é depositado na barragem da mina do Sossego, localizada em Canaã dos Carajás, com média de 11 milhões de toneladas/ano depositados.

As amostras do RCS utilizadas neste trabalho foram cedidas pela Companhia Vale do Rio Doce (VALE) ao Laboratório de Engenharia Química/UFPa, e o ato da coleta foi feita pelos próprios técnicos da VALE em tambor plástico de 100 litros com tampa removível.

O peso total de 100 quilos da amostra do RCS foi solicitado aos pesquisadores do Curso de Engenharia Química e dividido em cinco tambores de 20 litros e condicionados em sacos plásticos a fim de evitar perda da porção fina, contaminação com outros materiais existentes no laboratório e facilitar o deslocamento durante os ensaios laboratoriais.

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No presente estudo os ensaios de caracterização dos materiais (Granulometria, Limites de Atterberg, Densidade Real, Umidade Higroscópica, Equivalente de areia), Energia de compactação e Índice de Suporte Califórnia foram realizados no laboratório de Engenharia Civil / UFPA. O ensaio Triaxial de cargas repetidas foi realizado no Laboratório de Geotecnia e Pavimento - COPPE/UFRRJ. A classificação dos solos se deu de acordo com a metodologia MCT que foi desenvolvida no laboratório de Mecânica dos Pavimentos / UFC e COPPE/UFRRJ. Os Ensaios Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV/EDS aconteceram no Laboratório de Engenharia Química / UFPA. Enquanto laboratório de Eco-compósitos, da Faculdade de Engenharia Mecânica / UFPA, realizou os ensaios com DR-X.

3.4. PREPARO DOS SOLOS, RCS E MISTURA

A preparação dos solos SHB, SHC e do RCS para os ensaios envolveu procedimento de secagem ao ar (Figuras 3.7-9) para diminuir a umidade excessiva, devido a coleta dos solos ter acontecido no mês de março época de chuva na região e o RCS ter sido coletado no lago formado pela barragem e condicionado no tambor plástico e enviado diretamente para Belém.



Figura 3.7 – Solo SHC secagem ao ar.



Figura 3.8 – Solo SHB secagem ao ar.

No decorrer do preparo dos solos aconteceu a homogeneização e destorroamento para tornar o solo uniforme. Os solos coletados na jazida com ajuda da retroscavadeira apresentaram torrões com dimensões entre 5 a 15 cm, e para uniformizar houve necessidade de destorar. O solo SHC após a secagem e homogeneização apresentou ser um solo fino laterítico (SFL) de cor rosa (Figura 3.7), e o solo SHB um SFL de cor amarela-marrom (Figura 3.8).



Figura 3.9 – O RCS no processo de secagem ao ar.

O RCS ao ser entregue no laboratório, devido a quantidade de água que o envolvia, apresentou os grãos aglomerados com dimensões entre 2 a 10 cm, após a secagem e homogeneização apresentou cor rosa-cinza e pulverizado.

Após a secagem ao ar os grãos aglomerados foram desagregados no almofariz com a mão de gral recoberta de borracha para não reduzir o tamanho natural dos grãos individuais das amostras dos solos SHB, SHC e RCS. O procedimento ilustrado (Figura 3.10) foi feito para o SHC e para o SHB e RCS.



Figura 3.10 – Solo SHC: Secagem ao ar, desagregado no almofariz e depositado no balde.

Os materiais voltaram a ser organizados em sacos e tambores, com capacidade de 20 litros, devidamente fechados e identificados para a realização dos ensaios, de acordo com os métodos de ensaios do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

O preparo de mistura do RCS com solo aconteceu após o ensaio de granulometria dos solos e equivalente de areia, por ser o RCS um granito, ou seja, areia, o ponto de mistura seria verificar o percentual de argila e silte existentes nas amostras de solo. A sugestão é que quanto maior a fração de argila e silte existir no solo a ser misturado com o RCS maior será o consumo de RCS. Os percentuais adotados (Tabela 3.1) de início

foram de 50% de solo e 50% de RCS, devido o solo apresentar fração de areia superior a 40% e ao ser adicionado o RCS a mistura passou a ter maior fração de areia.

Tabela 3.1 – Preposição dos materiais, misturas e símbolos.

Mistura	Material	SHC (%)	SHB (%)	RCS (%)	Símbolo
Solo horizonte C		100	-	-	SHC
Solo horizonte B		-	100	-	SHB
Resíduo de cobre sulfetado		-	-	100	RCS
Mistura 1		50	-	50	50SHC+50RCS
Mistura 2		-	70	30	70SHB+30RCS
Mistura 3		-	50	50	50SHB+50RCS

Os primeiros ensaios ocorreram com as amostras de 50% solo do horizonte C (SHC) e mistura de 50% do RCS. No segundo momento aconteceram ensaios com solo do horizonte B (SHB) e mistura com o RCS. A Tabela 3.1 apresenta o procedimento adotado, com o solo *in natura*, resíduo e mistura de solo com o resíduo. As misturas dos materiais foram executadas de forma manual.

3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

As amostras de SHB (200 kg), SHC (200 kg) e RCS (100 kg) por meio de quarteamento (Figura 3.11) foram manuseadas com enxada, colher e trincha, e por ser material fino sem pedregulho foram tomados 1500 g de cada amostra para ser representativa nos ensaios de caracterização (DNER – ME 091/94).



Figura 3.11 - Procedimento manual para o quarteamento dos materiais.

A primeira fração maior que 2,00 mm (#10) serviu para o ensaio granulométrico a segunda fração menor que 2,00 mm por meio de quarteamento foram obtidas 350 g por eventualidade de se ter réplicas para os ensaios:

- a) 2 cápsulas com 50 g para determinação de umidade higroscópica;
- b) Uma cápsula com 120 g para análise granulométrica;
- c) 2 cápsulas com 50 g para determinação da densidade.

A segunda fração das 1500 g que passou na peneira 2,00 mm (#10) e passante na peneira com 0,42 mm (#40) foram quarteadas, para a realização dos ensaios limites de Atterberg: 100 g para limite de liquidez e 50 g para limite de plasticidade. A fração retida na peneira 0,42 mm (#40) foi descartada dos ensaios.

A Tabela 3.2 apresenta a lista destes ensaios que foram realizados com os métodos do DNIT/DNER para a caracterização do solo e misturas: análise granulométrica, limites de Atterberg, densidade, e umidade higroscópica.

Tabela 3.2 – Parâmetros e método de ensaio de caracterização.

PARÂMETRO	MÉTODO DE ENSAIO
Granulometria	DNER-ME 051/94
Limite de Liquidez	DNER-ME 122/94
Limite de Plasticidade	DNER-ME 082/94
Índice de Plasticidade	DNER-ME 082/94
Densidade real	DNER-ME 093/94
Umidade higroscópica	DNER-ME 213/94

O ensaio equivalente de areia (DNER-ME 054/97) considerado nesta etapa de caracterização aconteceu pela necessidade de avaliar a fração de areia e iniciar o procedimento de mistura com o RCS por ser um granito 100% de fração areia.

3.5.1 Análise Granulométrica

Este ensaio incluiu o processo do peneiramento e sedimentação. O preparo das amostras seguiu o método DNER-ME 041/94 Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização. A fração total de amostra seca ao ar e retida na peneira de 2,00 mm (#10) foi lavada, para eliminar a parte fina e levada a estufa a temperatura de 105 a 110 °C até o peso ficar constante.

As amostras de solo, RCS e mistura foram submetidas ao ensaio normalizado para a análise de tamanho de partícula, de acordo com DNER-ME 051/94 Solos – Análise granulométrica conjunta, ou seja, peneiramento e sedimentação, visto que as amostras apresentaram fração grossa e expressiva fração fina. O ensaio de granulometria possibilitou a representação em curva a classificação em: areias (grossa, média e fina), silte e argila.

3.5.2 Índices físicos

Ensaio de caracterização geotécnica, considerados nos limites de Atterberg (Limite de liquidez, Limite de plasticidade e Índice de plasticidade), foram realizados

para caracterizar os solos SHC, SHB e o resíduo RCS de acordo com os métodos do DNIT/DNER em vigência, novembro 2017.

O método de ensaio DNER-ME 122/94, para o limite de liquidez ajustado a solos brasileiros, cujos limites não excedam a 150%. O limite de liquidez marca a transição do estado plástico ao estado líquido. É representado por LL, expresso em porcentagem.

Por meio da relação dos teores de umidade, marcados em abscissas, com os números de golpes correspondente, marcados em ordenadas resultou na representação gráfica da curva de fluidez. O LL é expresso pelo teor de umidade correspondente a interseção da ordenada relativa a 25 golpes com a linha dos pontos do gráfico.

O limite de plasticidade seguiu o método de ensaio do DNER-ME 082/94, é expresso pela média dos 3 teores de umidade obtidos. O índice de plasticidade é determinado pela diferença numérica entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade.

Os materiais RHC, RHB e RCS foram separados em porções para realização dos limites de Atterberg, a Figura 3.12 (a) mostra o SHC e (b) RCS condicionados em bandejas para execução dos ensaios.

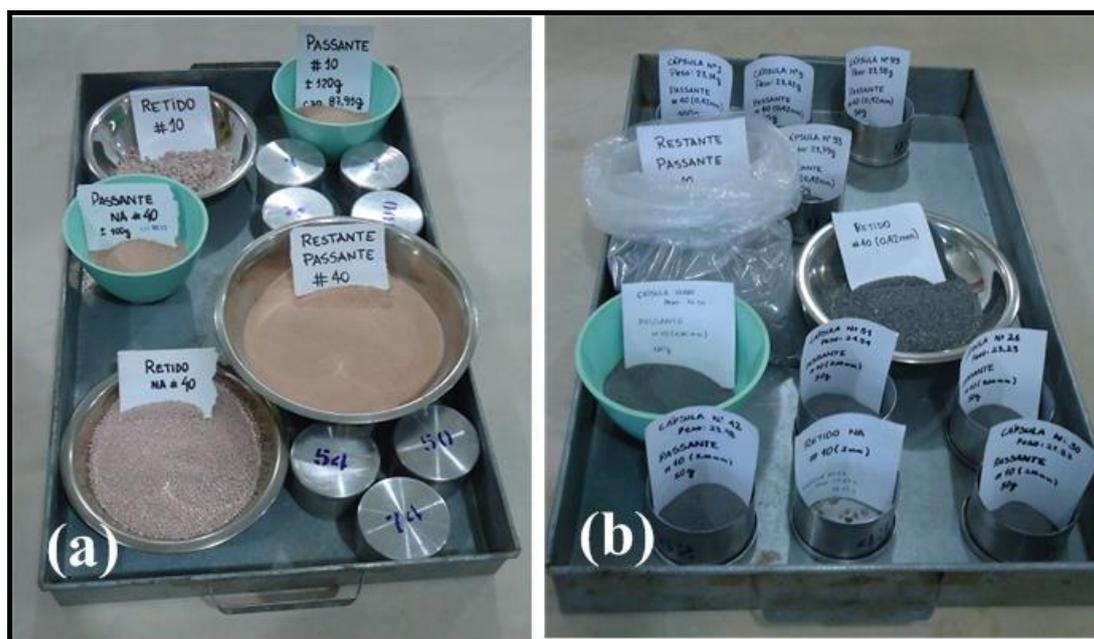


Figura 3.12 – Amostra SHC (a) e (b) RCS em bandejas para execução dos ensaios.

O RCS apresentou em sua composição a ausência de características plásticas, consequentemente os limites de Atterberg para o RCS não puderam ser determinados.

A Figura 3.13 mostra a sequência do ensaio para verificação dos limites para o RCS.

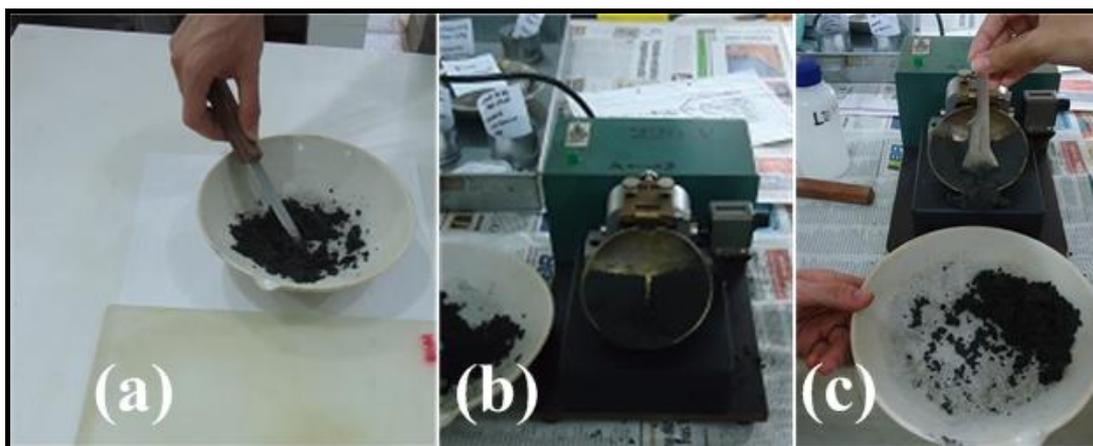


Figura 3.13 – Verificação dos limites para o RCS, não plástico.

O ensaio de equivalente de areia (EA) é a relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo, ou de agregado miúdo, em uma proveta, e decorreu conforme o método do DNER-ME 054/97, para determinar a areia presente no SHC, SHB e RCS.

O equipamento (Figura 3.14), utilizado para agitar a amostra é elétrico, com velocidade constante, possui contador de golpes e desligamento automático e o ensaio EA precisou de bastante atenção devido a turbidez causada pelo solo (Figura 3.15).



Figura 3.14 - O SHB no agitador de proveta.



Figura 3.15 - Ensaio com o material SHB.

A amostra para o ensaio dos materiais foi obtida com tamanhos de partículas menores do que 4,8 mm (#04) e o conjunto foi agitado com movimento alternado horizontal de 90 ciclos.

3.5.3 Ensaio de compactação e Índice de Suporte Califórnia

Os ensaios de compactação para os materiais, solo e resíduo de cobre, foram realizados de acordo a norma DNIT 164/2013 – ME e foi considerada a energia de compactação Proctor Intermediária, para determinar a massa específica seca máxima e de umidade ótima dos solos com energia intermediária para fração de solo, RCS e misturas

que passaram na peneira de 19 mm (#3/4"). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Pará – UFPA.

A Figura 3.16 ilustra a moldagem do corpo de prova.

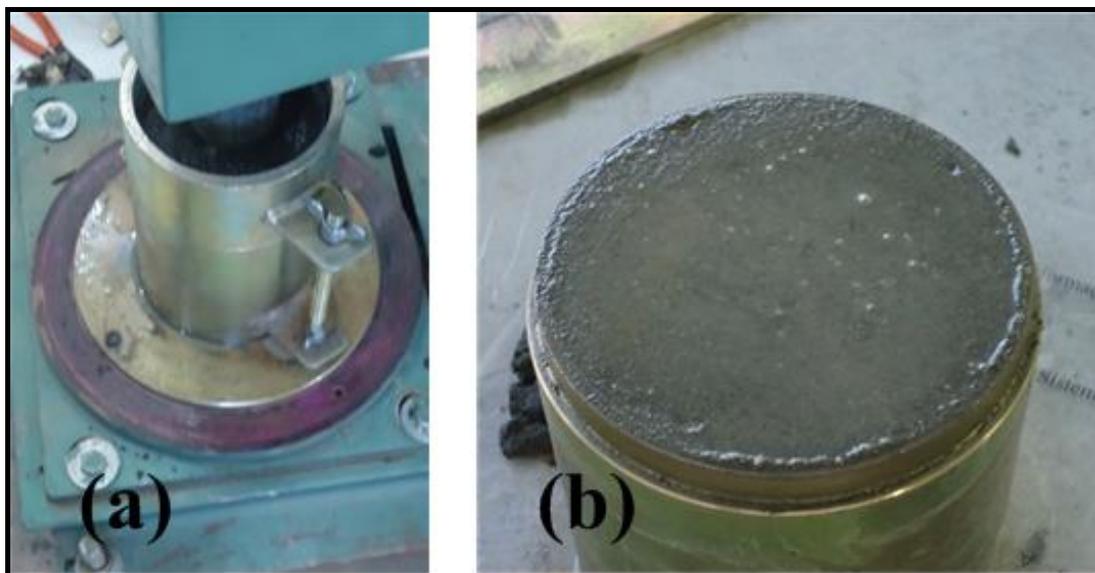


Figura 3.16 – Corpo de prova do RCS (a) Compactação e (b) Moldagem completa.

Na Figura 3.6 1 se determinou a correlação entre o teor de umidade e a massa específica para o RCS, os solos SHC e SHB.

A Figura 3.17 (a) é o RCS e a Figura 3.17 (b) o SHC fora do cilindro.

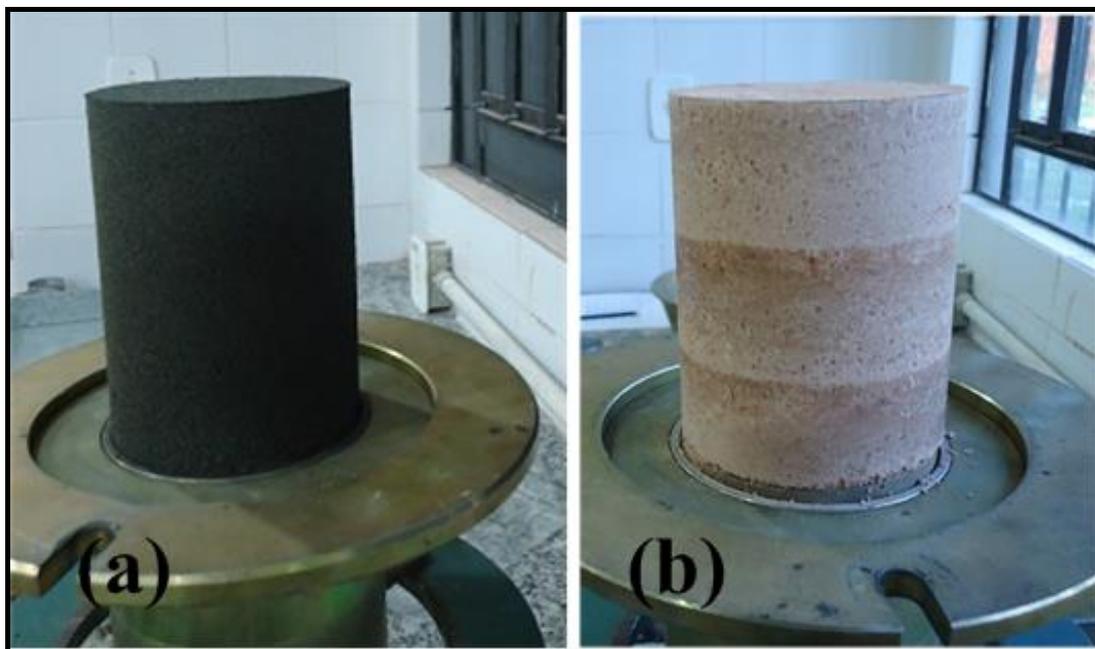


Figura 3.17 – Corpo de prova (a) RCS e (b) SHC.

A determinação da umidade ótima para os materiais SHC, SHB, RCS e misturas, possibilitou os ensaios de ISC com procedimento descrito no método DNER-ME-049/94

para determinação com amostras não trabalhadas para umidade ótima e energia intermediária de compactação.

3.5.4 Classificação MCT

Os primeiros ensaios para classificação MCT para a Mistura 1 (50SHC+50RCS) foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ, em junho de 2016 com amostra do SHC, segundo o método DNIT/DNER-ME 258/94.

As amostras para o ensaio MCT consideraram o material passante na peneira de 2,0 mm (#10) com corpos de prova miniatura, compactados. A Figura 3.18 mostra a Mistura 1 (50SHC+50RCS) durante o ensaio de Perda de Massa por Imersão no laboratório da COPPE/UFRJ.



Figura 3.18 – Mistura 1 (50SHC+50RCS): Perda de Massa por Imersão.

Em 2017 para os materiais SHC, SHB, RCS e misturas, para a Classificação MCT os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará.

Os ensaios para a classificação segundo a metodologia MCT, desenvolvida por NOGAMI e VILLIBOR, foi aplicada para os materiais SHC, SHB, RCS e misturas com objetivo para diferenciar o comportamento laterítico ou não-laterítico.

3.5.5 Módulo de Resiliência (MR) – Ensaio Triaxial de cargas repetidas

Os ensaios, para determinar o MR dos solos, resíduo e misturas, foram determinados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ, segundo a norma DNIT 134/2010 – ME. O método tem como objetivo determinar os valores do MR de solos com variação de tensões aplicadas, com equipamento triaxial de carga repetida em que se calculam as tensões e deformações produzidas. O estado de tensões em um elemento do subleito, ou de camadas do pavimento, varia com a posição da carga.

A Figura 3.19 (a) mostra o corpo de prova do RCS para ser submetido ao teste triaxial de carga repetida utilizado no presente estudo e ao lado após o ensaio, Figura 3.19 (b). As Figuras 3.19 (a) e 3.19 (b) apresentam o ensaio com o mesmo corpo de prova utilizado após o ensaio triaxial.

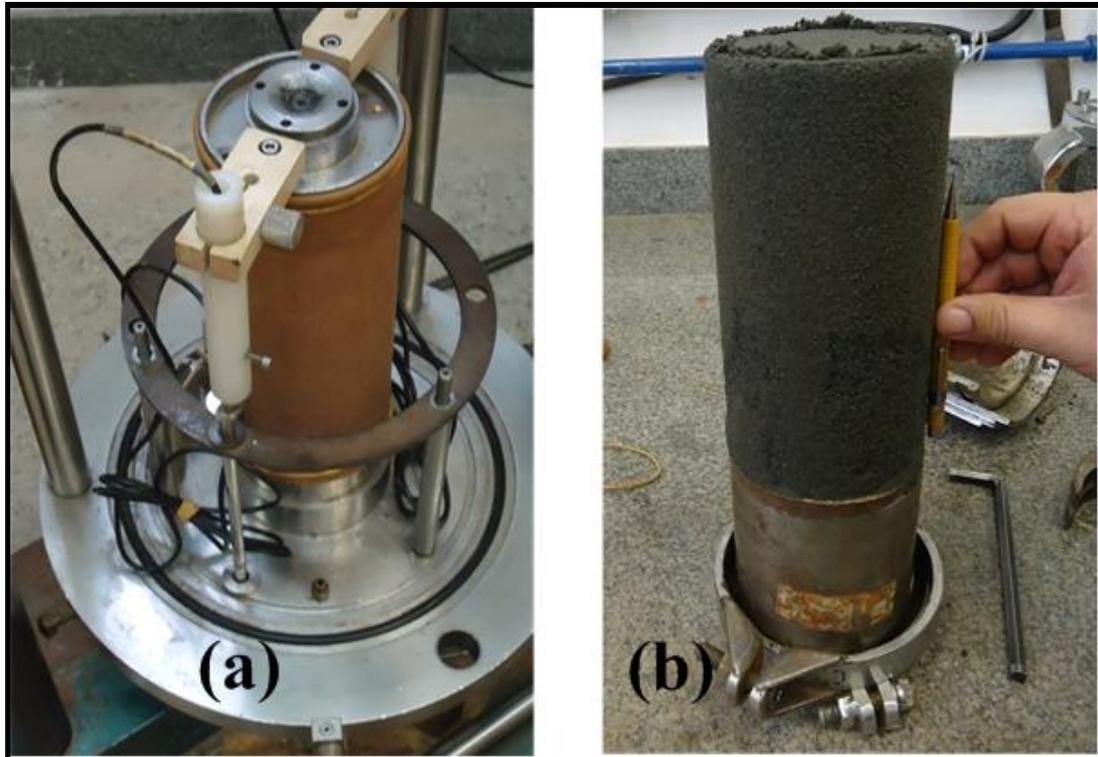


Figura 3.19 – Ensaio triaxial (a) Corpo de prova do RCS e (b) após o ensaio.

O ensaio para determinar o MR é descrito conforme o fluxograma apresentado na Figura 3.20.

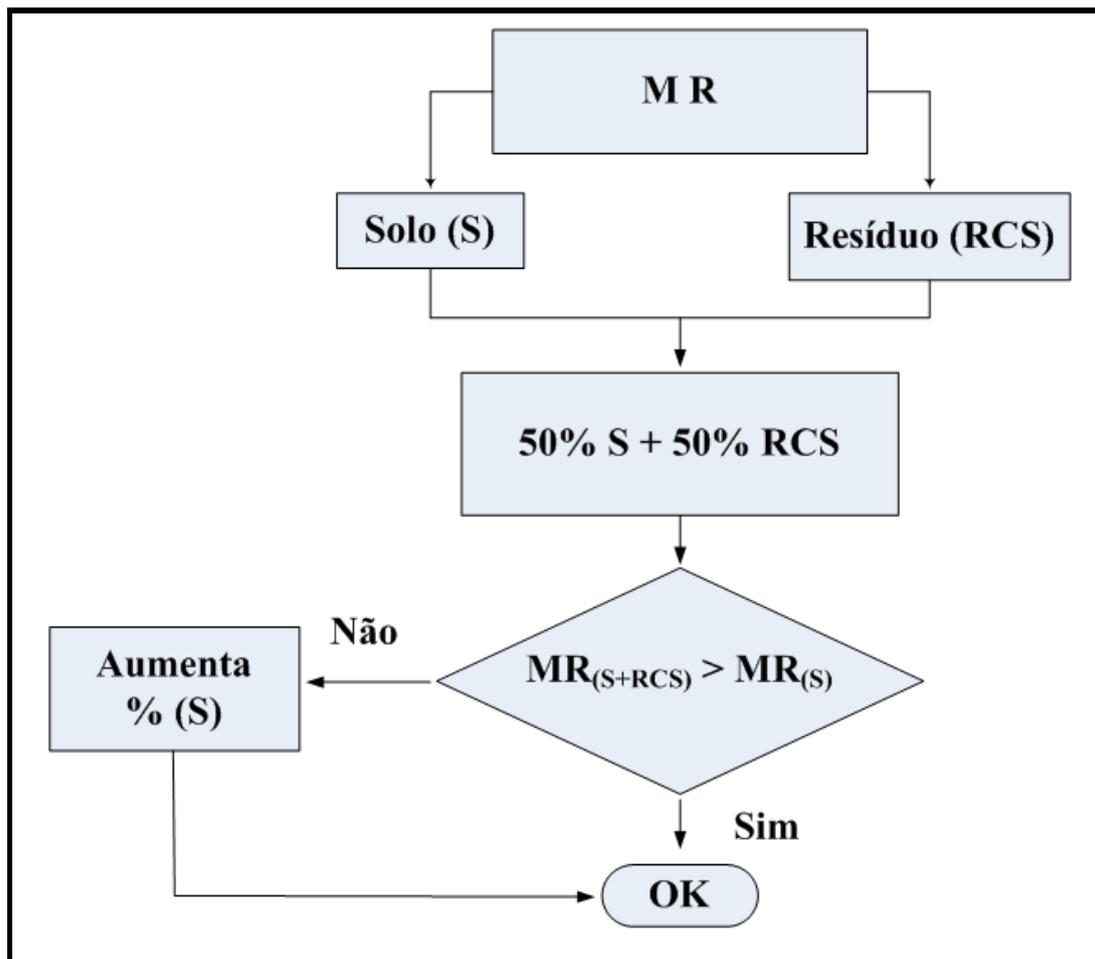


Figura 3.20 – Fluxograma para determinação do MR.

Foram utilizados corpos de prova de 10 cm de diâmetro com altura de 20 cm, moldados a umidade ótima e compactados com energia intermediária do ensaio Proctor. Este ensaio constou de duas etapas, sendo a primeira de condicionamento do material para diminuir os efeitos da deformação plástica e a segunda foi a realização do ensaio com o corpo de prova em confinamento com aplicação dos pares de tensões confinantes.

O ensaio triaxial de cargas repetidas para obtenção do MR é constituído por duas etapas: a primeira, de condicionamento, na qual a amostra deve ser submetida a carregamentos repetidos variados, de forma a eliminar, ao máximo, o efeito da história de tensões sofridas, suprimindo as deformações permanentes iniciais, e a segunda, para obter o parâmetro de interesse denominado de módulo de resiliência. Nesta última se aplicam pares de tensões, medindo as deformações resilientes e, após a conclusão do ensaio, por regressão, é feito o cálculo das constantes, dos modelos de MR.

3.5.6 Ensaio Difração de Raios x e Grau de Acidez - pH

As amostras dos solos, resíduo e mistura solo+resíduo foram analisadas no estado *in natura*, ou seja: nenhum pré-tratamento aconteceu para serem analisadas. Os materiais foram destorroados e foram coletadas a fração passante na peneira 0,075 mm (#200).

As amostras para a Difração de raios x (DRX) foram preparadas com a fração passante na peneira 0,075 mm (#200) e devidamente acondicionadas em sacos plásticos (Figura 3.21) e levadas aos laboratórios. A escala da Figura 3.21 é igual a 30 cm.



Figura 3.21 – Amostras dos materiais para análise DRX e pH.

A difração de raios x (DRX), nesta pesquisa, aconteceu no laboratório de Eco-compósitos, da Faculdade de Engenharia Mecânica – UFPA, para determinar a composição química com o objetivo qualitativo, com registro gráfico em um equipamento da Bruker, modelo D2- Phaser (Figura 3.22).



Figura 3.22 – Equipamento Bruker, modelo D2. Figura 3.23 – pHmetro utilizado no laboratório.

O espectro completo de raios x obtido para o estudo com tubo de raios x com alvo de cobre, operou a 30 kV e 10 mA e com comprimento de onda $\lambda_{CuK\alpha} = 1,5406\text{\AA}$.

As amostras foram examinadas no intervalo de 2θ entre 0 e 60°, a uma taxa de varredura de 8°/min. A aquisição de dados foi feita com o software X'Pert Data Collector,

versão 2.1a, e o tratamento dos dados com o software X'Pert HighScore versão 2.1b, também da PANalytical. Essa técnica é empregada para verificar a intercalação das cadeias poliméricas nas galerias da argila através da sua expansão interplanar basal e portanto, investigar a morfologia dos nanocompósitos obtidos.

No ensaio para determinar o pH do solo, resíduo e mistura, foram pesadas 10 g de solo seco. Ao pHmetro (Figura 3.23) devidamente calibrado, com o auxílio de uma proveta volumétrica foram adicionadas uma alíquota de 25 ml de água destilada em cada amostra de solo e mistura após compactação. Após 30 minutos de agitação as amostras foram deixadas em descanso, por 30 minutos, e adquiriram um aspecto bifásico que permitiu se diferenciar, nitidamente, o solo e o resíduo (sedimentados) e a água destilada, Figuras 3.24 e 3.25.



Figura 3.24 – Amostra em descanso: (a) SHC 1 e 2, (b) SHB.

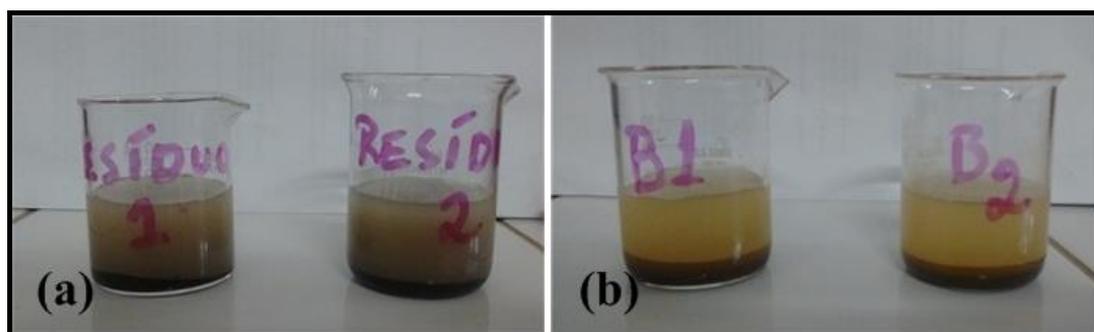


Figura 3.25 – Amostra em descanso: (a) RCS 1 e 2, (b) 50SHB+50RCS 1 e 2.

As análises químicas para a determinação do pH foram realizadas no laboratório da Faculdade de Engenharia Química – UFPA. O tratamento inicial para as amostras dos materiais foi expor o destorroamento e peneiramento com abertura de 2,0 mm (#10). O método escolhido para ser utilizado neste procedimento de determinação da acidez foi o da Acidez Ativa: Relação de solo/água de 1/2,5 com a imersão de um eletrodo de vidro

ligado a um pHmetro. No pHmetro podem ser usadas soluções salinas como o cloreto de potássio (KCl) e cloreto de cálcio (CaCl_2).

3.5.7 Ensaio Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

Os ensaios de MEV foram realizados no Laboratório de Microscopia Eletrônica da Faculdade do Instituto de Tecnologia – UFPA, utilizando-se um equipamento de bancada MEV 3000 da HITACHI (Figura 3.26) com capacidade de ampliação de até 3.000 vezes, e o detector EDS (swift ED3000 x-ray).

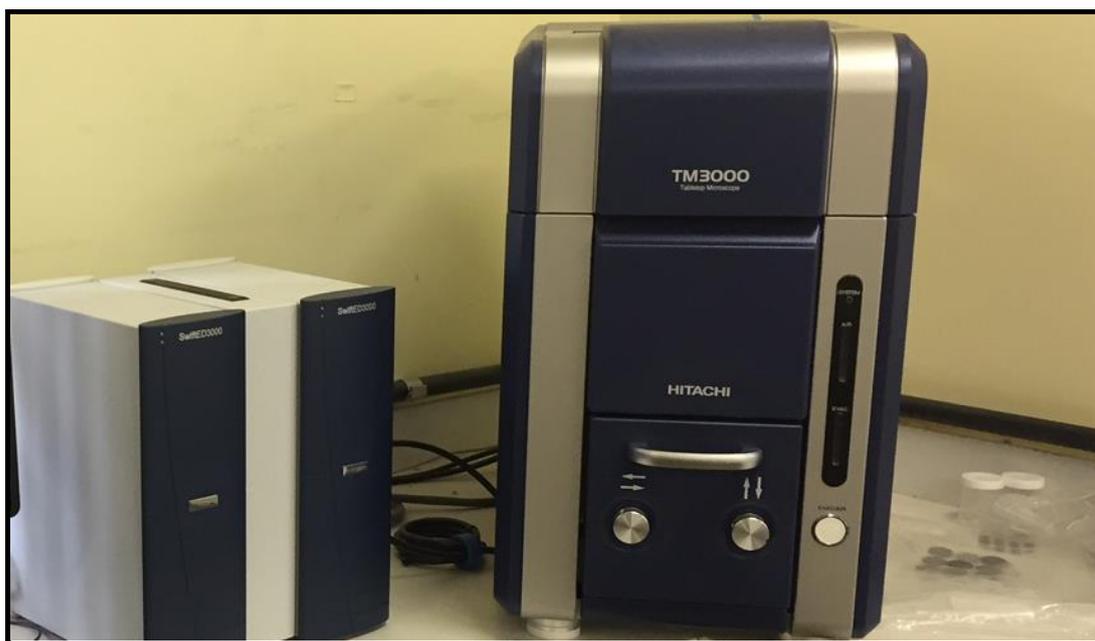


Figura 3.26 – Equipamento para Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.

O método MEV foi utilizado para analisar a microestrutura dos solos SHC, SHB e do resíduo RCS separadamente, a Mistura 3 (50SHB+50RCS) após o ensaio Índice de Suporte Califórnia. As amostras para análise foram coletadas da fração que passou na peneira 0,075 mm (#200) de abertura e no ensaio MEV/EDS, foram identificados os elementos químicos presentes nos solos, resíduo e misturas.

3.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESCOLHA DOS MATERIAIS.

O SHC serviu como primeiros estudos para a mistura com RCS, e logo houve a coleta do SHB pois é localizado em uma profundidade de 0,50 m a 1,00 m abaixo da superfície sendo utilizado para camada de base em pavimento asfáltico e havendo informação de classificação nos mapas pedológicos da EMBRAPA nesta região do Estado do Pará.

Neste capítulo se apresentou a escolha e detalhes dos materiais, o procedimento experimental enquanto o próximo constará de apresentação e discussão dos resultados experimentais obtidos nesta pesquisa.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, discutidos e analisados os resultados obtidos nos ensaios realizados no transcurso deste trabalho referentes à caracterização dos materiais. Os ensaios de Proctor foram realizados com energia intermediária, com os resultados de massa específica aparente seca – Meas (g/cm^3) e umidade ótima realizados com os ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Módulo de Resiliência (MR). Foram incluídos para os solos a classificação textural, a metodologia MCT, ensaios complementares: difração de raios x (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e determinação do pH. No capítulo é incluída a comparação de resultado de pesquisadores nacionais e internacionais relativa aos resultados obtidos com os solos e o resíduo de cobre sulfetado (RCS). Após a apresentação e discussão dos resultados é incluída a proposta para o emprego do RCS em pavimentos.

4.1 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Segundo NOGAMI e VILLIBOR (2009) pavimento econômico é aquele que utiliza base constituída de materiais naturais, ou misturados com pequena porcentagem de agregado, e que possui custos de execução menores do que os tradicionais, que utilizam, por exemplo: brita graduada, macadame hidráulico, solo cimento e outros.

O pavimento econômico utiliza revestimento betuminoso, tipo tratamento superficial, duplo ou triplo, com espessura máxima de 3 cm e, frequentemente, da ordem de 1,5 cm. Suporta tráfego máximo do tipo médio, com número de repetição de carga (Nt) igual, ou menor, do que 10^6 solicitações do eixo simples padrão de 80kN (NOGAMI E VILLIBOR, 2009).

A construção de pavimento com elementos econômicos para a estrutura de pavimento com materiais alternativos no Estado do Pará tem sido trabalhado constantemente entre os técnicos que estão preocupados com a qualidade do sistema rodoviário.

4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios tradicionais de caracterização do solo envolveram a análise granulométrica, limites de Atterberg, densidade real dos grãos, umidade higroscópica e equivalente de areia. Ao término da descrição dos ensaios de caracterização

apresentaremos a classificação dos materiais para construção de camadas de pavimento segundo *Transportation Research Board* (TRB).

4.2.1 Granulometria

O ensaio para obtenção da curva granulométrica consistiu de procedimentos de peneiramento e ensaios de sedimentação. Os ensaios provaram a observação visual dos materiais serem finos com predomínio de areia. A distribuição do tamanho dos grãos passantes nas peneiras é resumida na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição granulométrica dos grãos passantes nas peneiras.

Peneira	Abertura (mm)	Composição granulométrica (% em Peso Passante)					
		SHC	SHB	50SHC + 50RCS	70SHB + 30RCS	50SHB + RCS	RCS
1"	25,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,50	100,00	99,29	100,00	100,00	99,62	100,00
N° 4	4,75	99,54	97,54	100,00	98,99	98,48	100,00
N° 10	2,00	96,21	94,21	99,21	94,57	95,86	99,86
N° 40	0,42	89,52	87,52	92,17	81,74	84,23	91,45
N° 200	0,075	38,30	36,30	37,68	28,99	21,94	16,07

O resultado do peneiramento (Tabela 4.2) apresentaram granulometria de argila entre 22% a 47% e areia entre 42% a 66%. A distribuição do tamanho de partícula do rejeito de cobre sulfetado está 99,86% menor de 2,00 mm (# 10) e 16,07% passante na peneira 0,075 mm (# 200). A Tabela 4.2 apresenta o resultado da fração para os solos e misturas.

Tabela 4.2 – Características granulométrica dos materiais e misturas.

Fração	SHC	SHB	50SHC+50RCS	70SHB+30RCS	50SHB+50RCS	RCS
Argila	47,01	22,96	23,34	16,98	7,95	7,90
Silte	9,91	9,07	9,27	8,44	9,17	8,17
Areia	42,09	65,51	67,31	73,58	81,36	83,93
Pedregulho	0,99	2,46	0,08	1,01	1,52	

Os solos finos tropicais apresentam baixa fração de pedregulho com predominância de areia e argila e fração de silte menor que 30%. O resultado experimental com os solos SHC e SHB mostrou-se de acordo com os valores publicados em trabalhos nacionais e internacionais.

O resultado experimental (Tabela 4.2) encontrado neste trabalho é confirmado com a característica de Solos Finos Lateríticos (SFL) tropical de acordo com os valores publicados em trabalhos internacionais e nacionais (ZHANG *et al.*, 2017; DORANK *et*

al., 2016; FERREIRA *et al.*, 2014; BATOLIONE, 2007). O SHB e SHC possuem predomínio de areia e argila e a fração silte menor de 10%. A classificação TRB com base no ensaio de granulometria confirmam para o SHC (A-7 Argiloso) e para SHB (TRB A-6 Argiloso) resultados semelhantes encontrado nos trabalhos internacionais e nacionais para SFL.

A Figura 4.1 apresenta as 5 curvas de distribuição obtidas com resultados do peneiramento e sedimentação para os materiais e misturas.

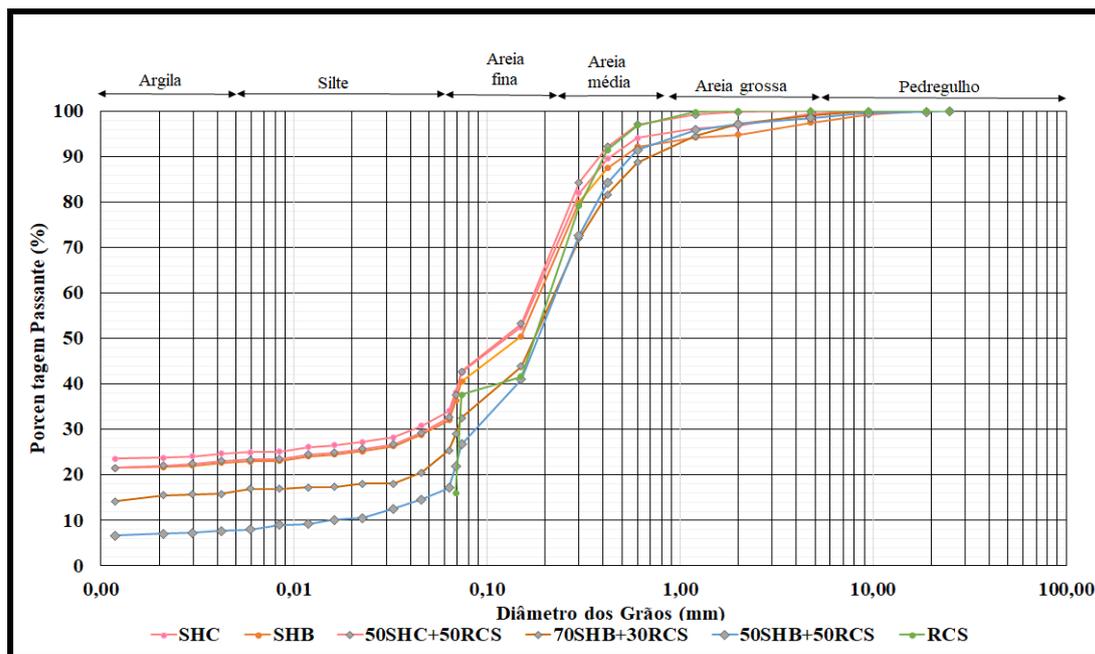


Figura 4.1 – Curvas granulométricas de materiais e misturas.

O resultado experimental obtido para o RCS na mina do Sossego – Região de Canaã dos Carajás, apresentou 99,86% menor de 2,09 mm (# N° 10) e 16,07 % passante na peneira 0,075 mm (N° 200).

As frações de argila, silte, areia e pedregulho estão relacionados na Tabela 4.2 e proporcionalmente fazem parte da Figura 4.2.

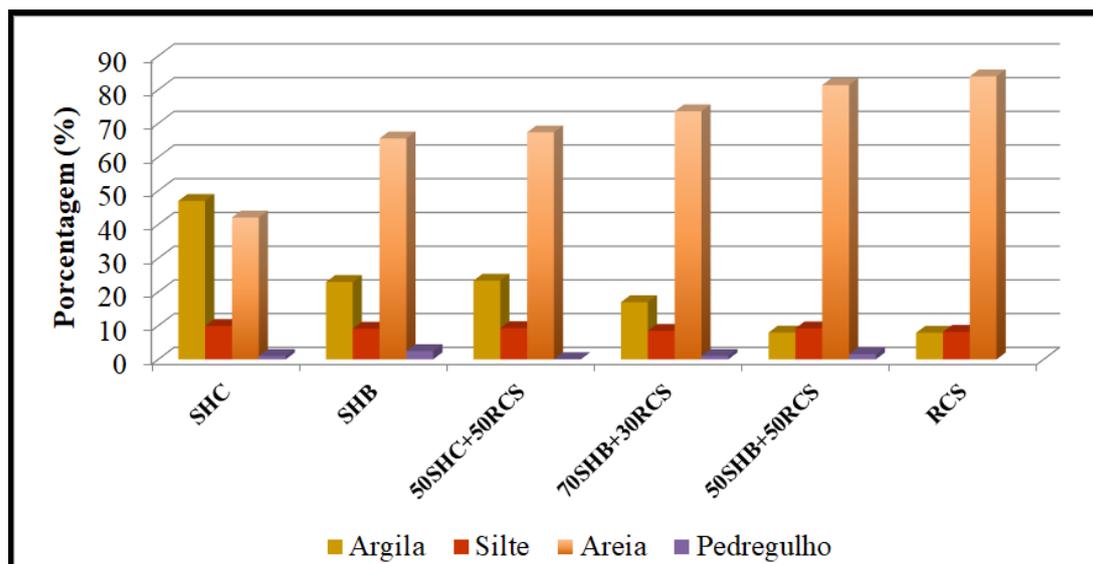


Figura 4.2 – Fração comparativa dos materiais e misturas.

A pesquisa de trabalhos, nacionais e internacionais (PAVEZ *et al.*, 2016; OLUWASOLA *et al.*, 2014 e 2015; MULLER e CASTRO, 2008; SHIMIZU, 2012), com RCS mostrou que a análise granulométrica esteve no intervalo entre 73% a 90% passante entre as peneiras 1,19 mm (#16) e 0,30 mm (#50). O resultado experimental mostrou que o RCS de Canaã dos Carajás é 99,65% menor de 1,19 mm (#16), material de diâmetro menor que os resíduos do Chile e Malásia, isto ocorre devido a diferença no processo de beneficiamento para obtenção do cobre.

4.2.2. Análise granulométrica do material para construção de sub-base e base

Os resultados obtidos com a análise granulométrica de misturas (solo + RCS) e RCS puro mostram que podem servir para a construção de sub-base e estão de acordo com a especificação de serviço DNIT 139/2010 – ES Pavimentação: Sub-base estabilizada granulometricamente, onde há a determinação de que o material retido na peneira N° 10 (2,00 mm) no ensaio de granulometria deve ser constituído de partículas duras, isentas de fragmentos moles, material orgânico ou outras substâncias prejudiciais.

As construções de base, com resultados da análise granulométrica, devem seguir as recomendações do DNIT 141/2010–ES: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço em que os materiais terão composição granulométrica (Tabela 4.3) para a faixa “F” com o Número N de tráfego ($N < 5 \times 10^6$). A especificação é comparada com resultado experimental para as misturas.

Tabela 4.3 – Granulometria do material faixa “F” DNIT 141/2010 – ES

Peneira (#)	2”	1”	3/8”	N°4	N° 10	N°40	N°200
Ø (mm)	50,00	25,00	9,50	4,75	2,00	0,425	0,075
% Passante	-	100	-	10 - 100	55 - 100	30 - 70	8 - 25
Tolerâncias	± 7	± 7	± 7	± 5	± 5	± 2	± 2
Resultado experimental para mistura e RCS puro (% Passante)							
50SHC+50RCS	-	100	100	100	99,21	92,17	37,68
70SHB+30RCS	-	100	100	98,99	94,57	81,74	28,99
50SHB+50RCS	-	100	99,62	98,48	95,86	84,23	21,94
RCS	-	100	100	100	99,86	91,45	16,07

Este trabalho de pesquisa verifica o potencial para utilizar o RCS em pavimento e quando considerou a faixa “F” do DNIT 141/2010 a ser aplicado em pavimento o resultado experimental mostrou que as misturas (50SHC+50RCS e 70SHB+30RCS) não atenderam o percentual nas peneiras de 0,425 mm (N°40) e 0,075 mm (N°200) a mistura 50SHB+50RCS e o RCS puro não atendeu com o percentual na peneira 0,425 mm (N°40). O resultado mostrou que há possibilidade de serem utilizadas para construção de base estabilizada granulometricamente.

A metodologia MCT é utilizada no Estado do Paraná e tem mostrado bons resultados. A Tabela 4.4 apresenta os resultados dos materiais e misturas obtidos com os ensaios de granulometria e os parâmetros do Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná quando destinado à construção de pavimentos segundo a DER/PR ES-P 08/05 Pavimentação: Sub-base de solo arenoso fino laterítico Especificação de serviço.

Tabela 4.4 – Especificação de serviço com SAFL no Estado do Paraná.

ITEM	DER/PR	Solos e misturas					
	ES-P 08/05 Sub-base	SHC	SHB	50SHC + 50RCS	70SHB + 30RCS	50SHB + 50RCS	RCS
Porcentagem que passa na peneira 0,42 mm (#40)	85 a 100	89,52	87,52	92,17	81,74	84,23	91,45
Porcentagem que passa na peneira 0,075 mm (#200)	20 a 40	38,30	36,30	37,68	28,99	21,94	16,07
Teor de argila (%)	> 12	47,01	22,96	23,34	16,98	7,95	7,90

Os resultados de granulometria analisados e comparados a especificação DER/PR ES-P 08/05 a mistura 50SHC+50RCS seria aceita para construção de sub-base. A mistura 70SHB+30RCS apresentou 81,74% passante na peneira 0,42 mm (#40) quando o mínimo seria 85%, com maior número de amostra para a mistura 70SHB+30RCS haveria melhor verificação para a construção sub-base. A Tabela 4.5 apresenta os

resultados dos materiais e misturas obtidos com a granulometria dos materiais e os parâmetros do Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná para construção de base.

Tabela 4.5 – Especificação para base com SFL no Estado do Paraná.

ITEM	DER/PR	Solos e misturas					
	ES-P 08/05 Base	SHC	SHB	50SHC + 50RCS	70SHB + 30RCS	50SHB + 50RCS	RCS
Porcentagem que passa na peneira n° 40 (0,42 mm)	85 a 100	89,52	87,52	92,17	81,74	84,23	91,45
Porcentagem que passa na peneira n° 200 (0,075 mm)	23 a 35	38,30	36,30	37,68	28,99	21,94	16,07
Teor de argila (%)	> 12	47,01	22,96	23,34	16,98	7,95	7,90

A especificação DER/PR ES-P 08/05 estabelece os procedimentos empregados na execução de base e aborda uma alternativa com base na classificação MCT. Os resultados de granulometria analisados segundo com a especificação DER/PR ES-P 08/05 a mistura 50SHC+50RCS serviria para construção de base, ao atender os itens especificados.

A construção de camadas de pavimento com SFL, segundo o Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo, considera a especificação técnica DER/SP ET-DE-P00/015 para Sub-base ou base de Solo arenoso fino de comportamento laterítico – SAFL. A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos para solos, resíduo e misturas.

Tabela 4.6 – Especificação de serviço com SLF no Estado de São Paulo.

ITEM	DER/SP	Solos e misturas					
	ET-DE-P00/015 Sub-base ou Base	SHC	SHB	50SHC + 50RCS	70SHB + 30RCS	50SHB + 50RCS	RCS
Porcentagem que passa na peneira 2,00 mm (#10)	100	96,21	94,21	99,21	94,54	95,86	99,86
Pequena porção retido na peneira 2,00 mm (#10)	Pouca	3,79	5,79	0,79	5,46	4,14	0,14
Porcentagem retida na peneira 0,075 mm (#200)	Mínimo 50	38,30	36,30	37,68	28,99	21,94	16,07

Análise comparativa com a especificação do DER/SP a mistura 50SHC+50RCS e o próprio RCS mostrou estarem próximo de 100% passante e com pouca retenção na peneira 2,00 mm (#10). O item mínimo de 50% de porcentagem retida na peneira 0,075 mm (#200) é o único fora do item especificado.

4.2.3 Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg para os solos, resíduo RCS e misturas foram executados de acordo com as recomendações do DNIT 098/2007 – ES Pavimentação: Base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico. Especificação de serviço. A Tabela 4.7 indica os parâmetros do DNIT, e os resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 4.7 – Base estabilizada com solo laterítico. Especificação de serviço DNIT.

Limites de Atterberg	DNIT	Solos e misturas					RCS
	098/2007 Base	SHC	SHB	50SHC + 50RCS	70SHB + 30RCS	50SHB + 50RCS	
LL (%)	≤ 40	44,00	25,30	24,20	16,50	NP	NP
LP (%)	-	22,32	12,00	9,10	3,10	NP	NP
IP (%)	≤ 15	21,68	13,30	15,10	13,40	NP	NP

Os solos lateríticos com $IP > 15\%$ poderão ser usados em misturas com outros materiais de $IP \leq 6\%$ satisfazendo a mistura aos seguintes requisitos DNIT 098/2007:

$$LL \leq 40\% \quad IP \leq 15\%$$

A Tabela 4.8 indica os resultados para LL, LP, IP e os parâmetros do Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná quando destinados à construção de pavimentos, segundo a DER/PR ES-P 08/05, Pavimentação: solo arenoso fino laterítico, para sub-base e base. A adição de quantidades variáveis de resíduos de cobre para substituir a amostra de solo aumentou a fração fina enquanto os valores limites de Atterberg, diminuíram e apresentaram resultado Não Plástico (NP).

Tabela 4.8 – Especificação de serviço com SAFL no Estado do Paraná.

Limites de Atterberg	DER/PR	Solos e misturas					RCS
	ES-P 08/05 Sub-base ou Base	SHC	SHB	50SHC + 50RCS	70SHB + 30RCS	50SHB + 50RCS	
LL (%)	-	44,00	25,30	24,20	16,50	NP	NP
LP (%)	-	22,32	12,00	9,10	3,10	NP	NP
IP (%):							
Sub-base	NP a 10	21,68	13,30	15,10	13,40	NP	NP
Base	5 a 10						

Na mistura 50SHB+50RCS e para o RCS puro, não foi possível a determinação dos Limites de Atterberg neste trabalho e segundo a especificação do Estado do Paraná servem para sub-base, devido ao teor de material granular em suas composições e à ausência de características plásticas. Portanto, a mistura 50SHB+50RCS e o RCS foram classificadas como materiais “Não Plásticos” (NP).

O resultado experimental dos solos SHC e SHB para limites de Atterberg foi comparado com índices de solos tropicais da China, Índia, Tailândia, Austrália, Benin e com os resultados obtidos por VERTAMATTI (1988) em solos existentes em Belém do Pará (Tabela 4.9).

Tabela 4.9 – Resultados comparativos entre o SHC e SHB e fontes bibliográficas.

Fonte / Local		LL (%)	LP (%)	IP (%)
Zhang <i>et al.</i> , 2017 Jiangsu, China		32,40	23,60	8,80
Biswal <i>et al.</i> , 2016 Região Oriental, Índia		44,70	26,10	18,60
Dorank <i>et al.</i> , 2016 Sakonnakhon, Tailândia		40,70	20,90	19,80
Mahalinga e Williams, 1994 Oeste de Queensland, Austrália		44,80	32,00	12,80
Simon <i>et al.</i> , 1973 Daomé, Benin		26,00	16,80	9,20
Vertamatti, 1988 Belém, Pará, Brasil	Solo 1	45,00	25,00	21,00
	Solo 2	45,00	30,00	15,00
	Solo 3	45,00	26,00	19,00
	Mínimo	26,00	16,80	8,80
	Máximo	45,00	32,00	21,00

O resultado experimental mostrou que o solo SHC (LL = 44,00; LP = 22,32; IP = 21,68) está entre o limite mínimo e máximo (LL = 26,00/45,00; LP = 16,80/32,00; IP = 8,80/21,00) dos índices dos trabalhos citados na Tabela 4.9. O solo SHB (LL = 25,30; LP = 12,00; IP = 13,20) está fora do limite estabelecido na Tabela 4.9, logo é necessário para ter uma conclusão definitiva aumentar o número de ensaios para o solo SHB a exemplo de BISWAL *et al.* (2016) que coletou 28 amostras de solos e SIMON *et al.* (1973) coletou 5 amostras.

4.2.4 Densidade real, Umidade higroscópica e Equivalente de areia.

O ensaio para a densidade real dos solos (DNER-ME 093/94) é utilizado, normalmente nos cálculos dos ensaios de sedimentação e fatores de contração dos solos. A presença do RCS nos solos em todas as porcentagens de adição aumentou a densidade de misturas: SHC com 2,660 g/cm³ a mistura 50SHC+50RCS para 2,755 g/cm³, ou seja, aumentou 3,57 % (Tabela 4.10) mostra os valores. E a Figura 4.3 representa a densidade real por meio de colunas.

Tabela 4.10 - Valores do aumento da densidade com RCS em relação ao solo puro.

Densidade	SHC	SHB	RCS	50SHC+ 50RCS	70SHB+ 30RCS	50SHB+ 50RCS
Real (g/cm ³)	2,660	2,644	2,895	2,755	2,660	2,669
Aumento em relação ao solo puro (%)	-	-		3,75	0,60	0,94

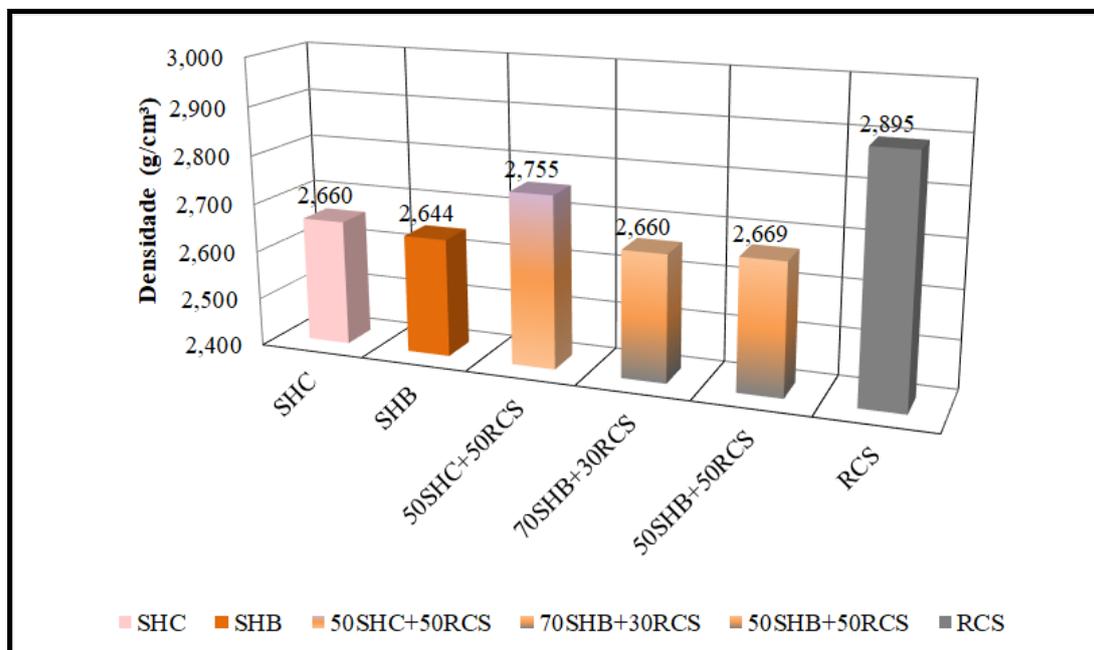


Figura 4.3 – Densidade real para solos, misturas e RCS.

As densidades reais dos materiais e misturas são apresentadas na Figura 4.4 que destaca a fração de areia quando aumenta a densidade real ao ser adicionado RCS material com densidade real igual a 2,895 g/cm³.

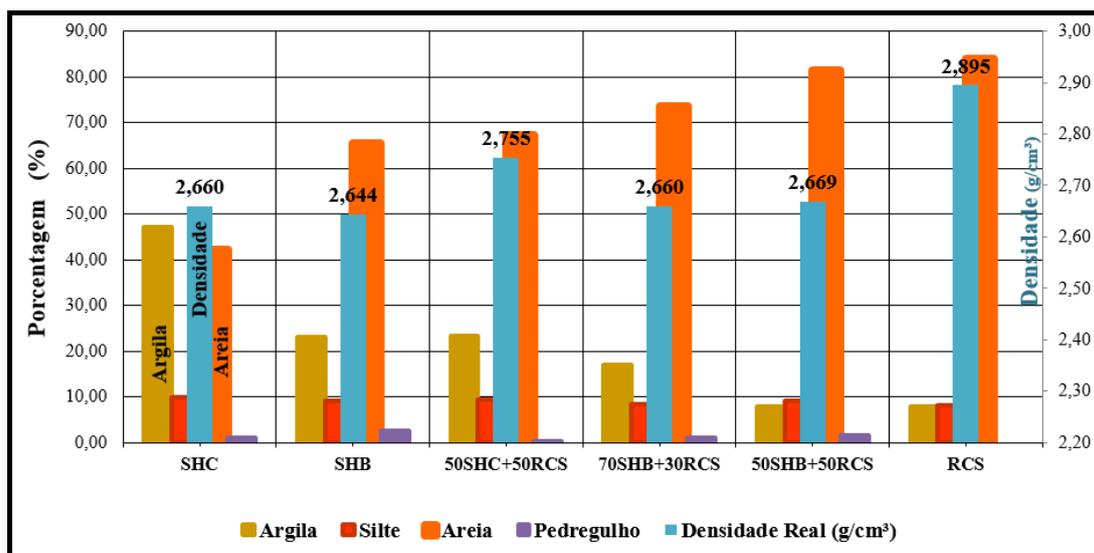


Figura 4.4 – Destaca a fração dos materiais e a variação da densidade.

Umidade higroscópica é água retida no solo por força de adsorção e, devido as elevadas pressões a que está submetida. Os valores fracionários, Umidade higroscópica e Equivalente de areia são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Umidade higroscópica, E. A. dos materiais e misturas.

Fração	SHC	SHB	50SHC+50RCS	70SHB+30RCS	50SHB+50RCS	RCS
Argila	47,01	22,96	23,34	16,98	7,95	7,90
Silte	9,91	9,07	9,27	8,44	9,17	8,17
Areia	42,09	65,51	67,31	73,58	81,36	83,93
Pedregulho	0,99	2,46	0,08	1,01	1,52	
Umidade higroscópica %	0,70	0,76	0,57	0,66	0,42	-
E. A. (%)	2,11	1,68	52,95	64,31	71,90	92,10

A umidade higroscópica varia proporcionalmente com a fração de argila e o SHC com 47,01% desse material o que agrega aos seus poros maior porção de água, para a mistura de 50SHB+50RCS com 7,95 % de argila e com 81,36 % de fração considerada areia a umidade higroscópica de 0,42%.

O ensaio equivalente de areia é o meio de definir, em bases volumétricas, as proporções de materiais argilosos e arenosos que ocorreram nos solos, RCS e misturas; com este resultado foi escolhido a proporção de RCS que foi adicionado ao solo. As Figuras 4.5 e 4.6 mostram o momento em que o ensaio para determinação do EA para os materiais puros (SHC, SHB e RCS) e misturas (50SHC+50RCS, 70SHB+30RCS e 50SHB+50RCS) foram realizados. É notável que a turbidez devido a coloração do solo dificulta a leitura.

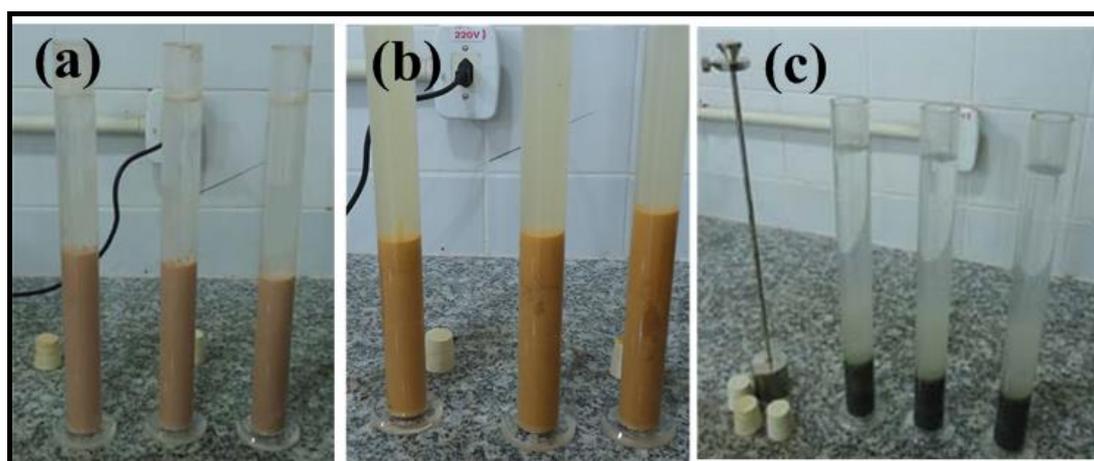


Figura 4.5 - EA para os materiais puros: SHC, SHB e RCS.

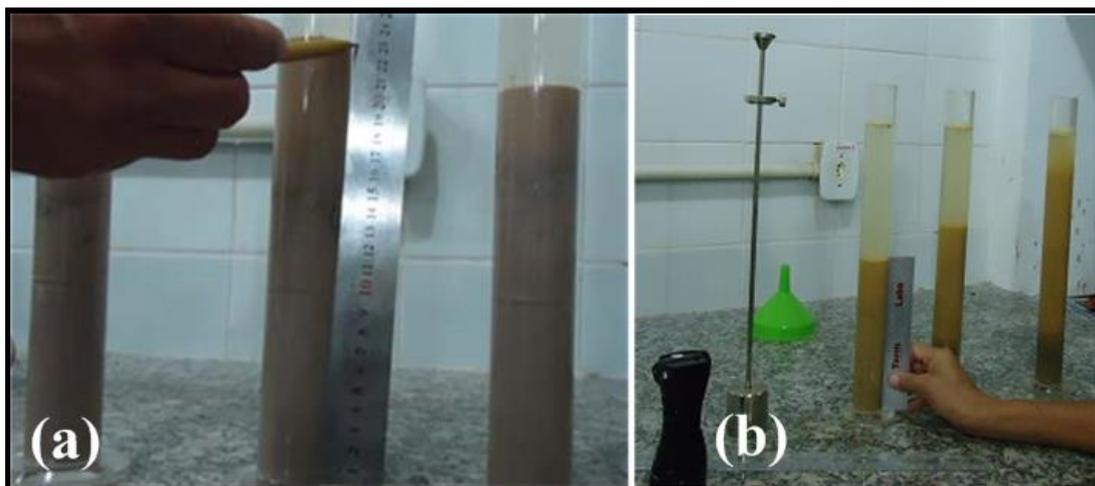


Figura 4.6 – EA: 50SHC+50RCS e SHB.

O resultado mostrou ser possível a utilização para base estabilizada granulometricamente, com IP maior que 6% e Equivalente de areia superior a 30. As misturas 50SHC+50RCS (IP = 15,10 %; E.A. = 52,95 e 70SHB+30RCS (IP = 13,40; E.A. = 64,31) estão no padrão estabelecido e podem ser aceitas para construção de base.

4.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Este determina a correlação entre o teor de umidade de um solo e sua massa específica aparente seca e pode ser utilizado no controle de compactação de campo, execução de ensaios ISC, MR e MCT. Os solos foram submetidos ao ensaio de Proctor a energia intermediária para determinar a umidade ótima e massa específica aparente seca – Meas (g/cm^3).

No começo com os solos e o resíduo separadamente e depois do ensaio E. A. com as misturas propostas.

Os resultados encontrados na Figura 4.7 e na Tabela 4.12 onde se observa a diferença para SHC e SHB, não obstante se tratem de solos da mesma jazida “Begot”.

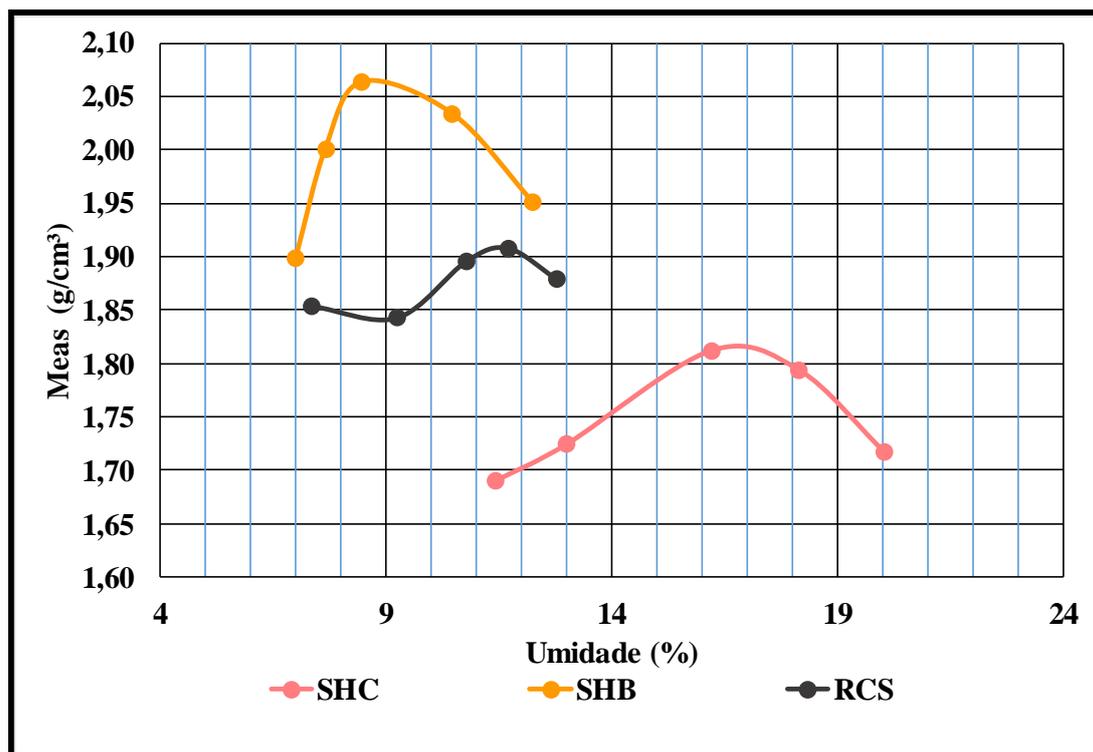


Figura 4.7 – Curvas de compactação dos solos e resíduo de cobre sulfetado.

A Meas dos solos aumenta com adição do RCS, como é possível constatar na Tabela 4.12. A menor Meas ocorre com 50SHC+50RCS (2,01 g/cm³) e a maior Meas acontece para a mistura 50SHB+50RCS (2,12 g/cm³).

Tabela 4.12 – Fração, Meas e Ho dos materiais e misturas.

Fração (%)	SHC	SHB	50SHC+50RCS	70SHB+30RCS	50SHB+50RCS	RCS
Argila (A)	47,01	22,96	23,34	16,98	7,95	7,90
Silte (S)	9,91	9,07	9,27	8,44	9,17	8,17
A + S	56,92	32,03	32,61	25,42	17,12	16,07
Areia	42,09	65,51	67,31	73,58	81,36	83,93
Meas (g/cm ³)	1,81	2,06	2,01	2,15	2,12	1,91
Ho. (%)	17,0	9,8	12,0	7,9	9,5	11,5

As curvas de compactação para SHC e SHB (Figura 4.8), o SHC com teor de argila (A) mais silte (S) igual a 56,92% e o SHB com teor de argila (A) mais silte (S) igual a 32,03%, que apresenta curva de compactação alongada e rebaixada, em relação a curva de SHB que apresenta curva mais pontiaguda, este comportamento, ou resultado está de acordo com o princípio tecnológico.

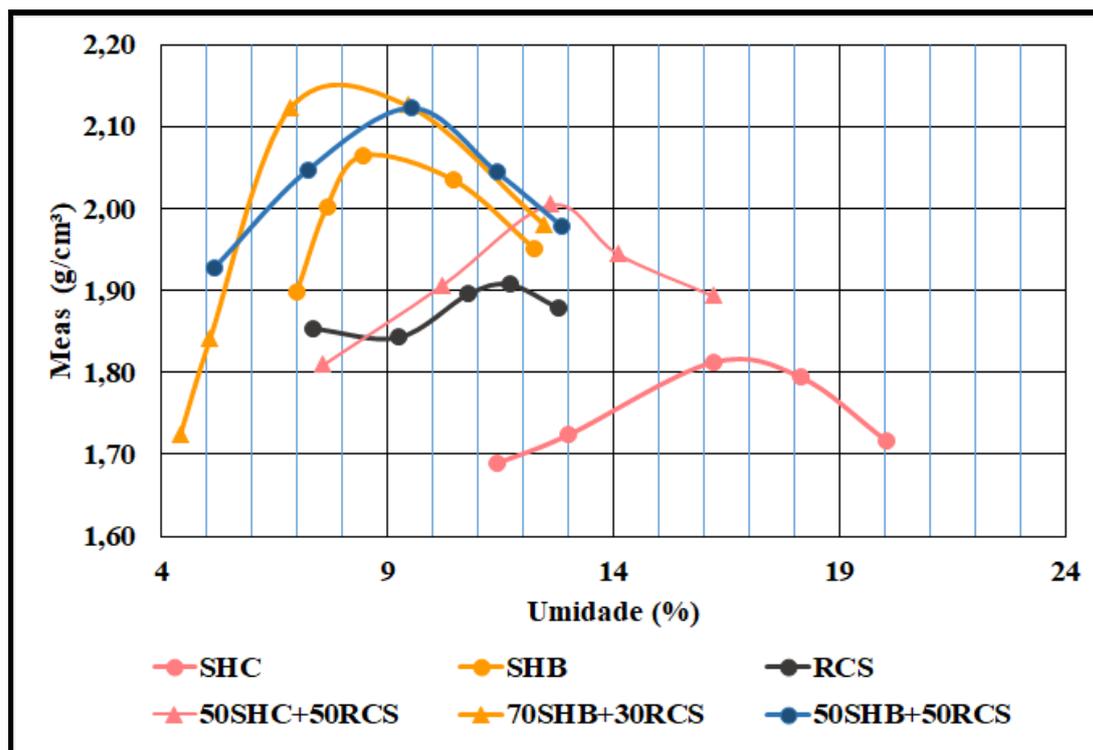


Figura 4.8 - Variação da Meas e Umidade (Ho) dos materiais e misturas.

Os resultados dos ensaios de compactação mostraram que as propriedades da amostra de solo melhoraram com a adição de RCS. Houve um aumento na Meas com uma diminuição no teor de umidade ótima.

O resultado encontrado para a Ho (%) e Meas (g/cm³) com solos tropicais nos trabalhos nacionais e internacionais (BISWAL *et al.*, 2016; DORANK *et al.*, 2016; MAHALINGA e WILLIAMS, 1994; SIMON *et al.*, 1973; FERREIRA *et al.*, 2014; BATOLIONE, 2007; OLIVEIRA, 2016) foram para a Ho (Mínimo = 7,60; Máximo = 27,40) e Meas (Mínimo = 1,560; Máximo = 2,202). O resultado experimental encontrado para SHC (Ho = 17,00 e Meas = 1,810) e os valores para SHB (Ho = 9,80 e Meas = 2,060) estão nos intervalos dos resultados determinados para solos tropicais.

4.4 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA E EXPANSÃO

O ensaio para determinação do ISC seguiu às normas do DNIT/DNER de solos com amostras deformadas e não trabalhadas de material, correspondente à umidade ótima e massa específica aparente máxima seca, a Tabela 4.13 indica as características do DNIT e do DER/PR.

Os valores de ISC e expansão são apresentados na Tabela 4.14 e na Figura 4.9.

Tabela 4.13 – Características para o ISC e Expansão

Características	DNIT 098/2007	DER/PR ES-P 08/05	
	Base	Sub-base	Base
ISC (%)	≥ 60 para $N \leq 5 \times 10^6$ ≥ 80 para $N > 5 \times 10^6$	> 40	> 60 para $N < x 10^5$ > 80 para $N \geq x 10^5$
Expansão (%)	-	$< 0,1$	$< 0,1$

Tabela 4.14 – Valores obtidos para ISC e Expansão dos materiais

Materiais	SHC	SHB	50SHC+50RCS	70SHB+30RCS	50SHB+50RCS
ISC (%)	9,90	42,80	4,90	51,90	21,80
Expansão (%)	0,490	0,280	0,260	0,280	0,750

A adição de 50%RCS reduziu a expansão do 50% SHC com diminuição do ISC. O maior ISC, com a menor expansão, ocorreu com a mistura 70SHB+30RCS. Para seguir às normas do DNIT ou DER/PR apenas o solo SHB e a mistura 70SHB+30RCS com ISC superior a 40% serviriam para construção de sub-base, porém, não atendem ao valor de expansão de 0,28% que é maior que 0,1%.

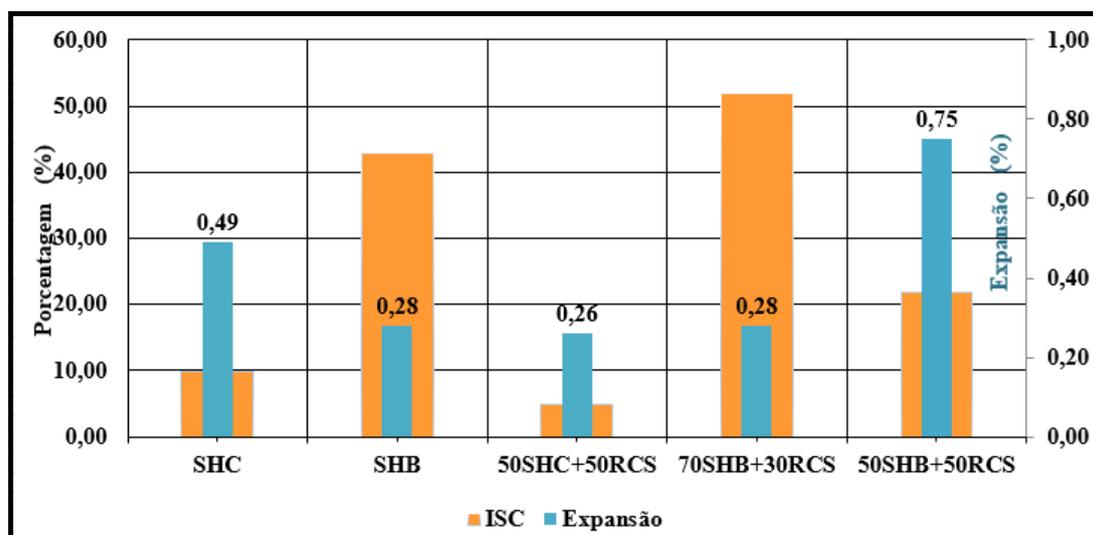


Figura 4.9 – Barras representativas para ISC e Expansão dos materiais.

O resultado obtido com o ensaio de ISC era esperado. Segundo (NOGAMI e VILLIBOR, 1995 e 2009) as normas estrangeiras basicamente resultaram de estudos do comportamento de rodovias e pistas experimentais localizadas nos Estados Unidos da América e envolvem fixação de condições empíricas válidas para ambientes e solos norte-americanos, portanto, não consideram as peculiaridades relacionadas com as condições e com solos mais frequentes no Brasil, onde os solos e climas predominantes, podem ser englobados, genericamente como do tipo “tropical úmido”.

O resultado experimental desta pesquisa com o ensaio ISC quando comparado com solos tropicais nos trabalhos nacionais e internacionais (BISWAL *et al.*, 2016; DORANK *et al.*, 2016; MAHALINGA e WILLIAMS, 1994; SIMON *et al.*, 1973; FERREIRA *et al.*, 2014; BATOLIONE, 2007; OLIVEIRA, 2016) foram para ISC (Mínimo = 9,30; Máximo = 61,86). Os valores para SHB (ISC = 42,80) e SHC (ISC = 9,90) estão nos intervalos dos resultados determinado para solos tropicais determinados nos estudos bibliográficos.

Pesquisadores brasileiros também investigam misturas com resíduos (Areia descartada de fundição, granito) para construção de pavimentos asfálticos a fim de mitigar impactos ambientais. O resultado encontrado nos trabalhos nacionais (FERREIRA *et al.*, 2014; BATOLIONE, 2007; OLIVEIRA, 2016) foram para o ISC (Mínimo = 12,00; Máximo = 40,00).

O resultado experimental encontrado para a mistura 70SHB+30RCS (ISC = 51,90) e para 50SHB+50RCS (ISC = 21,80) estão no intervalo do resultado determinado para solos tropicais e quando misturado com granito ou areia descartada de fundição e que ao ser submetido ao ensaio de Módulo Resiliente (Item 4.5) obtiveram resultado favorável para construção de pavimentos.

4.5 MÓDULO RESILIENTE - MR

O estudo é para verificar a possibilidade de se aplicar maior quantidade possível de RCS, que resulte em um maior benefício a menor custo para a construção do pavimento rodoviário, com qualidade técnica e econômica, logo, os ensaios experimentais do solo SHC com adição do cimento Portland resultaram em MRs maiores (395 a 1041 MPa), porém para adicionar cimento Portland para construção de camadas de pavimentos rodoviários aumenta o custo, neste estudo é melhor considerar a mistura 50SHB+50RCS que resultou em menores MRs (229 a 379 MPa). O solo SHC mostrou MR médio entre 408 a 478 MPa e o solo SHB teve MR médio entre 609 a 804 MPa.

A caracterização dos solos lateríticos finos desta pesquisa teve o objetivo de estudar a mistura com o RCS, e os ensaios de MR proporcionaram a verificação do comportamento do solo puro e mistura, sendo que os documentos pesquisados BISWAL *et al.*, 2016 (Menor MR = 100 MPa e maior MR = 380 MPa) e NGUYEN e MOHAJERANI, 2016 (Menor MR = 20 MPa e maior MR = 280MPa) ajudaram a verificar a compatibilidade com os resultados de trabalhos nacionais e internacionais.

Após os ensaios com o SHC o estudo passou a ter prioridade em relação ao SHB, por haver maior quantidade de informações nos documentos da EMBRAPA (2013) sobre os solos no Estado do Pará. A mistura 70SHB+30RCS apresentou maiores MRs (286 a 2044 MPa, Tabela 4.15) do que a mistura 50SHB+50RCS (191 a 484 MPa).

Tabela 4.15 – Variação do Módulo de Resiliência (MPa).

Materiais/ Corpo de prova	Umidade (%)		Deforma- ção Total (mm)	Variação do Módulo de Resiliência (MPa)			
	Hót.	Comp.		Menor	Maior	Média	Desvio Padrão (%)
RCS/1	11,50	11,50	0,973	250	829	356	157,04
SHC/1	17,00	17,00	0,889	362	508	408	41,73
SHC/2	17,00	19,00	0,752	363	591	478	61,85
50SHC+50RCS/1	12,00	12,00	3,335	229	379	293	50,45
SHB/1	9,80	9,80	1,592	446	811	609	138,08
SHB/2	9,80	9,80	1,514	520	1.115	804	197,59
70SHB+30RCS/1	7,90	7,90	3,061	303	529	415	79,26
70SHB+30RCS/2	7,90	7,90	3,757	286	2.044	500	412,67
50SHB+50RCS/1	9,50	9,50	4,480	224	484	325	75,40
50SHB+50RCS/2	9,50	9,50	5,066	191	362	282	59,39

O resultado experimental encontrado para a mistura 70SHB+30RCS (MR médio = 415 a 500 MPa) e para 50SHB+50RCS (MR médio = 293 MPa) estão no intervalo do resultado determinado para solos tropicais quando misturado com granito ou areia descartada de fundição e que ao ser submetido ao ensaio de Módulo Resiliente obtiveram resultado favorável para construção de pavimentos. O resultado encontrado nos trabalhos nacionais (FERREIRA *et al.*, 2014; BATOLIONE, 2007; OLIVEIRA, 2016) foram para o MR (Mínimo = 45; Máximo = 110 MPa).

A finalidade deste estudo foi de se ter um pavimento com baixo custo, a partir da utilização do RCS puro ou mistura com solo para atender rodovias de baixo e médio tráfego. A mistura RCS +Solo +Cimento Portland para o ensaio de MR foi realizada para observação do resultado, porém é notório que a utilização do cimento Portland aumenta o custo da obra.

O MR, quando adicionado cimento Portland a mistura com 7 dias de cura, aumentou o MR em 2 vezes mais do que valores da mistura Solo+RCS e diminuiu a deformação total de 1,53 mm para 0,69 mm. A mistura com cimento Portland e cura de

28 dias triplicou o MR em relação à mistura Solo+RCS e a menor deformação total decaiu de 1,53 para 0,28 mm.

A Tabela 4.16 apresenta para os materiais, a deformação total e as umidades de compactação.

Tabela 4.16 – Deformação total dos materiais.

Materiais / Umidade (%)	Altura final (mm)	Deformação Total (mm)	Deformação Total (%)
SHC (17,0)	199,1110	0,889	0,44
SHC (19,0)	199,2480	0,752	0,38
50SHC+50RCS (12,0)	196,6650	3,335	1,67
50SHC+50RCS+1% CP (12,0) 7 dias	198,6290	1,371	0,69
50SHC+50RCS+1% CP (12,0) 7 dias	198,4090	1,591	0,80
50SHC+50RCS+1% CP (12,0) 28 dias	199,4370	0,563	0,28 (menor)
50SHC+50RCS+1% CP (12,0) 28 dias	199,1660	0,834	0,42
RCS puro (11,5)	199,0270	0,973	0,49
SHB (9,80)	198,4080	1,592	0,80
SHB (9,80)	198,4860	1,514	0,76
70SHB+30RCS (7,90)	196,9390	3,061	1,53
70SHB+30RCS (7,90)	196,2430	3,757	1,88
50SHB+50RCS (9,50)	195,5200	4,480	2,24
50SHB+50RCS (9,50)	194,9340	5,066	2,53 (maior)

Fonte: Laboratórios Geotecnia e Pavimento - COPPE/UFRJ.

A Figura 4.10 simula deformação total em escala (mm) para cada material e o rebaixo do corpo de prova. O resultado para a deformação total resultou para a mistura 70SHB+30RCS (3,061 a 3,757 mm).

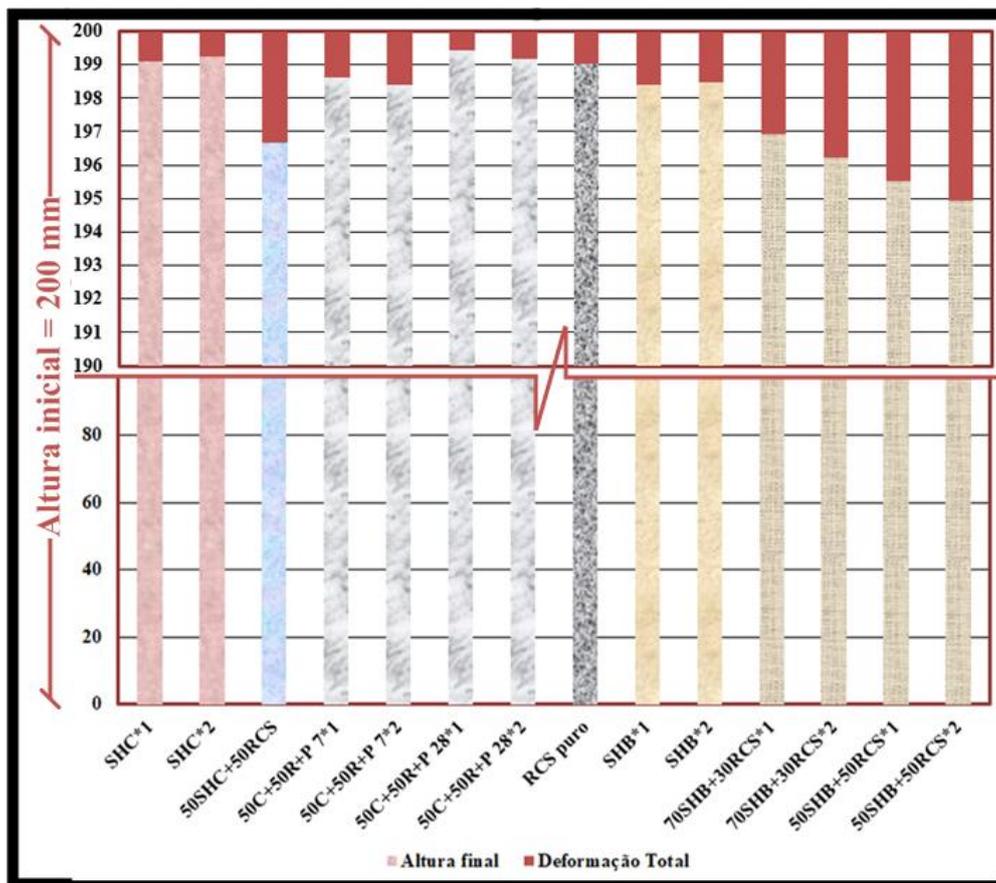


Figura 4.10 – Deformação total nos corpos de prova.

4.6 CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL DOS MATERIAIS

O diagrama trilinear da Figura 4.11. (EMBRAPA, 2013) foi utilizado para a classificação de grupamento textural, que é a reunião de uma ou mais classes de textura. A entrada de dados é com a percentagem de fração argila, silte, areia e pedregulho.

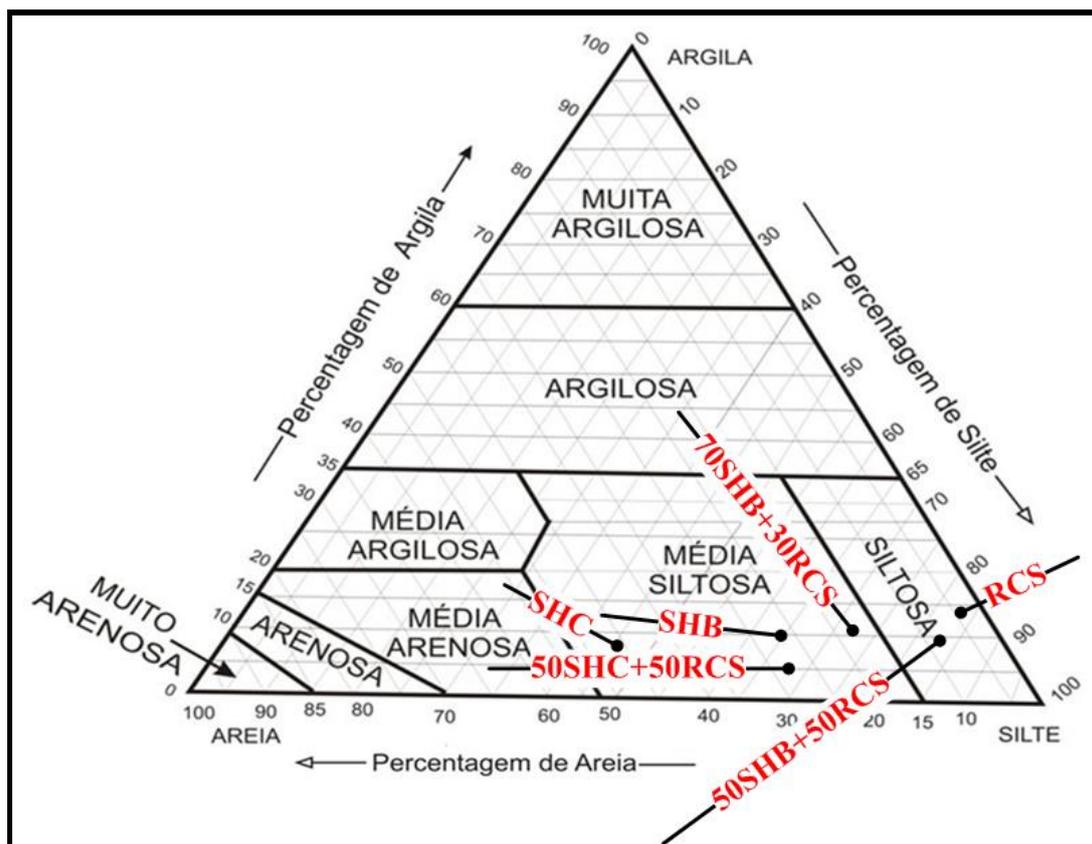


Figura 4.11 – Guia para subgrupamento de classes de textura, diagrama trilinear.

Fonte: EMBRAPA com adaptação, 2013.

O resultado do ensaio de granulometria, realizado de modo conjunto, peneiramento e sedimentação, é utilizado para classificação textural para os solos estudados e indicados nas Tabelas 4.17 e 4.18 para subgrupamento textural segundo EMBRAPA (2013).

Tabela 4.17 – Resultado de granulometria de peneiramento e sedimentação

Fração	SHC	SHB	50SHC+50RCS	70SHB+30RCS	50SHB+50RCS	RCS
Argila	47,01	22,96	23,34	16,98	7,95	7,90
Silte	9,91	9,07	9,27	8,44	9,17	8,17
Areia	42,09	65,51	67,31	73,58	81,36	83,93
Pedregulho	0,99	2,46	0,08	1,01	1,52	

Segue a análise para o solo e misturas com base em ábaco: SHC, 50SHB+50RCS, SHB e 70SHB+30RCS. São solos de textura fina que congregaram tanto materiais essencialmente argilosos quanto siltosos e arenosos, de peculiaridades pedológicas distintas, nos quais se incluiu como formação típica, a argila amarela.

Tabela 4.18 – Resultado da classificação grupamento textural segundo Embrapa 2013.

Materiais	Textura segundo o diagrama	Subgrupamento textural
SHC	Média-siltosa	Média-argilosa: Classe textural-argilo-arenosa
SHB	Média-siltosa	Média-siltosa:
50SHC+50RCS		Composição granulométrica com menos de
70SHB+30RCS		35% de argila e mais de 15% de areia.
50SHB+50RCS	Siltosa	Muito arenosa:
RCS		Compreende a classe textural areia.

A análise para o RCS puro e a mistura 50SHB+50RCS resultou em: solos lateríticos concrecionados que englobaram tanto materiais de caráter hidromórfico quanto maduros, apresentando concreções ferruginosas, mosqueadas fracamente cimentadas (quebráveis por pressão aplicada pelos dedos) até as maciças, fortemente cimentadas, com grau de laterização bem avançado.

4.7 RESULTADO DA CLASSIFICAÇÃO MCT

Os solos SHC e SHB foram avaliados no Laboratório para Estudos de Misturas Asfálticas – LEMA/UFGA e o resultado estão de acordo com as características estabelecidas segundo o critério MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 2009) conforme se verifica na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 - Características estabelecidas segundo o critério MCT.

Nogami e Villibor (2009)	SHC	SHB
Menos de 10% de fração retida na peneira 2,00 mm (#10)	3,79 < 10	5,79 < 10
Mais de 50% de fração retida na peneira 0,075 mm (#200)	61,70 > 50	63,70 > 50
Fração constituída com predominância de grãos quartzo	Predomínio de Quartzo (vide DR-X)	Predomínio de Quartzo (vide DR-X)
Pertence à classe de comportamento laterítico a um dos grupos: LA (Laterítico Areia), LA' (Laterítico Arenoso), ou LG' (Laterítico Argiloso)	LG'	LA'

Os ensaios para a classificação MCT das misturas foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimento - COPPE/UFRJ e Laboratório de Mecânica dos Pavimentos – LMP/UFC com a finalidade de utilizar o RCS.

Após os ensaios, em conformidade a metodologia MCT foram obtidos os parâmetros: c' , d' , e' PI e classe MCT. A definição dos parâmetros MCT para classificação dos materiais é a seguinte:

c' = Coeficiente c' que se correlaciona aproximadamente com a granulometria;

d' = Coeficiente relativo à inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação, correspondente a 12 golpes no ensaio Mini-MCV;

Pi = Perda de Massa (Pi), correspondente ao MiniMCV 10, no caso de solos de massa específica aparente baixa, e ao Mini-MCV 15, no caso de solos de massa de específica aparente alta.

$$e' \quad e' = \sqrt[3]{\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}} \quad (1)$$

onde:

Pi = perda de massa por imersão em água;

d' = é a inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação, correspondente a 12 golpes no ensaio Mini-MCV.

Após a obtenção dos parâmetros, obteve-se a classificação MCT para as misturas, conforme a Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Parâmetros e classificação MCT das misturas.

Misturas	Parâmetros MCT obtidos				
	c'	d'	e'	PI (%)	Classe
50SHC+50RCS	1,40	109,1	0,88	50,00	LA'
70SHB+30RCS	0,70	40,28	1,14	100,00	NA'
50SHB+50RCS	0,35	196,18	1,24	180,00	NA'

A mistura 50SHC+50RCS é classificada LA', valendo observar que mesmo com a adição do RCS que é um granito a mistura permanece laterítico arenoso, conforme Figura 4.12.

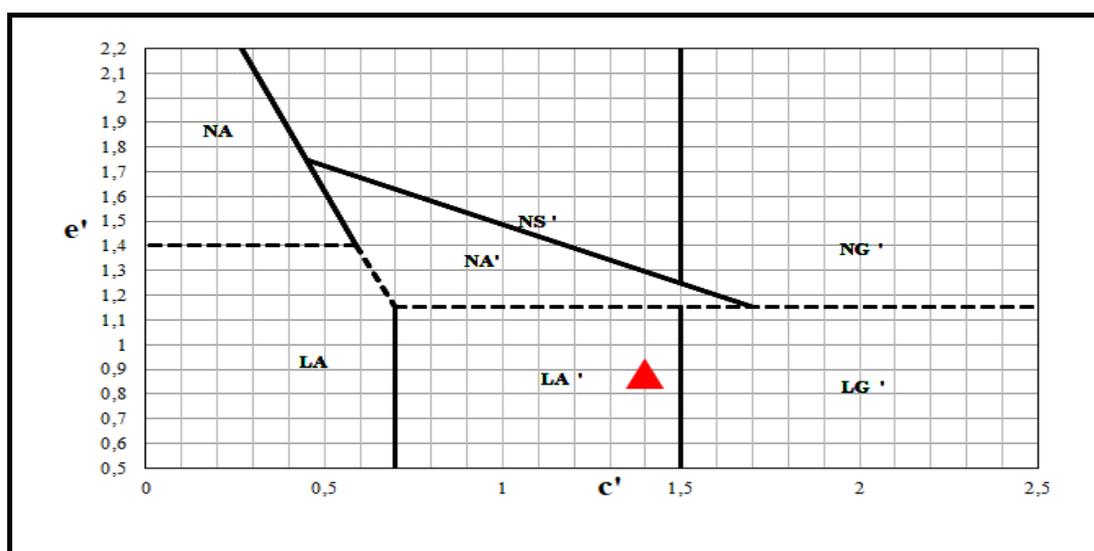


Figura 4.12 – Resultado MCT para a Mistura 50SHC+50RCS – COPPE/UFRJ.

Ao ser acrescentado o RCS ao solo SHB as misturas (70SHB+30RCS e 50SHB+50RCS) passaram a ter características não-laterítico arenoso. A mistura 70SHB+30RCS esteve em faixa de transição entre o não-laterítico e o laterítico (conforme

a Figura 4.13). Para a mistura 50SHB+50RCS a classificação MCT é não-laterítico, devido ao maior percentual do RCS do granito (Figura 4.14).

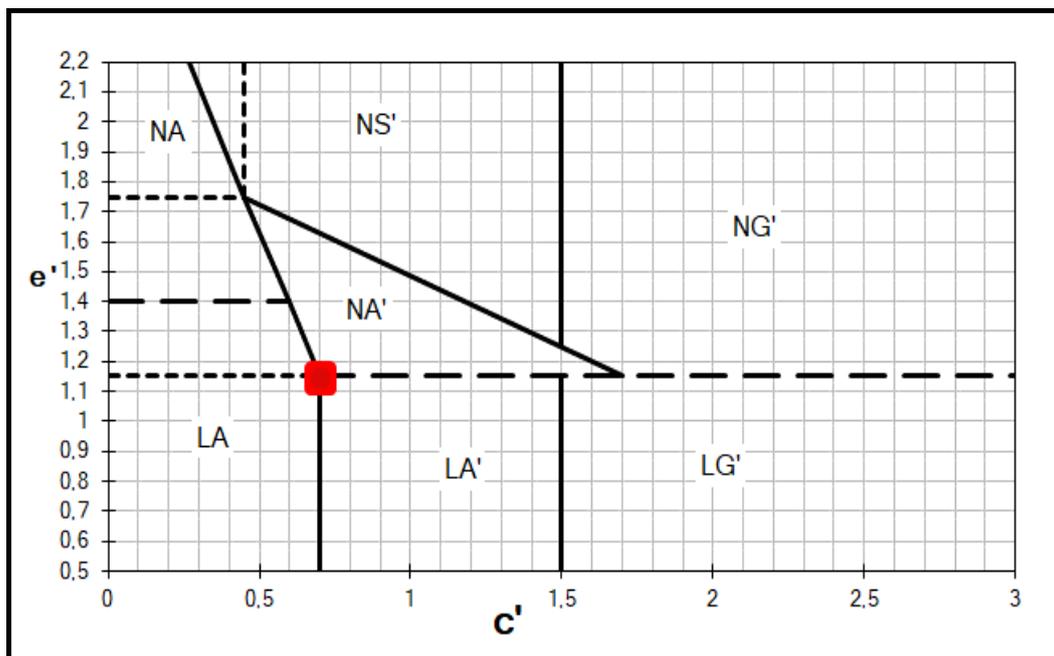


Figura 4.13 - Classificação da mistura 70SHB+30RCS no ábaco MCT – LMP/UFC.

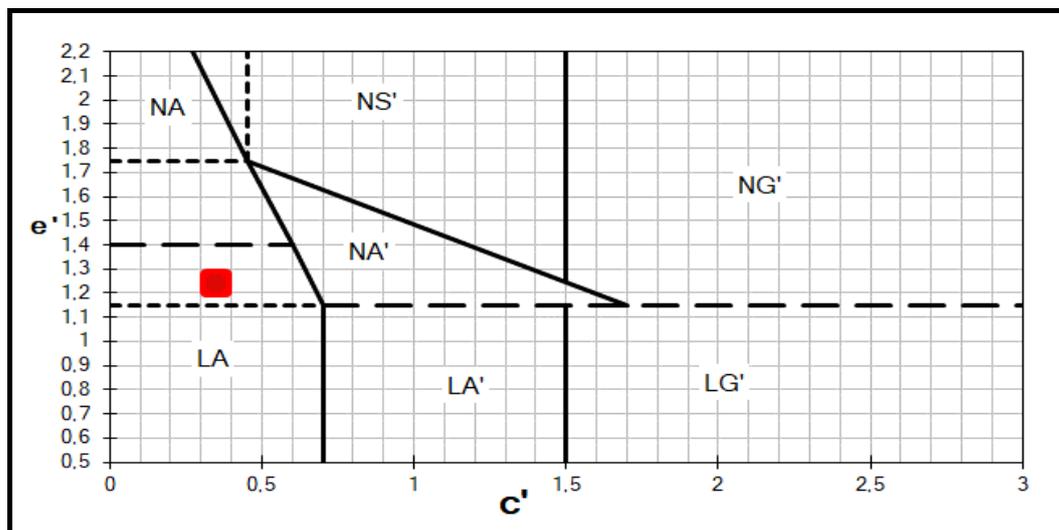


Figura 4.14 - Classificação da mistura 50SHB+50RCS no ábaco, MCT – LMP/UFC.

O resultado deste trabalho é o mesmo encontrado por pesquisadores com solo brasileiro e em destaque o trabalho de VERTAMATTI (1988) que estudou os solos da Amazônia e incluiu o solo de Belém em sua pesquisa e mostrou ser laterítico argiloso (LG') o solo predominante na RMB, em seguida o laterítico arenoso (LA').

4.8 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X E GRAU DE ACIDEZ - PH

O estudo para explorar a viabilidade do RCS, com a finalidade de construção de pavimento, incluiu as caracterizações física, e química. A caracterização química teve por

objetivo verificar a composição do resíduo, solos e misturas para avaliar o comportamento laterítico apresentado por estes materiais.

As análises DRX e do pH possibilitaram a observação para a caracterização química pontual das amostras, antes e após a compactação da mistura. Os resultados obtidos com análises do solo evidenciaram o padrão mineralógico característico de solos lateríticos.

4.8.1 Difratomia de Raios x

A análise mineralógica, utilizando o DRX, foi realizada nas amostras de solo SHC, SHB, RCS e para a mistura 50SHB+50RCS, após aplicação da carga de compactação para determinar o efeito sobre os compostos químicos e grãos.

O difratograma referente aos dois solos é apresentado na Figura 4.15 e representa os solos SHC e SHB pois são semelhantes e estão adaptados para facilitar a observação dos compostos dos solos. Os nomes dos minerais foram representados com seus símbolos ou nome do composto na Figura 4.15 e a Tabela 4.21 relaciona o composto e posição 2θ (comprimento de onda da radiação X) dos compostos químicos.

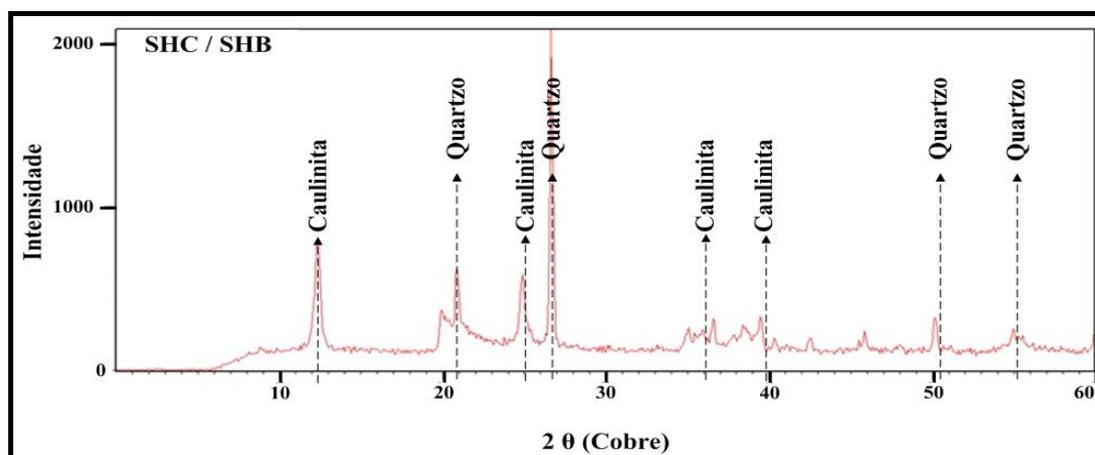


Figura 4.15 – O DR-X dos solos SHB e SHC.

Tabela 4.21 – Compostos dos solos e posicionamento DRX.

Composto	2 θ (Comprimento de onda)			
Quartzo - SiO_2	20,955	26,750	50,352	55,115
Caulinita - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	12,457	25,111	36,026	39,948

Os resultados obtidos com o DRX (Figura 4.16, SHB) marcaram a presença de picos acentuados de quartzo (SiO_2), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), características de solo laterítico misto argiloso-arenoso. O difratograma do RCS (Figura 4.17) está adaptado para análise, a linha contínua e a extremidade com seta indicam o valor médio da

intensidade de 320 (maior número quanta de raios x produzido por unidade de tempo – ciclos/segundos). Os elementos estão indicados com o valor para 2θ , e a legenda (Tabela 4.22) relaciona os compostos e a posição no eixo.

Trindade (2017) pesquisou as amostras de solo coletadas na jazida Begot e os resultados obtidos com a análise do DRX concluíram a presença de picos acentuados de quartzo (SiO_2) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) padrão comum para solos de composição de solos tropicais.

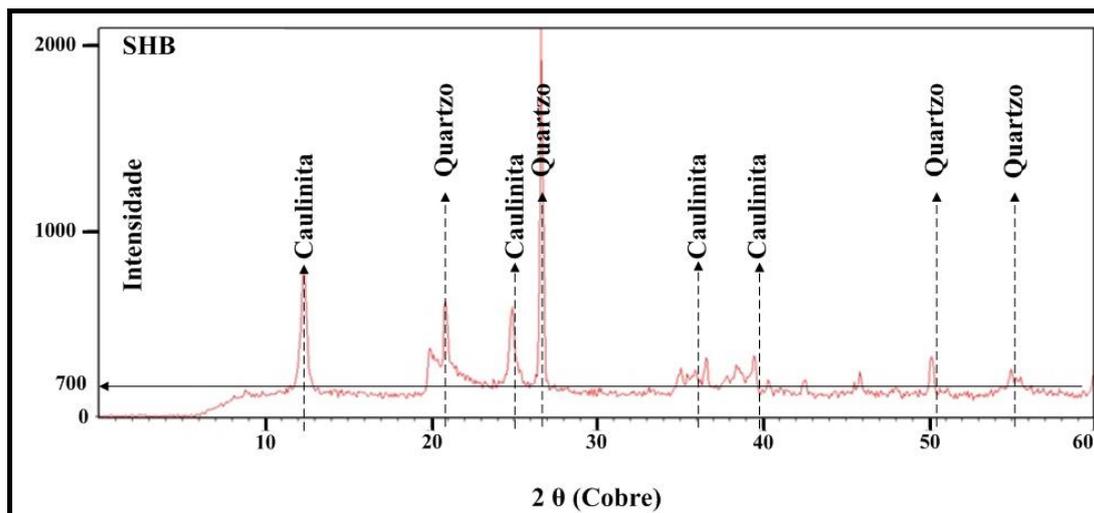


Figura 4.16 - O solo puro SHB apresenta intensidade média de 700 cps.

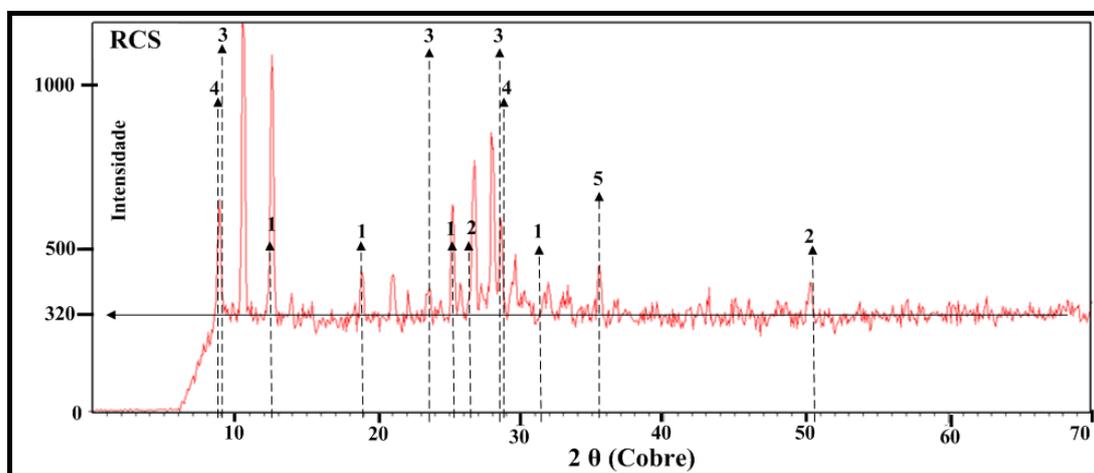


Figura 4.17 – DRX para o RCS adaptado com destaque a indicação da intensidade média 320.

Tabela 4.22 – Compostos RCS e posicionamento 2θ DRX.

Composto	2θ (Comprimento de onda)			
1 - Hidróxido de silicato alumínio e magnésio	12,563	18,866	25,245	31,647
2 - Quartzo	26,662	50,674		
3 - Sulfito alumínio potássio	9,297	23,663	28,522	
4 - Hidróxido duplo de ferro molibdênio	8,952	28,967		
5 - Hidróxido silicato de magnésio	35,554			

A análise dos resultados de DRX aconteceram para a mistura 50SHB+50RSC após a aplicação de carga para determinação do índice de suporte Califórnia, quando se constatou que as intensidades dos picos diminuíram. A linha contínua e a extremidade com seta paralela ao eixo de comprimento de onda da radiação X (posição 2θ) indicaram para o solo puro SHB intensidade média de 700 (Figura 4.16) e para o RCS com intensidade média de 320 (Figura 4.17), que, após a mistura compactada, a intensidade média passou a 200 cps (Figura 4.18).

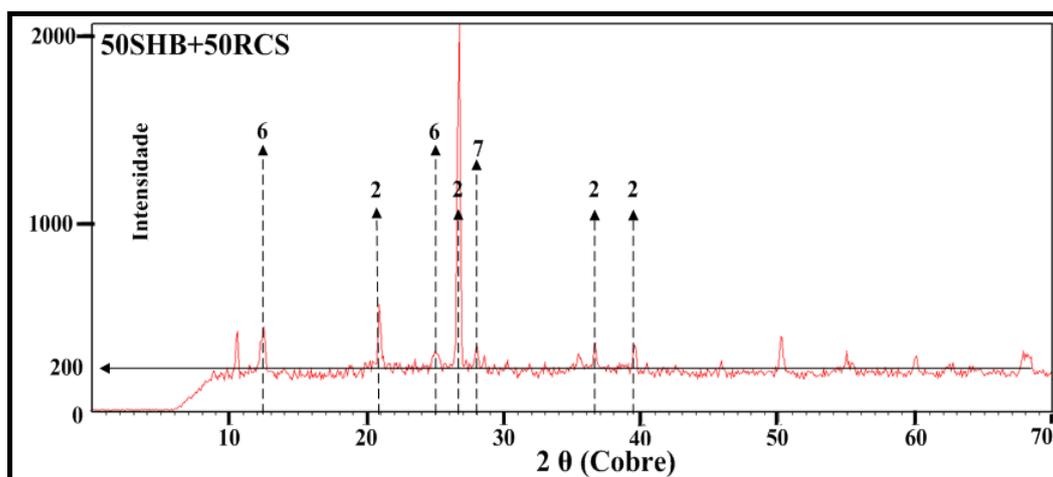


Figura 4.18 – DRX da mistura 50SHB+50RCS compactada, a intensidade média é de 200.

A análise da mistura feita com o DRX mostrou que as alterações após a compactação, a intensidade média dos compostos, fica menor, igual a 200 cps, o solo envolve o RCS e o quartzo domina os outros compostos. A Tabela 4.23 indica a posição 2θ dos compostos da mistura.

Tabela 4.23 – Compostos determinados em 50SHB+50RCS e o posicionamento.

Composto	2θ (Comprimento de onda)			
2 - Quartzo	20,871	26,654	36,567	39,487
6 - Hidróxido duplo de sódio e magnésio	12,380	24,907		
7 - Sulfito índio cobre	27,967			

O estudo mineralógico realizado neste trabalho de pesquisa indica que a maioria das amostras contém quantidade substancial de caulinita como mineral principal de argila. Os solos lateríticos tropicais são ricos em sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) e também contém óxidos de magnésio (MgO) e de cálcio (CaO). Os resultados da Composição Mineralógica – Raio x de pesquisadores nacionais e internacionais serviram para certificar a composição mineralógicas dos solos SHC e SHB aqui

pesquisados (BISWAL *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2017; BATOLINE, 2007; MASCARENHAS, 2016).

4.8.2 Determinação do grau de acidez – pH.

O procedimento foi realizado em duplicata e com o auxílio do pHmetro quando houve a leitura, para registrar os resultados das análises em laboratório. A Tabela 4.24 e a Figura 4.19 mostram os resultados obtidos. O pH dos solos variou entre 3,87 a 4,62, o que mostrou serem ácidos, e o RCS apresentou o pH entre 9,18 a 9,24, ou seja, é básico.

Tabela 4.24 - Resultados obtidos em duplicata nas análises de acidez das amostras.

Materiais	Amostra_1	Amostra_2	Análise
SHC	4,61	4,62	Ácido
SHB	3,96	3,87	Ácido
RCS	9,18	9,24	Básico
50SHB+50RCS Compactado	8,12	8,28	Básico

Após o ensaio do índice de Suporte Califórnia da mistura 50SHB+50RCS houve coleta da amostra e novo ensaio para determinação do pH e os valores obtidos foram 8,12 e 8,28: básico. O RCS básico neutralizou a acidez do solo.

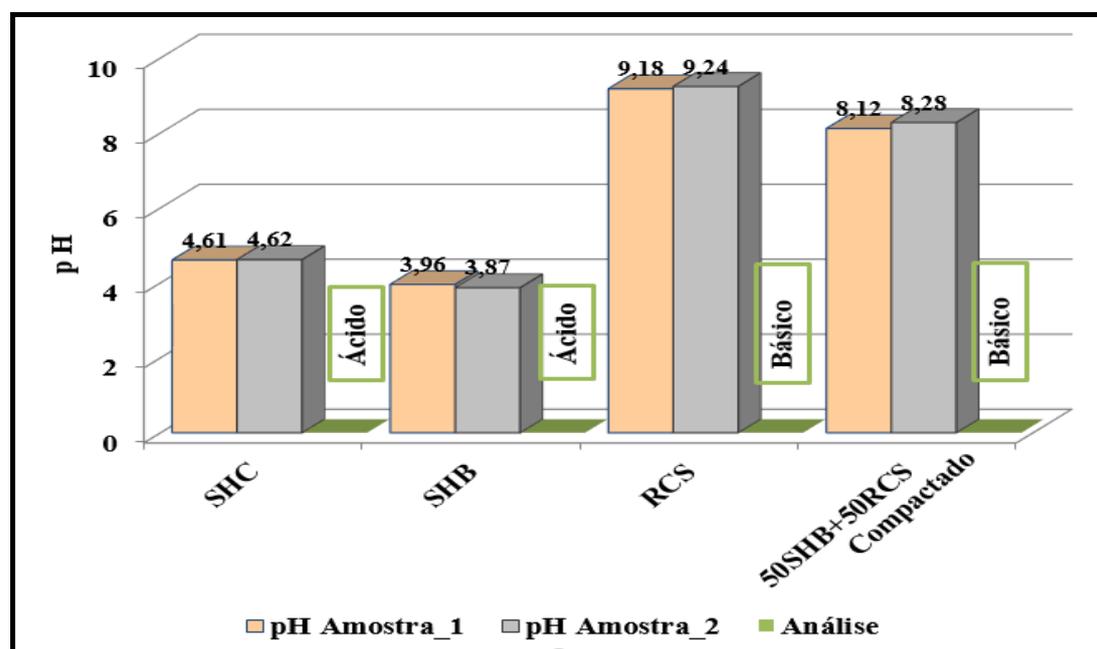


Figura 4.19 - Comparativo dos resultados obtidos em duplicata.

O resultado experimental para os solos SHC e SHB permite classificar os solos como ácidos, o que se confirma pelos documentos pesquisados (MEDINA *et al.*, 2017; MOONJUN *et al.*, 2017; ANDE *et al.*, 2016; BATOLIONE, 2007) e citados de que os solos tropicais são ácidos com valor mínimo (pH = 4,32) e máximo (pH = 8,95).

O estudo desenvolvido por REICHERT *et al.* (2016) afirma que: 50% das terras aráveis no mundo são ácidas (pois apresentam $\text{pH} < 5,5$). Relativamente à área desta pesquisa, TRINDADE (2017) também pesquisou amostras da jazida Begot e determinou o pH do solo SHB, o resultado mostrou: solo ácido.

4.9 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Os estudos foram desenvolvidos no laboratório de Engenharia Química/UFPA. As análises foram realizadas com 11 imagens, em cinco pontos escolhidos para cada solo (SHC, SHB), três imagens em dez pontos para RCS e mistura 50SHB+50RCS, após receber carga de compactação no ensaio de índice de Suporte Califórnia. Os aumentos das imagens variaram de 40 a 1.500 vezes.

As imagens, com alta ampliação e resolução, permitiram constatar a porosidade dos materiais. As microestruturas apresentaram forma irregular com dimensão que variou do silte à areia fina. Os solos SHC e SHB são apresentados na Figura 4.20 com imagens de aumento de 600X e na Figura 4.21 com imagens de aumento de 1.000X.

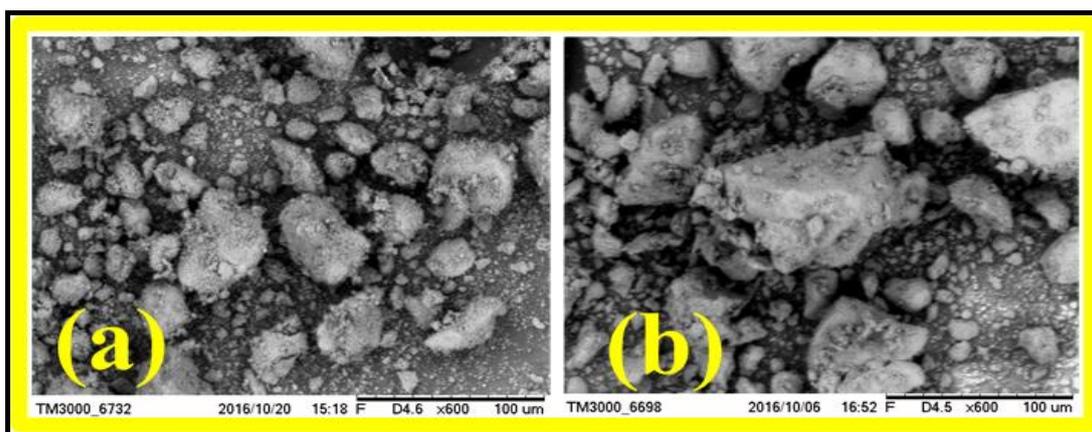


Figura 4.20 – Imagens ampliadas 600X: a) SHC, b) SHB.

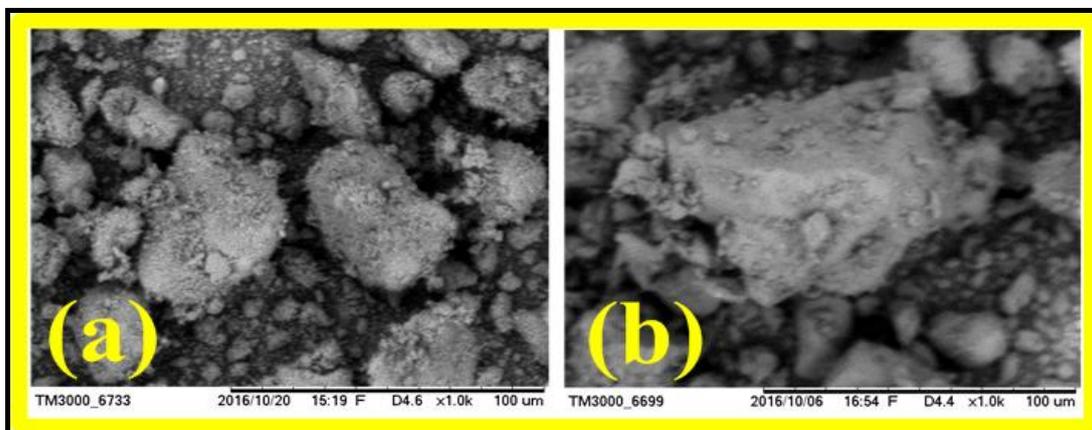


Figura 4.21 – Imagens 1000X: a) SHC com poros menores, b) SHB poros maiores.

O processo de verificar as medidas dos grãos é mostrado na Figura 4.22 com a imagem do RCS ampliada 1.000X. A escolha do grão foi o que possibilitou uma melhor visão e variedade de tamanho, para propiciar melhor análise dos solos. O método MEV foi utilizado para comparar a microestrutura dos materiais e misturas. O solo SHC e o RCS foram misturados em 50% (50SHC+50RCS), enquanto o solo SHB foi misturado com RCS em 70% (70SHB+30RCS) e 50% (50SHB+50RSC).

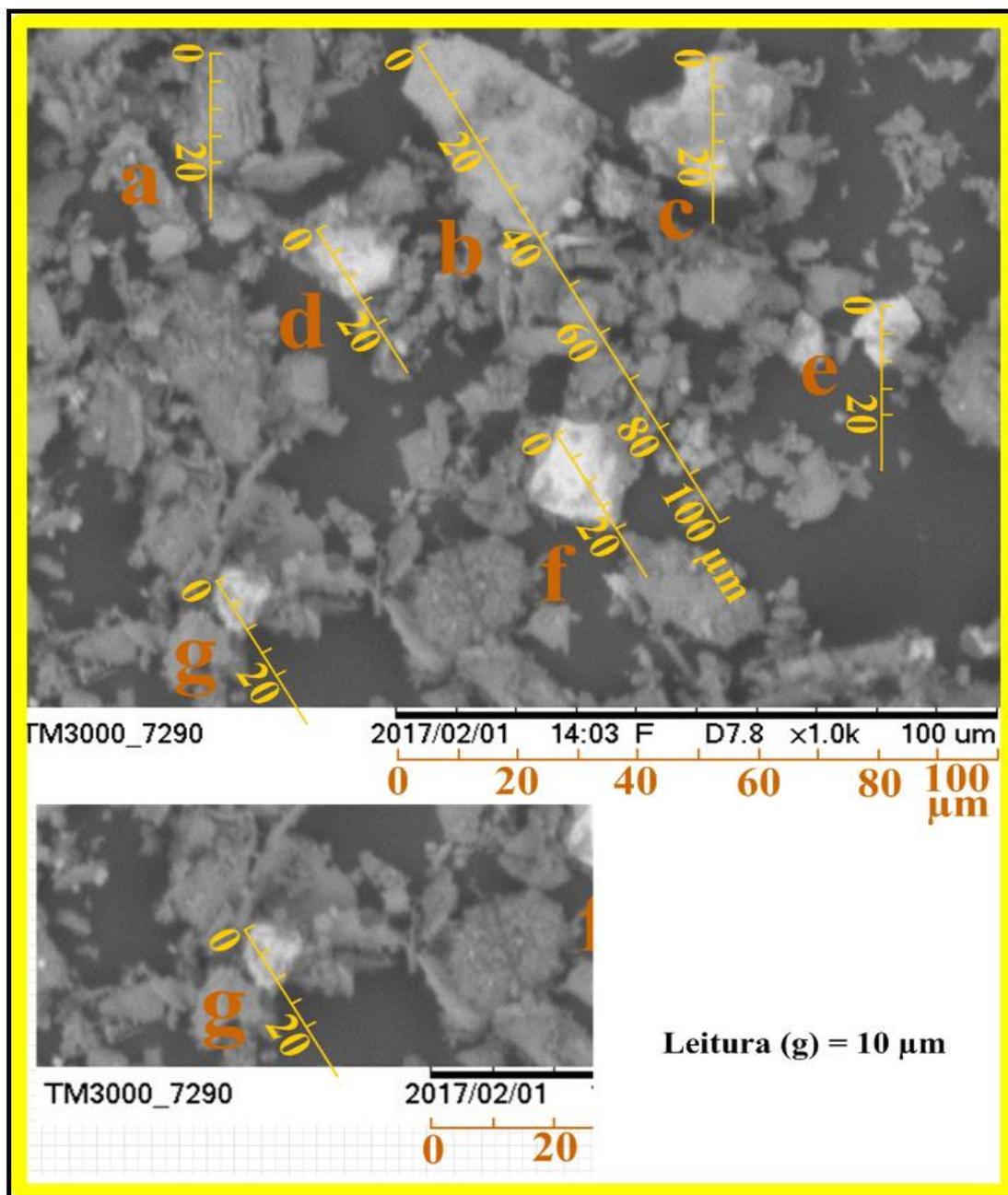


Figura 4.22 – Análise das dimensões dos solos com imagem ampliada 1.000X.

A análise MEV aconteceu para a mistura 50SHB+50RCS. Após sua realização, a mistura foi submetida à carga de compactação para determinação do Índice Suporte

Califórnia e expansão. Ficou evidente a partir das Figuras 4.23 e 4.24 que a porosidade das amostras reduziu consideravelmente quando adicionado o RCS.

A forma do RCS, de aspecto triturado com ponta aguçada, ao ser misturado com o solo propiciou que a mistura passasse a ter forma mais próxima do solo argiloso e menos do RCS.

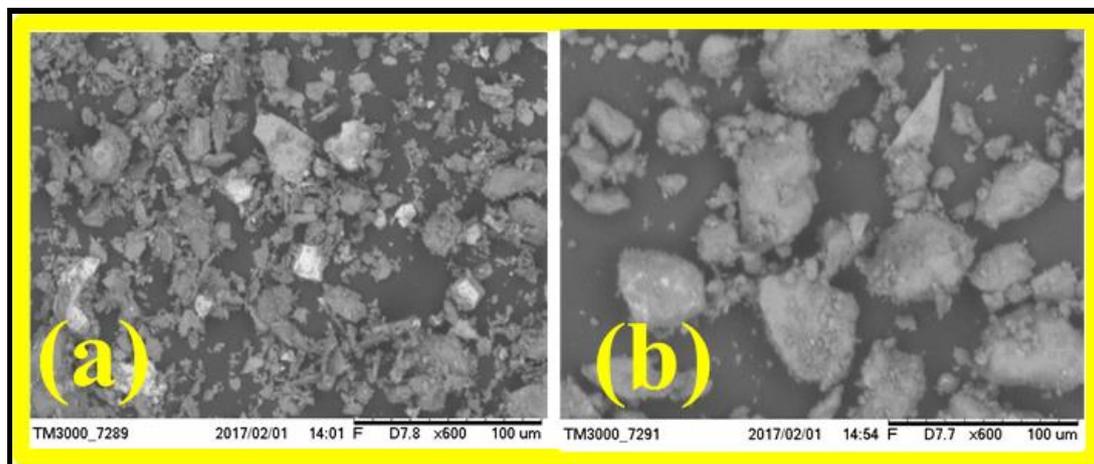


Figura 4.23 – Imagem ampliada 600X: a) RCS, b) 50SHB+50RC após compactação.

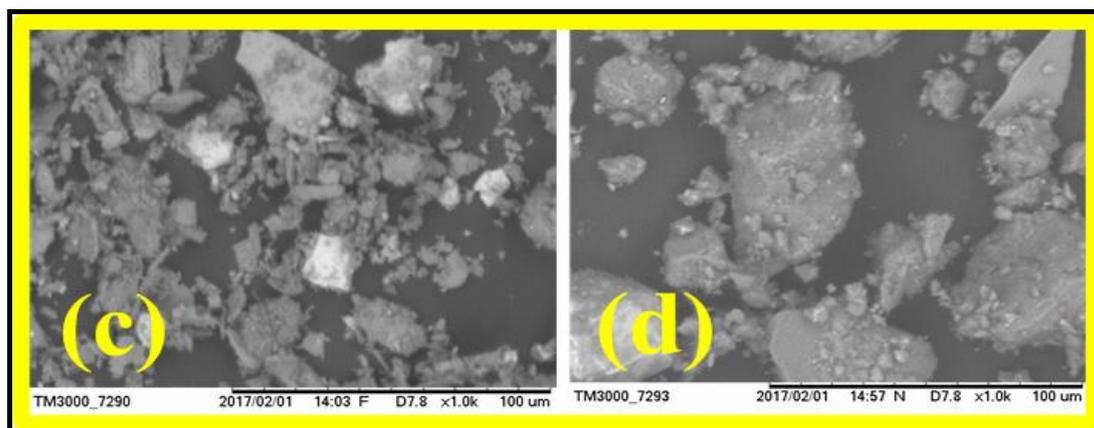


Figura 4.24 – Imagem ampliada 1000X (c) o RCS e (d) 50SHB+50RC após compactação.

A Tabela 4.25 relaciona as medidas dos grãos do solo, resíduo e mistura quando os grãos do solo envolvem o RCS, que perdeu seu aspecto triturado. Na observação com as medidas dos grãos, após a compactação a diferença média dos grãos no solo SHB para os grãos da mistura 50SHB+50RCS foi menor 39,82 % e a diferença entre os grãos do RCS para os da mistura foi de 17,09 % sendo que na mistura que os poros ficam reduzidos.

Tabela 4.25 - Medidas dos grãos do solo, resíduo e mistura após compactação.

Materiais	SHB		RCS		50SHB+50RCS	
	µm	mm	µm	mm	µm	mm
(a)	60,00	0,0600	20,50	0,0205	20,00	0,0200
(b)	50,00	0,0500	40,00	0,0040	15,00	0,0150
(c)	5,00	0,0050	20,00	0,0200	7,50	0,0075
(d)	3,00	0,0030	15,00	0,0150	15,00	0,0150
(e)	12,50	0,0125	10,00	0,0100	15,00	0,0150
(f)	5,00	0,0050	20,00	0,0200	5,00	0,0050
(g)	1,60	0,0016	10,00	0,0100	5,00	0,0050
Maior	60,00	0,0600	40,00	0,0205	20,00	0,0200
Menor	1,60	0,0016	10,00	0,0040	5,00	0,0050
Média	19,59	0,0196	19,36	0,0142	11,79	0,0118

A composição química dos materiais foi analisada em pontos observados, ou seja, nos espectros. Os resultados apresentados para os solos, SHC e SHB, e para o RCS e mistura 50SHB+50RCS mostraram dois grupos (Tabela 4.26) distintos no que diz respeito à variação percentual desses elementos nos solos: o primeiro grupo é representado pelos elementos Oxigênio, Carbono, Alumínio e Silício com percentuais de 7 a 69% enquanto o segundo grupo apresentou menor percentual de ferro e titânio, próximos de 1%.

Tabela 4.26 – Concentração dos elementos químico em peso (%) dos solos.

Elemento Químico	SHC (%)		SHB (%)	
	Médio	Mínimo / Máximo	Médio	Mínimo / Máximo
Oxigênio	60,76	49,48 / 68,96	60,52	53,48 / 64,11
Carbono	17,65	15,99 / 18,96	17,61	14,26 / 20,10
Alumínio	9,51	3,35 / 14,58	8,52	2,05 / 12,40
Silício	18,26	11,56 / 29,18	11,43	7,22 / 20,10
Titânio	0,31	0,17 / 0,49	0,28	0,17 / 0,39
Ferro	0,75	0,28 / 1,48	1,71	0,30 / 3,16

A mistura do RCS e solo quando submetida à carga para efeito de compactação sofreu alterações das características dos materiais e, com suas amostras, foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por dispersão de energia de raios x (MEV/EDS) a fim de identificar as principais alterações, antes e após a compactação. A Tabela 4.27 mostra 9 dos 13 elementos presentes e identificados no RCS e mistura.

Tabela 4.27 – Concentração dos 9 elementos químico (%) do RCS e mistura 50SHB+50RCS.

Elemento Químico	RCS (%)		50SHB+50RCS, compactado (%)	
	Médio	Mínimo / Máximo	Médio	Mínimo / Máximo
Carbono	6,53	8,81 / 21,44	17,13	17,18 / 46,93
Oxigênio	46,35	23,74 / 65,50	50,00	25,40 / 64,99
Sódio	2,18	0,56 / 7,27	1,28	0,50 / 7,06
Magnésio	2,25	0,70 / 8,53	0,28	0,33 / 1,60
Alumínio	4,36	1,11 / 8,95	7,62	2,75 / 11,50
Silício	10,49	2,99 / 26,83	11,94	2,52 / 23,46
Cloro	0,36	0,26 / 1,87		
Cálcio	2,21	0,26 / 11,75	1,66	0,16 / 2,59
Titânio			0,46	0,16 / 1,43
Ferro	26,24	1,21 / 60,49	9,21	0,45 / 48,12

Os resultados obtidos com as análises de difração de raios x (DRX) e de microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por dispersão de energia de raios x (MEV/EDS) a fim de identificar os elementos químicos dos materiais e misturas, estiveram de acordo com os resultados apresentados por OLUWASOLA *et al.* (2014 e 2015) e PAVEZ *et al.* (2016): a composição química do resíduo varia, mas os principais óxidos presentes são óxido de silício (SiO₂), óxido de cálcio (CaO), óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃), óxido de magnésio (MgO) e óxido de enxofre (SO₂).

A Figura 4.25 e a Tabela 4.28 construída com os valores menores e maiores de OLUWASOLA *et al.* (2015) e PAVEZ *et al.* (2016), apresentam um comparativo com os resultados dos quantitativos presentes no RCS de Canaã dos Carajás, mina do Sossego. A linha azul é o limite inferior enquanto a linha amarela representa os valores superiores. Os valores obtidos por MULLER e CASTRO (2008) e SHIMIZU (2012) estão dentro destes limites ou próximo dos mesmos, o que mostra a semelhança entre os resultados.

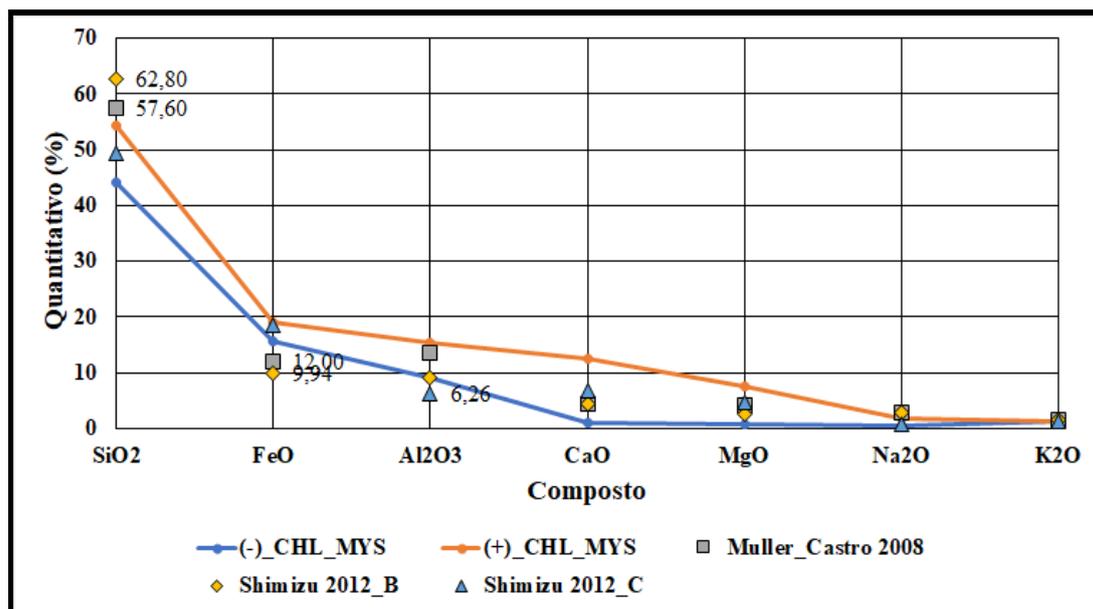


Figura 4.25 - Resultados comparativo presentes no RCS de Canaã dos Carajás.

Fonte: OLUWASOLA *et al.*, 2015; MULLER e CASTRO, 2008; SHIMIZU 2012; PAVEZ *et al.*, 2016.

Tabela 4.28 - Compostos químicos do RCS obtidos na Malásia, mina do Sossego e Chile.

Composto	Fonte Quantitativo (%)				
	Oluwasola <i>et al.</i> , 2015	Muller_Castro 2008	Shimizu 2012_B	Shimizu 2012_C	Pavez <i>et al.</i> , 2016
SiO ₂	44,10	57,60	62,80	49,30	54,30
FeO	19,00	12,00	9,94	18,50	15,70
Al ₂ O ₃	15,40	13,70	9,12	6,26	9,21
CaO	12,48	4,37	4,55	6,73	1,14
MgO	0,87	4,10	2,52	4,60	7,66
Na ₂ O	0,46	2,79	2,87	0,82	1,75
K ₂ O	1,24	1,69	1,60	1,34	1,42

Fonte: Oluwasola *et al.*, 2015; Muller e Castro 2008; Shimizu 2012; Pavez *et al.*, 2016.

O resultado dos compostos químicos do RCS de Canaã dos Carajás, pesquisados por MULLER e CASTRO (2008) e SHIMIZU (2012), foram comparados com a pesquisa de OLUWASOLA *et al.*, (2015) na Malásia e de PAVEZ *et al.*, (2016) com minas de cobre no Chile. Os valores encontrados no RCS estão próximos no quantitativo e iguais no qualitativo.

A composição química do resíduo do cobre pesquisado da Malásia (MYS) e Chile (CHL) varia, mas os principais óxidos presentes são óxido de silício (SiO₂), óxido de cálcio (CaO) e óxido de alumínio (Al₂O₃). Outros incluem óxido de ferro (Fe₂O₃),

óxido de magnésio (MgO) e óxido de enxofre (SO₂) (OLUWASOLA *et al.*, 2015 e PAVEZ *et al.*, 2016).

A presença do RCS alterou as características dos solos que apresentaram propriedades físicas e químicas na fase de pré-qualificação favoráveis para aproveitamento do RCS em camadas de pavimentação. Os resultados obtidos com solos, RCS e misturas serão considerados nos próximos itens dedicados à proposta para o emprego do RCS em camadas de pavimentos.

4.10 ELEMENTOS DA ESTRUTURA DE PAVIMENTO ASFÁLTICO

A bibliografia clássica que descreve os elementos da estrutura de pavimento asfáltico, mostrando que são constituídos por camadas (Figura 4.26).

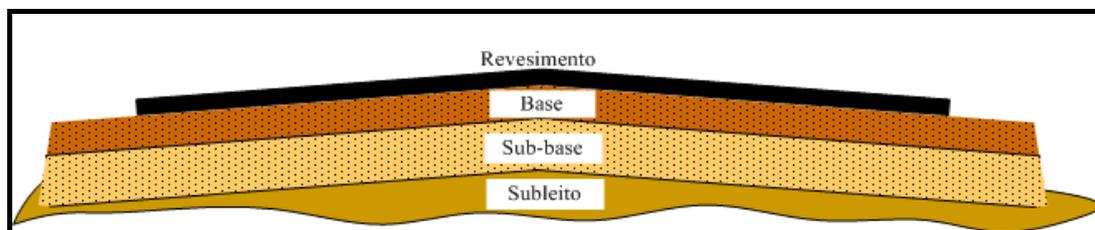


Figura 4.26 – Camadas típicas de um pavimento asfáltico.

Exemplo típico é o pavimento constituído por um revestimento betuminoso delgado sobre as seguintes camadas (SOUZA, 1980):

- a) Revestimento – camada destinada a resistir diretamente às ações do tráfego, além de impermeabilizar o pavimento, melhorar as condições de rolamento, melhorar conforto e segurança e a transmitir as ações do tráfego às camadas inferiores;
- b) Base – camada destinada a transmitir a sub-base as ações do tráfego;
- c) Sub-base – camada complementar à base, com as mesmas funções desta e executada quando, por razões de ordem econômica reduzir a espessura da base e transmitir as ações do tráfego ao subleito (SOUZA, 1980).

4.11 MATERIAIS ALTERNATIVOS NO ESTADO DO PARÁ

Na construção de pavimento asfáltico no Estado do Pará, por não haver especificação técnica própria, são consideradas as especificações rodoviárias do DNIT, adaptadas para a construção local. São citados como exemplo de materiais alternativos utilizados para construção de base a piçarra e a tabatinga para construção de sub-base.

4.11.1 Construção de base e sub-base

Para a construção de base e sub-base devem ser consideradas as propriedades dos materiais, e BERNUCCI *et al.* (2010) consideram, a seleção dos materiais como uma etapa preliminar, que consiste em averiguar os materiais disponíveis quanto às características de natureza para serem empregados na estrutura dos pavimentos.

As características de natureza interferem nas propriedades geotécnicas no estado compactado. De maneira geral, os materiais de pavimentação compactados devem ser resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura. Os materiais são basicamente constituídos por agregados, solos e, eventualmente, aditivos como cimento, cal, emulsão asfáltica, entre outros.

4.11.2 Construção de pavimento em Santarém do Pará

A sequência de Figuras 4.27-29 mostram a construção de sub-base de pavimento asfáltico para a construção de vias rurais e urbanas em Santarém, cidade situada na região oeste do Estado do Pará, executada com Tabatinga.



Figura 4.27 - Jazida para extração da tabatinga em Santarém – Pará.

Tabatinga é um solo fino e em Tupi quer dizer “Barro Branco” (GUIMARÃES, 2009). O estudo considerou as amostras de solo do Estado do Acre, e não deve ser confundido com o material sedimentar de coloração branca, constituído, predominantemente, de caulinita e amplamente utilizado na indústria cerâmica, e que possui a mesma nomenclatura em certas regiões brasileiras.



Figura 4.28 – A tabatinga no local para execução da sub-base.



Figura 4.29 – Sub-base executada com tabatinga.

No Estado do Acre a tabatinga é um silte argiloso conhecido na prática rodoviária regional por sua elevada expansão quando em contato com a água. Entretanto, devido à sua generalizada ocorrência, ao longo de quase todo o estado do Acre, sua remoção em obras de engenharia não se mostra viável.

A construção de base para pavimento asfáltico de vias rurais e urbanas em Santarém (Figuras 4.30 e 4.31) é executada com a piçarra (laterita) e segundo VERTAMATTI (1988) em seu trabalho de tese sobre as amostras coletadas que corresponderam, no caso dos solos de textura fina e amostras de solos lateríticos concrecionados, conhecidos e denominados localmente de piçarras, utilizadas como camadas de pavimentos aeroportuários, já executados ou em fase de estudos, compondo sub-bases ou bases de acordo com a magnitude de suas propriedades geotécnicas.



Figura 4.30 – Execução de base com laterita (piçarra).



Figura 4.31 - Base com laterita à espera da imprimação e revestimento.

Em Santarém, para a construção de base, é utilizada a laterita denominada de piçarra e a construção de sub-base é constituída por tabatinga. No presente momento a areia branca de cava passou a ser adicionada a tabatinga.

4.12 REGIÃO DO ESTADO DO PARÁ: VIAS RURAIS E URBANAS

Na região da Figura 4.32, está localizado o projeto de mineração S11D, mais precisamente no município de Canaã dos Carajás, que por sua vez, está incluído no 5º Núcleo Regional da administração das vias rurais do Estado do Pará (SETRAN, 2013).

As rodovias, nesta região, somam um total de 1.431 quilômetros, distribuídos da seguinte forma: revestimento primário 245 km, tratamento superficial duplo 200 km e concreto asfáltico, 986 km (SETRAN, 2013).

Entre as sedes dos municípios podemos citar como exemplo Eldorado dos Carajás (Figura 4.33), sendo que os mapas foram divididos em retângulos com lados conhecidos para se estimar o comprimento das vias no sentido do comprimento e largura e obter a somatória por retângulo e a soma total de quilômetros das vias urbanas.

A Tabela 4.29 apresenta as cidades, sedes dos municípios, pertencentes ao 5º Núcleo Regional com o total de vias urbanas igual a 3.699 km. O quantitativo verificado GOOGLE MAPS (2016; 2017) aconteceu durante o mês de agosto de 2016 e foi citado por KATO (2016).

Tabela 4.29 – Total de vias urbanas localizadas próximas a mina S11D

	Cidade	Vias Urbanas (km)
1	Abel Figueiredo	28
2	Bom Jesus do Tocantins	33
3	Breu branco	68
4	Canaã dos Carajás	220
5	Curionópolis	68
6	Dom Elizeu	123
7	Eldorado dos Carajás	85
8	Goianésia	68
9	Itupiranga	60
10	Jacundá	120
11	Marabá	1.350
12	Morada Nova	28
13	Nova Ipixuna	44
14	Palestina do Pará	30
15	Parauapebas	1.080
16	Piçarra	20
17	Rondon do Pará	163
18	São Domingos do Araguaia	43
19	São Geraldo do Araguaia	59
20	São João do Araguaia	9
	Total em quilômetros de vias urbanas	3.699

A possibilidade para transportar o RCS de Canaã dos Carajás para outros municípios (Tabela 4.30) da região tem a finalidade de reduzir os custos de transporte. Neste estudo foram determinadas as seguintes distâncias a serem percorridas:

- Resíduo na S11D e transportado para cada cidade, total de 6.416 km;
- Resíduo transportado via férrea para Marabá e distribuído para as cidades via rodoviária 2.009;
- Resíduo transportado por ferrovia hoje existente 564 km.

Tabela 4.30 - Transporte por trem com distância entre a mineração S11D e as cidades.

	Cidade	Menor Distância rodoviária entre a Projeto S11D e cidade (km)	Menor Distância rodoviária entre Marabá e demais cidades (km)	Ferrovia existente
1	Abel Figueiredo	391	118	
2	Bom Jesus do Tocantins	365	92	
3	Breu branco	506	232	
4	Canaã dos Carajás	41	Via ferrovia	41
5	Curionópolis	143	Via ferrovia	143
6	Dom Elizeu	519	247	
7	Eldorado dos Carajás	171	102	
8	Goianésia	445	172	
9	Itupiranga	327	54	
10	Jacundá	375	102	
11	Marabá	273	Via ferrovia (polo)	273
12	Morada Nova	285	12	
13	Nova Ipixuna	319	46	
14	Palestina do Pará	448	92	
15	Parauapebas	107	Via ferrovia	107
16	Piçarra	303	230	
17	Rondon do Pará	431	159	
18	São Domingos do Araguaia	309	36	
19	São Geraldo do Araguaia	350	277	
20	São João do Araguaia	311	38	
	Total percorrido	6.416	2.009	564

A pesquisa sobre o potencial de utilização do RCS no revestimento asfáltico relatado neste item tomou por base a pesquisa de KATO (2016), que utilizou o mesmo material da mina do Sossego em Canaã dos Carajás.

4.13 REVESTIMENTO COM USO DO RCS

Segundo KATO (2016) a pesquisa partiu dos ensaios de vida de fadiga, onde foi adicionado o RCS na proporção de 10, 20 e 25% (Tabela 4.31), em substituição ao agregado miúdo: RCS substituir a areia. Foram então geradas as equações de fadiga e obtidos os coeficientes das mesmas. As condições de contorno consideraram um volume de tráfego de $N = 1,543 \times 10^7$, o clima da Região Metropolitana de Belém e dados de base e sub-base de CAVALCANTE (2010).

Tabela 4.31 – Dimensionamento da espessura do pavimento segundo SisPav.

Mistura com RCS (%)			Pavimento
Seixo	Areia	RCS	Espessura (cm)
75	25	Zer	5,00
75	15	10	
75	5	20	
75	Zero	25	

Fonte: KATO, 2016.

Os resultados apontaram para uma espessura de pavimento asfáltico de 5,00 cm, independente da proporção de resíduo aplicada, o que viabilizou a aplicação do resíduo, quando analisado por este ponto de vista em substituir a areia pelo RCS.

4.14 CAMADAS DE BASE E SUB-BASE COM USO DE RCS

A pesquisa de BASTOS *et al.* (2013) utilizou solos no município de Caucaia/CE que foram submetidos aos ensaios de caracterização, compactação, ISC e MR. O ensaio de MR desses solos foi avaliado nas unidades de compactação e pós-compactação. A partir dos resultados de laboratório foram realizadas análises numéricas para determinar tensões, deformações e deslocamentos atuantes nos pavimentos asfálticos.

Para o dimensionamento tivemos como referência a pesquisa de BASTOS *et al.* (2013), que determinou a espessura das camadas por meio do dimensionamento Mecanístico-Empírico, com uso do CAP3D (Tabela 4.32), as camadas de base e sub-base com solo foram determinadas em 10 cm de espessura e o MR entre 298 e 363 Mpa.

Tabela 4.32 – Determinação das camadas para solicitação de tráfego $N=1 \times 10^7$.

Camada	Espessura (m)	MR (MPa)
Revestimento Concreto Asfáltico	0,050	3.000
Base	0,100	363
Sub-base	0,100	298

Fonte: BASTOS, 2013

O trabalho de BASTOS *et al.* (2013) contribuiu para obtermos o valor estimado para o consumo do RCS nas camadas de base e sub-base que seria o de utilizar a mistura 70SHB+30RCS, pois apresentou MR (MPa) no intervalo de 286 a 529 MPa.

4.15 ANÁLISE TÉCNICA/ECONÔMICA COM USO DO RCS

KATO (2016) avaliou a possibilidade de pavimentação de vias rurais sob jurisdição do 5º Núcleo Regional da SETRAN (Secretaria Estadual de Transporte) no total de 1.431 km, com espessura de 10,00 cm e largura de pista de 10,00 m, que consumiria cerca de 3.420.090 toneladas de concreto asfáltico. Esta área foi escolhida pela sua proximidade as bacias de estocagem do resíduo. Completou-se o levantamento de que em um total de 3.699 km, com uma espessura de 5,00 cm e largura de pista de 7,00 m, consumiria cerca de 6.500.000 toneladas de concreto asfáltico.

Variando o teor de resíduo na mistura, obtendo-se outras características como a maior resistência a fadiga, foi elaborada a Tabela 4.33 apresenta o consumo de resíduo, podendo chegar até próximo de 1.7000.000 de toneladas para um teor de 25%.

Tabela 4.33 – Consumo de resíduo para pavimentação das vias da 5ª Regional.

Detalhes	Vias Urbanas	Rodovias
Extensão (km)	3.699	1.431
Largura da via (m)	7,00	10,00
Espessura do pavimento (cm)	5,00	10,00
Quantidade de Concreto Asfáltico (t)	3.094.213,50	3.420.090,00
Total de Concreto Asfáltico (t)	6.514.303,50	
10,00 % de Resíduo (t)	651.430,35	
20,00% de Resíduo (t)	1.302.860,70	
25,00% de Resíduo (t)	1.628.575,88	

Fonte: KATO (2016)

O resultado de caracterização do RCS determinou um teor de finos na ordem de 16%, podendo chegar a 260.572,14 toneladas (para 25% de resíduo).

Devido ao baixo teor de finos na areia, o concreto asfáltico produzido pelas empresas de pavimentação na região geralmente incluído como filler, o cimento Portland. Segundo a CBIC (Câmara Brasileira da Indústria da Construção) o cimento apresentou valor de 0,5652 R\$/Kg para agosto de 2016, o que geraria uma economia até R\$ 147.275.373,53 para 25% de resíduo em substituição à areia. Em valores por tonelada, para 25% de resíduo corresponderiam a R\$ 22,61.

Contribuindo com as camadas do pavimento, que denominamos de “pavimento ecológico”, o consumo de 70SHB+30RCS para a camada de base dos 1.431 km, largura de 10,00 m e 10 cm de espessura, nas rodovias do 5º Núcleo Regional da SETRAN (Secretaria Estadual de Transporte) estabelecido em Marabá e onde está localizada a mina do Sossego, em Canaã dos Carajás, e construção de camada de sub-base com largura de 10,00 m e 10 cm de espessura, resultaria no volume total, de base e sub-base igual a 2.862.000 m³ com 30% de RCS, que tem densidade igual a 2,895 t/m³ e o consumo de RCS seria de 2.485.647 toneladas.

Com a pavimentação das vias urbanas nas sedes dos municípios nesta região com o total de 3.699 km, e as mesmas condições de base e sub-base para a rodovia rural o consumo chegaria a 4.497.614 toneladas.

O consumo de RCS total (Tabela 4.34) para construção de camadas de base e sub-base de vias rurais e urbanas seria de 6.983.260 toneladas que somados ao maior consumo para o revestimento em concreto asfáltico 1.628.575 toneladas (KATO, 2016) se teria um consumo de RCS igual a 8.611.835 toneladas. Este consumo pode ser maior se o RCS for adicionado ao reforço do subleito.

Tabela 4.34 – Resultado experimental: Consumo do resíduo.

Camadas	Consumo de Resíduo (t)
Sub-base (10 cm)	3.491.630
Base (10 cm)	3.491.630
Concreto asfáltico (variável)	1.628.575
TOTAL	8.611.835

A economia ao transportar o RCS do local que está depositado, no caso do lago da barragem, do projeto S11D no sistema de transporte via ferroviária e rodovia para construção de revestimento, base e sub-base na região do 5º Núcleo Regional da SETRAN significa ter economia ao otimizar a distância média de transporte.

Segundo ISAAC (2017) o custo de transporte rodoviário é 6 vezes maior que o ferroviário. O autor considera que no transporte de mil toneladas por quilômetro, o custo de transporte no modal ferroviário é de R\$40,00, enquanto no rodoviário seria de R\$248,00.

É importante notar o valor considerado para o transporte rodoviário de R\$1,29/tonelada quilômetro (SETRAN, 2017), entre a jazida e local da obra ou usina com base no preço de referência do DNIT para o Estado do Pará, este é um valor médio de custo, pois depende das condições da via a ser utilizada: se asfaltada, com leito natural, ou tratamento primário e outros.

O RCS do projeto S11D para o município de Dom Elizeu distante 519 km (ver Tabela 4.30), com 123 km de vias urbanas a serem pavimentadas seriam necessárias 712.170 toneladas. Com valor de R\$1,29/t km, o custo do transporte por caminhão seria de R\$476.804.936,00.

O RCS (712.170 t) transportado por ferrovia para Marabá distante 273 km do projeto S11D (ver Tabela 4.30) teria um custo de R\$7.776.896,00. A distância entre Marabá e Dom Elizeu é 247 km, distância que o RCS seria transportado por rodovia e custo seria igual a R\$226.918.727,00. O custo total na modalidade ferrovia - rodovia seria igual a R\$234.695.623,00.

Na simulação do transporte de RCS apenas por rodovia (R\$476.804.936,00) e o transporte na modalidade ferrovia - rodovia (R\$234.695.624,00), o custo é reduzido em 2 vezes, ou seja, é a metade (0,5). O exemplo mostra que Marabá pode ser um polo distribuidor do RCS para a região, pois ajudaria a diminuir o custo do transporte.

4.16 EXPLORAÇÃO DE SOLO COM PROCEDIMENTO DE MINERAÇÃO

Neste item é destacada a exploração do solo, que deveria receber mais atenção no sentido de preservar o meio ambiente e se ter melhor controle de qualidade para execução de um pavimento rodoviário.

O movimento de terra para construção de pavimento asfáltico envolve milhões de toneladas. Em geral, durante a ação de desmonte do solo para a construção, não são considerados os horizontes B e C, e este modo de proceder dificulta o controle de qualidade dos serviços executados. Em consequência tem-se o desperdício que acontece na própria jazidas e durante a construção. Agir com atenção no momento de exploração da jazida merece consideração maior a fim de obter um melhor controle de qualidade com as análises das amostras desenvolvidas em laboratório.

As instruções do DNIT/DNER sobre o estudo de jazidas orientam os procedimentos de serviços de campo para coleta, caracterização do material e limpeza da camada superficial e o horizonte A. O problema acontece após a fase de estudo, isto é, quando o procedimento para desmonte, ato de lavrar, e transportar o material são de responsabilidade do executor da obra, ou do fornecedor.

4.16.1 – Serviço de exploração de jazida.

O serviço para exploração de jazida com solo granular e fino geralmente começa com a retirada do horizonte ou camada A, executado com trator “os Buldôzers” ou Motoniveladora. Após essa fase o serviço de limpeza é destinado a pá-carregadeira de rodas, ou escavadeiras. O detalhe que esse serviço fica sob a responsabilidade do operador do equipamento que executa o serviço de desmonte e carregamento dos caminhões, que atua de acordo a experiência que possui.

As atividades do operador dos equipamentos deveriam ser acompanhadas por um técnico, conhecedor de tipos de solo e de topografia a fim de orientá-lo sobre as informações que foram obtidas durante a fase de estudo da jazida relativas às seções transversais desenhadas para todos os alinhamentos do reticulado na direção em que o

trabalho é executado. A Figura 4.34, com destaque em borda verde, realça o resultado do procedimento: solo B misturado com solo C.

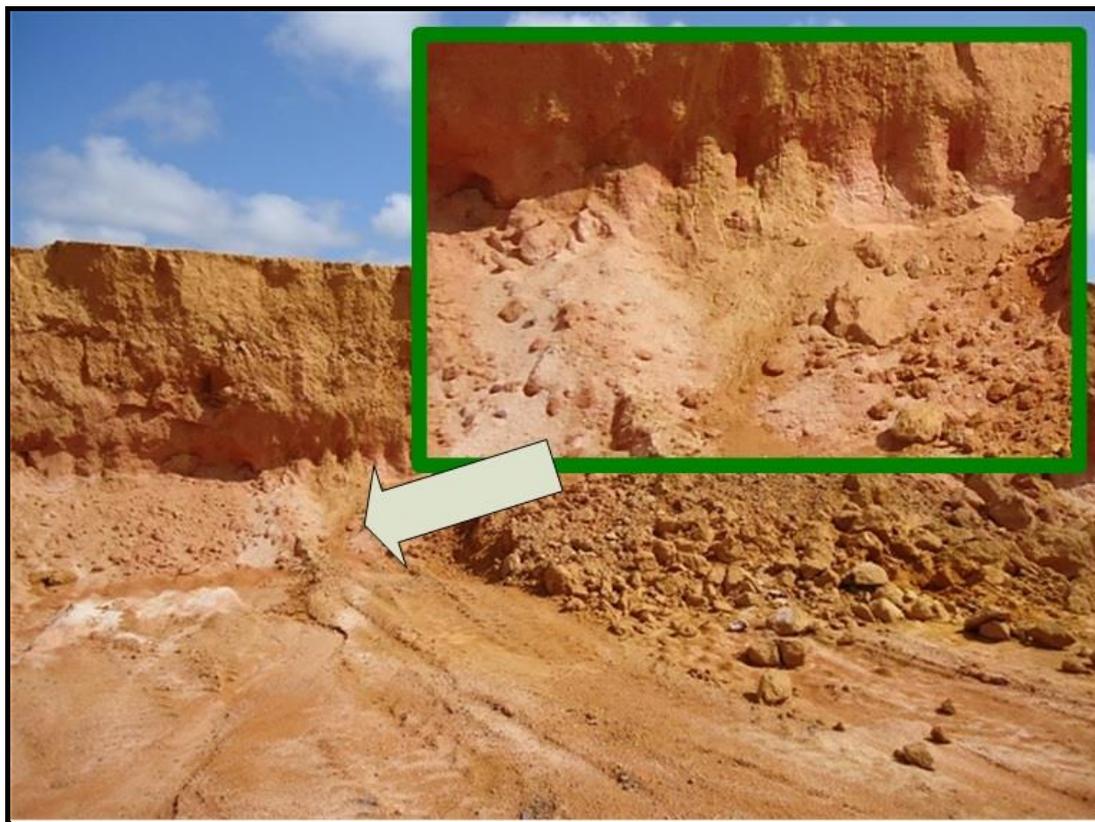


Figura 4.34 – Destaca o resultado do procedimento: solo B misturado com solo C.

O técnico, com as informações das seções transversais, auxiliaria a realização do trabalho de desmonte e transporte para evitar a mistura dos horizontes B e C que possuem características diferentes. A realidade, infelizmente, não é esta e, no final, acontece a perda da qualidade do material e o controle de qualidade dos ensaios de laboratório

4.16.2 Proposta de exploração de jazida de solo

Esse trabalho de tese inclui, entre os objetivos secundários, incentivar a lavra de areias, cascalhos, saibros e o beneficiamento associado, para utilização imediata na construção civil, conforme os horizontes pedológicos em tiras, ou seja, procedimento utilizado por mineradoras: *Strip Mine*. Em busca de diretrizes citamos os trabalhos que comumente são utilizados para orientar a exploração de jazida de solo a céu aberto.

RIBEIRO e PRADO (2008) colocam que, no planejamento de lavra a céu aberto, sejam considerados os elementos geométricos temporários ou definitivos, em função da sequência da lavra, que busca o melhor modo de conduzir a relação “estéril/minério ao longo da vida da mina”, ou seja, para a jazida em questão seria solo B/solo C. As bancadas

podem ser consideradas as unidades fundamentais de extração nas operações de lavra a céu aberto, e existem algumas que têm como função aparar os materiais que possam rolar de bancadas superiores e outras onde ocorre, efetivamente, o processo de lavra.

CAVADAS (2012) menciona que, eventualmente, a escavação na terra é efetuada para outros fins não intimamente relacionados com a extração mineral, mas que se torna possível por meio do conhecimento absorvido pela extração mineral. Os trabalhos relacionados com obras de construção civil, cujo o objetivo é executar serviços que apresentem um comportamento estável e duradouro no tempo, podem aplicar este procedimento.

O trabalho de FERREIRA (2004) apresenta uma breve avaliação da influência das atividades de mineração de rochas, visto que a rocha é um fator de instabilidade e agressão ao meio ambiente adjacente aos seus locais de exploração. Isto ocorre devido à falta de utilização de métodos de extração racionais e também à não existência de estudos técnicos prévios, para se obter dados da estrutura geológica e a determinação da metodologia de lavra, que é condicionada à morfologia da jazida, à sua cobertura não aproveitável (material estéril) e à necessidade de se remover os blocos selecionados após serem individualizados. Além disso, a configuração topográfica na região da lavra é um agravante dos problemas ao meio ambiente, principalmente quando ocorre o abandono precoce de uma frente de lavra, que outrora se pensava ser produtiva, mas que com o avanço da exploração mostra-se inviável, devido a vários fatores que poderiam ser pré-diagnosticados por um estudo ou avaliação inicial mais criteriosa. Conseqüentemente, o meio ambiente local sofre uma degradação que poderia ser minimizada, caso esse estudo técnico fosse realizado antecipadamente nas possíveis áreas de mineração.

A seqüência de estudo e exploração de mina a céu aberto ou subterrânea é parte do trabalho de COELHO *et al.* (2014) e pode ser considerada na exploração de jazida para construção civil. Neste caso, para que essa atividade seja possível, minas a céu aberto ou subterrâneas devem ser desenvolvidas de acordo com a geometria e localização da jazida.

O ciclo de vida de uma mina envolve basicamente cinco etapas:

a) Prospecção: esta etapa tem como objetivo procurar recursos minerais com potencial de se tornarem jazidas utilizando-se de técnicas, diretas ou indiretas, para localização dos corpos minerais;

b) Exploração: processo em que o depósito mineral é avaliado quanto à sua localização, forma física e viabilidade econômica, pela estimativa dos teores de corte, além das receitas e custos envolvidos em sua exploração;

c) Desenvolvimento: esta etapa consiste na preparação do local para o início das atividades de mineração, o que envolve a determinação da estrutura da mina, e a estimativa dos recursos necessários para que se possa alcançar a escala de produção desejada;

d) Exploração: envolve a extração e o beneficiamento dos minérios a partir de diferentes tecnologias;

e) Fechamento: processo de mitigação ambiental da área do empreendimento mineral.

Explorar, de uma maneira sustentável, é conceito estendido, sem exceção, a toda atividade de lavra em jazidas, seja mineral ou solo, e, desta forma, é de bom alvitre que seja levado em conta os horizontes A, B e C. A Figura 4.35 apresenta uma miniatura, maquete, construída em laboratório com solos da jazida Begot para exemplificar e incentivar a lavra do solo de acordo com a Instrução Normativa Nº 06, de 10 de novembro de 2014, que dispõe sobre procedimentos e critérios, no âmbito da Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Pará - SEMA/PA (PARÁ, 2014).

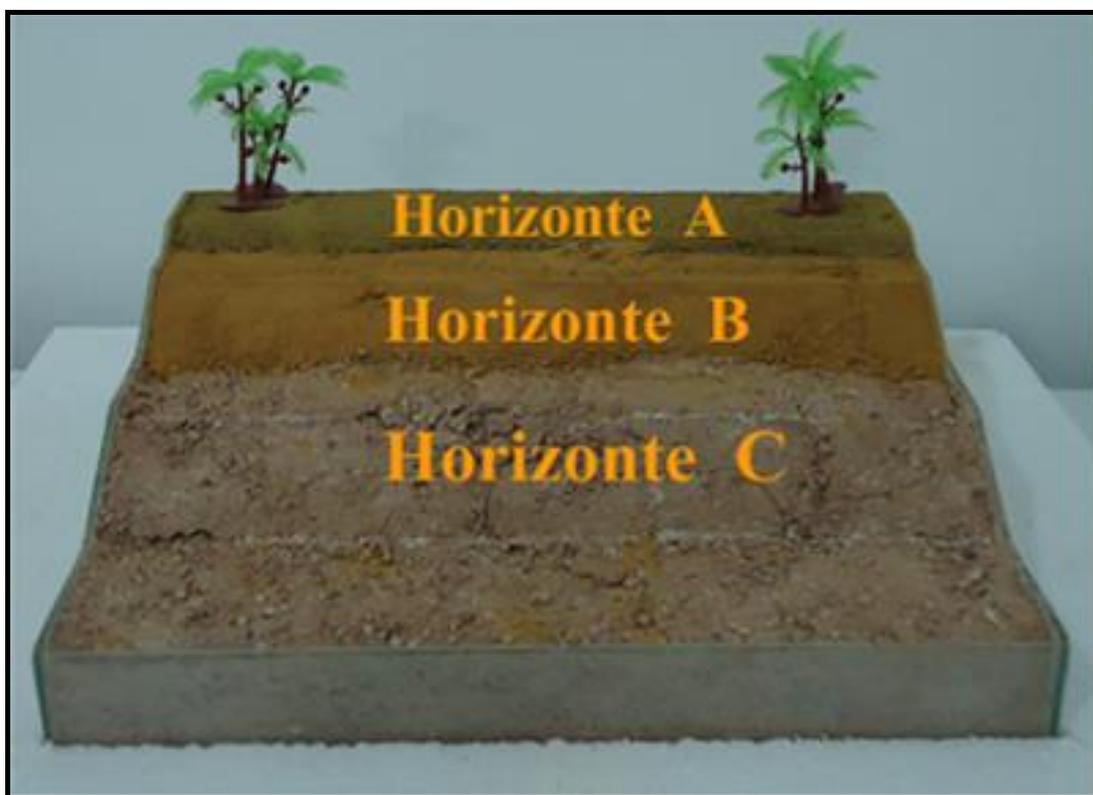


Figura 4.35 - Ação para extração de solo em tiras “Strip Mine” conforme os horizontes.

O licenciamento ambiental referente à extração de areias, cascalhos e saibros e o beneficiamento associado, para utilização imediata na construção civil a Instrução Normativa nº 06, de 10 de novembro de 2014, sugere que a ação para extração de solo, ocorra conforme os horizontes pedológicos em tiras *Strip Mine*, sistema de ordenamento da exploração em relação à sua condução, que consiste na recomposição da área explorada. A lavra por tiras (Figura 4.36) é um método aplicado à mineração a céu aberto.

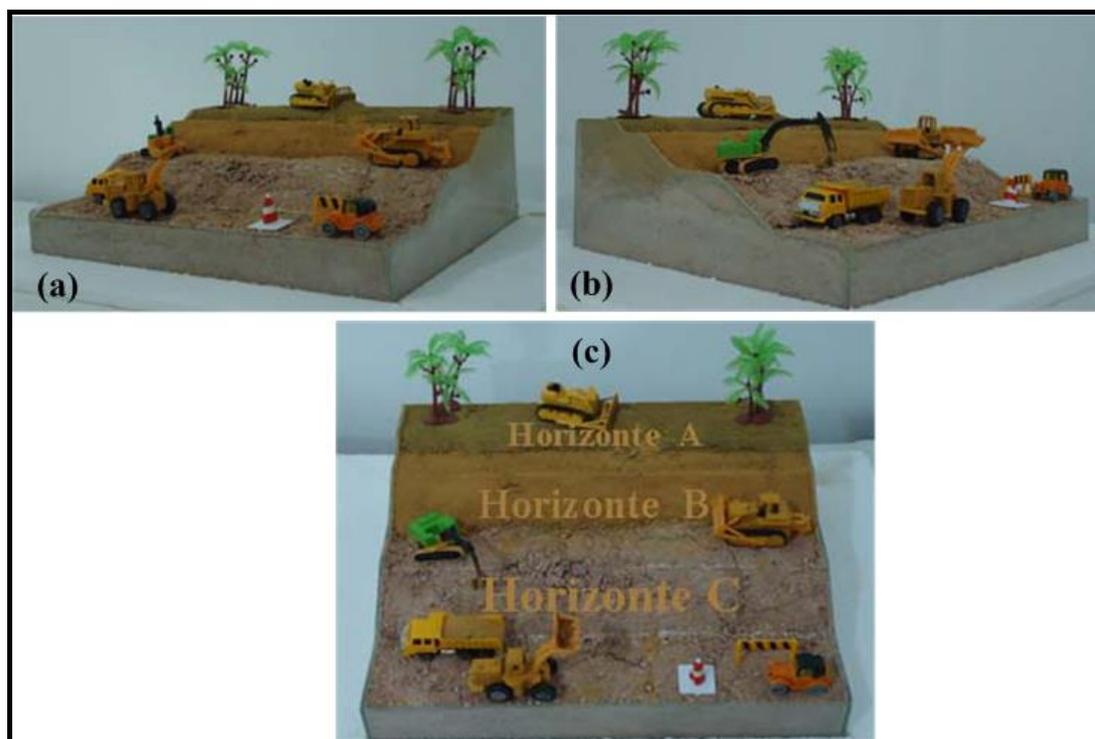


Figura 4.36 – O sistema “*Strip Mine*” utilizado em exploração mineral a céu aberto.

Segundo FERREIRA (2013) principalmente em jazidas com predominância de camadas horizontais (stratabound) com espessuras de minério menores em relação às grandes dimensões laterais. É semelhante à lavra por bancadas, diferindo em um aspecto: o capeamento não é transportado para um bota-fora ou pilhas de estéril, mas depositado diretamente nas áreas adjacentes já lavradas. Às vezes a mesma máquina faz a escavação e o transporte do estéril, em uma operação unitária. As Figuras 4.37 (a) e (b) são vistas das laterais direita e esquerda, enquanto a Figura 4.37 (c) é a vista frontal superior de um processo de exploração por Tiras.

4.16.3 Característica geométrica das cavas para lavra de jazida com solo fino.

A geometria proposta neste item toma por base os estudos de RIBEIRO e PRADO (2008). O dimensionamento da maioria dos componentes geométricos da cava ocorre em função do tamanho dos equipamentos de operação. Após ser definida a jazida,

são feitas cavas intermediárias onde os elementos geométricos podem ser temporários ou definitivos, em função do sequenciamento da lavra, que busca o melhor modo de conduzir a relação estéril/ minério ao longo da vida da mina, no caso para jazida estéril/solo.

As bancadas podem ser consideradas as unidades fundamentais de extração nas operações de lavra a céu aberto. Existem bancadas que têm como função aparar os materiais que possam rolar de bancadas superiores e outras onde ocorre efetivamente o processo de lavra.

As dimensões das bancadas dependem das seguintes características: depósito (volume, teor e outros), escala de produção, seletividade, porte dos equipamentos da operação, estabilidade dos taludes, custo e etc...

Os acessos ao solo serão feitos em busca da menor distância, entretanto é necessário considerar aspectos como a rampa máxima (10%), raio de curvatura mínimo e características do pavimento.

A lavra a céu aberto é composta basicamente por bancadas, taludes e acessos conforme pode ser visto na Figura 4.37.

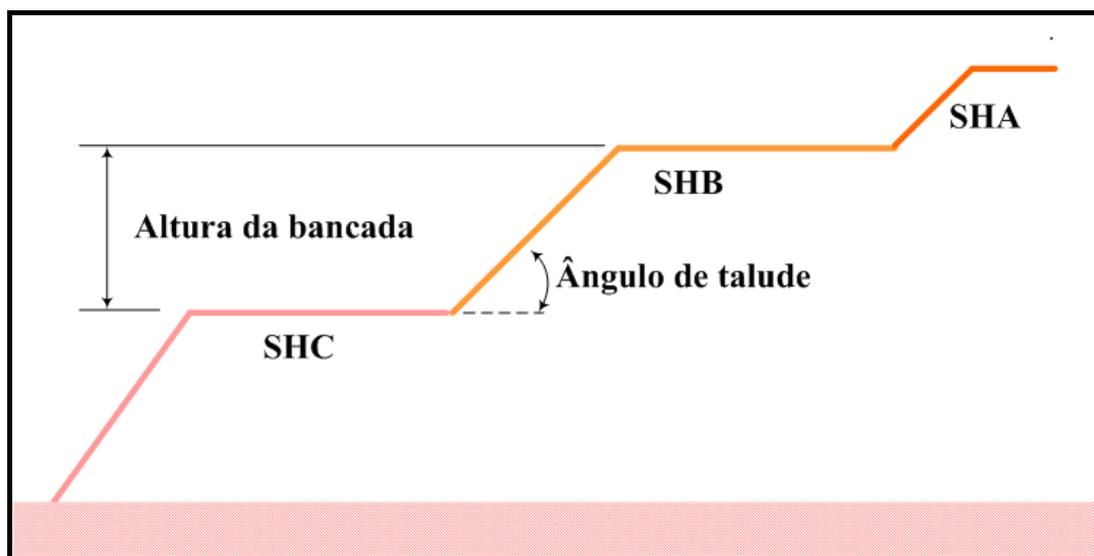


Figura 4.37 – Forma geométrica da cava.

Fonte: Ribeiro e Prado, 2008.

Propostas geométricas para exploração de jazida de solo são apresentadas de forma simplificada como as mínimas características que deveriam ser utilizadas:

- a) O desenho dos bancos tem altura de 2 e 4 m. Os bancos menores são usados para material descartado;
- b) Os taludes dos cortes serão limitados a uma altura de 4 m e a uma inclinação máxima de 10%, com bermas de 4 m de largura a cada 8 m de elevação, para melhorar as condições de estabilidade e drenagem;

c) Os sistemas de drenagem natural foram mantidos, sempre que possível, evitando-se concentrações excessivas escoamento.

4.16.4 Instruções normativas: Federal e Estadual.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) por intermédio do seu Instituto de Pesquisa Rodoviária (IPR) publicou os documentos IPR – 726 e IPR – 729, ambos de 2006, que formalizam as diretrizes básicas para elaboração de estudos e projeto rodoviários, com escopos básicos e instruções de serviço destinados à elaboração de estudos e programas ambientais rodoviários.

Quanto à geologia, orientam a identificação e o registro de jazidas de interesse econômico, com avaliação das atuais condições de exploração e comercialização, inclusive com vistas à utilização para execução das obras. Esses documentos indicam especificamente a Norma 070/2006-PRO, que dispõe sobre restrições ambientais instituídas de forma vinculada a vários programas ambientais e que contemplam as áreas de uso de obras. Especificam também a tarefa que envolve a utilização de jazida e as providências ambientais na fase de realização da obra e após o seu final (IPR, 2006).

A publicação IPR 739, de 2010, do Instituto de Pesquisa Rodoviária fornece as diretrizes básicas para elaboração de estudos e projetos rodoviários com as instruções para acompanhamento e análise, e tem o caráter orientador, não sendo normativo. Recomenda, esse documento, que cada estudo ou projeto rodoviário observe, principalmente, as particularidades do segmento rodoviário em estudo, objeto de cada contratação.

É de fundamental importância para a correta utilização dessas diretrizes, o entendimento de que as instruções nelas apresentadas, têm o objetivo de orientar os responsáveis pelo acompanhamento e análise de projetos rodoviários, e o conteúdo de cada instrução deve ser ajustado ao tipo de projeto que acompanha e analisa. É neste documento que há orientação específica para exploração de jazida a céu aberto (IPR, 2010).

5 CONCLUSÕES

As conclusões desta pesquisa com resíduo de cobre sulfetado (RCS) é que há possibilidade de ser aplicado para construção de pavimento com base nas análises dos resultados encontrados nos ensaios apresentados neste trabalho. As conclusões aqui apresentadas estão restritas ao número das amostras analisadas. Fazem parte deste capítulo recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

5.1 OBJETIVO REALIZADO

O objetivo deste trabalho de tese foi obtido ao analisar o “Potencial para a utilização do resíduo de beneficiamento de minério de cobre sulfetado em pavimentação”, com dados obtidos nos ensaios de laboratório e referendado segundo as fontes bibliográficas consultadas sobre a utilização de RCS e mistura com solo tropical fino:

- Os solos presentes com a variação de cores são característica dos solos brasileiros e que não acontece nos solos da Europa e da América do Norte. Os solos estão de acordo com a metodologia MCT e as especificações técnicas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. O SHB pertence à classe de comportamento laterítico do grupo LA’ (Laterítico Arenoso) e o SHC é do grupo LG’ (Laterítico Argiloso);

- O RCS + solo é inerte e sem problema ao meio ambiente pois não vai reagir ao ser misturado com o solo. Não houve interferência de contaminantes do rejeito, durante a fase dos ensaios com o RCS puro e mistura com solos;

- Os resultados de granulometria analisados e comparados a especificação DER/PR ES-P 08/05 a mistura 50SHC+50RCS seria aceita para construção de sub-base. Na etapa de estabilização granulométrica dos solos, verificou-se que o RPC pode ser empregado em misturas com solos para, pelo menos, compor as camadas de sub-base de pavimentos à luz dos métodos empíricos de dimensionamento. Essa aplicação representa uma oportunidade para o consumo do RCS;

- O resultado mostrou que há possibilidade de serem utilizadas para construção de base estabilizada granulometricamente. A curva granulométrica para a mistura 50SHB+50RCS e o RCS puro não atendeu apenas com o percentual na peneira 0,425 mm (Nº40) na faixa “F” do DNIT 141/2010.

- A mistura 70SHB+30RCS apresentou resultado mecânico satisfatório com ICS igual a 51% e pode ser usado para construção de sub-base para rodovia de baixo volume de tráfego segundo os métodos empíricos do DNIT;

- De acordo com os resultados do MR mostram que o RCS puro pode ser utilizados para regularização e reforço do subleito de pavimento;

- Os valores do MR médio para as misturas 50SHC+50RCS, 70SHB+30RCS e 50SHB+50RCS indicam que as misturas podem ser usadas para a construção de sub-base e base de pavimento econômico para rodovia com número $N < 5 \times 10^6$, ou seja tráfego do tipo médio.

- É viável incentivar e cobrar ação com propostas geométricas para exploração de jazida de solo no licenciamento ambiental, referente à extração de minério areias, cascalhos, saibros e o beneficiamento associado, para utilização imediata na construção civil que a lavra do solo seja de acordo com que dispõe sobre procedimentos e critérios, no âmbito do Meio Ambiente do Estado do Pará.

As análises efetuadas mostram os valores de módulo resiliente obtidos nos ensaios, e que o RCS é viável à utilização em construção de pavimentos. O resíduo é muito bom em termos de resiliência, mas como é uma areia muito fina, requer uma preocupação de incluir certa plasticidade para aderir o solo argiloso por questão da intensidade de chuvas na região do Estado do Pará que é em média acima de 1000 mm. Em termos de capacidade de carga o resíduo, por si só, pode ser usado para regularizar e reforçar o subleito, com solo SHB ou SBC para ter plasticidade por conter caulinita que é um composto argiloso.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Este trabalho revisou intensamente os potenciais do RCS, e suas propriedades de engenharia foram discutidas assim como a quantidade desses materiais, o potencial, verificando-se a plena viabilidade de usá-los como materiais rodoviários. A reciclagem destes materiais, como um substituto a agregados na indústria rodoviária reduzirá o risco de contaminação ambiental nas águas, solo, e floresta na região dos Carajás e em toda a bacia hidrográfica do rio Tocantins.

Outros benefícios ambientais incluem a economia no custo de exploração, ou cava, e, conseqüentemente, favorecer um ambiente mais limpo, propiciando a utilização

de matéria-prima de custo relativamente zero. Além disso, o uso do RCS reduz o custo de materiais virgens, sem comprometer o padrão do produto final.

É necessário aumentar o número de corpos de prova nos ensaios com a finalidade de haver maior representatividade dos resultados e, quanto mais a fração de silte e argila o solo apresentar, melhor será o resultado em termos geotécnicos e consumo do RCS.

Sugerir ação para extração de solo, conforme os horizontes pedológicos em tiras *Strip Mine*, é um assunto que apesar de ser debatido no setor de construção civil, não há interesse em incentivar a lavra do solo de acordo com que se dispõe sobre procedimentos e critérios, no âmbito do meio ambiente do Estado do Pará (2014) para o licenciamento ambiental referente à extração de minério de areias, cascalhos, saibros e o beneficiamento associado, para utilização imediata na construção civil. Entende-se que é preciso dar mais atenção a esta ação.

5.3 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Na presente pesquisa o RCS foi avaliado de acordo com as propriedades geotécnicas básicas e cumpre os requisitos para a segurança ambiental, por ser um material inerte. Contudo, são necessários ensaios geotécnicos mais avançados para investigar a sua aptidão em outras aplicações de engenharia civil, uma vez que se trata de um tipo de granito, ou seja, uma areia reciclada, portanto é de bom alvitre investigar:

- Misturar RCS com outros materiais, tais como o resíduo do caulim, da bauxita e do ferro, que são resíduos abundantes nas minas do Estado do Pará;
- Aplicar o RCS em um segmento com um comprimento de 1 km para melhor avaliar o resíduo puro e modificado no “campo”. A construção de um trecho com o RCS fornecerá ainda evidência conclusiva do desempenho real deste material, em condições reais de tráfego rodoviário;
- Estudar os efeitos da deformação permanente nas misturas com a presença de resíduo;
- Estudar os efeitos da fadiga em corpos de prova com adição de resíduo;
- A partir dos dados de deformação permanente, simular o dimensionamento das camadas do pavimento, inclusive do revestimento asfáltico com resíduo;
- A ideia de adicionar 1% de cimento Portland e cal hidratada é mais uma linha de pesquisa, e propor construção de pavimento para rodovias de tráfego pesado. O

concreto compactado com rolo - CCR pode se reverter em uma ampla linha de pesquisa com a utilização da laterita ou seixo;

- Executar misturas com solos argilosos e em caso de aplicação em campo, devem ser verificados com maior número de corpos de prova conforme recomendação do DNIT/DNER para estudo de jazidas.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma série de ensaios geotécnicos foram executados com o RCS e foram balizados de acordo com normas do DNIT/DNER e normas dos Estados do Paraná e São Paulo. Os estudos levantados, com a revisão bibliográfica, indicaram que não há riscos ambientais para o uso do RCS em aplicações rodoviárias no Estado do Pará e regiões próximas dos Estados do Maranhão e Tocantins.

Os valores de módulo resiliente obtidos nos ensaios, mostraram que é viável a utilização do RCS para utilização em base e sub-base, reforço e regularização do subleito de pavimentos e o trabalho de pesquisadores no Estado do Pará, São Paulo, Chile, Malásia indicaram que o RCS pode ser usado como um dos componentes para argamassa, concreto para a construção civil e contribuir com ação benéfica, não apenas para o Meio Ambiente e para a Engenharia mas também mitigar problemas de acúmulo de resíduos com um destino nobre a este material.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, J. C. M. **Georreferenciamento rural aplicado no município de Marituba, Pará.** Belém, 2016.
- ANDE, O.T. *et al.* **Characterization of floodplain soils in Southern Guinea Savanna of North Central Nigeria.** *Catena*, vol. 139, p. 19-27, 2016.
- ASAD, M.W.A.; QURESHI, M.A.; JANG, H. **A review of cut-off grade policy models for open pit mining operations.** *Resources Policy*, vol. 49, 142–152, 2016.
- AUTELITANO, F.; GIULIANI, F. **Electric arc furnace slags in cement-treated materials for road construction: Mechanical and durability properties.** *Construction and Building Materials*, vol. 113, p. 280–289, 2016.
- BASTOS, J. B. S.; HOLANDA, A. S.; BARROSO, S. H. A. **Comparação da influência da variação da umidade de compactação e de pós-compactação nas análises e no dimensionamento de pavimentos flexíveis.** *Anais: XXVII ANPET - Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte*, Belém, Pará 2013.
- BASTOS, T. X.; PACHECO, N. A.; NECHET, D.; SÁ, T. D. A. **Aspectos Climáticos de Belém nos Últimos Cem Anos.** Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2002.
- BATOLIONE, G. **Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedra de uma rocha granítica.** 2007. 190 p. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil, Universidade de Brasília), Brasília, 2007.
- BEHNOOD, A.; GHAREHVERAN, M.M.; ASL, F.G.; AMERI, M. **Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash.** *Construction and Building Materials*, vol. 96, p. 172–180, 2015.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica. Formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda, 2010.
- BISWAL, D.R.; SAHOO, U.C.; DASH, S.R. **Characterization of granular lateritic soils as pavement material.** *Transportation Geotechnics*, vol, p. 108–122, 2016.
- BREVIK, E.C. *et al.* **Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions.** *Geoderma*, vol. 264, p. 256-274, 2016.
- CANAÃ DOS CARAJÁS. **Diagnóstico Socioeconômico do Município de Canaã dos Carajás, Estado do Pará.** Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas do Estado do Pará. Canaã dos Carajás, 2016.

CAVADAS, P. M. M. **Optimização do desmonte numa mina a céu aberto com aplicação de air decks**. 2012. 204 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-ambiente), Universidade do Porto, Portugal, 2012.

COELHO, G. F. *et al.* **Análise do congestionamento do sistema produtivo de uma mina a céu aberto: comparativo entre soluções propostas por modelos de otimização e simulação**. In: XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Salvador, 2014. **Anais**. Salvador: UFBA, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 070/2006-PRO**. Condicionantes ambientais das áreas de uso de obras - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2006a.

_____. **IPR 726**: diretrizes básicas para elaboração de estudos e projeto rodoviários: Escopos básicos/instruções de serviço. Rio de Janeiro, 2006a.

_____. **IPR 729**: diretrizes básicas para elaboração de estudos e programas ambientais rodoviários. Rio de Janeiro, 2006b.

_____. **IPR 739**: diretrizes básicas para elaboração de estudos e projetos rodoviários: Instruções para acompanhamento e análise. Rio de Janeiro, 2010.

DNPN – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Cadastro nacional de barragens_2016_final 06-01-2017**. Brasília. Jan 2017.

DONRAK, J. *et al.* Improvement of marginal lateritic soil using Melamine Debris replacement for sustainable engineering fill materials. *Journal of Cleaner Production*, vol. 134, p. 515-522, 2016.

DUTRA, S.; VALE, C. **Utilização de solos lateríticos em pavimentos rodoviários**. *Geotecnia*, n°. 136, p. 81–93, 2016.

EMMERT, F.; PEREIRA, R.S. **Caracterização geotécnica e classificação de solos para estradas florestais: estudo de caso**. *Revista Ciência Florestal*, vol. 26, n°2, p. 601–613, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Extensão e distribuição dos solos no Brasil**. Disponível em: www.agencia.cnptia.embrapa.br. Acessado em 09 de abr 2017.

_____. **Mapas de solos e de aptidão agrícola das áreas alteradas do Estado do Pará**. Brasil, 2016.

_____. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. Brasil, 2013.

FERREIRA, G. C. S.; DOMINGUES, L.G.F.; TEIXEIRA, I.; PIRES, M.S.G. **Viabilidade técnica e ambiental de misturas de solo com areia descartada de fundição**. *Revista Transportes*, vol. 22, p. 62–69, 2014.

FERREIRA, G. S. **Estudo de estabilidade e tensões *in situ* na extração de rochas ornamentais no município de Santo Antônio de Pádua.** 2004, 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2004.

FERREIRA, L. A. **Escavação e exploração de minas a céu aberto.** 2013. 134 p. Trabalho de Conclusão (Curso de Engenharia) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013

GOOGLE. **Maps.** Disponível em: www.google.com.br/maps/@-6.4813749,-50.6697771,233660m/data=!3m1!1e3> Acesso em: 25 ago 2017

GUIMARÃES, A. C. R. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos.** 2009, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009, 367 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Arranjos Populacionais e Concentrações Urbanas do Brasil.** Rio de Janeiro, 2016

ISAAC, F. L. **Custo de transporte rodoviário e ferroviário.** SCOT CONSULTORIA, 2007. Disponível em www.scotconsultoria.com.br. Acesso em 30 de agosto de 2017.

JUILLERET, J. *et al.* **Mind the gap: A classification system for integrating the subsolum into soil surveys.** Geoderma. vol. 264, p. 332-339, 2016.

KATO, R.B. **Estudo da influência do resíduo de beneficiamento de cobre sulfetado nas propriedades do concreto asfáltico.** 2016. 147p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

LEI, H.; PENG, Z.; YIGANG, H.; YANG, Z. **Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines.** Ecological Engineering, vol. 94, p. 638–646, 2016.
LEISCHNER, S. *et al.* **Design of Thin Surfaced Asphalt Pavements.** Procedia Engineering, vol. 143, p. 844–853, 2016.

LIMA, R.M.F.; VASCONCELOS, J.A.; SILVA, G.R. **Flotação aniônica de rejeito de minério de manganês.** Revista Escola de Minas, vol. 61(3), p. 337-342, 2008.

MAHALINGA-IYER, U.; WILLIAMS, D. J. **Road construction using lateritic soil.** Engineering Geology, vol. 37, p. 199 – 209, 1994.

MAIA, A.A.B. *et al.* **Utilização de rejeito de caulim da Amazônia na síntese da zeólita A.** Cerâmica, vol. 53, p. 319-324, 2007.

MASCARENHAS, I. M. N. **Caracterização geotécnica dos solos da região metropolitana do cariri/ce para uso em pavimentação.** 2016, 141p. Dissertação (Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

MEDINA, H.; LIER, Q. J.; GARCÍA, J.; ELENA RUIZ, M.E. **Regional-scale variability of soil properties in Western Cuba**. *Soil & Tillage Research*, vol. 166, p. 84-99, 2017.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro, 2015.

MOHAMMADINIA, A.; ARULRAJAH, A.; HORPIBULSUK, S.; CHINKULKIJNIWAT. **Effect of fly ash on properties of crushed brick and reclaimed asphalt pavement base/subbase applications**. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 321, p. 547-556, 2017.

MOONJUN, R.; SHRESTHA, D.P; JETTEN, V.G.; RUITENBEEK, F.J.A. **Application of airborne gamma-ray imagery to assist soil survey: A case study from Thailand**. *Geoderma*, vol. 289, p. 196-212, 2017.

MORAGUES-QUIROGA, C. *et al.* **Genesis and evolution of regoliths: Evidence from trace and major elements and Sr-Nd-Pb-U isotopes**. *Catena*. Vol. 149, 185–198, 2017.

MRN – Mineração Rio do Norte. **Sequencia operacional. Produção de Bauxita**. Disponível em: <http://www.mrn.com.br>. Acessado em 27 mar 2017.

MULLER, A. S; CASTRO, F. J. **Uso do rejeito do beneficiamento do minério de cobre na produção de concreto para elementos pré-moldados**. 2008. 55 p. Monografia (Especialização em Tecnologia Mineral) - Universidade Federal do Pará, Parauapebas, 2008.

NEHRING, M; CHENG, X. **An investigation into the impact of mine closure and its associated cost on life of mine planning and resource recovery**. *Journal of Cleaner Production*, vol. 127, 228-239, 2016.

NGUYEN, B.T.; MOHAJERANI, A. **Resilient modulus of fine-grained soil and a simple testing and calculation method for determining an average resilient modulus value for pavement design**. *Transportation Geotechnics*, vol. 7, p. 59–70, 2016.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. Editora Vilibor, São Paulo, SP, 1995.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentos Econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. São Paulo, 2009.

OJURI, O.O.; ADAVI, A.A.; OLUWATUYI, O.E. **Geotechnical and environmental evaluation of lime–cement stabilized soil–mine tailing mixtures for highway construction**. *Transportation Geotechnics*, vol. 10, p. 1-12, 2017.

OLIVEIRA, D. B. **O uso do resíduo pedra cariri como material alternativo para aplicação em camadas granulares de pavimentos**. 2016, 107p. Dissertação (Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

OLUWASOLA, E.A.; HAININ, M.R.; AZIZ, M.M.A. **Comparative evaluation of dense-graded and gap-graded asphalt mix incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings**. *Journal of Cleaner Production*, vol. 122, p. 315-325, 2016.

OLUWASOLA, E.A.; HAININ, M.R; AZIZ, M.M.A. **Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction.** Transportation Geotechnics, vol. 2, p. 47-55, 2015.

OLUWASOLA, E.A.; HAININ, M.R; AZIZ, M.M.A.; YAACOB, H.; WARID, M.N.M. **Potentials of steel slag and copper mine tailings as construction materials.** Materials Research Innovations, vol. 18, n. 6, p. 250-254, 2014.

PAIGE-GREEN, P.; M. Pinard, M.; Netterberg, F. **A review of specifications for lateritic materials for low volume roads.** Transportation Geotechnics. vol. 5, p. 86–98, (2015).

PARÁ. **Instrução normativa n. 06, de 10 de novembro de 2014.** Dispõe sobre procedimentos e critérios para o licenciamento ambiental referente à extração de minério. Belém: Diário Oficial do Estado do Pará n. 32.765, cad. 2, p. 1416, 2014.

PARADELLA, W. R. *et al.* (2015). **Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis.** Engineering Geology, vol. 193, p. 61–78, 2015.

PAVEZ, O.; GONZÁLEZ, L.; VEJA, H.; ROJAS, E. **Copper tailings in stucco mortars. International.** Engineering Journal, vol. 69, n. 3, p. 333-339, 2016

PRASAD, P.S.; RAMANA, G.V. **Feasibility study of copper slag as a structural fill in reinforced soil structures.** Geotextiles and Geomembranes, vol. 44, p. 623-640, 2016.

RAPOSEIRAS, A.C.; VARGAS-CERÓN, A.; MOVILLA-QUESADA, D.; CASTRO-FRESNO, D. **Effect of copper slag addition on mechanical behavior of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement.** Construction and Building Materials, vol. 119, p. 268-276, 2016.

REICHERT, J.M. *et al.* **Land use effects on subtropical, sandy soil under sandzation/desertification processes.** Agriculture, Ecosystems and Environment, vol. 233, p. 370-380, 2016.

RIBEIRO, C; PRADO, J. B. **Planejamento de lavra a longo prazo – estudo de caso da mina do sossego.** 2008. 42 p. Monografia (Especialização em Tecnologia Mineral) - Universidade Federal do Pará, Parauapebas, PA. 2008

RIBEIRO, J. A. S. **Balanço Mineral Brasileiro.** Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, 2001.

SECRETARIA DE ESTADO DE TRANSPORTES DO ESTADO DO PARÁ. SETRAN. Diretoria de Transportes Terrestre. Belém, 2013.

SECRETARIA DE ESTADO DE TRANSPORTES DO ESTADO DO PARÁ. SETRAN. Diretoria de Transportes Terrestre. Belém, 2017.

SHIMIZU, V. K. **Classificação e caracterização de tipos de minérios de cobre da mina do Sossego - Região de Carajás.** 2012, 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SILVEIRA, J. L. **Recobrimento de pilha de estéril, com plantio de espécies comerciais. 169 p. Monografia** (Especialização em Tecnologia Mineral) - Universidade Federal do Pará, Parauapebas, 2008.

SIMINERAL – Sindicato das Indústrias Minerárias do Estado do Pará. **6º Anuário Mineral do Pará.** 2017.

SIMON, A. B.; GIESECKE, J.; BIDLO, G. **Use of lateritic soils for road construction in north Dahomey.** Engineering Geology, vol. 7, p. 197-218, 1973.

SOUZA, M.L. **Pavimentação rodoviária.** Rio de Janeiro, 1980.

TRINDADE, S. O S. **Utilização de biodiesel derivado de óleo residual de fritura como diluente asfáltico: uma contribuição à imprimação betuminosa de solos lateríticos.** 2017. 115p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

TRIPATHI, J. K.; RAJAMANI, V. **Geochemistry and origin of ferruginous nodules in weathered granodioritic gneisses, Mysore Plateau, Southern India.** Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 71, p. 1674–1688, 2007.

UMAR, M.; KASSIM, K.A.; CHIET, K.T.P. **Biological process of soil improvement in civil engineering: A review.** Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, vol. 8, p. 767-774, 2016.

VALE. Disponível em: www.vale.com/brasil/pt/initiatives/innovation/copper-eating-bacteria/paginas/default.aspx.> Acesso em: 12 de outubro de 2016.

VASCONCELOS, Y. Bactérias mineradoras. **Revista Pesquisa Fapesp.** 200.ed. São Paulo, 2012. Pag 92-95.

VERTAMATTI, E. **Contribuição ao Conhecimento Geotécnico de Solos da Amazônia com Base na Investigação de Aeroportos e Metodologias MCT e Resiliente.** Tese de Doutorado. Instituto Tecnológico da Aeronáutica. São José dos Campos/SP, 1988.

ZHANG, T.; CAI, G.; LIU, S. **Application of lignin-based by-product stabilized silty soil in highway subgrade: A field investigation.** Journal of Cleaner Production, vol. 142, p. 4243-4257, 2017.

ANEXO A

AMPARO LEGAL PARA A EXPLORAÇÃO DE JAZIDA

Esta etapa do trabalho busca uma diretriz sob a luz da lei que oriente explorar o solo destinado à construção de forma sustentável e mitigar os impactos ambientais. O documento que serve de base é a INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 06, DE 10 DE NOVEMBRO DE 2014 (PARÁ, 2014). Além deste também se buscou outras fontes históricas apresentadas em ordem cronológica:

- a) **Constituição Federal, de 1988**, O TÍTULO VIII - Da Ordem Social – CAPÍTULO VI - Do Meio Ambiente no artigo 225: Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações;
- b) **Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967**. Dá nova redação ao Decreto-Lei nº 1.985 de 29 de janeiro de 1940, que institui o Código Brasileiro de Mineração e permite a extração de substâncias minerais de emprego imediato na construção civil, definidas em Portaria do Ministério de Minas e Energia, para uso exclusivo em obras públicas;
- c) **Decreto-Lei nº 62.934, de 02 de abril de 1968**. Regulamenta o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 Código de Mineração, conceitua e classifica as jazidas no CAPÍTULO II. “Art. 6º Considera-se jazida toda massa individualizada de substância mineral ou fóssil de valor econômico, aflorando à superfície ou existente no interior da terra; considera-se mina a jazida em lavra, ainda que suspensa”. No Art. 7º divide em 8 (oito) classes as jazidas entre as quais as jazidas de substâncias minerais de emprego imediato na construção civil: Classe II ardósias, areias, cascalhos, gnaisses, granitos, quartzitos e saibros, quando utilizados "in natura" para o preparo de agregados, pedra de talhe ou argamassa, e não se destinem, como matéria-prima, à indústria de transformação.

- d) **Lei Federal nº 6.567, de 24 de setembro de 1978.** Dispõe sobre o regime especial para exploração e o aproveitamento das substâncias minerais, especifica condições para exploração e o aproveitamento das substâncias minerais e dá outras providências;
- e) **Constituição do Estado do Pará, de 1989** e atualizada até a edição da Emenda Constitucional nº 61 de 11 de junho de 2014. TÍTULO VIII - DA ORDEM ECONÔMICA E DO MEIO AMBIENTE. III - preservação do meio ambiente, do patrimônio arquitetônico e paisagístico e da topologia da região, respeitadas as diretrizes de uso do solo; CAPÍTULO VI - DO MEIO AMBIENTE. Art. 255. Compete ao Estado a defesa, conservação, preservação e controle do meio ambiente, cabendo-lhe: VIII - criar um conselho específico, de atuação colegiada, que contará com a participação de representantes do Poder Público e, majoritariamente, da sociedade civil organizada, especialmente por meio de entidades voltadas para a questão ambiental, na forma da lei, que terá, dentre outras, as seguintes competências: a) acompanhar, avaliar, controlar e fiscalizar o meio ambiente; b) opinar, obrigatoriamente, sobre a política estadual do meio ambiente, oferecendo subsídios à definição de mecanismos e medidas que permitam a utilização atual e futura dos recursos hídricos, minerais, pedológicos, florestais e faunísticos, bem como o controle da qualidade da água, do ar e do solo, como suporte do desenvolvimento socioeconômico;
- f) **Lei nº 8.982 de 24 de janeiro de 1995.** Dá nova redação ao art. 1º da Lei nº 6.567, de 24 de setembro de 1978, alterado pela Lei nº 7.312, de 16 de maio de 1985. Art. 1º O art. 1º da Lei nº 6.567, de 24 de setembro de 1978, alterado pela Lei nº 7.312, de 16 de maio de 1985, passa a vigorar com a seguinte redação: "Art. 1º Poderão ser aproveitados pelo regime de licenciamento, ou de autorização e concessão, na forma da lei: I areias, cascalhos e saibros para utilização imediata na construção civil, no preparo de agregados e argamassas, desde que não sejam submetidos a processo industrial de beneficiamento, nem se destinem como matéria-prima à indústria de transformação;
- g) **Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997,** O Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, dispõe sobre a revisão e complementação dos

procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental, de forma a efetivar a utilização do sistema de licenciamento como instrumento de gestão ambiental, instituído pela Política Nacional do Meio Ambiente; e incorporar os instrumentos, com objetivo de um desenvolvimento sustentável em atividade com extração de lavra a céu aberto de aluvião com ou sem beneficiamento;

- h) **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002**, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil e cita no artigo segundo (Art. 2º) que os geradores de resíduos da construção civil são pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos devem ser responsáveis pelos resíduos das atividades de construção, reforma, reparos e demolições de estruturas e estradas, bem como por aqueles resultantes da remoção de vegetação e escavação de solos. No artigo terceiro (Art. 3º) classifica os resíduos da construção civil Classe A são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem. A não geração de resíduos é destacado no artigo quarto (Art. 4º): “É responsabilidade dos geradores ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final. Os resíduos da construção civil não poderão ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de “bota fora”, em encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei”.
- i) **Portaria nº 266, de 10 de julho de 2008**, Ministério de Minas e Energia - Departamento Nacional de Produção Mineral. Dispõe sobre o processo de registro de licença e altera as Normas Reguladoras de Mineração aprovadas pela Portaria n 237, de 18 de outubro de 2001. Capítulo II - DO REQUERIMENTO DO REGISTRO DE LICENÇA. Documentos Essenciais - Art. 4º O requerimento impresso de registro de licença deverá conter, obrigatoriamente, os seguintes documentos de instrução: X - prova de recolhimento dos emolumentos fixados em Portaria do DNPM; (Redação dada pelo art. 18 da Portaria DNPM nº 564, de 19/12/2008). § 1º A empresa

dispensada da apresentação de plano de aproveitamento econômico fica obrigada a apresentar memorial explicativo das atividades de produção mineral, assinado por profissional legalmente habilitado, acompanhado da respectiva anotação de responsabilidade técnica, contendo, no mínimo, o método de produção mineral a ser adotado, suas operações unitárias e auxiliares, tais como, decapeamento, desmonte, carregamento, transporte, manutenção de equipamentos, construção de áreas de depósito de estéril e barramentos, escala de produção, mão de obra contratada, medidas de segurança, de higiene do trabalho, de controle dos impactos ambientais e de recuperação da área minerada e impactada;

- j) **Lei nº 12.3051, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. TÍTULO III - DAS DIRETRIZES APLICÁVEIS AOS RESÍDUOS SÓLIDOS - CAPÍTULO I Disposições Preliminares. Art. 13. Para os efeitos desta lei, os resíduos sólidos têm a seguinte classificação: I – quanto à origem: k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;
- k) **Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011.** Fixa normas, nos termos dos incisos III, VI e VII do caput e do parágrafo único do art. 23 da Constituição Federal, para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum relativas à proteção das paisagens naturais notáveis, à proteção do meio ambiente, ao combate à poluição em qualquer de suas formas e à preservação das florestas, da fauna e da flora;
- l) **Instrução Normativa nº 06, de 10 de novembro de 2014,** publicada no Diário Oficial do Estado do Pará número 32.765, de 11/11/2014, caderno 2, páginas 1416 que dispõe sobre procedimentos e critérios, no âmbito da Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Pará – SEMA/PA, para o licenciamento ambiental referente à extração de minério (areias, cascalhos e saibros) e beneficiamento associado, para utilização imediata na construção civil.