

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE

WELITON EDUARDO LIMA DE ARAUJO

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA
EXTRAÇÃO DE MICAXISTO EM
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Goiânia
2008

WELITON EDUARDO LIMA DE ARAUJO

APROVEITAMENTO DE RESÍDUO DA EXTRAÇÃO DE
MICAXISTO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia do Meio Ambiente –
Universidade Federal de Goiás, para obtenção de
título de mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

Área de concentração: Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental.

Orientadora: Profa. Lilian Ribeiro de Rezende, DSc.

Goiânia
2008

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(GPT/BC/UFG)

A663a Araújo, Weliton Eduardo Lima de
Aproveitamento de resíduos da extração de micaxisto em pavimentos flexíveis [manuscrito] / Weliton Eduardo Lima de Araújo. – 2008.
142 f. : il., graf.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. LÍlian Ribeiro de Rezende.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2008.

1. Pavimentos flexíveis – Micaxisto – uso 2. Pavimentos flexíveis – Resíduos sólidos – Uso 3. Pavimentação – Resíduos sólidos – Uso 4. Pavimentação – Micaxisto – Uso I. Rezende, LÍlian Ribeiro de II. Universidade Federal de Goiás. **Escola Engenharia Civil**. II. Título.

CDU: 625.85.021

WELITON EDUARDO LIMA DE ARAUJO

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA EXTRAÇÃO DE
MICAXISTO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia do Meio Ambiente – Universidade Federal de Goiás, para obtenção de título de mestre em Engenharia do Meio Ambiente, aprovada em 24 de junho de 2008, pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Eraldo Henriques de Carvalho – UFG
(Presidente)

Prof. Luis Fernando Martins Ribeiro, DSc. - UnB
(Examinador Externo)

Prof. Dr. Edgar Bacarji – UFG
(Examinador Interno)

Goiânia
2008

“Feliz daquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina”.

Cora Coralina

*Dedico este trabalho à minha família, em especial
aos meus amados pais, **Juscelino e Ilma**, que sempre me
incentivaram na busca pelo conhecimento.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de todas as sabedorias. Aquele a quem eu devo a dádiva da minha vida e que me capacitou com serenidade e conhecimento para realização desse trabalho.

À professora Lilian Ribeiro de Rezende, pela paciência, dedicação e confiança depositada em minha pessoa durante a orientação do trabalho e, acima de tudo, pela confiança depositada em mim. Serei eternamente grato por todo o conhecimento a que me proporcionaste. Que a Lara te propicie momentos sublimes.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás pela disposição em nos proporcionar conhecimento.

Aos grandes colegas de curso pela amizade, união, companheirismo e colaboração na busca pelo mesmo ideal.

A professora Marta Pereira da Luz pela força e incentivo.

A Deuzelia, secretária do PPGEMA, pelo apoio e tempo dedicado a minha pessoa.

À PARANAFERROS em nome do seu proprietário Edílson, pelo apoio e infra-estrutura oferecida durante os trabalhos de campo.

Ao Departamento de Estradas de Rodagem do Município de Goiânia (DERMU), em nome de Leandro e Jonício por ter cedido o resíduo para a minha pesquisa. Também pelo apoio e patrocínio do trecho experimental.

Aos alunos Saul, Márcia, Diego e Thiago, pelo empenho e dedicação na realização do trecho experimental.

Aos técnicos do Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Goiás pelas dicas e ajuda na execução dos ensaios de laboratório.

A Energética do Cerrado Açúcar e Álcool, pela compreensão e apoio para que eu pudesse realizar este trabalho.

Aos meus pais, Juscelino e Ilma, pelo empenho em me oferecer condições de prosseguir com meus estudos, me deixando como legado esse bem tão valioso. Nada que eu faça será suficiente pra retribuir todo o carinho e amor que vocês me deram. Amo vocês.

Ao meu grande irmão, Wisley, e minha cunhada, Ana Paula, que sempre me ouviram e me acalmava quando surgia “alguma pedra no meio do caminho”, que me fazem rir de todas as situações difíceis enfrentadas. A minha já amada Gabriela. O tio espera que você ilumine ainda mais a vida de todos nós.

Aos meus grandes amigos Larissa e Carlo, pela confiança e apoio durante toda essa trajetória.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização dessa pesquisa, muito obrigado.

RESUMO

A reciclagem de materiais tem se fortalecido como um eficiente mecanismo para minimização dos problemas gerados pela disposição inadequada de resíduos sólidos das atividades antrópicas. Neste sentido, a busca por mecanismos capazes de absorver os resíduos de pedra, oriundo da produção de agregados para a construção civil, torna-se uma importante ferramenta para mitigação das externalidades geradas pelo acúmulo desse material. Portanto, o objetivo principal desta pesquisa foi estudar a utilização de resíduo de pedra como material constituinte das camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis. O resíduo estudado é oriundo do processamento da rocha do tipo micaxisto, sendo então denominado de pó de micaxisto, oriundo da pedra do Departamento de Estradas de Rodagem do Município de Goiânia (DERMU-COMPAV). Visando avaliar o comportamento mecânico, foram realizados ensaios laboratoriais (Peso específico, Limites de consistência, Granulometria, Compactação, Expansão e “California Bearing Ratio”) para as Amostras: 1 (100% pó de micaxisto), 2 (20% pó de micaxisto e 80% solo), 3 (30% pó de micaxisto e 70% solo), 4 (solo), 5 (cascalho) e 6 (30% brita 1 e 70 % solo). Para avaliar o comportamento em campo dos materiais estudados, foi construído nos meses de agosto e setembro de 2007, um trecho experimental com uma extensão de 300 metros, situado à Rua Amélia Rosa, no Sítio dos Ipês em Goiânia-Goiás, sendo subdividido em três sub-trechos (solo + pó de micaxisto, solo + brita 1 e cascalho). O comportamento desses sub-trechos foi analisado por meio dos ensaios de frasco de areia, *Speedy*, prova de carga sobre placa e penetrômetro dinâmico de cone, realizados durante a execução do trecho experimental. Com os dados obtidos pode-se verificar que os materiais estudados, com exceção da Amostra 1, demonstraram possuir propriedades físicas e mecânicas satisfatórias, refletindo em um bom desempenho técnico em laboratório e em campo. O cascalho apresentou melhores resultados tanto em laboratório como em campo, comprovando a eficiência desse material já tradicionalmente utilizado na pavimentação. De maneira geral, conclui-se que para o pó de micaxisto, o melhor desempenho foi obtido para dosagem de 20 % (Amostra 2), comparáveis a materiais tradicionais, comprovando assim a possibilidade do uso desse resíduo em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis.

Palavras-chave: Micaxisto. Pavimentação. Resíduos sólidos. Meio ambiente

ABSTRACT

The recycling of materials has been strengthened as an efficient mechanism to minimise the problems caused by improper disposal of solid waste from human activities. Accordingly, the search for mechanisms able to absorb the waste from quarry, coming from the production of aggregates for construction, it becomes an important tool for mitigating externalities generated by the accumulation of such material. So the main objective of this research was to study the use of waste material from quarry as the basic constituent of layers and sub-base of flexible pavements. The residue studied comes from the processing of micaxist, and then called the dust of micaxist, coming from the quarry of the Department of Roads Rodagem the city of Goiania (DERMU-COMPAV). To assess the mechanical behavior, laboratory tests have been conducted (specific weight, Limits of consistency, size, compression, expansion and California Bearing Ratio) for samples: 1 (100% of micaxist powder), 2 (20% of powder micaxist and 80% soil), 3 (30% of powder micaxist and 70% only), 4 (soil), 5 (gravel) and 6 (30% crushed 1 and 70% soil). To assess the performance on the field of materials studied, was built in August and September 2007, a trial with a sentence of 300 meters, located at Amélia Rosa street, the site of Ipês, in Goiânia-Goiás, being divided into three sub-sections (soil + micaxisto of dust, soil + 1 and crushed gravel). The behaviour of these sub-sections were examined by means of testing the vial of sand, Speedy, proof of cargo on board, and dynamic cone penetromet, made during the execution of the sentence trial. With the data collected can be verified that the materials studied, with the exception of Sample 1, have shown properties physical and mechanical satisfactory, reflecting in a good technical performance in the laboratory and in field. The gravel had better results both in the laboratory to the field, proving the efficiency of such material has traditionally used in flooring. In general, concluded that for the dust of micaxist, the best performance was obtained for dosing 20% (Sample 2), comparable to traditional materials, thus demonstrating the possibility of using such waste in layers of sub-base and base of flexible pavements.

Keywords: Micaxist. Pavement. Solid waste. Environment

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	22
1.1 ASPECTOS GERAIS.....	22
1.2 JUSTIFICATIVA.....	23
1.3 OBJETIVOS.....	25
1.3.1 Objetivo Geral.....	25
1.3.2 Objetivos Específicos.....	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1 PEDREIRAS E MEIO AMBIENTE.....	26
2.1.1 Aspectos Gerais.....	26
2.1.2 A Exploração de Recursos Minerais.....	28
2.1.3 Interferências no Meio Ambiente.....	31
2.1.4 Tipo de Rocha Explorada em Goiânia-GO.....	35
2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE PAVIMENTAÇÃO.....	38
2.2.1 Tipos de Pavimento.....	38
2.2.2 Materiais Tradicionais Utilizados.....	41
2.2.3 Materiais Alternativos.....	43
2.2.3.1 Cinza de Carvão Mineral.....	43
2.2.3.2 Escória de Usinas Siderúrgicas.....	44
2.2.3.3 Fosfogesso.....	46
2.2.3.4 Resíduos de Construção e Demolição.....	49
2.2.3.5 Resíduos Cerâmicos.....	52
2.2.3.6 Resíduos de Pedreira.....	52
2.3 ESTUDOS DE LABORATÓRIO E DE CAMPO.....	55
2.3.1 ESTUDOS DE LABORATÓRIO.....	56
2.3.1.1 Análise Granulométrica.....	56
2.3.1.2 Teor de Umidade.....	57
2.3.1.3 Massa Específica.....	57
2.3.1.4 Limites de Consistência.....	58
2.3.1.5 Compactação, Expansão e <i>California Bearing Ratio</i> (CBR).....	59
2.3.2 Estudos de Campo.....	60
2.3.2.1 Frasco de Areia.....	60
2.3.2.2 Método <i>Speedy</i>	61
2.3.2.3 Penetrômetro Dinâmico de Cone.....	62

2.3.2.4	Prova de Carga Sobre Placa.....	65
3	METODOLOGIA.....	66
3.1	MATERIAIS.....	71
3.2	MÉTODOS.....	70
3.2.1	Fase Laboratorial.....	70
3.2.1.1	Amostras.....	70
3.2.1.2	Ensaio de Laboratório.....	71
3.2.2	Fase de Campo.....	76
3.2.2.1	Trecho experimental.....	76
3.2.2.2	Ensaio de Campo.....	86
3.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	90
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	91
4.1	INTRODUÇÃO.....	91
4.2	ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	91
4.2.1	Caracterização das Amostras.....	91
4.2.1.1	Análise Granulométrica.....	91
4.2.1.2	Massa Específica dos Sólidos.....	96
4.2.1.3	Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade.....	97
4.2.1.4	Classificação da Amostras.....	98
4.2.2	Ensaio Mecânicos.....	99
4.2.2.1	Compactação.....	99
4.2.2.2	Expansão e CBR.....	103
4.2.3	Comparação entre as Amostras.....	105
4.3	ENSAIOS DE CAMPO.....	106
4.3.1	Frasco de Areia e <i>Speedy</i>	106
4.3.2	Ensaio Prova de Carga Sobre Placa.....	107
4.3.2.1	Sub-Trecho Solo-Pó de Micaxisto.....	107
4.3.2.2	Sub-Trecho Solo Brita 1.....	110
4.3.2.3	Sub-Trecho Cascalho.....	113
4.3.3	Penetrômetro Dinâmico de Cone.....	116
4.3.3.1	Sub-Trecho Solo-Pó de Micaxisto.....	116
4.3.3.2	Sub-Trecho Solo-Brita 1.....	120
4.3.3.3	Sub-Trecho Cascalho.....	125
4.3.4	Comparação entre os Sub-Trechos.....	130

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	131
5.1	CONCLUSÕES.....	131
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	134
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Preços das britas em março 2007 (Modificado de SINDIBRITA, 2007).....	30
Tabela 2.2	Resultados dos ensaios de caracterização do <i>filler</i> ou pó de micaxisto (modificado LUZ, <i>et al.</i> 2006).....	37
Tabela 3.1	Quantificação dos ensaios de laboratório.....	71
Tabela 3.2	Quantificação dos ensaios de campo.....	86
Tabela 4.1	Frações granulométricas dos materiais estudados.....	91
Tabela 4.2	Resultados do ensaio de massa específica dos grãos.....	97
Tabela 4.3	Resultados dos ensaios de limite de consistência.....	97
Tabela 4.4	Classificação segundo SUCS e TRB das amostras estudadas.....	99
Tabela 4.5	Resultados encontrados no ensaio de compactação.....	101
Tabela 4.6	Resultados encontrados nos ensaios de expansão e CBR.....	105
Tabela 4.7	Resultado dos ensaios de frasco de areia e <i>Speedy</i>	107
Tabela 4.8	Resultados obtidos nos ensaios de prova de carga no trecho 1.....	108
Tabela 4.9	Resultados obtidos nos ensaios de prova de carga no trecho 2.....	111
Tabela 4.10	Resultados obtidos nos ensaios de prova de carga no trecho 3.....	114
Tabela 4.11	Resultados obtidos no ensaio de DCP para o trecho solo-resíduo.....	116
Tabela 4.12	Valores de CBR obtidos por correlação de três autores para o subleito e base.....	120
Tabela 4.13	Resultados obtidos no ensaio de DCP para o trecho solo-brita.....	121
Tabela 4.14	Valores de CBR obtidos por correlação de três autores para o subleito.....	124
Tabela 4.15	Valores de CBR obtidos por correlação de três autores para a base.....	125
Tabela 4.16	Resultados obtidos no ensaio de DCP para o trecho cascalho.....	126
Tabela 4.17	Valores de CBR obtidos por correlação de três autores para o subleito.....	128
Tabela 4.18	Valores de CBR obtidos por correlação de três autores para a base.....	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Gráfico da evolução da produção e consumo de agregados entre 1988 a 2010 (DNPM, 2001).....	27
Figura 2.2	Imagem da jazida de rocha do tipo micaxisto na pedreira do DERMU – Compav de Goiânia.....	29
Figura 2.3	Visão superior do processo de trituração da rocha micaxisto na pedreira do DERMU-COMPAV de Goiânia.....	30
Figura 2.4	Imagem da rocha micaxisto: (a) Foto de um bloco de rocha de micaxisto; (b) Rocha micaxística britada para ser empregada na pavimentação urbana do município de Goiânia-GO.....	36
Figura 2.5	Pilhas de pó de micaxisto gerada no processo de lavagem da brita.....	36
Figura 2.6	Resultado ensaio de Difração de raios-X (LUZ, <i>et al.</i> 2006).....	37
Figura 2.7	Esquema demonstrando a estrutura de um pavimento flexível.....	39
Figura 2.8	Esquema demonstrando a estrutura de um pavimento rígido.....	40
Figura 2.9	Fotomicrografia de amostras em pó com um aumento de 500x: (a) fosfogesso <i>in natura</i> ; (b) fosfogesso beneficiado (CANUT, 2006).....	46
Figura 2.10	Secagem das amostras estudadas por Batalione (2007): (a) amostras de solo; (b) rejeito de pedreira de Granito.....	54
Figura 2.11	Ensaio da densidade pelo método do frasco de areia.....	61
Figura 2.12	Ensaio método <i>Speedy</i> : (a) Preparo da amostra de solo no ponto de execução do frasco de areia; (b) Aparelhagem utilizada no ensaio; (c) Detalhe do início do ensaio, com a amostra de solo e a ampola de carbureto de cálcio no aparelho.....	62
Figura 2.13	Realização do ensaio Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP).....	63
Figura 2.14	Estrutura de um Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP) (ANDRADE; SALES, 2005 <i>apud</i> RESPLANDES, 2007).....	64
Figura 2.15	Equipamentos utilizados no ensaio de prova de carga sobre placa.....	65
Figura 3.1	Resíduo selecionado para a pesquisa: (a) Mapa de localização da pedreira; (b) Foto da pilha de pó de micaxisto.....	67
Figura 3.2	Cascalho Laterítico selecionado para pesquisa: (a) Mapa de localização da jazida; (b) Imagem do ponto de extração do cascalho.....	68

Figura 3.3	Solo fino selecionado para a pesquisa: (a) Mapa de localização da área de empréstimo; (b) Foto do Local de coleta.....	69
Figura 3.4	Análise granulométrica: (a) Ensaio peneiramento; (b) Ensaio de sedimentação.....	72
Figura 3.5	Massa Específica dos Sólidos: (a) Amostras e vidrarias para realização do ensaio; (b) Placa aquecedora com amostras entrando em ebulição; (c) Balões volumétricos com as amostras já resfriadas a temperatura ambiente.	73
Figura 3.6	Limite de Liquidez: (a) Aparelho de Casagrande, amostra de solo e demais instrumentos para execução do ensaio; (b) Amostra de solo umedecida, homogeneizada posta no aparelho de Casagrande e cortada com cizel.....	74
Figura 3.7	Limite de Plasticidade: (a) Instrumentos utilizados e amostra a ser ensaiada; (b) Execução do ensaio.....	74
Figura 3.8	Ensaio de Compactação: (a) Amostra homogeneizada; (b) Corpo de prova moldado com auxílio de um cilindro e soquete.....	75
Figura 3.9	Ensaio CBR e Expansão: corpos de prova no tanque de imersão (a); extensômetro utilizado na leitura de expansão (b).....	76
Figura 3.10	Trecho experimental: (a) Mapa com a localização; (b) Foto do local antes da pavimentação.....	77
Figura 3.11	Seção transversal do trecho experimental.....	78
Figura 3.12	Trecho experimental em planta, localizando os sub-trechos e as estacas que foram ensaiadas em cada um deles.....	80
Figura 3.13	Aquisição de material: (a) Vista da limpeza da área de empréstimo de solo; (b) Coleta do resíduo estudado na pedreira do DERMU Compav.....	82
Figura 3.14	Abertura do subleito do trecho experimental.....	82
Figura 3.15	Execução da Sub-base e Base: (a) Recepção e distribuição do solo ao longo do trecho; (b) Repartição das dosagens de 20% e 30% do resíduo determinado em cálculo.....	82
Figura 3.16	Execução da Sub-base e Base: (a) Incorporação e homogeneização do resíduo estudado ao solo; (b) Adição de água para determinação da umidade ótima de trabalho.....	83
Figura 3.17	Execução da Sub-base e Base: (a) Compactação da camada com o auxílio de um rolo vibrador; (b) Vista da área após compactação das camadas.....	83
Figura 3.18	Aspecto da base compactada após o trincamento.....	83

Figura 3.19	Imprimação: (a) Aplicação de material betuminoso para impermeabilização do trecho; (b) Vista da pista após término da imprimação.....	84
Figura 3.20	Revestimento: (a) Aplicação de uma camada de três centímetros de revestimento do tipo CBUQ; (b) Compactação da massa asfáltica com rolo liso.....	84
Figura 3.21	Vista do trecho após término da sua construção.....	84
Figura 3.22	Aparência da camada de base do sub-trecho composto por solo-brita.....	86
Figura 3.23	Aparência da camada de base do sub-trecho composto por cascalho.....	86
Figura 3.24	Ensaio da densidade pelo método do frasco de areia: abertura do orifício na camada (a); preenchimento com areia do frasco (b) e pesagem do frasco(c).....	87
Figura 3.25	Detalhe do Penetrômetro Dinâmico de Cone.....	88
Figura 3.26	Disposição dos equipamentos para ensaio de Prova de Carga Sobre a Placa.....	89
Figura 4.1	Curva granulométrica da Amostra 1 com e sem defloculante.....	93
Figura 4.2	Curva granulométrica da Amostra 2 com e sem defloculante.....	94
Figura 4.3	Curva granulométrica da Amostra 3 com e sem defloculante.....	94
Figura 4.4	Curva granulométrica da Amostra 4 com e sem defloculante.....	94
Figura 4.5	Curva granulométrica da Amostra 5 com e sem defloculante.....	95
Figura 4.6	Curva granulométrica da Amostra 6 com e sem defloculante.....	95
Figura 4.7	Curvas granulométricas das amostras estudadas, com uso de defloculante...	96
Figura 4.8	Curvas granulométricas das amostras estudadas, sem uso de defloculante...	96
Figura 4.9	Resultado do ensaio de Limite de Liquidez das amostras estudadas.....	98
Figura 4.10	Curvas de compactação e saturação das amostras estudadas, na energia intermediária.....	100
Figura 4.11	Curvas de compactação e saturação das amostras estudadas, na energia modificada.....	101
Figura 4.12	Valores de umidade ótima obtidos nos ensaios de compactação.....	107
Figura 4.13	Valores de peso específico aparente seco máximo obtidos nos ensaios.....	107
Figura 4.14	Curvas de expansão das amostras compactadas na energia intermediária.....	108
Figura 4.15	Curvas de expansão das amostras compactadas na energia modificada.....	104
Figura 4.16	Curvas de CBR das amostras estudadas, na energia intermediária.....	104
Figura 4.17	Curvas de CBR das amostras estudadas, na energia modificada.....	104

Figura 4.18	Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 1 (subleito).....	109
Figura 4.19	Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 1 (sub-base).....	109
Figura 4.20	Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 1 (base).....	110
Figura 4.21	Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 1 (revestimento).....	110
Figura 4.22	Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 2 (subleito).....	112
Figura 4.23	Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 2 (sub-base).....	117
Figura 4.24	Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 2 (base).....	113
Figura 4.25	Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 2 (revestimento).....	113
Figura 4.26	Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 3 (subleito).....	114
Figura 4.27	Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 3 (sub-base).....	115
Figura 4.28	Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 3 (base).....	115
Figura 4.29	Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 3 (revestimento).....	115
Figura 4.30	Curvas DCP para o trecho solo-resíduo após execução do subleito.....	117
Figura 4.31	Curvas DCP para o trecho solo-resíduo após execução da base.....	117
Figura 4.32	Diagrama Estrutural no ensaio de DCP no trecho solo-resíduo após regularização do subleito.....	118
Figura 4.33	Diagrama Estrutural no ensaio de DCP no trecho solo-resíduo após execução da base.....	118
Figura 4.34	Curvas DCP para o trecho solo-brita após regularização do subleito.....	122
Figura 4.35	Curvas DCP para o trecho solo-brita após execução da base.....	122
Figura 4.36	Diagrama Estrutural no ensaio de DCP no trecho solo-brita após a execução do subleito.....	122
Figura 4.37	Diagrama Estrutural no ensaio de DCP no trecho solo-brita após a execução da base.....	123
Figura 4.38	Curvas DCP para o trecho cascalho após execução da base.....	126
Figura 4.39	Curvas DCP para o trecho cascalho após construção do subleito.....	127
Figura 4.40	Diagrama Estrutural no ensaio de DCP no trecho cascalho após a execução da base.....	127
Figura 4.41	Diagrama Estrutural no ensaio de DCP no trecho cascalho após a execução da base.....	128

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABP	Associação Brasileira de Pavimentação
Al	Alumínio
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtoras de Agregados para Construção Civil
ASMT	<i>American Society for Testing and Materials</i>
A-4	Solo siltoso ($IG < 8$), segundo Classificação TRB
BA	Bahia
Bq	Becquerel
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CEASA	Central de Abastecimento do Estado de Goiás
COMPAV	Companhia de Pavimentação do Município de Goiânia
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CREA/GO	Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia de Goiás
C_u	Coefficiente de não uniformidade
D_e	Diâmetro efetivo
d_e	Deslocamento elástico
D_o	Deflexão real ou verdadeira, em centésimos de milímetro
d_t	Deslocamento total
DCP	<i>Dynamic Cone Penetration</i>
DCT/UM	Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Minho
DN	Índice de Penetração
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DERMU	Departamento de Estradas de Rodagem do Município de Goiânia
DER/PR	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná
DER/SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
EGF	Escória Granulada de Fundação

D ₂₅	Deflexão a 25 cm do ponto de prova, em centésimos de milímetro
FIPR	<i>Florida Institute of Phosphate Research</i>
Fe	Ferro
GC	Grau de Compactação
Hn	Espessura total do pavimento
IRM	<i>Institute for Recyclable Materials</i>
IP	Índice de Plasticidade
IPT/SP	Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo
ISC	Índice de Suporte Califórnia
K	Potássio
K _{placa}	Módulo de reação
k _{elástico}	Relação tensão/deslocamento
L _o	Leitura inicial, em centésimos de milímetro
L _f	Leitura final, em centésimos de milímetro
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
Mg	Magnésio
ML	Solo silto-arenoso, segundo Classificação USCS
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
P	Pressão
Pb	Chumbo
PRAD	Plano de Recuperação de Área Degradada
R	Raio de curvatura da bacia de deformação
Ra	Rádio
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RCS	Resistência à Compressão Simples
Rn	Radônio
r _{elástico}	Deslocamento correspondente à fase elástica ou de descarregamento das curvas
RILEM	<i>Reunion International d'Essais et Matériaux</i>
Si	Sílica

SINDIBRITA	Sindicato das Empresas de Brita e Argila do Estado de Goiás e Indústrias
SP	São Paulo
T	Temperatura
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UnB	Universidade de Brasília
USCS	<i>Unified Soil Classification System</i>
w	Teor de umidade
w _L	Limite de liquidez
w _{ot}	Umidade ótima
w _p	Limite de plasticidade
ρ _s	Massa específica dos grãos
γ _d	Peso específico aparente seco
γ _{dmáx}	Peso específico aparente seco máximo

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

As descaracterizações do meio ambiente por meio de atividades antrópicas causam impactos nem sempre passíveis de recuperação imediata. O homem, como elemento do ecossistema, tem a qualidade de vida afetada como um reflexo da sua própria ação. Portanto, uma política de desenvolvimento sustentável se faz necessária, não só para melhoria da qualidade de vida como também para a própria sobrevivência da raça humana.

Atualmente, no meio científico, a reciclagem de materiais tem se fortalecido como um eficiente mecanismo para solucionar e minimizar os problemas oriundos do não gerenciamento dos resíduos gerados pelas atividades antrópicas. Além disso, tem-se a busca de novos materiais construtivos que possam substituir as matérias-primas retiradas do meio ambiente.

O reaproveitamento de um resíduo e o melhor aproveitamento das matérias-primas são vistos por muitos especialistas como a única saída para a continuidade do processo tecnológico já implementado, pois atuam em perfeita sintonia com as necessidades do mundo atual (MINAS AMBIENTE, 1999¹ *apud* CANUT, 2006). Segundo a Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), a abordagem do reaproveitamento pode ter três enfoques distintos que são 3R's, quais sejam (i) a Reciclagem: processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação; (ii) a Recuperação: extração de algumas substâncias dos resíduos como óxidos metálicos ou outros mais e (iii) a Reutilização: processo de reaplicação de um resíduo, sem envolver transformação do mesmo.

A pesquisa visando o desenvolvimento de possíveis tecnologias e processos que viabilizem o uso de determinado resíduo é importante tanto sob o ponto de vista econômico quanto social, na medida que o resíduo comumente é abundante, de baixo custo de aquisição,

¹MINAS AMBIENTE. *Ensino e desenvolvimento tecnológico para controle ambiental na indústria: pesquisa tecnologia para controle ambiental em unidades independentes de produção de ferro-gusa de Minas Gerais*. Belo Horizonte, 1999, 140 p. Relatório Técnico.

e por consequência, induz a um baixo valor agregado, podendo possuir propriedades que atestem bom desempenho para determinada aplicação e apresenta uma solução contra a deterioração ambiental gerada pela estocagem realizada em grandes áreas.

Nesse contexto, encontra-se os resíduos de processo de britagem de rochas para obtenção de agregados da construção civil. Nessa linha produtiva existe a geração de expurgos, compostos por materiais rochosos e camada mais superficial da mina inadequada para o processamento. Também, na linha de britagem dos blocos rochosos para obtenção de materiais em diversas granulometrias, há a geração de finos ou *filler* como resíduo dessa etapa do produtiva, sendo a mesma em abundância. Atualmente esse *filler* é estocado nas propriedades dessas mineradoras, ocupando áreas extensas e que poderiam ser aproveitadas para outras atividades com fins lucrativos. Além desse prejuízo econômico, esse resíduo gera diversas externalidades ao meio ambiente, bem como para as populações circunvizinhas a essas áreas. Dessa forma, constata-se a necessidade da busca de mecanismos de utilização desse resíduo de modo a propiciar uma destinação adequada para o mesmo.

Pode-se ressaltar que a indústria da Construção Civil ocupa um papel de destaque neste cenário. A reciclagem e reuso de materiais e a substituição dos produtos de alto impacto ambiental racionalmente utilizado, pode aliviar a pesada contribuição do setor e cooperar para a não degradação ambiental, e conseqüentemente, para a diminuição dos impactos ambientais. Pesquisas realizadas comprovam que é possível utilizar produtos econômicos e ecologicamente viáveis em substituição a matérias-primas tradicionalmente utilizadas.

1.2 JUSTIFICATIVA

A pavimentação de rodovias e vias urbanas, por exigir grande volume de material para a composição de suas camadas constituintes, tem no meio técnico-científico destaque como possível receptora de materiais alternativos, principalmente materiais provenientes de resíduos de produtos e processos industriais.

A dificuldade de encontrar materiais naturais na região onde será executada a obra, em alguns casos, eleva os custos da mesma, principalmente referente a escavações e transportes. Esta situação é agravada em função de que nos dias de hoje, há uma grande preocupação entre o que é retirado da natureza, e seus possíveis impactos decorrentes da

modificação da condição inicial de um determinado local. No Estado de Goiás, o cascalho laterítico, comumente utilizado neste tipo de obra, está escasso e cada vez mais distante dos centros urbanos, inviabilizando, economicamente, sua aplicação.

Por outro lado, a proximidade de pedreiras de centros habitados é uma decorrência natural da forte influência do custo dos transportes no preço final do produto. Isso ocorre, principalmente, com os agregados, devido ao seu baixo valor unitário.

As implicações ambientais dessa proximidade estão associados, de modo geral, às fases do processo de exploração deste insumo, podendo-se evidenciar uma série de externalidades que afetam não só o meio ambiente, mas também a comunidade que margeia a propriedade dessas mineradoras. Dentre esses impactos, destacam-se a formação da cava e as pilhas de rejeito (pó de rocha) oriundos da lavagem da brita. O lançamento de fragmentos desse fino afeta sobremaneira os meios como cursos d'água, solo e ar, além de se tornar um incômodo à população local.

A alternativa da utilização de um material de descarte do processo industrial sana três problemáticas importantes: a primeira diz respeito à escassez de materiais granulares aceitos pelas especificações tradicionais para compor as camadas de sub-base e base de pavimentos flexíveis (REZENDE, 2003); a segunda, refere-se à dificuldade imposta pela Legislação Ambiental para a exploração de jazidas naturais; por fim, a terceira, onde tenta-se solucionar o problema enfrentado por empresários no que se refere ao destino dado ao resíduo de processos industriais, que a cada dia se acumulam em áreas pertencentes à empresa gerando custos e externalidades diversas (LUZ *et al.*, 2005).

O eixo Goiânia-Brasília constitui-se no terceiro mercado consumidor de produtos resultantes de processo de britagem no país. Goiânia, com uma população de cerca de 1,4 milhão de habitantes, consome atualmente cerca de 100.000 metros cúbicos de pedra britada por mês, embora tenha potencial para consumir até 250.000 metros cúbicos. Existem hoje nesta região, conforme a Associação Nacional das Entidades de Produtoras de Agregados para Construção Civil (ANEPAC, 2004), 10 produtores de brita distribuídos na periferia de Goiânia, em Aparecida de Goiânia e Goianira.

Com esses crescentes números fica bastante evidente o interesse, por parte do setor empresarial, em solucionar o problema do acúmulo de resíduos advindos do processo

de lavagem da brita. Estudos que possam viabilizar a utilização deste rejeito em atividades capazes de absorver o grande volume gerado do mesmo, como as obras de pavimentação, são de fundamental relevância, tanto para sanar ou mitigar os problemas oriundos da destinação desse material, assim como da escassez de materiais granulares utilizados na pavimentação.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar o aproveitamento do resíduo denominado pó de micaxisto em obras de pavimentação.

1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos deste trabalho, têm-se:

- Acompanhar a execução de um trecho experimental, onde misturas do resíduo com solo local, misturas de solo-brita e o cascalho foram utilizadas;
- Caracterizar os materiais utilizados no trecho;
- Avaliar, em laboratório, a resistência dos materiais selecionados para o estudo;
- Realizar ensaios de campo, para controle de execução e determinação dos parâmetros estruturais da pista;
- Comparar o desempenho dos diferentes materiais estudados;
- Avaliar a viabilidade técnica da utilização do resíduo neste tipo de aplicação.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta capítulo será abordados alguns tópicos sobre a relação da atividade de mineração desempenhada pelas pedreiras com o meio ambiente onde as mesmas estão inseridas.

2.1 PEDREIRAS E MEIO AMBIENTE

2.1.1 Aspectos Gerais

Observando a história do Brasil, é possível constatar uma íntima relação com a busca e o aproveitamento dos seus recursos minerais, que sempre contribuíram com importantes insumos para a economia nacional, fazendo parte da ocupação territorial e da história do país.

Hoje em dia, a mineração de materiais de uso imediato na construção civil, (areia, brita e argila) é um dos setores básicos da economia do país, contribuindo de forma decisiva para o bem estar e melhoria da qualidade de vida das presentes e futuras gerações, sendo fundamental para o desenvolvimento econômico e social.

O termo “agregados para a construção civil”, conforme o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2001), é empregado no Brasil para identificar um segmento do setor mineral que produz matéria-prima mineral bruta ou beneficiada de emprego imediato na indústria da construção civil. São basicamente a areia e a rocha britada. O termo “emprego imediato na construção civil”, que consta da legislação mineral para definir uma classe de substâncias minerais, não é muito exato, já que nem sempre são usadas dessa forma. Muitas vezes entram em misturas, tais como o concreto.

Segundo Poletto (2006), devido esse setor possuir um vínculo com o estágio de desenvolvimento de uma região e aos ciclos econômicos, a disponibilidade de dados e informações sobre a produção e o consumo de agregados minerais permite identificar diversas situações, como as de carência de investimento em obras públicas, ou também períodos de aquecimento ou de retração da economia.

Que se trate de um importante indicador da situação econômica e social de um país, os números apresentados não deixam dúvidas. Enquanto os Estados Unidos consomem anualmente por habitante cerca de 7,5 t de agregados para a construção civil e a Europa Ocidental, de 5 a 8 t por habitante/ano, no Brasil o consumo está pouco acima de 2 t (DNPM, 2001).

Baseando-se em um crescimento médio anual da oferta de agregado em uma taxa de 4 % a 4,5 %, o DNPM considera uma projeção de oferta / demanda de 285 milhões e 339 milhões de metros cúbicos em 2005 e 2010, respectivamente. A Figura 2.1 demonstra graficamente esta previsão de crescimento.

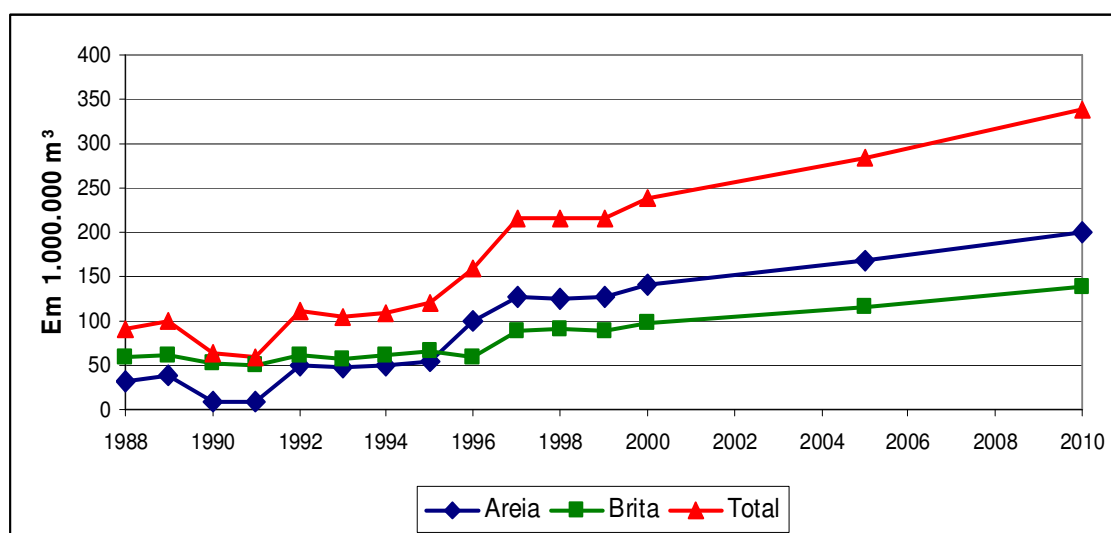


Figura 2.1 – Gráfico da evolução da produção e consumo de agregados entre 1988 a 2010 (Modificado de DNPM, 2001).

Essa atividade produtiva, diferentemente do que ocorre em outros ramos de atividades industriais, possui rigidez local, ou seja, só é possível desenvolver essa atividade onde existe a rocha. Embora pareça óbvio, essa realidade associada ao fato da necessidade da proximidade do mercado consumidor desse produto, sempre gera polêmicas entre mineradores e ambientalistas.

Vislumbrando uma saída para essa questão, Farias (2002), afirma que o empreendedor deve tomar ações preventivas para minimizar os conflitos. Como exemplo, o

autor cita a criação de uma zona de transição entre a atividade mineral e as atividades circunvizinhas, ou seja:

- Compra de áreas no entorno do empreendimento. Essa alternativa nem sempre é possível, em função do custo, principalmente para as pequenas empresas de mineração;
- Arrendamento de áreas no entorno do empreendimento para serem utilizadas em atividades que possam conviver com a atividade de mineração. Embora de menor custo, exige estudos para identificação dessas atividades;
- Melhoria das relações de vizinhança com os proprietários das terras vizinhas ao empreendimento;
- Planejamento das operações de lavra e de beneficiamento de acordo com as disposições legais que regulam o uso e ocupação do solo na região.

2.1.2 A Exploração de Recursos Minerais

A atividade das pedreiras pode ser identificada como uma estrutura industrial, visto que abrange a exploração de diversos recursos minerais, utilizando metodologias distintas de beneficiamento em suas linhas produtivas para obtenção dos agregados, envolvendo também vários efeitos sobre o meio ambiente. Para esse estudo, são abordadas apenas as jazidas de exploração a céu aberto, visto que esse tipo de exploração é o observado para as pedreiras no eixo Goiânia-Brasília, bem como da pedreira do DERMU-COMPAV da Prefeitura Municipal de Goiânia, onde é gerado o resíduo estudado nesta pesquisa.

O plano de lavra de uma pedreira a céu aberto consiste basicamente, segundo Poletto (2006), na remoção da camada vegetativa, do solo e do material estéril (regolito que recobre a rocha); no transporte do mineral para as instalações de beneficiamento e na britagem da rocha, reduzindo-a em diversas faixas granulométricas.

A exploração mineral nas jazidas do tipo céu aberto é realizada por meio do desmonte em sucessivos degraus (Figura 2.2), com altura dos mesmos variando entre 10 e 20 metros, de modo que no momento do desmonte das bancadas não haja ultralaçamentos de fragmentos de rocha durante a detonação.



Figura 2.2 – Imagem da jazida de rocha do tipo micaxisto na pedreira do DERMU – COMPAV de Goiânia – desmonte em degraus.

A extração da rocha é realizada por meio de detonações, martelos e outras, dependendo da situação da jazida. Na lavra da rocha, são compatibilizadas as características geomecânicas do elemento a ser lavrado com o processo produtivo, ou seja, as operações de lavra devem atender os critérios de segurança (estabilidade de taludes) e de produção.

Os agregados artificiais são obtidos pela redução do tamanho de pedras, geralmente por trituração em britadores (Figura 2.3). O processo necessário para transformar o material de uma determinada jazida em agregado de qualidade satisfatório para o uso na construção civil pode ser simples ou complexo, a depender de uma série de fatores. A escolha do equipamento e do *layout* das instalações de britagem e peneiramento são elementos de máxima importância para a obtenção do agregado a custos mais reduzidos (SILVA, 2000).

Existem basicamente quatro tipos de britas, com diferentes aplicações. A brita 0 é utilizada na fabricação de asfalto, lajotas, bloquetes, intertravados, lajes, jateamento de túneis e acabamentos em geral. A brita 1 é o produto mais utilizado pela construção civil, na fabricação de concreto, com diversas aplicações como na construção de pontes, edificações e grandes lajes. As britas 2 e 3 são britas mais resistentes, voltadas para fabricação de concreto, principalmente em formas mais pesadas. Também é comercializado o pó de pedra, muito

utilizado no assentamento de bloquetes, tubulações em geral, tanques, além de fazer parte na composição de concreto e asfalto, substituindo com qualidade a areia de rio, sem danos ao meio ambiente.



Figura 2.3 – Vista superior do processo de trituração da rocha micaxisto na pedreira do DERMU-COMPAV de Goiânia.

O panorama do mercado de agregados para a construção civil no Estado de Goiás, segundo o Sindicato das Empresas de Brita e Argila do Estado de Goiás e Indústrias (SINDIBRITA, 2007), demonstra que a demanda por brita não se alterou em 2004 e 2005. Em 2006, como consequência da recuperação do setor de construção civil, a demanda por brita aumentou, o que também provocou uma variação nos preços. A Tabela 2.1 apresenta os valores das britas praticados em março de 2007.

Tabela 2.1 – Preços das britas em março 2007 (Modificado de SINDIBRITA, 2007).

Tipos	Preços (R\$)/m³
Brita 0	28,00
Brita 1	24,00
Brita 2	24,00
Brita 3	24,00
Pó de pedra	11,00

2.1.3 Interferências no Meio Ambiente

Embora o setor de produção de agregados para construção civil possua uma grande importância econômica para o país, a mineração como atividade potencialmente poluidora, altera profundamente o meio ambiente onde se encontra inserida, gerando ainda uma série de resíduos que acabam sendo depositados em bancas dentro da propriedade dessas empresas, constituindo assim em áreas com passivo ambiental.

Ao conjunto de efeitos não desejados oriundos das atividades desempenhadas pela mineração dá-se a denominação de externalidades. Algumas dessas externalidades são: alterações ambientais, conflitos de uso do solo, depreciação de imóveis circunvizinhos, geração de áreas degradadas e transtornos ao tráfego urbano. Estas externalidades geram conflitos com a comunidade, que normalmente têm origem quando da implantação do empreendimento, pois o empreendedor não se informa sobre as expectativas, anseios e preocupações da comunidade que vive nas proximidades da empresa de mineração (BITAR², 1997 *apud* FARIAS, 2002).

Degradação é outro termo usualmente associado aos efeitos ambientais negativos ou adversos decorrentes da mineração. O Decreto Federal 97.632 / 1989, define a degradação gerada pela atividade mineradora como sendo os “processos resultantes de danos ao meio ambiente, pelos quais se perde ou se reduzem algumas propriedades, tais como a qualidade ou capacidade produtiva dos recursos ambientais”.

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

² BITAR, O. Y. *Avaliação da recuperação de áreas degradadas para mineração Região Metropolitana de São Paulo*. SP 1997.

A questão do impacto visual ocasionada pelas pilhas de rejeito da atividade mineradora, também são apontados nos trabalhos de Nicholson³ (1996 *apud* BATALIONE, 2007) e Silva (2000), como um dos impactos mais expressivos da mineração.

Bacci *et al.* (2006) realizaram um estudo inerente ao levantamento dos impactos gerados por pedreiras em áreas urbanas. Os autores, no entanto, apontaram em seu trabalho que os impactos adversos mais significativos estão relacionados ao uso de explosivos no desmonte de rocha, os quais podem estender-se para áreas fora do domínio da pedreira, afetando, principalmente, a região circunvizinha.

Mendes⁴ (1999 *apud* BATALIONE, 2007) identifica os tipos de impactos ambientais associados à exploração de pedreiras devido à geração de finos:

- Poluição atmosférica através de emissão de materiais particulados presentes nos depósitos;
- Alterações no regime hidrológico promovendo turvamento, assoreamento e mudanças nas seções das calhas dos cursos de água; trazendo conseqüências praticamente irreversíveis à manutenção de um micro-sistema biológico, danificando o habitat das espécies que dependem deste meio;
- Ocupações indevidas de áreas devido à necessidade de estocagem de rejeitos gerados. Muitas vezes, estas estocagens, tendem a esterilizar terrenos que poderiam servir a utilizações mais nobres ou até mesmo promover poluição do solo;
- Ruídos e vibrações gerados durante as explosões, trituração, esmagamento e transporte das rochas;
- Consumo excessivo de água para processar os agregados com perda em certos casos, de aproximadamente 80% do volume de água utilizado no processo.

Contudo, a partir da década de 90, a mineração de agregados, principalmente a de brita, nas regiões metropolitanas, tem feito esforços para acompanhar as demandas atuais da legislação ambiental, incorporando ao processo produtivo o gerenciamento ambiental no planejamento do empreendimento com a correta aplicação das técnicas de lavra e a

³ NICHOLSON, D.T. *The visual impact of quarrying*. Rock Products Magazine, III: 68-76, 1996.

⁴ MENDES, K.S., *Viabilidade de Emprego de Finos de Basalto em Concreto Compactado a Rolo*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 109p., 1999.

adequação a determinados parâmetros, bem como a recuperação das áreas. (SINTONI⁵, 1994 *apud* FARIAS, 2002).

Mesmo com esse esforço citado pelo autor, observa-se que normalmente nas áreas diretamente afetadas por essa atividade, ou seja, nos pontos onde ocorrem a extração e processamento das rochas, bem como das pilhas de rejeito, após o término das atividades nesses pontos pode-se observar um completo quadro de abandono, justificado muitas vezes pela grande dificuldade em se recuperar essas áreas degradadas.

Outra hipótese para essa situação é levantada por Silva (2000), onde o mesmo afirma que o sentido de degradação para aqueles que praticam a atividade mineira está incorporada ao próprio processo de atividade, devendo não ser encarada como degradação, mas sim com desenvolvimento sócio-econômico e de sustento de suas famílias. É possível observar na colocação do autor a predominância de uma ideologia de desenvolvimento em apenas dois planos: o econômico e o social, ficando de lado o fator ambiental.

Na busca por metodologias de mitigação dos impactos causados por essa atividade, Bitar e Braga⁶ (1995 *apud* SILVA, 2000) reconhecem três grandes conjuntos de técnicas aplicadas à recuperação de áreas degradadas pela mineração, sendo elas a revegetação, medidas geotecnológicas e remediação. Em geral, segundo os autores a aplicação dessas medidas é praticada de modo combinado, visando uma otimização e aceleração na recuperação das áreas.

Outro mecanismo utilizado no auxílio da recomposição dessas áreas é o Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD), metodologia determinada pelo Decreto N^o. 97.632/89, citado anteriormente. O maior desafio para a implantação do PRAD, segundo Silva (2000), é executá-lo simultaneamente à mineração, pois isso implica rever o atual padrão tecnológico utilizado e incorporação de técnicas que aglutinam a recuperação ao cotidiano da atividade mineira.

Os principais aspectos abordados em um programa de recuperação de área degradada são:

⁵ SINTONI, A. *A mineração no cenário do município de São Paulo: mercado e novas tecnologias*. In: I Encontro de Mineração no Município de São Paulo. **Anais...** São Paulo: Secretaria das Administrações Regionais da Prefeitura do Municipal de São Paulo, 1994. p. 31-42.

⁶ BITAR, O.Y.; BRAGA, T.O. *O Meio Físico na Recuperação de Áreas Degradadas*. Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente, O.Y. Bitar, (ed.), ABGE, São Paulo, SP. 1995. pp. 165-177.

- Caracterização e avaliação da degradação ambiental;
- Definição dos objetivos e análises das alternativas tecnológicas de recuperação;
- Definição e implementação das medidas de recuperação;
- Definição do uso futuro da área;
- Proposições para monitoramento e manutenção das medidas corretivas implementadas.

Nesse sentido, Silva (2000) afirma que na grande maioria, a reabilitação da área afetada é o termo praticado pela atividade de mineração, sendo esse o conjunto de procedimentos através do qual se minimiza os impactos bióticos e abióticos causados por essa atividade. Esse termo está associado, segundo o autor, a idéia de que o local alterado deverá ser destinado a uma dada forma de uso do solo, ou seja, de reaproveitar a área para outra finalidade.

Outro aspecto relevante no processo de minimização dos impactos ocasionadas pela atividade de mineração é a procura de uma destinação adequada para os resíduos sólidos gerados pelo mesmo.

Mediante o constante crescimento do consumo de agregados britados para o abastecimento do mercado da construção civil, este tem exigido uma busca por novas fontes de extração capazes de suprir às necessidades por esses produtos. Outro aspecto desse crescimento é o fato de que nem toda jazida oferece condições técnico-econômicas para sua utilização, bem como o fato da abertura de uma nova área para mineração implica em novas áreas degradadas. Dessa forma, é oportuno que ocorra o aproveitamento dos rejeitos das atuais pedreiras já instaladas, para que eles possam ser destinados como um material de valor econômico e ambiental, visando dessa forma maximizar os agregados produzidos nas pedreiras e sanar as principais externalidades geradas por essa atividade.

No que se refere a legislação pertinente a essa área, Farias (2002) afirma que no Brasil a mineração, de um modo geral, está submetida a um conjunto de regulamentações, onde os três níveis de poder estatal possuem atribuições com relação à mineração e o meio ambiente. O autor ainda cita alguns órgãos federais que têm como responsabilidade definir as diretrizes e regulamentações, bem como atuar na concessão, fiscalização e cumprimento da legislação mineral e ambiental para o aproveitamento dos recursos minerais.

São exemplos desses órgãos o Ministério do Meio Ambiente (MMA), responsável por formular e coordenar as políticas ambientais, assim como acompanhar e superintender sua execução; o Ministério de Minas e Energia (MME), responsável por formular e coordenar as políticas desse setor de produção mineral, o DNPM, responsável pelo planejamento e fomento do aproveitamento dos recursos minerais, preservação e estudo do patrimônio paleontológico, cabendo-lhe também superintender as pesquisas geológicas e minerais, bem como conceder, controlar e fiscalizar o exercício das atividades de mineração em todo o território nacional; o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), responsável por formular as políticas ambientais, cujas Resoluções têm poder normativo, com força de lei, desde que, o Poder Legislativo não tenha aprovada legislação específica; etc.

Em referência a legislação ambiental específica para o setor mineiro de produção de agregados para a construção civil, destaca-se a Resolução do CONAMA N^o. 010 de 6 de dezembro de 1990, que dispõe sobre o estabelecimento de critérios específicos para a extração de substâncias minerais de emprego imediato na construção civil. Destaca-se também o Decreto N^o. 97.632 de 10 de abril de 1989, que dispõe sobre Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD) pela mineração.

2.1.4 Tipo de Rocha Explorada em Goiânia-GO

A maioria das pedreiras localizadas na região metropolitana de Goiânia exploram a rocha conhecida como micaxisto.

Os micaxistos (Figura 2.4) são rochas metamórficas de estrutura com xistosidade acentuada, formadas por uma composição química pelítica, essencialmente, por quartzo e mica (moscovite e/ou biotite), podendo conter feldspato, granadas, estauroilite, silimanite e horneblenda (TERRA, 2007).

Segundo o Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Minho (DCT/UM, 2007), as rochas metamórficas são produtos especiais dos processos geológicos que atuam nos materiais sólidos da crosta e manto superior da Terra. O metamorfismo, o processo pelo qual rochas pré-existentes são alteradas pelo aumento de pressão (P) e temperatura (T), é controlado pelo gradiente geotérmico e pelo padrão de deformação que, em última análise, têm origem na tectônica de placas.

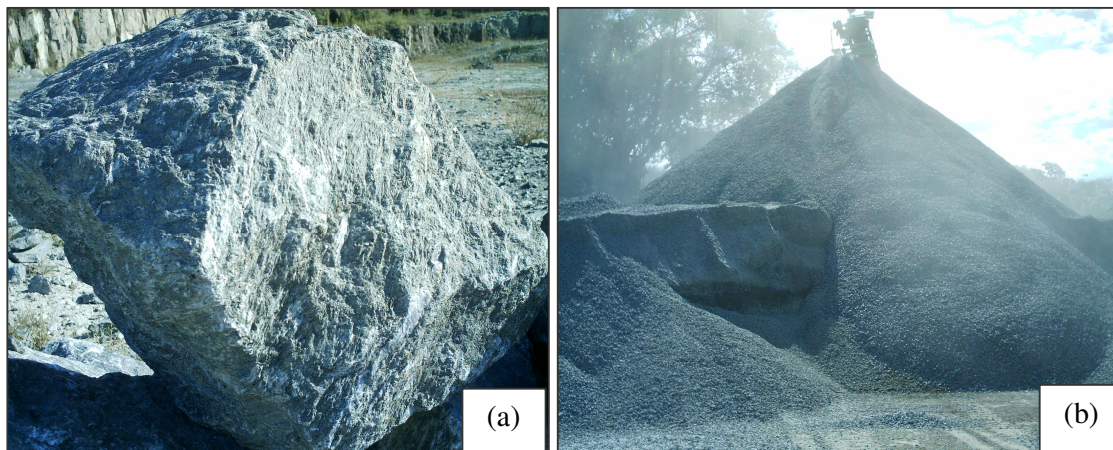


Figura 2.4 – Imagem da rocha micaxisto: (a) Foto de um bloco de rocha de micaxisto; (b) Rocha micaxística britada para ser empregada na pavimentação urbana do município de Goiânia-GO.

O micaxisto distingue-se do filito, pois os grãos podem ser observados macroscopicamente. Possui ainda minerais acessórios na sua formação, tais como: clorite, hapatite, turmalina, zircão, pirite, magnetite e grafite. É um tipo de rocha com grau de metamorfismo de médio a elevado. Sua cor é branca-prateada, acinzentada, acastanhada ou anegrada (MICAXISTO, 2007).

No processo de beneficiamento da rocha e britagem do agregado ocorre a lavagem da brita, gerando o resíduo denominado de pó de micaxisto. Este resíduo geralmente é disposto em pilhas conforme mostrado na Figura 2.5.



Figura 2.5 – Pilhas de pó de micaxisto gerada no processo de lavagem da brita

Luz *et al.* (2006), realizaram a caracterização do pó da rocha micaxisto, onde foram feitos ensaios de limites de Atterberg, massa específica dos grãos, classificação do *Transportation Research Board* (TRB) e a classificação do *United Soil Classification System* (SUCS), análise de difratometria de raios – X, que analisa a composição mineralogógica que condiciona as propriedades dos materiais, entre outros. Foram observados os resultados apresentados na Tabela 2.2 a seguir. Segundo o TRB material enquadra-se no grupo A-4, sendo do tipo solo siltoso e para o SUCS como sendo um silte arenoso do tipo ML.

Tabela 2.2 – Resultados dos ensaios de caracterização do *filler* ou pó de micaxisto (modificado LUZ, *et al.* 2006)

Material	w _L * (%)	w _P * (%)	IP* (%)	ps* (g/cm ³)	Classificação TRB	Classificação SUCS
<i>Filler</i> Micaxisto	31	22	9	2,782	A-4*	ML*

w_L = limite de liquidez, w_P = limite de plasticidade, IP = índice de plasticidade, ps = massa específica dos grãos, A-4 e ML (silto-arenoso)

Na Figura 2.6 está representado o resultado da difração, que em nada variou de uma amostra para outra, tratando-se, portanto, de resíduo bastante homogêneo, rico em quartzo e muscovita, ambos resistentes ao intemperismo tropical.

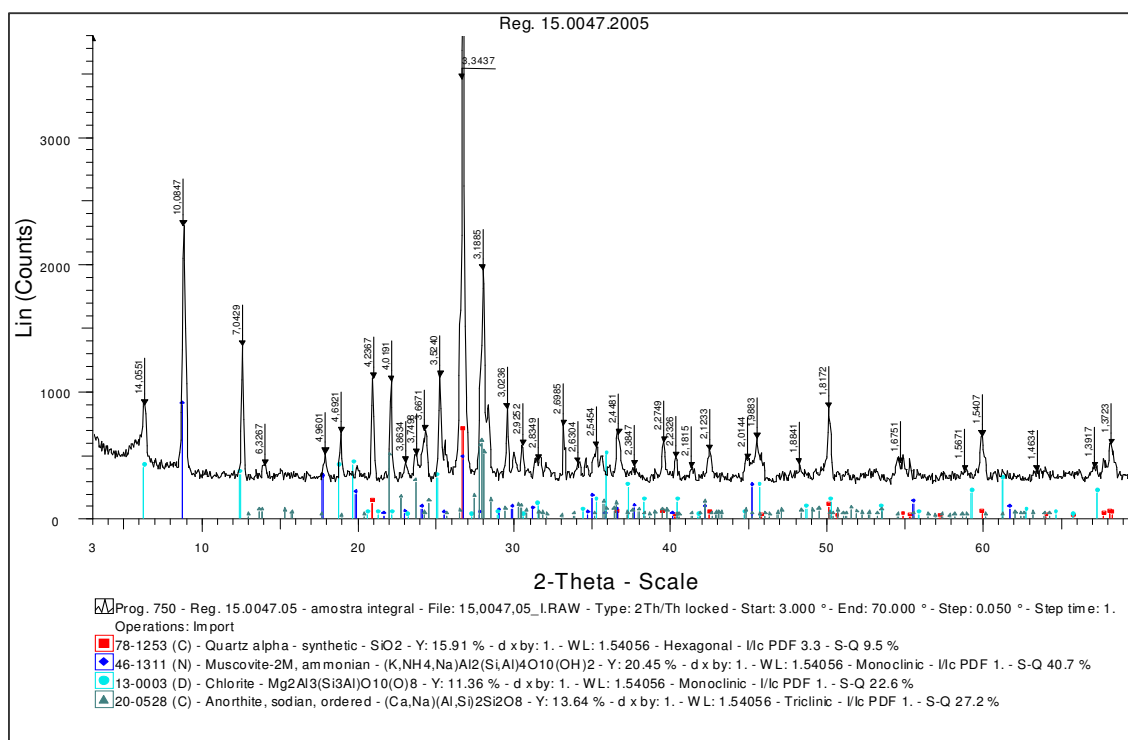


Figura 2.6 – Resultado ensaio de Difração de raios-X (LUZ *et al.*, 2006).

A proposta da execução do ensaio de difratometria de raios – X, segundo Luz *et al.* (2006), foi a de verificar se o tempo, e as condições de armazenamento, influenciavam na variação das características mineralógicas do *filler*. Nesse sentido, os autores retiraram amostras de vários pontos no aterro de armazenamento deste rejeito, na Pedreira Britenge, situada no município de Goiânia. Observaram com os resultados obtidos uma repetição para todas as amostras coletadas, no total de 9 (nove), não havendo a alteração do rejeito ao longo do tempo.

2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE PAVIMENTAÇÃO

No presente tópico são abordados alguns tópicos sobre pavimentação, mostrando com isso algumas informações básicas sobre o tema, visando um conhecimento melhor sobre o mesmo e sobre a sua capacidade de utilização de resíduos de diversas áreas produtivas.

O tópico inicia mostrando os tipos de pavimentos existentes, pavimento rígido e pavimento flexível, identificando as diferenças encontradas em ambos no que se refere as suas camadas constituintes, resistência à deformação, etc.

Mais adiante, são apresentados os materiais tradicionalmente utilizados para execução de obras de pavimentação, mostrando também a dificuldade que esse setor vem enfrentando para obter esses materiais, visto o estado avançado de escassez dos mesmos.

Visando propor soluções alternativas para preservação dos recursos naturais empregados nessas obras, são apresentados resultados de pesquisas envolvendo a utilização de materiais alternativos nesse setor. A utilização de materiais não tradicionais nesse setor pode ser encarada não só como uma saída para o problema de escassez da matéria-prima consumida, bem como uma alternativa para disposição de resíduos das mais variadas atividades produtivas desempenhadas pelo homem.

2.2.1 Tipos de Pavimentos

Segundo o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP, 2006), pavimento flexível é aquele “cujas deformações, até um certo limite, não o levam à ruptura, constituído principalmente por materiais betuminosos. Poderá ser composto

por diversas camadas, como subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento” (Figura 2.7).

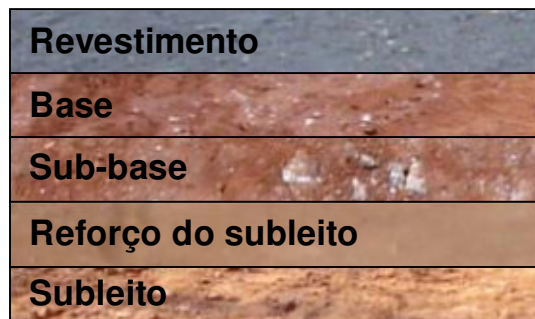


Figura 2.7 – Esquema demonstrando a estrutura de um pavimento flexível.

Um pavimento flexível está sujeito à degradação ao longo do seu período de vida, reduzindo a sua capacidade estrutural e a funcionalidade para que foi projetado. Amaral (2000) relata que, do ponto de vista estrutural, as fendas por fadiga das misturas betuminosas e as deformações permanentes são as principais degradações que contribuem para a redução da qualidade do pavimento.

Balbo⁷ (1997 *apud* AMARAL, 2000) cita uma série de fatores que levam a formação de uma deformação permanente no pavimento flexível. São elas:

- Deformação acentuada de camadas de solo e granulares inferiores com diminuição de volume;
- Início de um processo de solapamento motivado por ruptura de tubulações enterradas;
- Perda de resistência e ruptura de camadas inferiores geradas por saturação de materiais;
- Ação intensa do tráfego sobre mesmas posições em faixas estreitas com fluxo canalizado;
- Combinação de deformações plásticas de várias camadas do pavimento, entre outros.

O pavimento rígido (Figura 2.8) por sua vez é aquele “cuja camada é constituída por placas de concreto de cimento Portland, não armadas ou eventualmente com armadura

⁷ BALBO, J.T. *Pavimentos asfálticos: patologias e manutenção*. Editora Plêiade. 1997, 103p.

sem função estrutural, que desempenham simultaneamente as funções de base e de revestimento” (DER/PR, 2005).

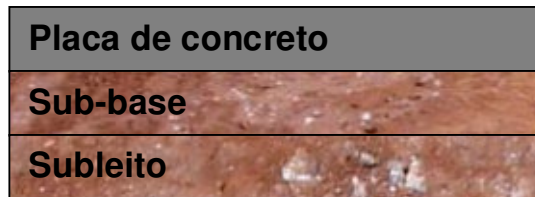


Figura 2.8 – Esquema demonstrando a estrutura de um pavimento rígido.

Mesmo possuindo em sua constituição elementos que conferem uma resistência superior ao pavimento se comparado ao pavimento flexível, os pavimentos rígidos também podem apresentar ao longo de sua vida útil, uma infinidade de defeitos. Dentre eles, pode-se ressaltar as fissuras de canto e transversais, a divisão de placas, trincas longitudinais e diagonais, o desgaste superficial, quebras localizadas e de canto, entre outras. Contudo, um dos principais fatores geradores de defeitos nesse tipo de pavimento, é a falha na selagem das juntas, como indica o Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes (DNIT, 2004).

Segundo o Portal do Concreto (2007), os pavimentos rígidos, há muito tempo estudados e utilizados em outros países, vêm ganhando força no Brasil, mesmo que de forma discreta e concentrada em grandes centros, existindo várias características que tem feito crescer a opção pelo pavimento rígido, entre elas destaca-se: resistência, durabilidade, menor custo de manutenção, economia em iluminação pública, menor risco de acidentes, menor temperatura superficial, entre outras.

Para garantir um tempo de vida útil mais longo possível para um pavimento, seja ele flexível ou rígido, devem ser levados em consideração alguns aspectos básicos, como: a qualidade do material utilizado na confecção das camadas do pavimento, a execução das mesmas seguindo normas e parâmetros técnicos adequados, entre outros.

Kumar *et al.* (2006) afirmam que a resposta da estrutura do pavimento mediante a aplicação de carga é muito sensível às propriedades dos materiais utilizados nas camadas de

base e sub-base do mesmo. Relatam ainda, que a qualidade do projeto do pavimento é extremamente dependente da exatidão da maneira em que as propriedades dos materiais são avaliadas.

2.2.2 Materiais Tradicionais Utilizados

De acordo com Mesquita (2007), dentro da classificação dos solos, aqueles que apresentam propriedades peculiares e de comportamento em decorrência da atuação de processo geológico ou pedológico típicos das regiões tropicais úmidas são denominados de solos tropicais. Ainda, como uma subdivisão existente dentre os solos tropicais destaca-se duas classes principais: solos lateríticos e os solos saprolíticos. Os solos saprolíticos ocorrem em menor quantidade no território brasileiro e também possuem emprego limitado na pavimentação. Já os solos lateríticos podem ser considerados como:

solos superficiais, típicos das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas, resultantes de uma transformação de parte superior do subsolo pela atuação do intemperismo. Os solos lateríticos têm sua fração argila constituída predominantemente de minerais cauliníticos e apresentam elevada concentração de ferro e alumínio na forma de óxidos e hidróxidos, da qual surge sua peculiar coloração avermelhada. Estes sais se encontram, geralmente, recobrimdo agregações de partículas argilosas (PINTO, 2000).

Outra característica dos solos lateríticos é a sua elevada permeabilidade, devido principalmente ao desenvolvimento de agregados argilosos resistentes, mesmo depois da imersão em água. Quando compactados, verifica-se a variação da permeabilidade encontrada ao longo da curva de compactação. As argilas lateríticas podem apresentar permeabilidade elevada no ramo seco e as areias argilosas podem ser consideradas quase impermeáveis na condição ótima de compactação. No campo, prever corretamente a permeabilidade é muito difícil pelo tipo de estrutura de compactação que é desenvolvida e pelo aparecimento de trincas de contração por perda de umidade. Essas trincas são consideradas irreversíveis e quando parte do solo seco é colocada em contato com a água podem aparecer novas trincas e fissuras (MESQUITA, 2007).

Segundo Vargas⁸ (1994 *apud* REZENDE, 2003), a relevância dos solos tropicais utilizados como material na construção de pavimentos flexíveis no Brasil foi reconhecida no

⁸ VARGAS, M. (1994). *A engenharia de solos e fundações no Brasil*. Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, 147-180.

fim da década de trinta, mediante influência do surgimento da Seção de Solos de Fundação no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT/SP).

Nogami e Villibor (1990) citam que o primeiro trecho experimental empregando as argilas lateríticas foi construído na década de 50, na cidade de Campinas – SP. Relatam também que na mesma década, o Plano de Pavimentação do Estado de São Paulo fez uso em larga escala de solo arenoso fino laterítico nas obras de pavimentação rodoviária e urbana.

Amaral (2004) relata que a Associação Brasileira de Pavimentação (ABP), desde 1976, considera que a laterita é bem aceita em camadas de base, sub-base e revestimento primário e notifica que, como exemplo mais expressivo de seu uso cita as pavimentações das rodovias Belém – Brasília e Transamazônica.

O cascalho laterítico, ainda hoje, é um dos materiais mais utilizados em obras de pavimentação, o que vem provocando a diminuição do mesmo na natureza. O termo laterita, segundo Costa⁹ (1991 *apud* AMARAL, 2004), designa rochas formadas ou em fase de formação por meio de intenso intemperismo químico de rochas preexistentes, inclusive de lateritas antigas, sob condições tropicais, ou equivalentes, sendo as mesmas caracteristicamente ricas em ferro (Fe) e alumínio (Al), e pobres em sílica (Si), potássio (K) e magnésio (Mg).

Pesquisa desenvolvida por Brasileiro (1990) relata uma outra característica dos agregados graúdos lateríticos. Estes possuem uma elevada porosidade e variam suas propriedades físicas e mecânicas quando submetidos a diferentes teores de umidade e de temperatura.

Devido a adoção de parâmetros, especificações e metodologias existentes em outros países já no princípio da construção das rodovias no Brasil, inicialmente, os materiais granulares foram utilizados para a execução de camadas de base e sub-base em grande escala e como consequência, hoje estes já não são facilmente encontrados (REZENDE, 2003).

Outros aspectos levantados pela mesma autora dizem respeito aos obstáculos ambientais impostos pelos órgãos competentes, que a cada dia vem dificultando ainda mais a concessão de licenças específicas para a retirada do cascalho, uma vez que a extração deste altera de forma significativa a vegetação, o relevo e até mesmo as características do solo local.

⁹ COSTA, M.L. *Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia*. Revista Brasileira de Geociências, V. 21, p. 146 – 160. 1991.

O outro obstáculo relatado consiste no fato de que muitas vezes, quando sua exploração é concedida, o custo envolvido com a distância de transporte entre a jazida e a obra torna-se elevado e até mesmo inviabiliza o empreendimento.

Já os solos tropicais finos (areias e argilas lateríticas) só tiveram sua viabilidade de utilização comprovadas a partir de estudos iniciados na década de 80 por Nogami e Villibor (1995). Até então, pelo fato dos mesmos não atenderem as especificações tradicionais oriundas de países de clima temperado, eles não eram utilizados nas obras. Atualmente, sabe-se que estes materiais podem ser utilizados *in natura* ou estabilizados principalmente para a construção de pavimentos de baixo custo, com tráfego variando de baixo a médio (VILIBOR *et al.*, 2000; REZENDE, 2003).

2.2.3 Materiais Alternativos

É cada vez maior o número de pesquisas desenvolvidas buscando novas soluções para o aproveitamento de materiais alternativos como incremento a recursos naturais utilizados na confecção de pavimentos flexíveis. Os materiais estudados nessas pesquisas são, em sua maioria, resíduos oriundos das mais diversas atividades antrópicas. A seguir tem-se um resumo dos principais resíduos utilizados.

2.2.3.1 Cinzas de Carvão Mineral

Um dos principais problemas ambientais causados por empreendimentos que utilizam o carvão mineral como fonte energética, é a produção de toneladas de cinzas no processo de geração de energia elétrica ou calorífera. Como sub-produto da queima de combustíveis naturais, as cinzas de caldeiras tornaram-se um problema para as empresas geradoras.

O uso da cinza de carvão mineral teve seu começo como subproduto para material de construção por volta dos anos 40. Com o crescimento no mundo do uso de termoelétricas, cujo combustível é o carvão, aumentou-se à necessidade de reaproveitamento do grande volume de cinza gerado (DIAS; DIAS; CERATTI, 2005). Estudos feitos por Leandro e Fabbri

(2005) apontaram que esse resíduo é composto principalmente por sílica, alumina e óxido de ferro, com porcentagens menores de cálcio, magnésio, sulfatos e outras combinações.

Machado *et al.* (2005) afirmam haver interesse das comunidades situadas nas mediações de fontes geradoras desse tipo de resíduo, principalmente sobre o volume grande da cinza depositado nas bacias de sedimentação, assim como sua localização, devido à degradação dessas áreas pela locação desse material que pode também produzir impactos negativos nas cidades circunvizinhas.

Atualmente, o destino deste resíduo, segundo Machado *et al.* (2005), até então não reaproveitado, são as bacias de sedimentação, implicando em prejuízos econômicos, uma vez que para sedimentar este material, necessita-se de uma grande área territorial, desvalorizando também as áreas vizinhas.

Soluções alternativas para o emprego desse resíduo foram estudadas por Dias (2004), visando sua utilização na execução da malha viária municipal urbana na região litorânea do Rio Grande do Sul, onde há abundância de areias e falta de agregados pétreos. Foram testados em laboratório para este estudo, bases de solo estabilizado com cinza-cal ou areia-asfalto. Ensaio prévios de granulometria, peso específico, equivalente de areia e o ensaio *Goldbeck* foram realizados para caracterizar os materiais utilizados. Com o objetivo de analisar o comportamento mecânico de misturas utilizadas como revestimento, foram realizados os ensaios Marshall, módulo resiliente e resistência à compressão e à tração. Conclui-se que a utilização das misturas de cinza-cal e areia asfalto foram satisfatórias para pavimentos com baixo volume de tráfego.

Machado *et al.* (2004), também verificando a potencialidade do uso desse resíduo na pavimentação, testaram a resistência de misturas de solo/cinza e o comportamento mecânico destas misturas compactadas, baseando sua metodologia nos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Resistência a Compressão Simples (RCS). Foi verificado o ganho de resistência com o tempo de cura de diversos corpos-de-prova.

2.2.3.2 Escórias de Usinas Siderúrgicas

Usinas siderúrgicas também geram, durante sua produção, além do aço, materiais de descarte diversos, dentre eles as escórias de auto forno e de aciaria. Com o objetivo de

utilizar o material na construção rodoviária, este agregado siderúrgico pode ser adicionado ao solo para construção de bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente. Parente *et al.* (2003) realizaram pesquisa neste sentido, apresentando resultados de ensaio de ISC e de módulo de resiliência de solos misturados à escória. Os autores concluíram com este trabalho que a escória de aciaria, desde que seja submetida ao processo de cura por hidratação e seu potencial expansivo seja reduzido aos limites aceitáveis, poderá ser empregada como agregado para as camadas de base e sub-base de pavimentos e, sob o aspecto econômico, o emprego deste agregado siderúrgico é vantajoso visto que seu preço de aquisição é 4 vezes menor que o agregado oriundo do desmonte de rocha viva.

Ocorre neste material que alguns dos principais componentes das escórias de aciaria: os óxidos de cálcio e magnésio, o silicato dicálcico e o ferro metálico, sofrem transformações químicas, principalmente sob presença de umidade, que provocam a expansibilidade da escória compactada (NASCIMENTO, 2003). Sendo a natureza expansiva da escória de aciaria apontada como fator limitante para sua utilização na pavimentação rodoviária, o referido autor realizou um estudo da expansibilidade nesse material visando sua aplicação para esse fim. Adotou-se como metodologia o tratamento da escória com hidratação diária e determinação do tempo ideal de tratamento para redução da expansibilidade volumétrica do resíduo a níveis adequados para o seu emprego. O estudo apontou um tempo de tratamento de 44 dias para se obter valores de expansibilidade inferiores a 2,0% .

Rohde *et al.* (2001) realizaram trabalho semelhante ao de Parente *et al.* (2003), tendo o primeiro trabalho como alternativa a adição de outros elementos como a cal de carbureto e cinza pesada, onde obtiveram valores de resistência um pouco mais elevados para os mesmos tempos de cura.

Pagnussat (2004), por sua vez, estudou a aplicação desse resíduo em blocos de concreto para pavimentação para vias de tráfego intenso, avaliando as vantagens da utilização da escória nestes blocos, como substituição parcial do cimento e também do agregado miúdo. Para ambas situações foram realizados ensaios de resistência mecânica à compressão, desgaste por abrasão e absorção de água, com os teores de substituição variando em 10, 30 e 50%. Como resultado foi constatado que o teor de 10% como substituição parcial de cimento foi o que mais se aproximou do desempenho dos blocos referência. Os resultados também

demonstram que não há diferenças significativas entre os blocos referência e os blocos com resíduos da produção de ferro fundido, por ele denominado de Escória Granulada de Fundição (EGF), quanto ao desgaste por abrasão e absorção de água.

2.2.3.3 Fosfogesso

Outro resíduo que tem atingido grande destaque ambiental e tem sido estudado para aplicação na construção rodoviária é o fosfogesso, principalmente pela alta quantidade acumulada deste resíduo nas indústrias que produzem fertilizantes agrícolas.

O termo fosfogesso é freqüentemente referenciado na literatura como subproduto de gesso, gesso químico, resíduo de gesso, gesso agrícola ou gesso sintético. Por conter resíduos de fósforo na sua composição (0,7% a 0,9%) este é chamado de fosfogesso (NUERNBERG¹⁰, 2005 *apud* CANUT, 2006). Todos estes termos se referem a um mesmo produto, diferente do gesso no seu estado natural. A Figura 2.9 mostra uma ampliação microscópica de duas amostras de fosfogesso dos estudos de Canut (2006). Observa-se nas fotomicrografias do fosfogesso *in natura* (Figura 2.9a) e do fosfogesso beneficiado (Figura 2.9b), que a morfologia das partículas de fosfogesso sofre alteração, passando de lamelar estriada para lamelar lisa. Tal situação é explicada pela autora devido o beneficiamento do fosfogesso, onde o mesmo perde a água adsorvida na superfície de suas partículas, deixando assim as mesmas com aspecto mais liso.

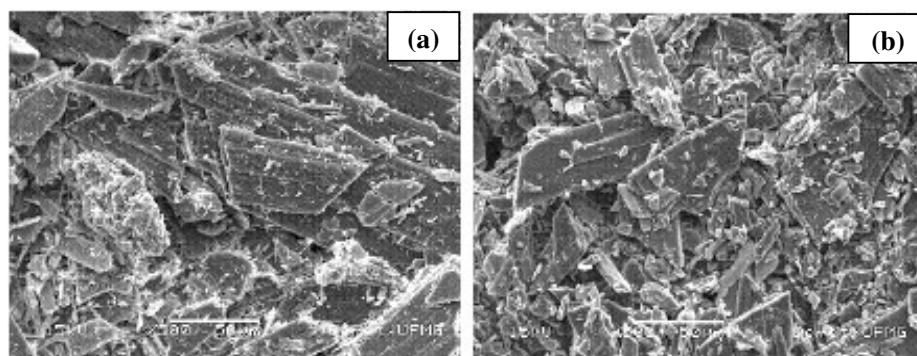


Figura 2.9 – Fotomicrografia de amostras em pó com um aumento de 500x: (a) fosfogesso *in natura*; (b) fosfogesso beneficiado (CANUT, 2006).

¹⁰ NUERNBERG, N.J.; RECH, T.D.; BASSO, C. *Uso do gesso agrícola*. BOLETIM TÉCNICO n. 122. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina S.A (EPAGRI). Santa Catarina:EPAGRI, 2005. ISSN 0100-7416.

O fosfogesso é um resíduo sólido da produção de ácido fosfórico pelas indústrias de fertilizantes. Silvestre *et al.* (2001) realizaram ensaios de avaliação da influência do tipo de cimento Portland para ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS) e deformabilidade das misturas de fosfogesso e cimento para uso em construção de pavimentos. Como resultado, observaram que o tipo de cimento não tem efeito predominante no comportamento da mistura, se comparado com os efeitos das outras variáveis. Entretanto, a consideração do tipo de cimento é importante, visto que, a longo prazo, cimentos com teores elevados de aluminato tricálcico conduzem à diminuição de resistência e rigidez.

Estudos similares foram desenvolvidos por Kobayashi (2000), onde o autor também analisou o comportamento expansivo de corpos-de-prova compactados com diferentes proporções de fosfogesso e cimento, constando que a influência do tipo de cimento na expansão das misturas de fosfogesso e cimento é significativa, e que o teor de aluminato tricálcico não é a única explicação para o comportamento de expansão observado. Os resultados experimentais indicam que quantidades crescentes de aluminato tricálcico conduzem a menores expansões, fato que contrariou a expectativa inicial da pesquisa de que a reação do aluminato tricálcico contido no cimento e dos sulfatos presentes no fosfogesso poderia conduzir à formação de cristais de etringita e à expansão subsequente.

Diversos estudos têm sido desenvolvidos visando a utilização do fosfogesso como material de construção de bases ou sub-bases de pavimentos, sendo que a maior parte das pesquisas têm sido conduzidas pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) na França, o *Institute for Recyclable Materials* (IRM) e o *Florida Institute of Phosphate Research* (FIPR), sendo estes dois últimos institutos localizados nos Estados Unidos, (OLIVEIRA, 2005) .

Desejando a avaliação do comportamento mecânico de solo-cimento e fosfogesso e cimento para uso em pavimentação, Parente *et al.* (2003) trabalharam com teores de 4, 7 e 10% para a primeira mistura e apenas os teores de 7 e 10% para a segunda, e cura por 3, 7 e 28 dias. Foram realizados ensaios de compressão simples, compressão diametral e triaxiais cíclicos. Observou-se que valores crescentes de tempo de cura e teor de cimento conduziram a maiores valores de resistência e rigidez. Concluiu-se ainda que as misturas de fosfogesso e cimento apresentaram resistência e rigidez significativamente menores. Contudo, principalmente no tocante à deformabilidade, é comparável ao de materiais empregados em pavimentação, como algumas bases estabilizadas granulometricamente de uso corrente.

Parreira e Takeda (2000) realizaram estudos avaliando as propriedades de mistura de fosfogesso estabilizadas com cimento, objetivando a verificação da possibilidade do uso dessa mistura na construção de base e sub-base de pavimentos. Além da caracterização do resíduo, também verificaram a influência do índice de cimento, o tempo de cura, entre outros, sendo que os resultados apontaram que a mistura têm aplicações potenciais como material a ser empregado na pavimentação.

Por se tratar de um resíduo radioativo com baixo poder de radiação devido a presença de Radônio (Rn) e seus produtos de decaimento em sua composição, o fosfogesso tem despertado até então baixo interesse de pesquisadores, visto a problemática que o envolve devido apresentar tal característica. Santos (2002) buscou avaliar o impacto radiológico ambiental desse resíduo no Brasil, utilizando-se para tanto análises de lixiviação do resíduo. As concentrações encontradas de atividade médias determinadas na água das pilhas foram de $1,5 \pm 0,6$ Bq L⁻¹ para o Ra⁻²²⁶ e $2,1 \pm 1,0$ Bq L⁻¹ para o Pb⁻²¹⁰. As concentrações de atividade de Rn-222 no ar variaram de 8 ± 1 Bq m⁻³ a 48 ± 7 Bq m⁻³. Os produtos de decaimento do Rn⁻²²² presentes no ar apresentaram valores de concentração inferiores 86×10^{-2} WLM. Os resultados mostram que os radionuclídeos de interesse, apesar de estarem presentes em concentrações relativamente altas no fosfogesso, não são disponibilizados e não representam um perigo. Salienta ainda da necessidade da realização de estudos mais aprofundados caso a caso.

Mesquita e Rezende (2005) realizaram uma avaliação de misturas de fosfogesso e solos tropicais finos. Com os ensaios de caracterização, as autoras verificaram que o resíduo caracteriza-se como um material não plástico possuindo ainda um elevado valor de umidade ótima e baixo peso específico aparente seco máximo.

Dando continuidade à sua pesquisa, Mesquita (2007) observou que para as amostras de fosfogesso estudadas, a curva granulométrica demonstrou que o mesmo pode ser incluído na classe dos siltes, com mais de 75 % de suas partículas passantes na peneira n°. 200. Para as misturas trabalhadas (20, 50 e 80 % de fosfogesso dosado a um solo laterítico fino) a análise granulométrica mostrou que as mesmas apresentaram uma quantidade maior de areia. Em referência ao ensaio de compactação, a autora observou que quanto maior a quantidade de fosfogesso presente na mistura, menor é o valor do peso específico aparente seco máximo (em torno de 12 kN/m³) e maior é o teor de umidade ótima (superior a 30%),

sendo que para a energia Proctor Intermediária constatou-se que o fosfogesso puro não apresenta capacidade de suporte e, portanto, sozinho, não poderia ser utilizado em obras de pavimentação (CBR = 0,6%). No entanto, ficou comprovado que para uma adição de 20 % de fosfogesso dosado ao solo estudado, a mesma apresentou maior potencial de aplicação, podendo ser utilizada em camadas de sub-base de pavimentos (CBR = 37%). Os resultados das análises químicas realizados pela autora mostraram a existência de reações entre as partículas do solo e do fosfogesso, explicando, conforme a pesquisadora, as variações de resistência obtidas nos ensaios mecânicos.

2.2.3.4 Resíduos de Construção e Demolição

Alguns comitês visando o uso de resíduos na construção civil foram criados a partir de 1970, como por exemplo, Comitê E-38, criado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) em 1974, que tem como principal objetivo desenvolver métodos e pesquisas relacionadas com aplicações de resíduos como fonte de energia e materiais. Destaca-se também o Comitê 37-DRC, criado em 1978 pela *Reunion International d'Essais et Matériaux* (RILEM) voltado para resíduos de demolição (CINCOTTO¹¹, 1988 *apud* CANUT, 2006).

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD), também denominados como entulho, têm se tornado um dos alvos do meio técnico-científico, utilizando o mesmo como agregado para inúmeros usos. O resíduo de construção e demolição é um material heterogêneo com características variáveis, que dependem do tipo de obra, das técnicas construtivas, da fase da obra, das características socioeconômicas da região, entre outros fatores. A forma mais simples de reciclagem do entulho é a sua utilização em pavimentação (base, sub-base ou revestimento primário) na forma de brita corrida ou ainda em misturas do resíduo com solo (ZORDAN, 2006). A eficiência desta prática já comprovada cientificamente, vem sendo confirmada pela utilização da mesma por diversas administrações municipais.

¹¹ CINCOTTO, M.A.C. *A utilização de sub-produtos e resíduos na construção civil*. In: TECNOLOGIA DE EDIFICAÇÕES. São Paulo : Pini, 1988.

Na maioria dos municípios, a maior parte desse lixo é depositado em bota-fora clandestino, nas margens de rios e córregos ou em terrenos baldios. A deposição irregular de entulho ocasiona proliferação de vetores de doenças, entupimento de galerias e bueiros, assoreamento de córregos e rios, contaminação de águas superficiais e poluição visual.

Segundo a Revista do Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia de Goiás (CREA/GO, 2007), os resíduos gerados pela construção civil representam mais de 60% de todo o resíduo produzido no Brasil, sendo que só em Goiânia, os rejeitos equivalem a cerca de 1,2 quilos por habitante/dia, ou num total de quase 500 mil toneladas/ano, volume problemático para uma capital que ainda não tem Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos.

Este resíduo causa tantos problemas à vida urbana e ao meio ambiente que a melhor solução é que o entulho seja visto como fonte de materiais que podem ser reutilizados na construção civil e pavimentação. Silva *et al.* (2005) afirmam ainda que, além de atrair a deposição de outros resíduos no local, a deposição irregular também acarreta num ciclo vicioso de gastos públicos com limpeza, uma vez que mais lixo será depositado ali posteriormente.

Angulo e John (2004) relatam que a quantidade de RCD gerada é significativa em muitos países do mundo, com estimativas variando de 136 kg/habitante a 3359 kg/habitante por ano, sendo que em diversos países, a geração dos RCD em relação ao total de resíduos sólidos urbanos em massa é predominante, variando de 13 a 80%. Estas variações, segundo os autores, se devem às diferenças nos critérios de classificação, no controle da geração dos resíduos, nas tecnologias disponíveis e os materiais empregados em cada país. No Brasil, a cidade de São Paulo gera 4.000 toneladas de RCD/dia (BRITO, 1999).

A aplicação nas camadas de base e sub-base de pavimentos é a utilização predominante para os agregados de RCD reciclados no Brasil e no exterior, pois são as aplicações que exigem dos agregados menor qualidade (exigência quanto a variabilidade). Assim, poucas especificações para os agregados são necessárias, propiciando o emprego do material com segurança (ÂNGULO, 2004; JOHN, 2004).

Carneiro *et al.* (2001) realizaram pesquisa com RCD do município de Salvador-BA, onde inicialmente caracterizou o entulho e o agregado reciclado miúdo (<4,8 mm) e graúdo (<19 mm) envolvendo aspectos físicos, químicos e de risco ambiental. De posse desses dados, os referidos autores verificaram em laboratório o potencial da utilização do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos, onde observou-se que o material estudado apresentou desempenho adequado para sua aplicação em campo.

Oliveira *et al.* (2005) realizaram, em uma parceria entre FURNAS - Centrais Elétricas S.A., Universidade de Brasília – UnB, Universidade Federal de Goiás - UFG e Prefeitura de Goiânia, estudos com a confecção de um trecho experimental de 56 metros de extensão, utilizando agregado reciclado misturado a um solo fino argiloso nas camadas de base e sub-base do pavimento. Para avaliar o comportamento do trecho, os pesquisadores utilizaram os ensaios de viga Benkelman, Penetrômetro Dinâmico de Cone - DCP, entre outros, obtendo resultados satisfatórios do desempenho da mistura estudada.

Ribeiro (2006) avaliou em seu trabalho o comportamento estrutural de um pavimento executado utilizando aplicação do agregado reciclado na camada de base do mesmo no município de Goiânia – GO. Para essa avaliação, o autor realizou ensaios de campo do tipo viga Benkelman, prova de carga sobre placa, DCP e Pressiômetro Pencil em dois períodos distintos (abril/2005 e janeiro/2006). Os ensaios de deflexão utilizando a viga Benkelman mostraram um desempenho maior do pavimento para o ano de 2006. Com os resultados do ensaio de DCP, aliados à correlações, foram obtidos valores significativos de capacidade de suporte (CBR), variando entre 39,7% a 94,2% para condições saturadas, e de 43,1% a 99,3%, para condições não saturadas. Nos ensaios de prova de carga, foram observadas reduções dos deslocamentos medidos no ensaio de um período para outro, sendo estas mais significativa para as estacas situadas nos bordos do pavimento. Por fim, nos ensaios de pressiômetro Pencil o autor observou uma semelhança entre os módulos encontrados, verificando ainda a existência de anisotropia na camada de base e no subleito, devido à compactação.

Visando dar continuidade aos trabalhos de Oliveira *et al.* (2005) e de Ribeiro (2006), Resplandes (2007) realizou o monitoramento dos dois trechos estudados pelos autores citados, por meio da execução de ensaios de campo do tipo viga Benkelman, DCP e prova de

carga sobre placa. Mediante os dados obtidos nos ensaios, pode-se verificar que ambos os trechos experimentais apresentaram um bom desempenho para todos os ensaios realizados, sendo que os melhores valores foram obtidos no trecho executado na pesquisa de Oliveira *et al.* (2005), comprovando com isso a eficácia da aplicação do agregado reciclado em obras de pavimentação.

2.2.3.5 Resíduos Cerâmicos

Existem ainda diversos resíduos sendo estudados para avaliar seu uso potencial como material granular alternativo em obras de pavimentação. Dentre eles pode-se citar o trabalho de Dias (2004), que avalia o emprego de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas em camadas de pavimentos de baixo custo, baseado em análises de laboratório, onde realizou a caracterização do objeto de estudo e o submeteu ainda aos ensaios empregados na pavimentação, como a metodologia tradicional, módulo de resiliente, deformação permanente entre outros. Os resultados dos ensaios de laboratório indicaram ser possível a aplicação deste material em misturas com solos lateríticos em camadas de pavimentos de baixo custo. Apontou ainda, um ganho expressivo no valor do módulo de resiliência, chegando a atingir 288% acima do módulo do agregado.

Outro material cerâmico atualmente estudado para esse emprego, são os expurgos da produção de tijolos de argila. Mazumder *et al.* (2006) desenvolveram um estudo nesse sentido em Bangladesh, onde cerca de 13% dos tijolos produzidos são descartados devido a falhas no processo de cozimento. Visando a aplicação desse rejeito como agregado granular utilizando ensaio de resistência abrasão Los Angeles, concluíram que este material pode ser utilizado na pavimentação, apresentando elevados valores de resistência.

2.2.3.6 Resíduos de Pedreira

Soares e Mendes (1999) discutiram sobre as perspectivas da utilização de finos resultantes da britagem de rocha em segmentos de pavimentação. Rezende (1999) e Valle (1999) avaliaram a utilização do expurgo de uma pedreira do Distrito Federal na camada de base de um pavimento flexível. Foram feitos ensaios em laboratório de caracterização,

compactação, ISC, expansão e triaxial cíclico e este material foi utilizado num trecho experimental localizado na rodovia DF-205 Oeste. O material mostrou-se bastante viável economicamente, segundo os autores, em regiões localizadas próximas às pedreiras.

Os autores citados não relataram estudos acerca da problemática sócio-ambiental, no que tange a potenciais problemas de saúde e impactos ocasionados sobre a população quando da exposição ao resíduo estudado, assim como os benefícios advindos da sua diminuição, quando da possibilidade de utilização em obras de pavimentação (LUZ *et al.*, 2005).

A utilização de finos de pedra agregado ao solo para ser usado nas camadas de base e sub-base tem alcançado igualmente um destaque no meio científico, visto a necessidade de se achar uma utilização viável para esse resíduo. Tal fato resulta em sérios problemas ambientais, tais como: poluição atmosférica, assoreamento de drenagens, impacto visual e ocupação de áreas úteis com as pilhas de rejeitos.

Fujimura¹² *et al.* (*apud* PISSATO, 2001; SOARES, 2001) propõem uma definição para finos de pedra, com sendo o material granulometricamente situado abaixo da fração 4,8 mm derivado dos processos de perfuração, detonação e britagem de rochas, apresentando, normalmente, forma cúbica, superfícies rugosas e angularidades proeminentes.

Pissato (2001) realizou estudo envolvendo os finos de britagem de rocha como elemento constituinte da mistura de solo-cimento, melhorando as características do solo utilizado e oferecendo destinação a este resíduo. Foram executados ensaios de compressão simples cujos resultados foram comparados aos valores admitidos pelas normas, atingindo valor de 7,0 MPa, assim como ensaios de resistência ao cisalhamento e determinados os parâmetros que definem o comportamento do material frente ao estado de tensões, onde foram observados valores satisfatórios em termos de ganho de resistência.

Luz *et al.* (2006) realizaram uma análise da viabilidade técnica da utilização de um rejeito de pedra, conhecido como pó de micaxisto, dosado a um solo local tropical fino, como material de pavimentação. Em uma etapa inicial desse trabalho foram caracterizados o solo escolhido, o pó de micaxisto (*filler*) e das misturas estipuladas (0, 10, 20, 30 e 50% de pó

¹² FUJIMURA, F.; SOARES, L.; HENNIES, W. T.; SILVA, M. A R. *Enviromental issues and profitable uses of stone quarry fines*. . Fourth International Conference on Enviromental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production. (SWEMP). **Proceedings**. Cagliari, Italy. 1996.

adicionado ao solo), por meio de análise granulométrica, limites de consistência, massa específica real dos grãos e difração de raios – X. Também foram empregados ensaios de compactação e ISC, visando verificar a resistência das misturas. Os resultados alcançados permitiram constatar que há viabilidade técnica de utilização do pó dosado ao solo, observando uma melhora sobremaneira da qualidade do solo *in natura*, já que o ISC passa de 32% para 59%, na energia modificada, e de 18% para 41%, na energia intermediária, o que significa economia das jazidas naturais. O ensaio de difração de raios – X atestou a homogeneidade e estabilidade cistaloquímica do material, o que possibilita a não repetição de análises qualitativas do *filler*.

Pesquisa semelhante foi desenvolvido por Batalione (2007), onde o mesmo realizou um estudo sobre a utilização de rejeitos finos de uma pedreira de granito (Figura 2.10), nas dosagens de 15%, 25% e 35%, a quatro solos tropicais da região noroeste do estado de Goiás, visando a estabilização desses solos por meio do emprego desse rejeito.

A pesquisa desenvolvida pelo referido autor ainda buscou avaliar a viabilidade técnica e econômica da adição deste rejeito na execução de um trecho experimental, executado na cidade de Inhumas – Goiás, tendo como materiais constituintes de suas camadas, a mistura: solo e rejeito fino de Granito.

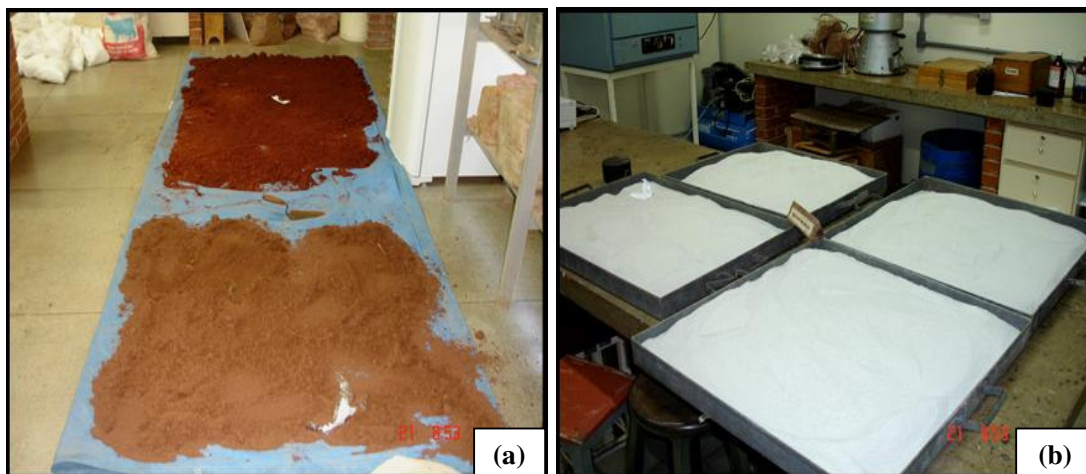


Figura 2.10 – Secagem das amostras estudadas por Batalione (2007): (a) amostras de solo; (b) rejeito de pedreira de Granito.

Batalione (2007) realizou uma investigação do potencial técnico da adição do rejeito aos solos estudados através de ensaios de laboratório, tais como: ensaios de compactação e ISC, expansão, Resiliência, entre outros. Analisou ainda o potencial técnico

desenvolvido por meio de ensaios de campo tais como: viga Benkelman e o módulo de elasticidade do solo. Os resultados encontrados demonstraram a possibilidade da aplicação do rejeito estudado em base de pavimentos, mesmo os valores de ISC não atingindo 60 %. Para o ensaio de resiliência, os valores dos solos naturais e das composições que receberam adição de rejeito não apresentaram diferenças significativas. Finalizando, nos ensaios de campo o autor afirma que com a adição de 15% do rejeito ao solo nas camadas do pavimento não gerou danos à sua estrutura, comprovando com isso a possibilidade do seu emprego na pavimentação. Também para os resultados de viabilidade econômica a mistura contendo 15 % de rejeito. A adição desse rejeito nesse teor propiciou uma redução de custos, sendo essa redução mais acentuada para os itens com transporte e limpeza e abertura de jazida de solo natural.

2.3 ESTUDOS DE LABORATÓRIO E DE CAMPO

Neste tópico são apresentados os ensaios laboratoriais tradicionalmente executados para caracterização e avaliação do comportamento mecânico de materiais, bem como ensaios de campo aplicados para monitorar e aferir obras de pavimentação.

Nos estudos de laboratório, visando a caracterização e classificação dos materiais tradicionalmente são realizados os seguintes ensaios: granulometria, limites de consistência ou Limites de Atterberg, peso específico do material. Concluída a caracterização dos materiais, existe a necessidade da obtenção dos parâmetros do material, tais como, sua umidade ótima e seu peso específico aparente seco máximo numa dada energia de compactação, podendo ser utilizada a energia normal, intermediária ou modificada. Por fim, deve-se determinar a capacidade de suporte do material através do ensaio de *California Bearing Ratio* (CBR) ou Índice de Suporte Califórnia (ISC) e analisar sua expansão.

Determinados todos esses parâmetros em laboratório, os mesmos são aplicados em campo na execução de pavimentos. No sentido de realizar monitoramento da construção das camadas constituintes desse pavimento, são realizados ensaios como frasco de areia e método *speedy*, para aferição do grau de compactação das camadas e a umidade ótima de campo. Para averiguação da resistência e deformação do pavimento são realizados os ensaios de Penetrômetro Dinâmico de Cone – DCP, Viga de Benkelman e Prova de Carga Sobre Placa. Nos tópicos seguintes, tem-se um detalhamento mais aprofundado sobre cada um desses ensaios citados.

2.3.1 Estudos de Laboratório

2.3.1.1 Análise Granulométrica

O ensaio de análise granulométrica tem como objetivo o ordenamento das partículas do material que está sendo ensaiado, em diferentes intervalos de tamanho e determinar a porcentagem relativa, em peso seco, de cada uma das faixas. Visando uma distribuição mais uniformemente possível, são utilizados dois métodos distintos na análise granulométrica, permitindo com isso cobrir a enorme diversidade de tamanhos das partículas existentes, que são o peneiramento e a sedimentação (CAPUTO, 1973).

A obtenção da distribuição granulométrica de um material por meio do método peneiramento consiste em submeter à passagem do material por um conjunto de peneiras, com o auxílio de uma peneiradora mecânica que dá ao jogo a vibração necessária para que os grãos encontrem a melhor posição para passar pelas aberturas das malhas das peneiras. Esse método é comumente utilizado na análise de areias e pedregulhos, obtendo dessa forma a separação dos grãos dos mesmos em diferentes granulometrias.

Para materiais finos, apresentando grãos com diâmetro menor que cerca de 0,074 mm (peneira nº 200) emprega-se o método de análise por sedimentação. A metodologia mais utilizada para esse procedimento foi desenvolvida por Casagrande, baseado na lei de Stokes, a qual consiste em medir a velocidade de deposição das partículas num meio líquido, associando-se os valores ao diâmetro dessas partículas. A sedimentação pode ser natural (não é usado defloculante) e total (usa-se defloculante de 20 cm³ de silicato de sódio de densidade 1,023 g/cm³ a 20 °C (SENÇO, 1997)). Geralmente o ensaio é realizado de acordo com a norma da NBR 7181 (ABNT, 1984). A finalidade do defloculante é de desmembrar as partículas de solo que se encontram unidas em flocos.

A representação gráfica desse ensaio é dada por meio da curva granulométrica. Essa curva é traçada por pontos em um diagrama semi-logarítmico, no qual, sobre o eixo das

abscissas, são marcados os logaritmos das dimensões das partículas e sobre o eixo das ordenadas as porcentagens, em peso, de material que tem dimensão média menor que a dimensão considerada (porcentagem de material que passa). A partir desta curva pode-se determinar a quantidade de pedregulho, areia, silte e argila presentes no material de acordo com as definições apresentadas na NBR 6502 (ABNT, 1995).

As exigências granulométricas que se fazem para que o solo-agregado seja utilizado na execução de bases de pavimentos se baseiam nas considerações de que este material possua uma elevada densidade, consequência do preenchimento da maior parte dos vazios inter-granulares pelas partículas menores do próprio agregado (DIAS, 2004).

2.3.1.2 Teor de Umidade

A umidade de uma determinada massa de solo é a relação entre a massa de água contida nos vazios desse solo e a massa de sólidos (massa de solo seco). A determinação do teor de umidade geralmente é feita em laboratório, utilizando-se a secagem em estufa, mantendo-se a temperatura entre 100°C e 110°C (BAPTISTA, 1976).

2.3.1.3 Massa Específica dos Grãos

Segundo Lambe (1967), a massa específica é a relação massa por unidade de volume apenas da parte sólida, sendo que para tanto, à necessidade de se excluir todos os vazios, inclusive os ocupados pelo ar e os vazios nos poros das partículas. Os dados obtidos nesse ensaio são utilizados na determinação de vários outros ensaios de laboratório.

Uma vez que os materiais em análise apresentarem uma variabilidade considerável entre os grãos finos e os grossos, realizam-se ensaios de massa específica dos grãos finos, de acordo com NBR 6508 (ABNT, 1984a) e de grãos de pedregulho retidos na peneira de malha 4,8mm NBR 6458 (ABNT, 1984b).

2.3.1.4 Limites de Consistência

Também conhecidos como Limites de Atterberg, esses limites permitem avaliar a plasticidade dos solos. São baseados no conceito de que um solo de granulação fina pode existir em qualquer dos quatro estados dependendo do seu teor de umidade. Um solo é sólido quando seco e após se ir adicionando água caminha para os estados semi-sólidos, plásticos e finalmente líquido.

Segundo Lambe (1967), essa transição dá-se nas seguintes etapas: (a) limite de liquidez, a fronteira entre o estado líquido e o plástico; (b) limite de plasticidade, a fronteira entre o estado plástico e o semi-sólido; e (c) limite de contração, a fronteira entre o estado semi-sólido e sólido.

O limite de liquidez é determinado de acordo com NBR 6459 (ABNT, 1984c), através do aparelho de Casagrande, que consiste de um recipiente de latão em forma de concha sobre um suporte de ebonite. Através de um excêntrico imprime-se ao prato repetidas quedas de um altura padrão de 1 cm.

De posse do conjunto de valores de teor de umidade do solo e do número de golpes e correspondente, traça-se a linha de escoamento, assumida como linear. Nesse gráfico têm-se o número de golpes representados no eixo das abcissas em escala logarítmica os teores de umidade, em porcentagem representados no eixo das ordenadas em escala natural. Por definição o limite de liquidez do solo é o teor de umidade correspondente a 25 golpes (SENÇO, 1997).

O limite de plasticidade é a transição de estado de consistência semi-sólida para o estado de consistência plástica (umidade crescente). O ensaio é realizado de acordo com a NBR 7180 (ABNT, 1984d), é expresso pelo menor teor de umidade com que um cilindro de solo de cerca de 10 cm de comprimento é rolado, rompendo-se ao atingir 3 mm de diâmetro.

Fisicamente, o que ocorre é que a película de umidade que envolve os grãos começa a romper-se, provocando atrito direto grão a grão (SENÇO, 1997).

O índice de plasticidade (IP) é a diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade. Ele define a zona em que o terreno se acha no estado plástico e, por ser máximo para as argilas e nulo para as areias, fornece um critério para avaliar o caráter argiloso de um solo. Assim, quanto maior o IP, tanto mais plástico será o solo.

2.3.1.5 Compactação, Expansão e *California Bearing Ratio* (CBR)

Segundo Lambe (1967), o propósito do ensaio laboratorial de compactação é para determinar a quantidade adequada de água a ser misturada ao solo quando, de maneira a se alcançar o ponto de compactação em campo. Esse ensaio, portanto, fornecerá os pontos de compactação comparáveis com os a se obter pelo método utilizado em campo.

De acordo com Baptista (1976), o CBR, por tradução Índice Suporte Califórnia (ISC), é uma prova de resistência mecânica em que se mede a penetração de uma haste de seção transversal circular, de área igual a três polegadas quadradas, em uma amostra de solo, compactada na umidade ótima e densidade máxima para uma determinada pressão (que reduz essa penetração) e se compara com a pressão que produz a mesma penetração, em uma amostra de pedra britada, de granulometria determinada. O ensaio é realizado conforme a NBR 9895 (ABNT, 1987).

Depois de medir a expansão da amostra, isto é, depois de imersa em água durante quatro dias, tira-se o cilindro do tanque de água, leva-o para à prensa e coloca-se uma carga de 10 libras (4,5 kgf). Estas cargas são circulares, com uma abertura circular no centro, onde penetra o pistão ou haste de seção transversal circular, de área igual a três polegadas quadradas. A operação de penetração deve ser feita de tal modo que a velocidade de penetração do pistão seja 0,05 polegadas por minuto. Para isto utiliza-se um cronômetro e o

extensômetro, que no início da prova é ajustado em zero e mede a penetração. Na prensa deve-se controlar as pressões em kgf/cm^2 correspondentes à penetração de 0,1", 0,2", 0,3", 0,4" e 0,5". O ISC é dado pela relação em porcentagem da pressão encontrada em relação à pressão que produz a mesma penetração na amostra padrão de pedra britada.

O resultado é uma curva de tensão-penetração, onde tem-se nas abscissas, as penetrações em milímetros e, nas ordenadas, as tensões em kgf/cm^2 . A curva não deve apresentar ponto de inflexão. Caso apresente deve-se corrigi-la, traçando a tangente no ponto de inflexão, que interceptará o eixo das abscissas em um ponto que será a nova origem para o cálculo do ISC corrigido.

2.3.2 Estudos de Campo

Atualmente, existem dois tipos de problemas relacionados com a pavimentação no Estado de Goiás. O primeiro trata da quantidade de vias pavimentadas existentes na malha viária. O segundo refere-se aos problemas gerados, principalmente, pela falta de manutenção nas vias existentes.

Para referida manutenção dos pavimentos, podem-se utilizar diferentes tecnologias, dentre as quais, destacam-se os ensaios de campo (PALOCCI; VARGAS, 2005). Estes podem ser realizados tanto durante o controle de execução das camadas do pavimento, como também ao longo de sua vida útil para avaliação das condições estruturais.

Visando um controle de execução, bem como garantir uma vida útil do trecho experimental, foram realizados ensaios específicos para essas finalidades, como demonstram os tópicos a seguir.

2.3.2.1 Frasco de Areia

O ensaio de frasco de areia é utilizado para a determinação do Grau de Compactação (GC) em campo. Para realização deste ensaio é utilizada a metodologia

descrita na norma NBR 7185 (ABNT,1986).

Ele é executado em todas as camadas do trecho, durante a construção do mesmo, visando o controle de compactação do pavimento. A Figura 2.11 demonstra a execução desse ensaio.



Figura 2.11 – Ensaio da densidade pelo método do frasco de areia.

2.3.2.2 Método *Speedy*

Visando o controle de execução de pavimentos, utiliza-se ainda o método *Speedy* para determinação do teor de umidade em campo. Esse método, conforme Oliveira, Araújo e Mazur (2002) consiste em colocar no aparelho *Speedy* (Figura 2.12) uma quantidade de amostra de solo de acordo com a umidade prevista, juntamente com uma ampola de carbureto de cálcio e esferas de metal.

O princípio do ensaio, portanto, é medir a pressão gerada pela reação entre o carbureto de cálcio e a água presente na amostra de solo, fazendo-se em seguida uma conversão da leitura obtida por um teor de umidade.

A seguir, tem-se a reação obtida no método *Speedy* (Equação 2.1).

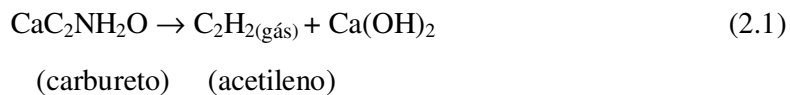


Figura 2.12 – Ensaio método *Speedy*: (a) Preparo da amostra de solo no ponto de execução do frasco de areia; (b) Aparelhagem utilizada no ensaio; (c) Detalhe do início do ensaio, com a amostra de solo e a ampola de carbureto de cálcio no aparelho.

2.3.2.3 Penetrômetro Dinâmico de Cone

A penetração de uma haste no terreno é uma técnica antiga utilizada para se obter

medidas de resistência das camadas de um terreno. Segundo Röhm¹³ (1984 *apud* LIMA, 2000), engenheiros e arquitetos valiam-se da introdução de varas de madeira ou hastes metálicas no solo já no início do século XIX com o objetivo de avaliarem qualitativamente a resistência dos terrenos, baseando-se na resistência oferecida à penetração das hastes. A evolução deste processo deu origem aos penetrômetros atuais. A realização do ensaio Penetrômetro Dinâmico de Cone é demonstrado na Figura 2.13.



Figura 2.13 – Realização do ensaio Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP).

Lima (2000) comenta que nos penetrômetros dinâmicos ou *Dynamic Cone Penetration* (DCP), a energia aplicada para se efetuar a penetração é obtida através da queda livre de uma massa padronizada sobre um elemento solidário à haste de penetração, sendo este o tipo mais simples e que apresenta melhor relação custo benefício para aplicação na avaliação da capacidade de suporte *in situ* de camadas estruturais e do subleito de pavimentos.

O DCP é um instrumento que possibilita realizar ensaios de penetração dinâmica em estruturas de pavimentos cujas camadas são de materiais levemente cimentadas, materiais granulares ou solos (RIBEIRO, 2006).

A estrutura de um penetrômetro dinâmico leve consiste em uma haste de 19,35 cm de comprimento e 16 mm de diâmetro, extremidade pontiaguda em forma de cone a 60° com

¹³ RÖHM, S. A. *Considerações sobre Penetrômetros Dinâmicos Leves Aplicados na Construção e Avaliação de Pavimentos de Baixo Custo*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 1984. p. 109.

20 mm de diâmetro e peso de 8 kg deslizando ao longo da haste a partir de uma altura constante de 57,5 cm (REZENDE, 2003). Ressalta-se que a classificação da categoria do equipamento de leve a super pesado é determinada em função do peso do martelo, como mostra a Figura 2.14.

A justificativa para utilização da ponta cônica com ângulo de abertura de 60°, segundo Kleyn¹⁴ (1975 *apud* LIMA, 2000), está no fato de que este cone com essa angulação apresenta uma maior vida de trabalho e produz uma curva DCP mais bem definida comparativamente àquela produzida pelo cone de 30°.

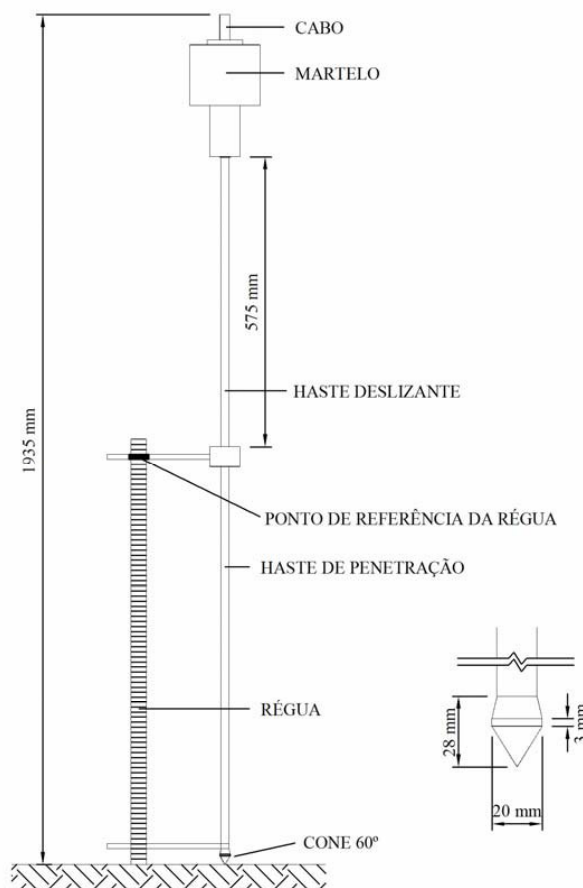


Figura 2.14 - Estrutura de um Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP) (LOPES *et al.*, 2007).

¹⁴ KLEYN, E. G. *The Use of Dynamic Cone Penetrometer*. Transvaal Road Department, Africa do Sul, Report L2/74, 1975, 50 p.

Na forma gráfica de apresentação do ensaio DCP, tem-se a curva que relaciona a profundidade com o número de golpes a partir da qual se determina o índice de penetração DN (REZENDE, 2003).

2.3.2.4 Prova de Carga Sobre Placa

O ensaio de prova de carga sobre placa (Figura 2.15) é uma importante ferramenta para a determinação de variáveis, como: deslocamento máximo total medido, correspondendo ao maior carregamento possível de ser aplicado no ensaio; obtenção das curvas que apresentam o comportamento tensão versus deslocamento; o valor do deslocamento total, obtido mediante a aplicação de uma tensão determinada avaliando-se o escopo do ensaio; o módulo de reação (K_{placa}); deslocamento correspondente à fase elástica ou de descarregamento das curvas ($r_{\text{elástico}}$) e a respectiva relação tensão/deslocamento ($k_{\text{elástico}}$), entre outros (REZENDE, 2003).



Figura 2.15 - Equipamentos utilizados no ensaio de prova de carga sobre placa.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Visando a realização desta pesquisa, que consiste na análise da utilização de resíduos de pedreira como agregado a um solo tropical fino, para construção de base e sub-base de pavimentos flexíveis, foram adotadas as seguintes etapas:

- Avaliação técnica do comportamento dos materiais estudados, por meio de ensaios laboratoriais, bem como a caracterização dos mesmos;
- Acompanhar a execução de um trecho experimental dimensionado mediante a determinação das dosagens especificadas pelos ensaios de laboratório;
- Verificar o comportamento do trecho experimental, por meio de ensaios de campo capazes de realizar o controle da compactação realizada, bem como da qualidade e resistência das camadas do pavimento executado.

A seguir estão detalhados todos os procedimentos utilizados para o cumprimento de cada uma das etapas descritas acima.

3.1 MATERIAIS

O resíduo selecionado neste estudo é o material mais fino, no que diz respeito a granulometria, gerado no processo de beneficiamento realizado nas pedreiras. A rocha comumente encontrada na região metropolitana de Goiânia é o micaxisto e o resíduo recebe a denominação pó de micaxisto. O pó de micaxisto utilizado nesta pesquisa é oriundo do Complexo Industrial da Pedreira da Companhia de Pavimentação do Município (COMPAV). A pedreira está localizada no setor Parque Ateneu, Goiânia-GO. A Figura 3.1 mostra a pedreira e a pilha de resíduo onde foram coletadas as amostras.

Nesta pedreira são produzidos cerca de 1500 m³ de agregado por mês. A escavação da mina é realizada a céu aberto por meio de explosivos compostos de nitrato. A britagem produz agregados nas seguintes granulometrias: matacão ($\varnothing \geq 76$ mm), brita 2 ($\varnothing 25$ mm), brita 1 ($\varnothing 19$ mm) e finos ($\varnothing \leq 19$ mm). Visando estabelecer um parâmetro de

comparação entre os valores obtidos com o resíduo selecionado, foi estudado também outra mistura composta por brita 1, oriunda da mesma pedreira da COMPAV de Goiânia.



Figura 3.1 – Resíduo selecionado para a pesquisa: (a) Mapa de localização da pedreira; (b) Foto da pilha de pó de micaxisto.

Toda a produção da pedreira é consumida pela própria prefeitura na confecção de massas asfálticas utilizadas nos serviços de pavimentação. O próprio pó de micaxisto é utilizado na composição dessa massa como material de enchimento. No entanto, a

quantidade é pequena. Assim, se for possível utilizá-lo também na composição de outras camadas do pavimento, como sub-base e base, o ganho ambiental será maior.

Ainda no intuito de realizar comparações entre os resultados obtidos para os materiais selecionados nesta pesquisa, surgiu a necessidade de estudar um cascalho laterítico, material este que ainda hoje é o mais tradicional e conseqüentemente o mais utilizado em obras de pavimentação. A área de empréstimo do cascalho trata-se de uma pequena jazida deste material (Figura 3.2) localizada em um sítio a 500 metros do ponto onde foi executado o trecho experimental.



Figura 3.2 – Cascalho Laterítico selecionado para pesquisa: (a) Mapa de localização da jazida; (b) Imagem do ponto de extração do cascalho.

O solo fino selecionado para o estudo representa o solo abundantemente encontrado na região. Sua utilização se faz necessária já que, com base nos resultados de Luz *et al.* (2006), tem-se que o pó de micaxisto sozinho não apresenta as características mecânicas necessárias para ser utilizado em pavimentação. Assim, a situação mais viável economicamente é utilizar misturas do resíduo com o solo encontrado no próprio local da obra. Dessa forma, as amostras de solo fino foram retiradas da área de empréstimo localizada na Central de Abastecimento do Estado de Goiás (CEASA), conforme apresentado na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Solo fino selecionado para a pesquisa: (a) Mapa de localização da área de empréstimo; (b) Foto do local de coleta.

3.2 MÉTODOS

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram definidas duas fases distintas: fase laboratorial e fase de campo. Na fase laboratorial foram realizados os ensaios necessários para caracterizar os materiais e avaliar o comportamento mecânico das amostras definidas no estudo. Na parte de campo, foi construído um trecho experimental baseado nos dados obtidos na fase laboratorial. Este trecho teve seu comportamento estrutural avaliado por meio de ensaios de campo durante a sua execução. A seguir, tem-se o detalhamento das duas fases.

3.2.1 Fase Laboratorial

3.2.1.1 Amostras

Para a realização dos estudos de laboratório foram definidas 6 (seis) amostras, quais sejam:

- Amostra 1: 100% pó de micaxisto;
- Amostra 2: 20% pó de micaxisto+ 80% solo;
- Amostra 3: 30% pó de micaxisto + 70% solo;
- Amostra 4: 100% solo;
- Amostra 5: 100% cascalho laterítico;
- Amostra 6: 30% brita 1 + 70% solo.

As porcentagens de materiais definidas para as Amostras 2 e 3 foram baseadas nos resultados preliminares apresentados por Luz *et al.* (2006). Estas dosagens foram as que apresentaram os melhores desempenhos nos ensaios de laboratório. Embora sabendo que o resíduo estudado por Luz *et al.* (2006), apresenta características granulométricas diferentes do pó de micaxisto avaliado nesta pesquisa, buscou-se com isso avaliar as semelhanças entre estes resíduos de micaxisto.

As dosagens de solo e brita da Amostra 6 foram definidas conforme ensaios realizados pelo DERMU.

3.2.1.2 Ensaios de Laboratório

Foram realizados ensaios laboratoriais para caracterizar os materiais e observar seus parâmetros quando compactados. Quanto ao risco de contaminação ambiental, entende-se que este não existe pelo fato do material ser inerte.

A Tabela 3.1 apresenta um resumo com a quantificação dos ensaios realizados com as seis amostras.

Tabela 3.1 – Quantificação dos ensaios de laboratório.

ENSAIO		QUANTIDADE	LOCAL DE REALIZAÇÃO
Granulometria		12	Laboratório Mecânica dos Solos UFG.
Massa Específica dos Sólidos		18	Laboratório Mecânica dos Solos UFG.
Limite de Liquidez		06	Laboratório Mecânica dos Solos UFG.
Limite de Plasticidade		06	Laboratório Mecânica dos Solos UFG.
Compactação	E. Intermediária	06	Laboratório Mecânica dos Solos UFG.
	E. Modificada	06	
Expansão e CBR	E. Intermediária	06	Laboratório Mecânica dos Solos UFG.
	E. Modificada	06	
TOTAL		66	

A seguir tem-se a descrição dos procedimentos adotados para cada ensaio.

a) Análise Granulométrica

Os ensaios de análise granulométrica por peneiramento e sedimentação foram realizados conforme procedimentos padronizados na NBR 7181 (ABNT, 1984d), realizada por uma combinação de sedimentação e peneiramento, visando obter a curva granulométrica dos materiais e de suas misturas. Isso é feito por meio da correlação entre a porcentagem que passa pelas peneiras e o diâmetro dos grãos, para a fase de peneiramento, e tempo de queda das partículas e os seus respectivos diâmetros, na fase de sedimentação (Figura 4.4).

Foram executados um ensaio para cada uma das amostras, ou seja: Amostra 1, Amostra 2, Amostra 3, Amostra 4, Amostra 5 e Amostra 6.

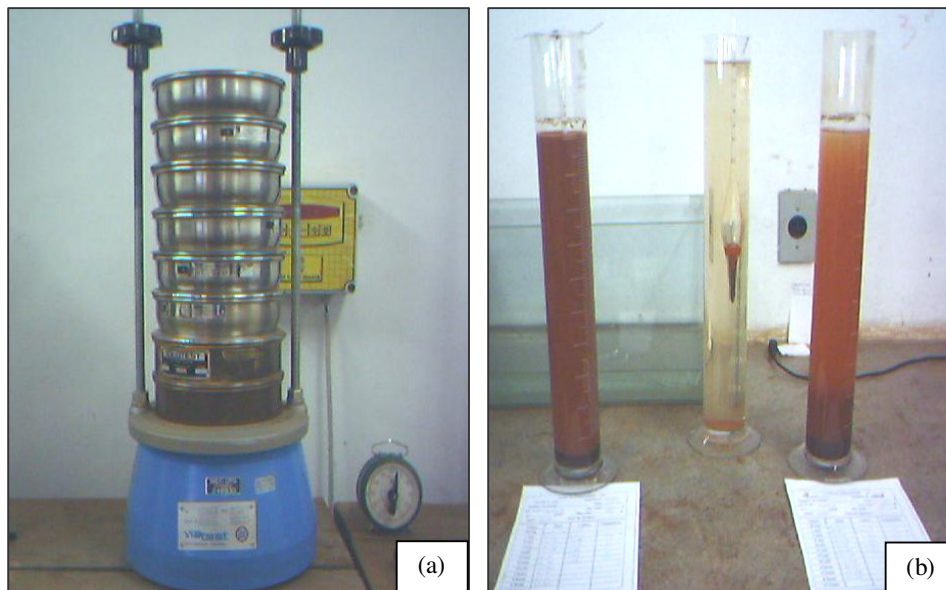


Figura 3.4 – Análise granulométrica: (a) Ensaio de peneiramento; (b) Ensaio de sedimentação.

A norma do ensaio especifica o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio na preparação das amostras para o ensaio de sedimentação. No entanto, pesquisas realizadas com solos tropicais e resíduos sólidos têm mostrado diferenças de resultados nos ensaios executados com e sem defloculante (REZENDE, 2003; RESPLANDES, 2007; MESQUITA, 2007). Por este motivo, neste trabalho realizou-se também ensaios sem defloculante.

b) Massa Específica dos Sólidos

Para este ensaio, foi utilizada a Norma NBR 6508 (ABNT, 1984b) de modo a determinar a massa específica dos grãos das amostras selecionadas, que passam na peneira de 4,8 mm, por meio de picnômetro ou balão volumétrico.

Foram realizados três ensaios para cada uma das amostras. A Figura 3.5, ilustra parte da realização desse ensaio.

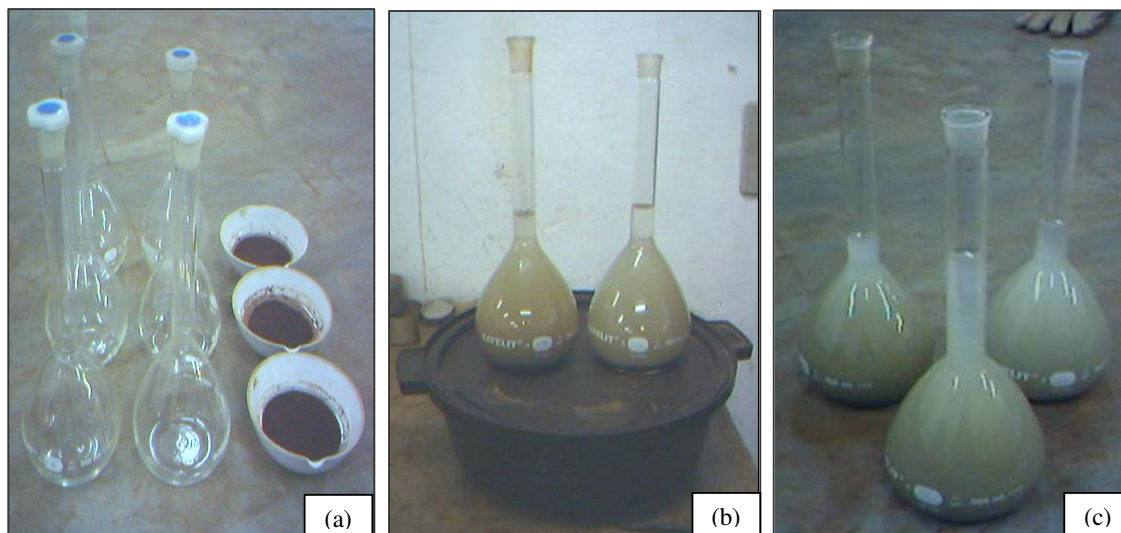


Figura 3.5 – Massa Específica dos Sólidos: (a) Amostras e vidrarias para realização do ensaio; (b) Placa aquecedora com amostras entrando em ebulição; (c) Balões volumétricos com as amostras já resfriadas a temperatura ambiente.

c) Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade

Na determinação do Limite de Liquidez foi empregada a instrução normativa NBR 6459 (ABNT, 1984c), visando à obtenção desse parâmetro por meio da construção de um gráfico com a correlação entre o número de golpes aplicado ao aparelho de Casagrande e os teores de umidade correspondentes. Ajustando uma reta pelos pontos assim obtidos, localizou-se na reta o teor de umidade correspondente a 25 golpes, sendo este o limite de liquidez da amostra.

Para os ensaios de determinação do Limite de Plasticidade tomou-se como parâmetro a NBR 7180 (ABNT, 1984d), de modo a obter o referido limite, que é o valor médio de umidade dos corpos de prova moldados, tendo como guia um molde cilíndrico de 3,0 mm de diâmetro. Essa norma também estabelece o cálculo do índice de plasticidade do solo, que é a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade.

Na pesquisa foi executado um ensaio de cada um dos limites para todas as amostras. As Figuras 3.6 e 3.7 mostram detalhes da execução de cada um dos ensaios.

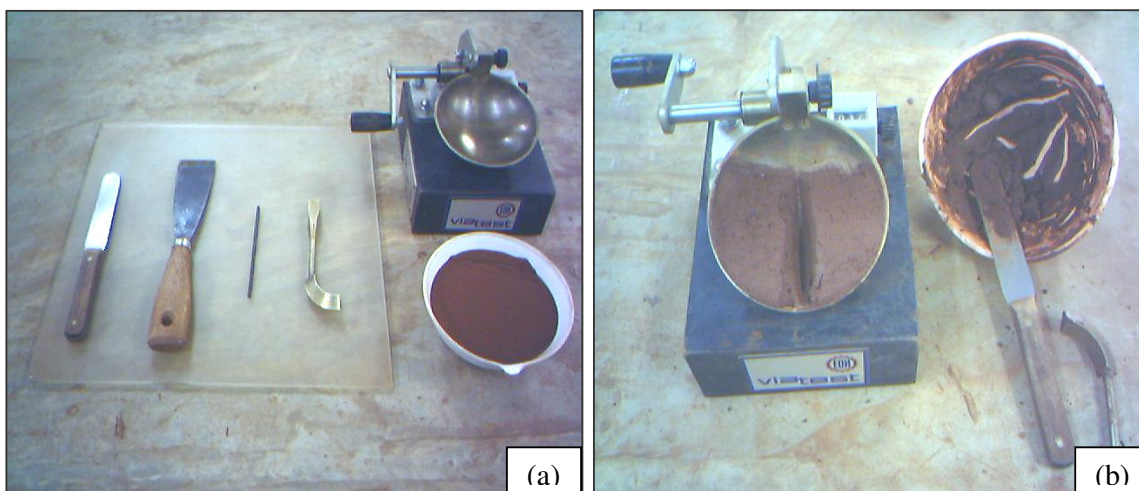


Figura 3.6 – Limite de Liquidez: (a) Aparelho de Casagrande, amostra de solo e demais instrumentos para execução do ensaio; (b) Amostra de solo umedecida, homogeneizada posta no aparelho de Casagrande e cortada com cizel.

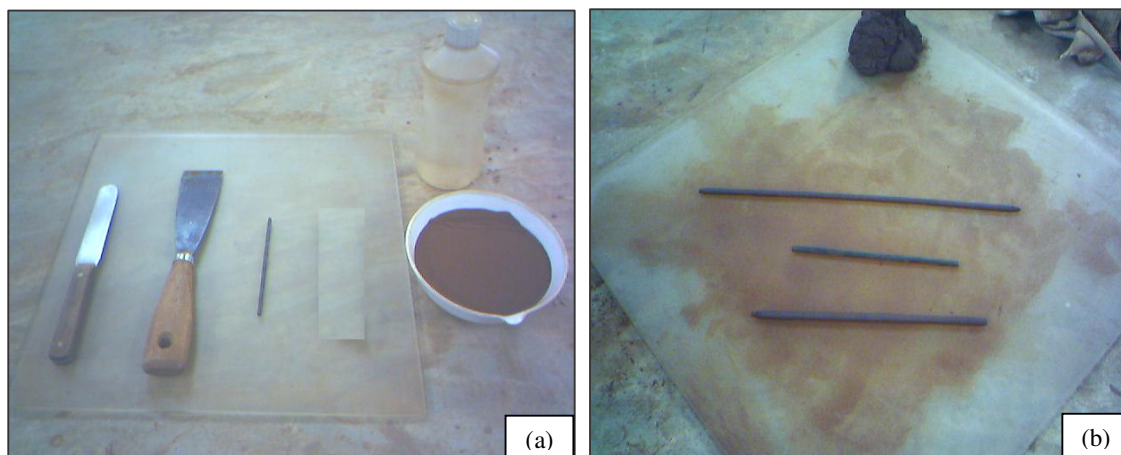


Figura 3.7 – Limite de Plasticidade: (a) Instrumentos utilizados e amostra a ser ensaiada; (b) Execução do ensaio.

d) Classificação das Amostras

Com os dados obtidos nos ensaios de caracterização (granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade) as amostras estudadas foram classificadas de acordo com os dois métodos mais utilizados para solos: a classificação do *Transportation Research Board* (TRB) e a classificação do *United Soil Classification System* (USCS).

e) Compactação

Os ensaios de compactação (Figura 3.8) foram realizados de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 1984e), sem reuso de material, com o objetivo de obter a correlação entre o teor de umidade o peso específico aparente seco máximo das amostras estudadas, quando compactado com certa energia. Esse ensaio é utilizado como ferramenta de controle de qualidade de compactação em aterros e pavimentos, determinando parâmetros de compactação de materiais na fase de projeto.

Após consulta de campo e revisão bibliográfica, optou-se por realizar os ensaios de compactação nas energias Proctor intermediária e modificada, devido à sua maior utilização em função dos equipamentos atuais adotados em campo e obtenção de melhores resultados. Os ensaios de compactação foram realizados com todas as amostras nas duas energias especificadas.

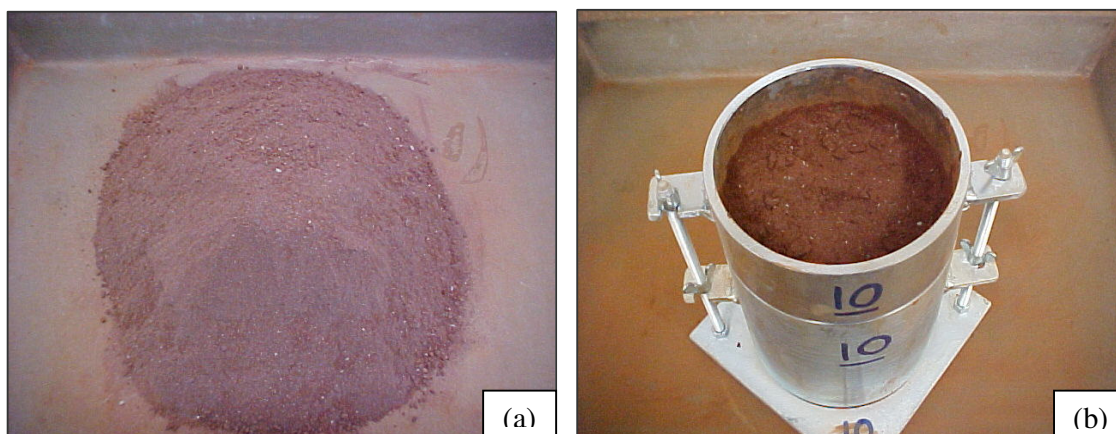


Figura 3.8 – Ensaio de Compactação: (a) Amostra homogeneizada; (b) Corpo-de-prova moldado com auxílio de um cilindro e soquete.

f) Expansão e Índice de Suporte Califórnia (CBR)

Os ensaios de Índice de Suporte Califórnia foram realizados conforme a norma NBR 9895 (ABNT, 1987), com o objetivo de mensurar a relação entre a pressão exercida por um pistão de diâmetro padronizado, necessário para penetrar o material compactado até um

determinado valor e a pressão necessária para o mesmo pistão penetrar o mesmo valor em uma brita padronizada compactada.

Para avaliação da expansão, os materiais depois de compactados foram submetidos a imersão em água por 4 dias, como mostra a Figura 3.9. Este ensaio foi realizado com as seis amostras compactadas nas duas energias já especificadas.

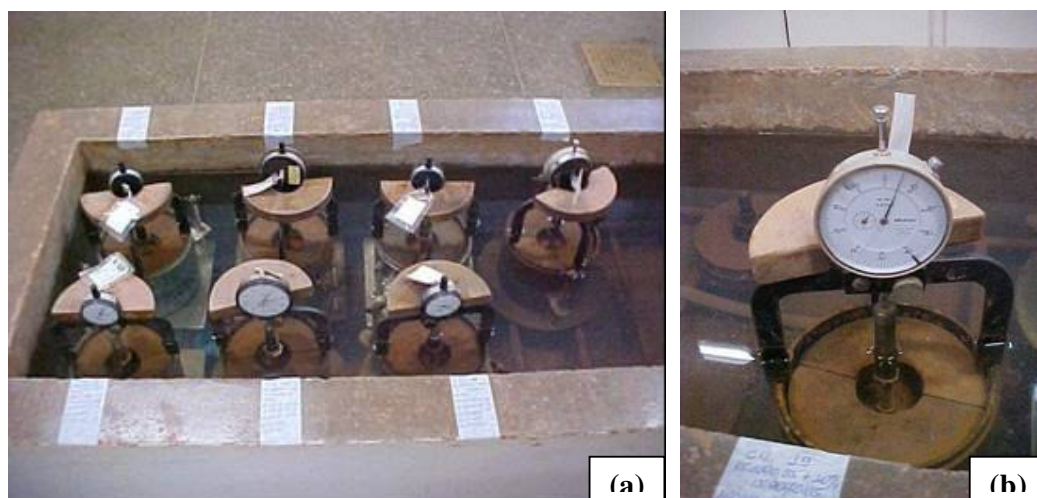


Figura 3.9 – Ensaio CBR e Expansão: corpos de prova no tanque de imersão (a); extensômetro utilizado na leitura de expansão (b).

3.2.2 Fase de Campo

3.2.2.1 Trecho experimental

A pesquisa foi conduzida de maneira a possibilitar o estudo em campo, da execução de um pavimento alternativo, tendo como constituintes da sua base e sub-base o pó de micaxisto. Para avaliar o comportamento do trecho experimental executado e comparar seu desempenho com soluções tradicionais dois sub-trechos foram executados tendo como materiais constituintes: i) a mistura solo-brita e ii) o cascalho laterítico. Para tanto foram efetuados ensaios de campo visando garantir o controle de execução e realizar o monitoramento do mesmo.

A pista foi construída entre os meses de julho e agosto de 2007. O trecho pavimentado está localizado na Rua Amélia Rosa, coordenadas $16^{\circ} 37' 33,58''$ S e $49^{\circ} 11'$

50,75" W, bairro Sítio de Recreio Ipê, situado n região nordeste de Goiânia, possuindo uma extensão de 300 metros (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Trecho experimental: (a) Mapa com a localização; (b) Foto do local antes da pavimentação.

Com os resultados obtidos em laboratório, foram definidos os materiais e as condições de aplicação dos mesmos na pista. Com estes dados e conhecendo-se o tráfego atual da via (N) igual a 5×10^6 , foi realizado o dimensionamento do pavimento utilizando-se os métodos do extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atualmente denominado de Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT). Os métodos são: método do DNER e método da Resiliência. A seção definida no dimensionamento está apresentada na Figura 3.11. A construção desse trecho experimental foi realizada pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Município de Goiânia (DERMU). O laboratório do DERMU também forneceu os resultados do ensaio de CBR realizados com o material do subleito, sendo que o valor adotado para o projeto foi de 9,0%.

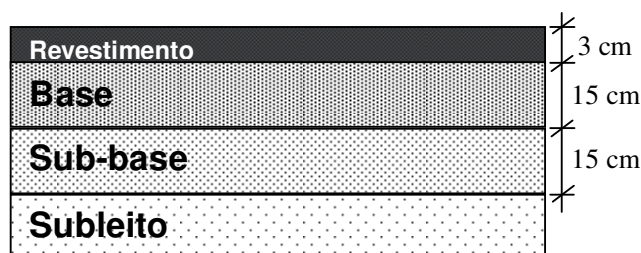


Figura 3.11 – Seção transversal do trecho experimental.

Para a obtenção dos volumes de material a ser empregado na execução dos trechos estudados, foram realizados os cálculos descritos a seguir.

Dados do Trecho Experimental:

- Extensão total: 300 m
- 3 subtrechos de 100 m
 - 1º sub-trecho: solo + pó de micaxisto;
 - 2º sub-trecho: solo + brita 1;
 - 3º sub-trecho: cascalho laterítico.
- Revestimento: 3 cm de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ);
- Subleito considerado com CBR médio de 9% obtido em laboratório, para o dimensionamento, segundo o método do DNIT;
- Espessura de base: 15 cm;

- Espessura da sub-base: 15 cm;
- Empolamento do material: 30%;
- Espessura total do pavimento (Hn) = 33cm;
- Largura estimada da pista = 7m.

1º Sub-trecho: solo + pó de micaxisto:

- Características do 1º sub-trecho:

*Base: 20% de pó de micaxisto, 80% de solo local, compactados na energia modificada, com CBR obtido em laboratório de 52%, na $\gamma_{dm\acute{a}x} = 19,0 \text{ KN/m}^3$, $w_{ot} = 14,5\%$;

*Sub-base: 30% de pó de micaxisto, 70% de solo local, compactados na energia modificada, com CBR obtido em laboratório de 40%, na $\gamma_{dm\acute{a}x} = 19,2 \text{ KN/m}^3$, $w_{ot} = 14,0\%$.

- **Cálculo da massa de pó de micaxisto e solo para a camada de base:**

$$1,92 \text{ g/cm}^3 = \frac{M \text{ (solo + resíduo)}}{700 \times 15 \times 10.000}$$

$$M \text{ (solo + resíduo)} = 201,6 \text{ t}$$

$$M \text{ (solo + resíduo)} \times \text{empolamento} = 206,1 \times 1,30 = 268,0 \text{ t}$$

$$M \text{ solo} = 268,0 \times 0,8 = 214,4 \text{ t}$$

$$M \text{ pó de micaxisto} = 53,6 \text{ t}$$

- **Cálculo da massa de resíduo e solo para a camada de sub-base:**

$$1,90 \text{ g/cm}^3 = \frac{M \text{ (solo + resíduo)}}{700 \times 15 \times 10.000}$$

$$M \text{ (solo + resíduo)} = 199,5 \text{ t}$$

$$M \text{ (solo + resíduo)} \times \text{empolamento} = 199,5 \times 1,30 = 259,3 \text{ t}$$

$$M \text{ solo} = 259,3 \times 0,7 = 181,5 \text{ t}$$

$$M \text{ resíduo} = 77,8 \text{ t}$$

A Figura 3.12 mostra todo trecho experimental em planta. Os trechos experimentais executados com os materiais alternativos (solo-filler e solo-pó de micaxisto) ficaram com a extensão de 100 metros cada por motivos operacionais do órgão executor.

Ressalta-se ainda que o trecho construído com a mistura solo-*filler* vem sendo estudado por Luz (2006), cuja tese de doutorado está em andamento.

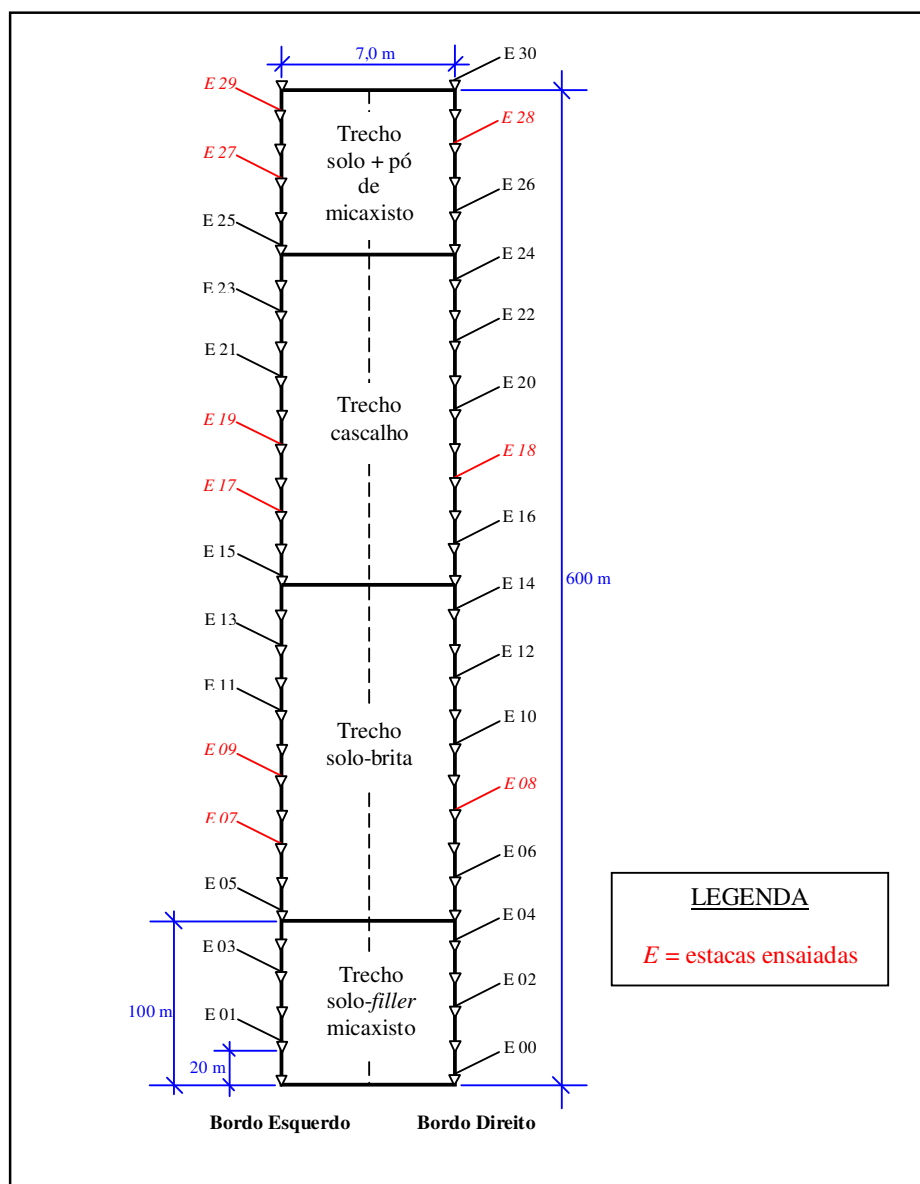


Figura 3.12 – Trecho experimental em planta, localizando os sub-trechos e as estacas que foram ensaiadas em cada um deles.

Assim, para a execução do 1º sub-trecho foram utilizados 395,9 toneladas de solo local e 131,4 toneladas de resíduo. Mediante a determinação do volume dos materiais necessários para a construção dos trechos experimentais, partiu-se para a execução dos mesmos. As Figuras 3.13 a 3.20 ilustram a construção do pavimento, a partir a aquisição da

matéria-prima até a colocação do revestimento betuminoso. Para execução deste sub-trecho foram adotadas as seguintes etapas:

- 1ª etapa: aquisição do material (Figura 3.13);
- 2ª etapa: regularização e compactação do subleito na energia Proctor normal (Figura 3.14);
- 3ª etapa: execução da sub-base (Figuras 3.15 à 3.17), compactada na energia Proctor modificada, utilizando a mistura de 30% de pó de micaxisto e 70% de solo, em peso, como materiais constituintes. Em seguida a mistura foi homogeneizada com grade de disco, logo após foi umidecida com caminhão pipa e novamente homogeneizada com a grade. Após esse preparo a mistura foi compactada com um rolo pé-de-carneiro vibratório;
- 4ª etapa: execução da base, compactada na energia Proctor modificada, utilizando a mistura de 20% de pó de micaxisto e 80% de solo, em peso, como matéria prima. A compactação desse material ocorreu utilizando a mesma metodologia empregada para a sub-base;
- 5ª etapa: trincamento e tratamento da base (Figura 3.18). Após a execução da base a mesma ficou exposta por um período de 48 horas visando o trincamento da mesma. Esse trincamento ocorre devido a perda de umidade da camada de solo, sendo também uma característica de solos argilosos. Depois do trincamento da base, foi realizado um tratamento dessa superfície por meio de um umedecimento seguido de raspagem. Esse tratamento é necessário para o preenchimento das trincas. Todo esse procedimento visa um ganho de resistência da camada, conforme indica estudo de Nogami e Villibor (1995);
- 6ª etapa: imprimação (Figura 3.19) da base com material betuminoso tipo CM-30, visando a impermeabilização e proteção das camadas do pavimento. A imprimação também é empregada para conservação da umidade das camadas compactadas, de forma a evitar novos trincamentos;
- 7ª etapa: execução do revestimento to trecho com uma camada de 3 cm de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), compactado com rolo de aço liso (Figura.20).



Figura 3.13 – Aquisição de material: (a) Vista da limpeza da área de empréstimo de solo; (b) Coleta do resíduo estudado na pedreira do DERMU-COMPAV.



Figura 3.14 – Regularização do subleito do trecho experimental.



Figura 3.15 – Execução da Sub-base e Base: (a) Recepção e distribuição do solo ao longo do trecho; (b) Repartição das dosagens de 20% e 30%, em peso, do resíduo determinado em cálculo.

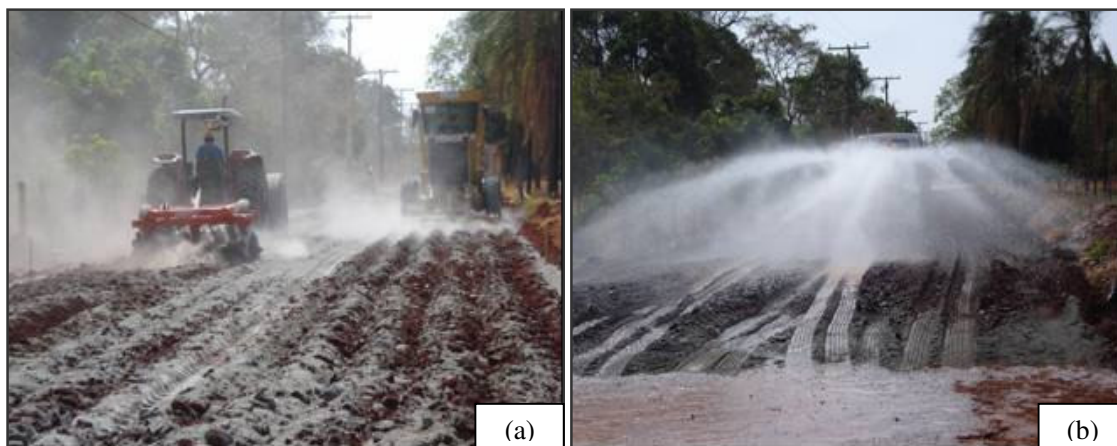


Figura 3.16 – Execução da Sub-base e Base: (a) Incorporação e homogeneização do resíduo estudado ao solo; (b) Adição de água para determinação da umidade ótima de trabalho.



Figura 3.17 - Execução da Sub-base e Base: (a) Compactação da camada com o auxílio de um rolo pé-de-carneiro vibrador; (b) Aspecto da camada após a compactação.



Figura 3.18 – Aspecto da base compactada após o trincamento.



Figura 3.19 – Imprimação: (a) Aplicação de material betuminoso (CM-30) para impermeabilização do trecho; (b) Vista da pista após término da imprimação.



Figura 3.20 – Revestimento: (a) Aplicação de uma camada de três centímetros de revestimento do tipo CBUQ; (b) Compactação da massa asfáltica com rolo de aço liso.



Figura 3. 21 – Vista do trecho após término da sua construção.

2º Sub-trecho: solo + brita 1:

- Características do 2º sub-trecho:

*Base e Sub-base: 30% de brita 1, 70% de solo local, compactado na energia modificada, com CBR obtido em laboratório de 56,2%, na $\gamma_{dm\acute{a}x} = 19,1 \text{ KN/m}^3$, $w_{ot} = 16,7\%$;

- **Cálculo da massa de brita e solo para as camadas de base e sub-base:**

$$1,91 \text{ g/cm}^3 = \frac{M (\text{solo} + \text{brita } 1)}{700 \times 30 \times 10.000}$$

$$M (\text{solo} + \text{brita } 1) = 401,1 \text{ t}$$

$$M (\text{solo} + \text{brita } 1) \times \text{empolamento} = 401,1 \times 1,25 = 501,4 \text{ t}$$

$$**M solo = 501,4 \times 0,7 = 351 t**$$

$$**M brita 1 = 50,1 t**$$

3º Sub-trecho: cascalho laterítico :

- Características do 3º trecho:

*Base e Sub-base: 100% de cascalho, sendo a energia de compactação intermediária, com CBR previsto em laboratório de 62,3%, na $\gamma_{dm\acute{a}x} = 19,6 \text{ KN/m}^3$, $w_{ot} = 10,5\%$;

- **Cálculo da massa de cascalho para as camadas de base e sub-base:**

$$1,96 \text{ g/cm}^3 = \frac{M (\text{cascalho})}{700 \times 30 \times 10.000}$$

$$M (\text{cascalho}) = 411,6 \text{ t}$$

$$M (\text{cascalho}) \times \text{empolamento} = 411,6 \times 1,30 = 535,1 \text{ t}$$

$$**M cascalho = 535,1 t**$$

A execução dos sub-trechos de solo-brita e de cascalho foi realizada seguindo os mesmos procedimentos adotados para o sub-trecho solo-pó de micaxisto, como demonstrado nas Figuras 5.13 à 5.20. As Figuras 5.21 e 5.22 mostram o aspecto das camadas de base dos respectivos pavimentos depois de compactadas.



Figura 3.22 – Aspecto da base de solo-brita compactada.



Figura 3.23 – Aspecto da base de cascalho compactada.

3.2.2.2 Ensaios de Campo

Foram realizados ensaios de campo para controlar a qualidade das camadas durante a execução do trecho experimental e avaliar seu desempenho estrutural inicial. A Tabela 3.2 apresenta um resumo com a quantificação dos ensaios realizados.

Tabela 3.2 – Quantificação dos ensaios de campo.

ENSAIO	QUANTIDADE
Frasco de Areia e <i>Spedy</i>	18
Penetrômetro Dinâmico de Cone	18
Prova de Carga Sobre Placa	36
TOTAL	72

a) Frasco de Areia e *Speddy*

Para realização deste ensaio foi utilizada a metodologia descrita na norma NBR 7185 (ABNT,1986). Sua execução se deu em todas as camadas dos sub-trecho, durante a construção dos mesmos, visando o controle de compactação do pavimento. Os ensaios foram realizados em pelo menos 3 (três) estacas de cada camada: no bordo direito, eixo e bordo esquerdo do pavimento. A Figura 3.24 ilustra a realização do ensaio utilizando o frasco de areia.



Figura 3.24 - Ensaio da densidade pelo método do frasco de areia: abertura do orifício na camada (a); preenchimento com areia do frasco (b) e pesagem do frasco (c).

c) Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP)

Para realização deste ensaio foi utilizada a metodologia descrita por Rezende (2003). A Figura 3.25 traz um detalhe do equipamento utilizado no ensaio.



Figura 3.25 - Detalhe do Penetrômetro Dinâmico de Cone .

O equipamento utilizado é formado por uma haste de 19,35 cm de comprimento e 16 mm de diâmetro, extremidade pontiaguda em forma de cone a 60° com 20 mm de diâmetro e peso de 8 kg deslizando ao longo da haste a partir de uma altura constante de 57,5 cm.

Após a escolha dos pontos, foi iniciada a investigação com a aplicação de golpes utilizando o equipamento especificado no parágrafo anterior. A obtenção do índice de penetração (DN) deu-se por meio da correlação entre penetração da haste e o número de golpes aplicados. Também foi possível com essa relação, obter os croquis estratigráficos do pavimento, mediante a sondagem realizada;

Na comparação dos valores obtidos para DN, averiguaram-se os respectivos valores para as umidades encontradas nas sondagens realizadas, diferenciando os valores de umidades encontrados conforme as camadas alcançadas. O valor do CBR de campo também foi obtido nesse ensaio por meio de correlação com os valores de DN.

O ensaio de DCP foi realizado em duas etapas, sendo executado em cada sub-trecho, nos bordo direito, eixo e bordo esquerdo:

- 1ª etapa – logo após a regularização do subleito;
- 2ª etapa – antes da execução do revestimento.

Foram realizados três ensaios no subleito e três na camada de base de cada um dos sub-trechos, totalizando assim 18 ensaios.

c) Ensaio Prova de Carga Sobre Placa

Na realização deste ensaio foi utilizada a metodologia descrita por Rezende (2003). Este ensaio foi realizado em três estacas de cada sub-trecho e sobre todas as camadas do pavimento (subleito, sub-base, base e revestimento). A Figura 3.26 traz um detalhe do equipamento utilizado no ensaio.



Figura 3.26 – Disposição dos equipamentos para ensaio de Prova de Carga Sobre a Placa.

O equipamento necessário para realização desse ensaio é composto por uma placa metálica com 25 cm de diâmetro e 2,54 cm de espessura, um caminhão carregado com 8,2 t como sistema de reação, um macaco hidráulico, no mínimo três deflectômetros com precisão de 0,01 mm instalados sobre a placa e uma viga metálica para fixação dos deflectômetros.

O ensaio foi iniciado com a montagem do macaco hidráulico sobre a placa, precedido pelo posicionamento do caminhão sobre o conjunto citado anteriormente. Em

seguida foram posicionados os extensômetros fixados na placa de maneira diametralmente opostos. Após a montagem do equipamento, foi dado início a fase operacional do experimento aplicando estágios de carregamento (0, 5, 10, 20, 30, 40 e 50 KN) a cada 5 minutos. Após aplicação de todos os estágios de carregamento, foi realizado o descarregamento (40, 25, 15, 5 e 0 KN) também em estágios com tempo entre eles de 5 minutos cada. Mediante as leituras efetuadas, foram obtidas a curva tensão versus deslocamento, assim como o módulo de reação para o ensaio em placa (k_{placa}).

3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a avaliação dos dados obtidos em cada ensaio realizado tanto em laboratório como em campo, os parâmetros de cada material estudado foram comparados, visando verificar a viabilidade mecânica da utilização do resíduo (pó de micaxisto) e seu desempenho em relação aos materiais convencionais (cascalho e solo-brita).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises dos dados obtidos nos ensaios de laboratório e na fase de campo, durante a execução do trecho experimental executado no município de Goiânia-GO, visando avaliar a viabilidade técnica da utilização do pó de micaxisto dosado ao solo em pavimentos flexíveis.

4.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

4.2.1 Caracterização das Amostras

4.2.1.1 Análise Granulométrica

Os resultados obtidos nos ensaios de granulometria das seis amostras (100% resíduo, 20% resíduo + 80% solo, 30% resíduo + 70% solo, 100% solo, 100% cascalho laterítico e 30% brita 1 + 70% solo) estudadas nesta pesquisa são apresentados na Tabela 4.1 a seguir. Nas Figuras 4.1 a 4.6 são apresentadas as curvas granulométricas dos ensaios realizados com e sem a utilização de defloculante (hexametáfosfato de sódio).

Tabela 4.1 – Frações granulométricas dos materiais estudados

Amostras		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
Com defloculante	Pedregulho(%)	34,99	7,91	14,06	2,31	68,24	32,29
	Areia (%)	58,01	54,09	57,94	51,69	21,76	39,21
	Silte (%)	6,00	18,00	18,00	21,00	5,00	13,5
	Argila (%)	1,00	20,00	10,00	25,00	5,00	15,00
Sem defloculante	Pedregulho(%)	34,95	7,72	14,04	2,32	68,33	32,19
	Areia (%)	61,05	76,28	70,96	78,68	27,17	56,31
	Silte (%)	3,00	14,00	13,00	16,00	3,50	9,00
	Argila (%)	1,00	2,00	2,00	3,00	1,00	2,50

Avaliando as frações granulométricas das amostras estudadas, percebe-se que o pó de micaxisto (Amostra 1) enquadra-se na classe das areias pedregulhosas, contendo mais de 95 % de suas partículas retidas na peneira nº 200. Comparando os valores dos ensaios realizados com e sem defloculante, pode-se constatar que não houve alteração significativa entre os resultados, demonstrando, com isso, que não há indícios de agregação entre as partículas desse material. Esse fato torna-se mais visível nas curvas granulométricas do ensaio dessa amostra, representadas na Figura 4.1, podendo ser observada a coincidência entre as curvas traçadas.

Para o solo estudado (Amostra 4) pode-se observar que o uso do defloculante refletiu na redução da porcentagem de areia e em um incremento nos teores de silte e argila. Esse comportamento pode ser explicado pela ação do defloculante na quebra das ligações entre partículas menores que formam torrões de diâmetros correspondentes à fração areia, ocorrendo a obtenção de um material mais fino quando do uso do defloculante. Este comportamento é característico de solos tropicais, conforme observado por Rezende (2003). Avaliando a distribuição granulométrica desse material, é possível afirmar que o mesmo enquadra-se na faixa de uma areia argilo-siltosa.

Comparando os valores obtidos para o solo (Amostra 4) com resultados das misturas estudadas (Amostras 2 e 3), percebe-se que a Amostra 2 apresenta comportamento similar ao do solo puro, também sendo caracterizada como uma areia argilo-siltosa. Para a Amostra 3, já é possível observar uma mudança significativa para as porcentagens de areia e silte, correspondendo, dessa forma, a uma areia silto-argilosa.

O cascalho (Amostra 5) estudado foi identificado como um pedregulho arenoso com baixo teor de finos. Não foi observada nenhuma alteração significativa entre os valores obtidos com e sem o uso do defloculante para esse material. Analisando os mesmos parâmetros para a mistura solo-brita (Amostra 6), é possível observar uma queda na porcentagem de areia e aumento no silte e argila quando do uso do defloculante no ensaio. Os valores obtidos para a faixa de pedregulho não demonstrou alteração significativa, sendo a mistura definida como uma areia pedregulhosa argilosa.

A não coincidência entre as curvas granulométrica geradas nos ensaios foi um fator observado para as amostras que apresentam o solo tropical fino em sua composição, sendo explicado devido a quebra das concreções presentes neste tipo de solo com uso do

defloculante. Esse comportamento demonstra a capacidade aglomerativa desses materiais onde ocorreu esse fato (Amostras 2 a 6), como mostram as Figuras 4.2 a 4.6. A confirmação dessa afirmação é dada por Luz *et al.* (2006) que realizou ensaios da Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) nesse mesmo solo e o classificou como laterítico argiloso (LG').

A curva de distribuição granulométrica de um material é freqüentemente representada por dois parâmetros, sendo eles o diâmetro efetivo (D_e ou D_{10}) e o coeficiente de não uniformidade (C_u). O diâmetro efetivo é o diâmetro tal que 10% do solo em massa têm diâmetros menores que ele. O coeficiente de não uniformidade é a relação entre os diâmetros que correspondem a 60% passantes na curva granulométrica e o diâmetro efetivo, devendo ser maior que 10. Avaliando esses parâmetros é possível observar na Figura 6.1, que a Amostra 1 apresenta uma boa distribuição granulométrica, tendo um C_u de 17,0 (com defloculante) e 17,2 (sem defloculante).

Para a Amostra 2 foram obtidos valores de C_u de 0,0 e 2,5 respectivamente, mostrando que a mistura apresenta distribuição granulométrica descontínua, ou seja, mal graduada. O mesmo comportamento foi observado nas Amostras 4 e 6, com C_u de 0,0 e 3,0 e C_u 0,0 e 13, respectivamente. Comportamento distinto foi percebido para a Amostra 3, com C_u de 42,8 e 7,5. A obtenção desses valores pode ser atribuída a uma dosagem maior de resíduo ao solo.

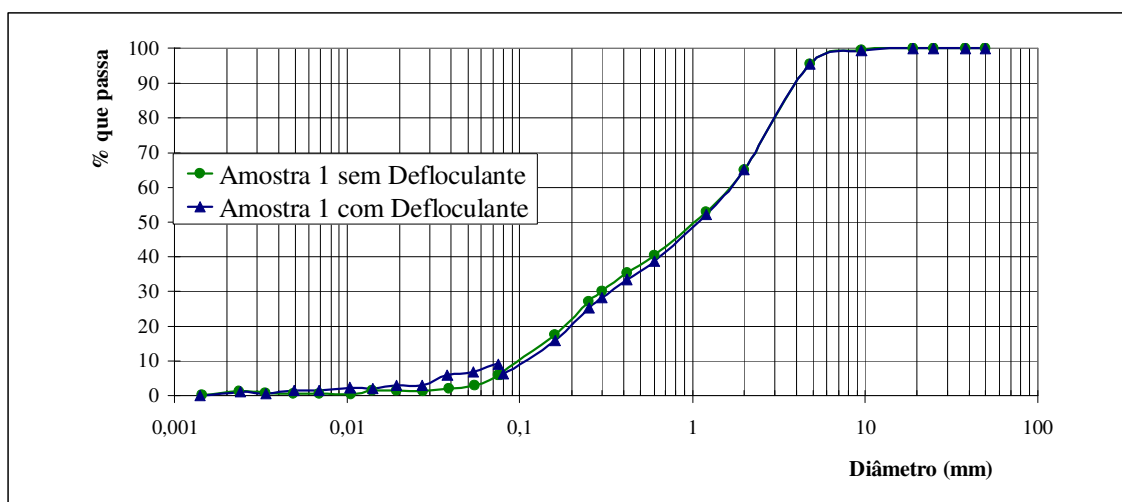


Figura 4.1 - Curva granulométrica da Amostra 1 (100% pó de micaxisto) com e sem defloculante.

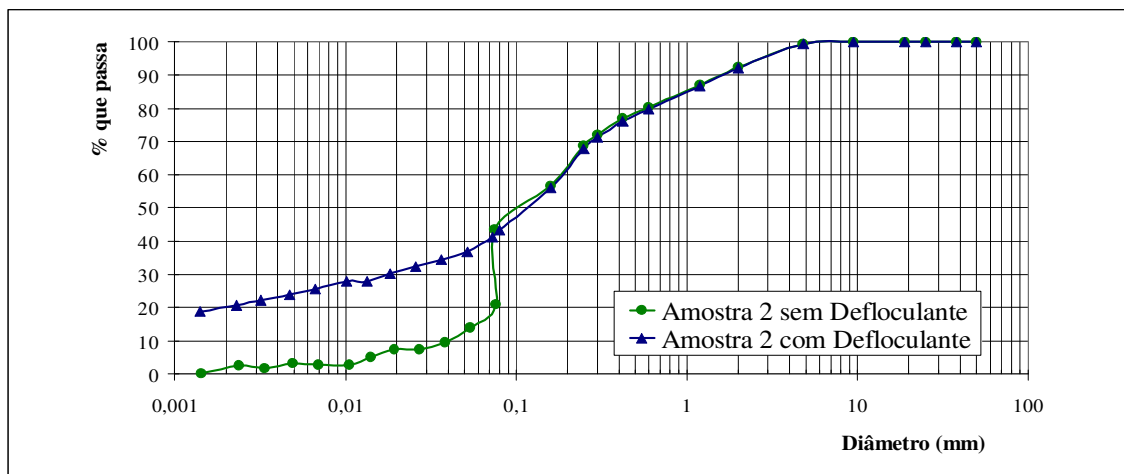


Figura 4.2 - Curva granulométrica da Amostra 2 (20% solo + 80% pó de micaxisto) com e sem defloculante.

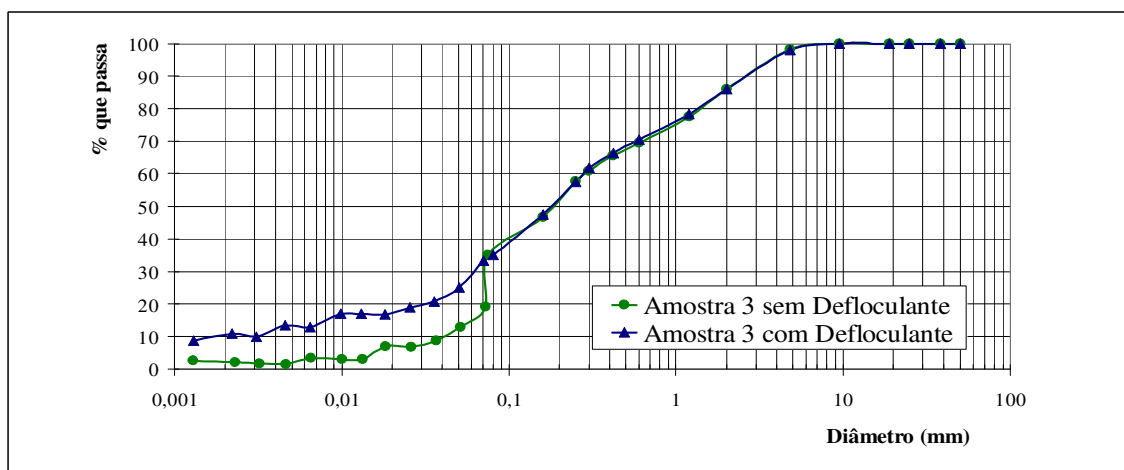


Figura 4.3 - Curva granulométrica da Amostra 3 (30% solo + 70% pó de micaxisto) com e sem defloculante.

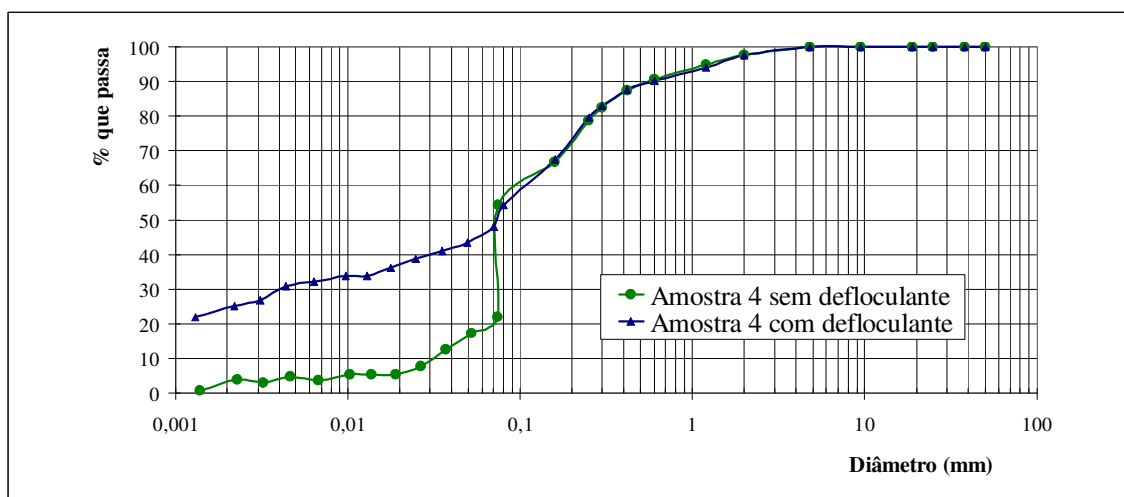


Figura 4.4 - Curva granulométrica da Amostra 4 (100% solo) com e sem defloculante.

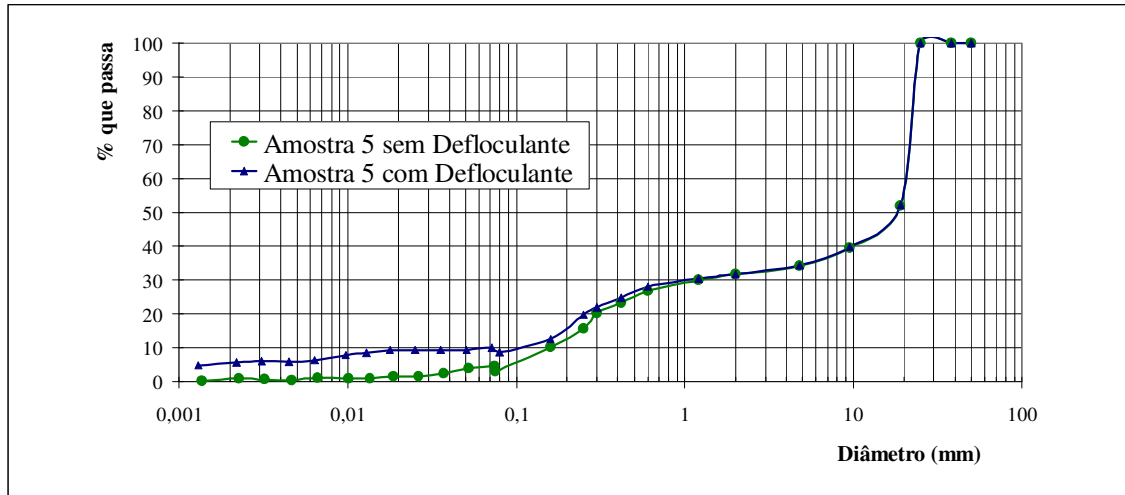


Figura 4.5 - Curva granulométrica da Amostra 5 com e sem defloculante.

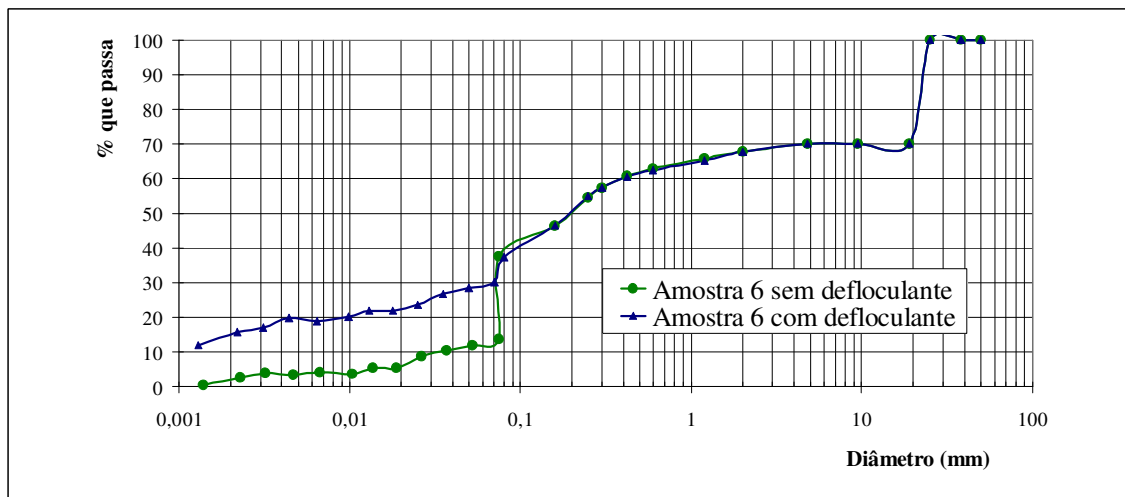


Figura 4.6 - Curva granulométrica da Amostra 6 com e sem defloculante.

Nas Figuras 4.7 e 4.8 é possível observar o comportamento das curvas granulométricas separadamente, com e sem defloculante para todas as amostras avaliadas. Pode-se observar a faixa de variação granulométrica das amostras estudadas, desde a mais granular (Amostra 5 - cascalho) até a menos granular (Amostra 4 - solo). É possível observar ainda nos gráficos, a transição da variação granulométrica das misturas avaliadas, devido o incremento de pó de micaxisto ao solo.

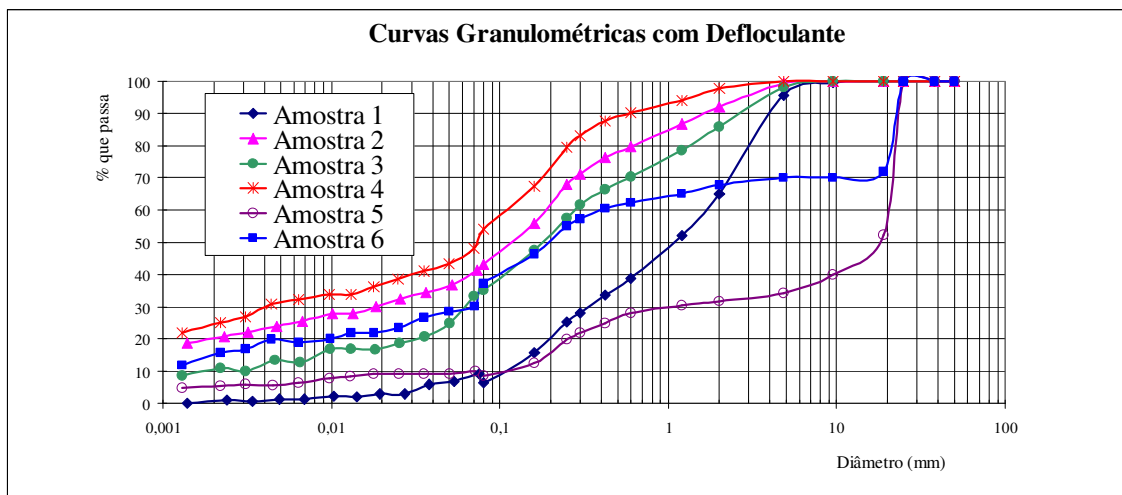


Figura 4.7 - Curvas granulométricas das amostras estudadas, com uso de defloculante.

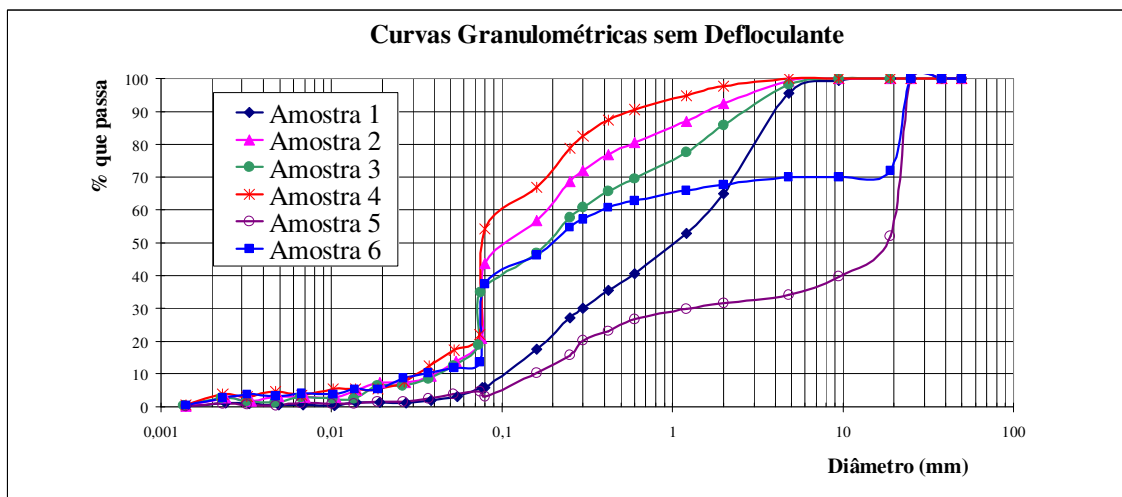


Figura 4.8 - Curvas granulométricas das amostras estudadas, sem uso de defloculante.

4.2.1.2 Massa Específica dos Sólidos

Segundo Caputo (2000), os valores da massa específica dos grãos do solo dependem do constituinte mineralógico das partículas, sendo que para a maioria dos solos o seu valor varia de 2,65 a 2,85, diminuindo para os solos que contém elevado teor de matéria orgânica e aumentando para solos ricos em óxido de ferro. Nesta pesquisa, observam-se valores superiores a 2,80 para as Amostras 4 (solo) e 5 (cascalho), o que pode indicar a presença de óxido de ferro nesses materiais e caracterizá-los como laterizados.

Foram obtidos resultados da massa específica dos grãos dos materiais estudados (solo, pó de micaxisto, misturas, cascalho e solo-brita), como demonstram os valores expostos na Tabela 4.2. Avaliando o comportamento do solo (Amostra 4) e das misturas representadas pelas Amostras 2 e 3, verificou-se um decréscimo nos valores da massa específica das misturas em relação ao solo com o aumento da incorporação do pó de micaxisto.

Percebe-se, também, uma pequena diferença entre os valores das Amostras 4 (solo) e 6 (solo-brita). Pelo fato do ensaio ter sido realizado com amostras compostas por material passante na peneira de 4,8 mm, esperava-se valores iguais em ambos os ensaios. É provável que a fonte dessa discrepância seja explicada pela incorporação de pó de micaxisto oriundo da brita 1 utilizada na Amostra 6, visto que a mesma não foi lavada.

Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de massa específica dos grãos

Propriedade	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
ρ (g/cm ³)	2,741	2,798	2,776	2,825	2,968	2,817

Obs: ρ = massa específica dos grãos.

4.2.1.3 Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade

A Figura 6.9 mostra o comportamento das linhas de tendência traçadas para os pontos da relação teor de umidade e o número de golpes. Os valores obtidos para o limite de liquidez (w_L) são os teores de umidade correspondentes a 25 golpes aplicados no aparelho de Casagrande. Esses valores podem ser observados na Tabela 4.3 a seguir, bem como os valores obtidos para o limite de plasticidade (w_P) e o índice de plasticidade (IP).

Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de limite de consistência

Propriedades	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
w_L (%)	-	29,6	29,1	34,3	38,1	33,1
w_P (%)	-	21,2	22,8	26,3	31,7	25,7
IP (%)	NP	8,4	6,3	8,0	7,1	7,4

Obs: w_L = Limite de liquidez; w_P = Limite de plasticidade; IP = Índice de plasticidade

No ensaio de limite de liquidez executado para a Amostra 1 (100% pó de micaxisto), a mesma demonstrou-se ser um material não plástico, não apresentando trabalhabilidade suficiente e impossibilitando, dessa forma, a realização do mesmo.

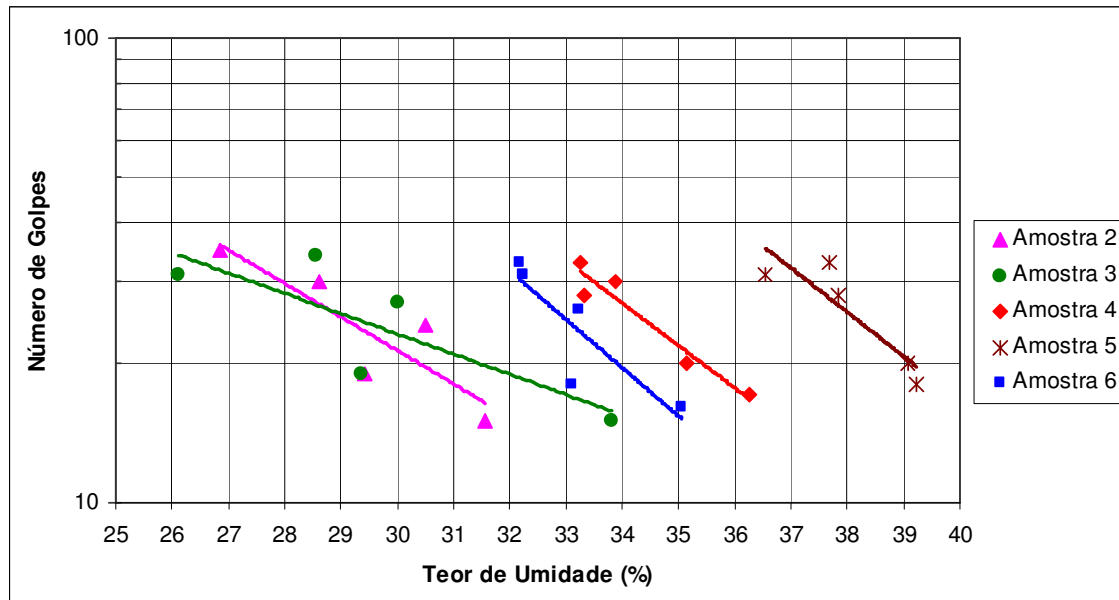


Figura 4.9 – Resultado do ensaio de Limite de Liquidez das amostras estudadas.

Em relação ao solo puro, representado pela Amostra 4, as misturas contendo o pó de micaxisto (Amostras 2 e 3) demonstram uma diminuição nos valores dos limites de consistência, bem como no valor do índice de plasticidade. As Amostras 2 e 3 não apresentaram grande variação para os valores de w_L . Observa-se, no entanto, um valor de w_P da Amostra 2 inferior ao obtido para Amostra 3. Outro aspecto observado para essas duas amostras são os resultados de IP, onde é possível constatar um decréscimo no valor obtido para Amostra 3 em relação ao da Amostra 2.

4.2.1.4 Classificação das Amostras

De posse dos resultados da análise granulométrica e dos limites de consistência de cada amostra estudada, as mesmas foram classificadas de acordo com o Sistema Unificado dos Solos (SUCS) e a *Transportation Research Borad* (TRB).

O solo (Amostra 4) foi classificado segundo SUCS como uma argila pouco plástica, tipo CL e no sistema TRB enquadrou-se no grupo A-4, sendo classificado como solo do tipo siltoso. Contudo pesquisas já realizadas com este solo (MESQUITA, 2007; RESPLANDES, 2007) utilizando a classificação específica para solos tropicais (Metodologia MCT) demonstraram que este solo corresponde a um solo laterítico argiloso (LG'). O resíduo estudado (Amostra 1), de acordo com os resultados obtidos nos limites de consistência, é um material não plástico, sendo classificado pelo SUCS como areia bem graduada, tipo SW e enquadrada pela TRB no grupo A-3, como uma areia fina.

As misturas (Amostra 2 e 3) foram enquadradas, segundo a TRB, no grupo A-4, como solos siltsos. Contudo, para o SUCS a Amostra 2 foi classificada como uma areia argilosa, tipo SC e a Amostra 3 como uma areia siltosa, tipo SM.

O cascalho (Amostra 5) utilizado na pesquisa foi classificado como mistura pedregulho-areia, mal graduada com poucos finos, tipo GP, segundo o SUCS e no sistema TRB enquadrou-se no grupo A-1-a, como um cascalho e areia. O solo-brita analisado (Amostra 6) foi classificado segundo o SUCS, como uma areia argilosa do tipo SC e quanto ao sistema TRB, enquadrou-se no grupo A-4 sendo classificado como solo siltoso. As classificações encontradas para cada material estão apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Classificação segundo SUCS e TRB das amostras estudadas

Classificação	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
TRB	A-3	A-4	A-4	A-4	A-1-a	A-4
SUCS	SW	SC	SM	ML	GP	SC

4.2.2 Ensaios Mecânicos

4.2.2.1 Compactação

Apresentam-se neste item os resultados dos ensaios de compactação executados com as amostras nas energias Proctor intermediária e modificada, objetivando definir a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo, sendo os mesmos utilizados na realização nos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR) e no estudo do comportamento expansivo dos materiais avaliados. A Figura 4.10 e

4.11 apresentam as curvas de compactação e de saturação obtidas para as amostras ensaiadas, nas energias intermediária e modificada respectivamente.

É possível observar nos gráficos o comportamento do material quando dosado ao solo em relação à umidade ótima. Observa-se que à medida que há a adição do resíduo de pedra ao solo, ocorre uma redução da umidade ótima das misturas. Para os valores de peso específico aparente seco máximo, o acréscimo do resíduo ao solo ocasiona um aumento nos resultados encontrados para esse índice.

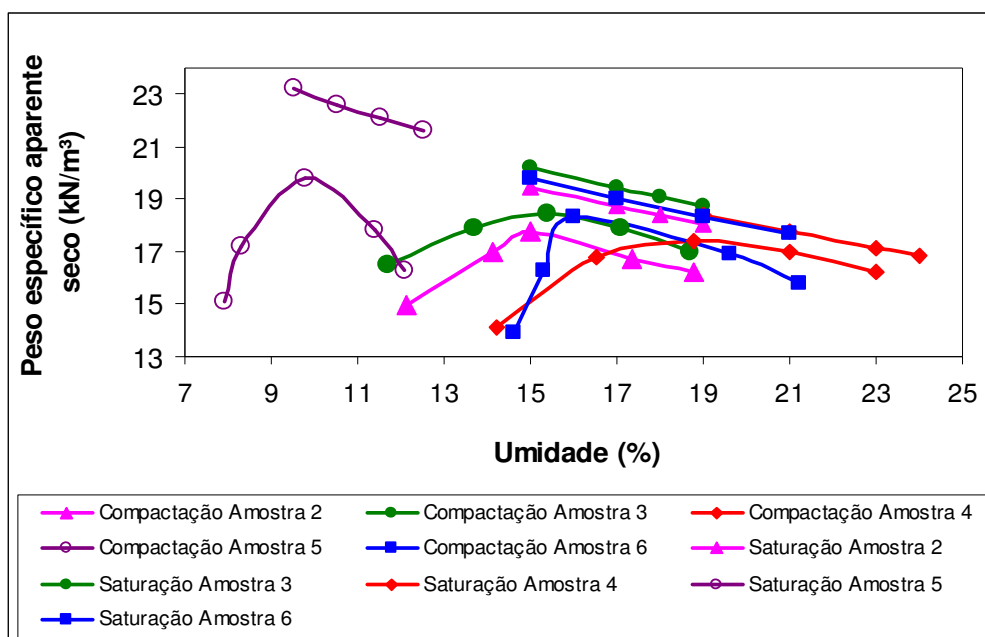


Figura 4.10 – Curvas de compactação e saturação das amostras estudadas, na energia intermediária.

A Amostra 1 (pó de micaxisto) também não demonstrou trabalhabilidade para esse ensaio, não sendo possível executá-lo dessa forma. Para as curvas da Amostra 5 (cascalho), observou-se um comportamento distinto das demais curvas traçadas, visto o material apresentar valores inferiores de umidade ótima e superiores para o peso específico aparente seco máximo.

Na Tabela 4.5 são apresentados os dados obtidos nos ensaios de compactação em ambas as energias utilizadas.

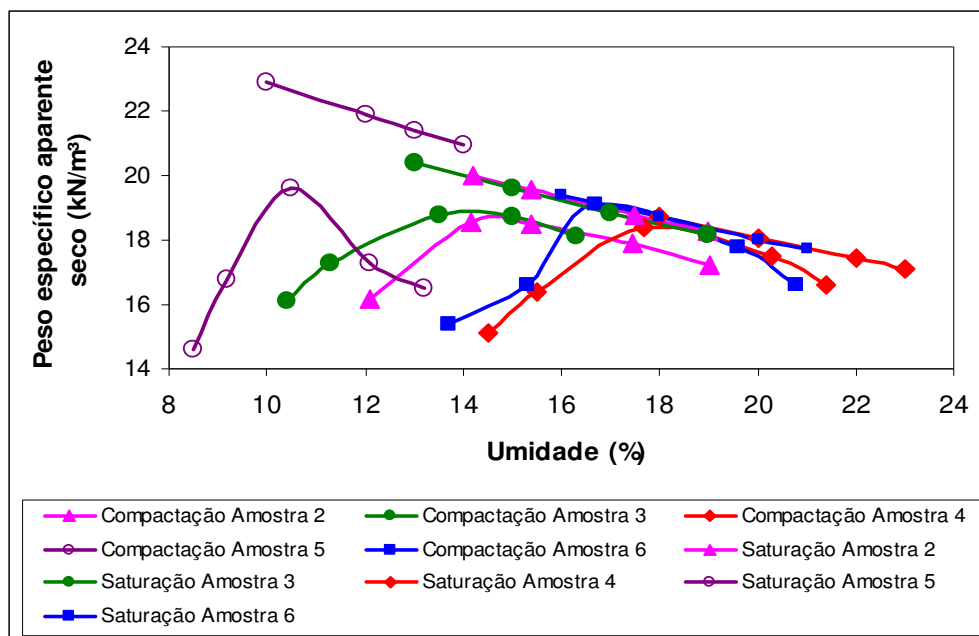


Figura 4.11 – Curvas de compactação e saturação das amostras estudadas, na energia modificada.

Tabela 4.5 – Resultados encontrados no ensaio de compactação

AMOSTRA	E. intermediária		E. modificada	
	w_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	w_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)
Amostra 1 (resíduo de pedreira)	-	-	-	-
Amostra 2 (20% resíduo + 70% solo)	15,0	17,8	15,4	18,6
Amostra 3 (30% resíduo + 70% solo)	15,4	18,5	13,5	18,8
Amostra 4 (solo)	18,8	17,4	17,7	18,4
Amostra 5 (cascalho)	9,8	19,8	10,5	19,6
Amostra 6 (30% brita 1 + 70% solo)	16,0	18,3	16,7	19,1

Obs: w_{ot} = umidade ótima; γ_{dmax} = peso específico aparente seco máximo

Observando os valores de umidade ótima (w_{ot}) dispostos na Tabela 4.5, percebe-se que cada material apresentou comportamento distinto para os parâmetros avaliados. Em relação à umidade ótima, as Amostras 3 e 4 apresentaram uma diminuição nos valores quando da mudança da energia de compactação para a modificada. Os outros materiais demonstraram comportamento oposto, tendo seus valores aumentados na energia modificada. A Figura 4.12 retrata graficamente a variação dos valores de umidade ótima das amostras em função da energia de compactação aplicada em cada amostra.

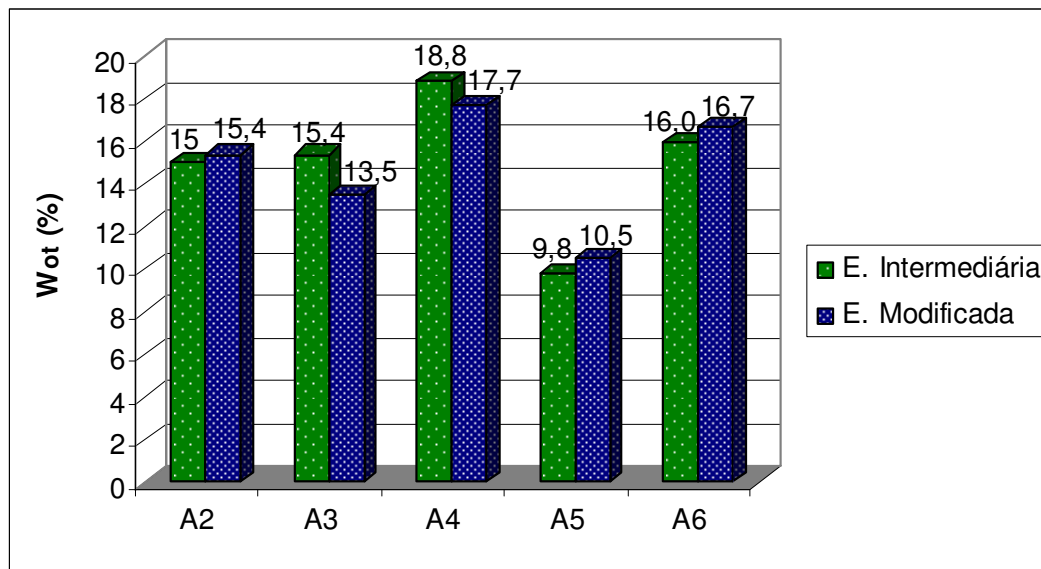


Figura 4.12 – Valores de umidade ótima obtidos nos ensaios de compactação.

Para o peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}), tem-se um comportamento distinto apenas para a Amostra 5, onde houve uma leve diminuição do resultado para a energia modificada. As demais amostras apresentaram comportamento similar de aumento dos valores de γ_{dmax} na energia modificada como demonstra a Figura 4.13.

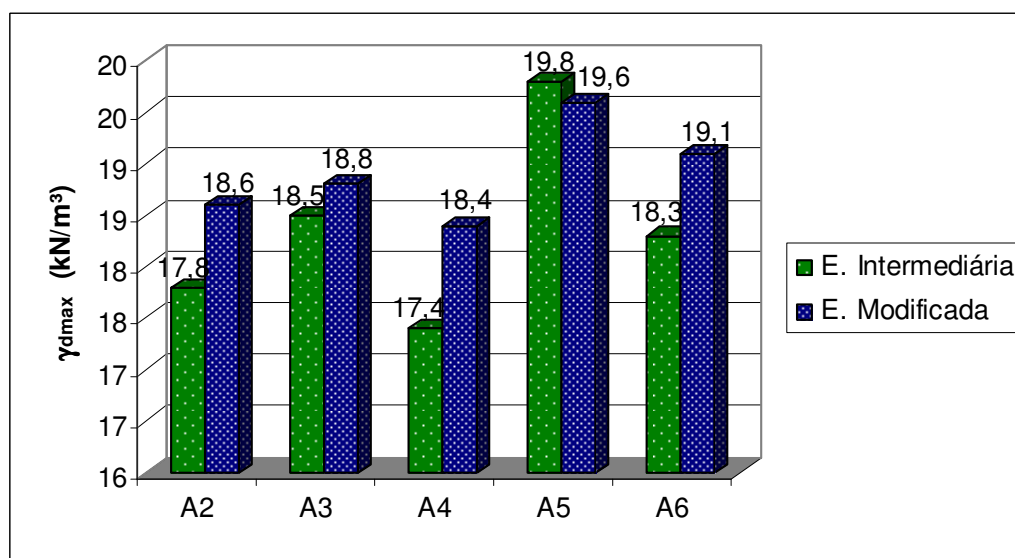


Figura 6.13 – Valores de peso específico aparente seco máximo obtidos nos ensaios de compactação.

4.2.2.2 Expansão e CBR

A Figura 4.14 mostra as curvas de expansão de todas as amostras estudadas. Percebe-se que a Amostra 3 (30% resíduo + 70% solo) demonstrou ter um comportamento mais expansivo em relação às demais amostras avaliadas.

No entanto, de uma maneira geral, os índices de expansão encontrados em todas as análises foram baixos ($\leq 3\%$). Logo, esses valores não comprometem a utilização do material em camadas de pavimentos.

Conforme os resultados obtidos na Tabela 4.6, verifica-se que os materiais estudados, exceto a Amostra 4 (solo), apresentam potencialidade técnica para serem usados na confecção de bases de pavimentos de vias urbanas de médio a baixo volume de tráfego, visto terem atingido valores de CBR acima de 40% na energia modificada.

Contudo, as mesmas, exceto a Amostra 5 (cascalho), seriam recomendadas apenas para camada de sub-base de pavimentos rodoviários, pois apresentam valores de CBR $\geq 20\%$.

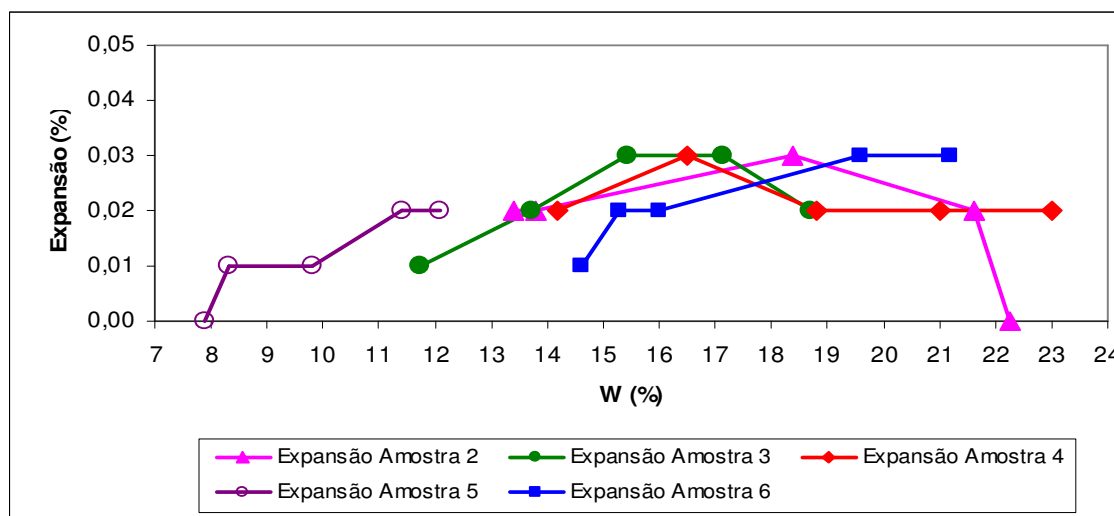


Figura 4.14 – Curvas de expansão das amostras compactadas na energia intermediária.

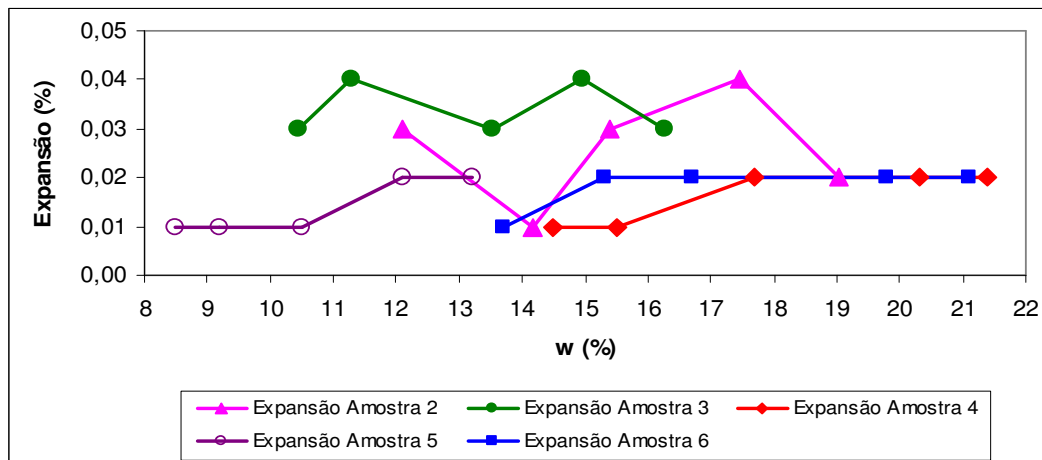


Figura 4.15 – Curvas de expansão das amostras compactadas na energia modificada.

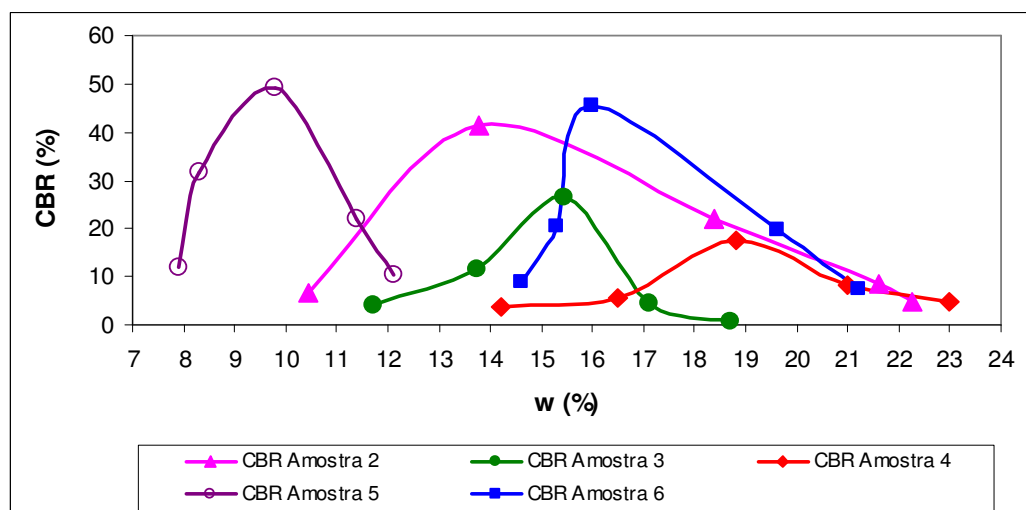


Figura 4.16 – Curvas de CBR das amostras estudadas, na energia intermediária.

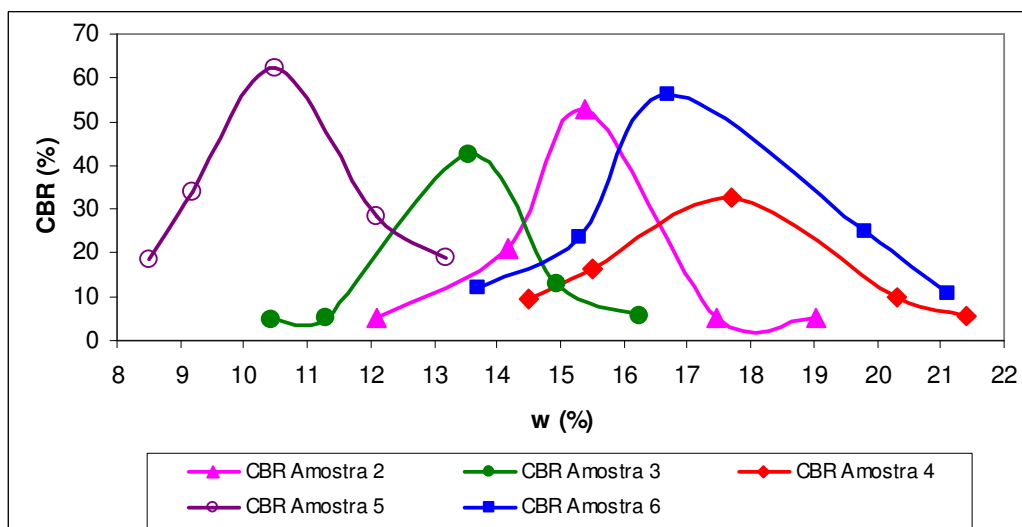


Figura 4.17 – Curvas de CBR das amostras estudadas, na energia modificada.

A Amostra 5 (cascalho) por atingir um valor de CBR = 62,3% pode ser recomendada tanto para confecção de camadas de sub-base como para camadas de base de pavimentos urbanos e rodoviários.

Tabela 4.6 – Resultados encontrados nos ensaios de expansão e CBR.

AMOSTRA	E. intermediária		E. modificada	
	Expansão (%)	CBR (%)	Expansão (%)	CBR (%)
Amostra 1 (resíduo de pedreira)	-	-	-	-
Amostra 2 (20% resíduo + 70% solo)	0,02	40,0	0,03	52,9
Amostra 3 (30% resíduo + 70% solo)	0,03	26,5	0,03	42,7
Amostra 4 (solo)	0,02	17,4	0,02	32,5
Amostra 5 (cascalho)	0,01	49,3	0,01	62,3
Amostra 6 (30% brita 1 + 70% solo)	0,02	45,3	0,02	56,2

4.2.3 Comparação entre as Amostras

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de laboratório, pode-se concluir que as amostras estudadas apresentam potencial para serem utilizadas na construção de pavimentos flexíveis. O cascalho apresentou os melhores parâmetros, seguido pela mistura solo-brita, solo-pó de micaxisto (20%) e solo-pó de micaxisto (30%).

No entanto, a incorporação do pó de micaxisto nos solos locais das obras pode se tornar uma alternativa viável, sendo que dependendo do tipo de via que será executada e do tráfego que nela irá existir, a mistura solo-pó de micaxisto aparece como substituto do tradicional cascalho laterítico e de outras soluções mais onerosas como a mistura solo-brita. Também fica evidente a melhora das características de resistência do solo local com a incorporação do pó de micaxisto.

Numa estimativa de custos relacionada a uma obra de pavimentação, se forem considerados ainda os passivos ambientais envolvidos em todo o processo, será possível verificar que o cascalho se tornará o material mais caro e a mistura solo-pó de micaxisto poderá ser considerada a mais viável economicamente.

4.3 ENSAIOS DE CAMPO

4.3.1 Frasco de Areia e *Speedy*

Os resultados dos ensaios de frasco de areia e *Speedy* realizados, visando o controle da compactação dos materiais em campo, são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultado dos ensaios de frasco de areia e *Speedy*.

Sub-trecho	Camada	Estaca	w_{campo} (%)	γ_{campo} (kN/m ³)	Δw_{ot} (%)	GC (%)
SOLO + PÓ DE MICAXISTO	subleito	E 27 BD	13,20	19,80	-	98,9
		E 29 BE	13,60	19,16		99,3
	sub-base	E 27 BD	14,00	18,56	13,0 a 14,5	98,7
		E 29 BE	14,00	18,80		100,0
	base	E 27 BD	14,60	18,92	13,8 a 15,0	101,7
		E 29 BE	14,80	18,84		101,3
SOLO + BRITA 1	subleito	E 07 BD	14,30	18,73	-	96,8
		E 09 BE	14,10	18,80		97,4
	sub-base	E 07 BD	15,60	18,54	16,0 a 17,8	101,3
		E 09 BE	15,60	18,30		100,0
	base	E 07 BD	17,20	18,67		102,0
		E 09 BE	16,30	18,57		101,5
CASCALHO	subleito	E 17 BD	13,70	18,91	-	98,0
		E 19 BE	13,80	18,88		97,8
	sub-base	E 17 BD	11,00	20,12	9,8 a 11,4	101,6
		E 19 BE	11,10	20,53		103,7
	base	E 17 BD	10,70	20,22		102,1
		E 19 BE	10,80	20,47		103,4

Obs: - = resultado não obtido; E = estaca; BD = bordo direito; BE = bordo esquerdo; w_{campo} = umidade de campo; γ_{campo} = peso específico de campo; Δw_{ot} = faixa de variação de umidade permitida em torno da umidade ótima; GC = grau de compactação

É possível observar que as umidades obtidas em campo, em todos sub-trechos, se enquadram dentro da taxa de variação da umidade ótima obtida em laboratório (Δw_{ot}). Percebe-se ainda, baixa variação para os valores encontrados em cada sub-trecho, com valores médios de 14,0% para o sub-trecho 1 (solo + pó de micaxisto), 15,5% para o sub-trecho 2

(solo + brita 1) e 11,9% para o sub-trecho 3 (cascalho), indicando com isso uma boa homogeneização e controle de umidade dos materiais antes da sua compactação.

Esse mesmo comportamento de uniformidade também pode ser observado para o $\gamma_{d_{\text{campo}}}$, com uma média de valores de 19,01 kN/m³ para o sub-trecho 1 (solo + pó de micaxisto), 18,60 kN/m³ no sub-trecho 2 (solo + brita 1) e 19,85 kN/m³ para o sub-trecho 3 (cascalho).

Em relação aos valores do grau de compactação (GC), nota-se que todas as camadas executadas para cada um dos sub-trechos obtiveram um $GC > 95 \%$, sendo que os menores valores obtidos foram para o subleito do solo + brita 1 (sub-trecho 2). De um modo geral, pode-se observar esse mesmo comportamento do subleito em todos os sub-trechos executados, indicando com isso uma maior fragilidade do material constituinte dessa camada do pavimento.

Assim sendo, com os dados obtidos com o controle de compactação durante a execução da pista experimental, verifica-se que em termos de compactação todos os critérios exigidos no projeto foram atendidos.

4.3.2 Ensaio Prova de Carga Sobre Placa

4.3.2.1 Sub-Trecho Solo-Pó de Micaxisto

A Tabela 6.8 e as Figuras 4.18 a 21 apresentam os resultados obtidos no ensaio de prova de carga sobre placa para as camadas do trecho solo-pó de micaxisto, obtidos para um tempo de cinco minutos para cada carga aplicada, bem como na fase de descarregamento.

Analizando os dados encontrados, pode-se observar que foram obtidos valores de $d_t \leq 1,30 \text{ mm}$, com uma média de 0,87 mm, demonstrando com isso um bom comportamento estrutural dos materiais empregados na construção dos sub-trechos. No entanto, esperava-se uma diminuição progressiva dos valores de uma camada para outra, sendo que na realidade foi observada uma oscilação entre os valores encontrados.

Tabela 4.8 – Resultados obtidos nos ensaios de prova de carga no trecho 1 (solo + pó de micaxisto).

CAMADA	ESTACA	T = 560 kPa		k_{placa} (kPa/mm)
		d_t (mm)	d_e (mm)	
Subleito	E 27 BD	1,17	0,24	478,63
	E 28 EIXO	0,95	0,17	589,47
	E 29 BE	0,70	0,14	800,00
Sub-base	E 27 BD	1,19	1,13	470,59
	E 28 EIXO	0,59	0,16	949,15
	E 29 BE	1,04	0,22	538,46
Base	E 27 BD	0,55	0,16	1018,18
	E 28 EIXO	0,47	0,11	1191,49
	E 29 BE	0,78	0,15	717,95
Revestimento	E 27 BD	1,30	0,30	430,77
	E 28 EIXO	0,91	0,23	615,38
	E 29 BE	0,73	0,19	767,12
MÉDIA		0,87	0,27	713,93

Obs: E = estaca; BD = bordo direito; BE = bordo esquerdo; k_{placa} = módulo de reação para o ensaio em placa

Pode-se constatar ainda que os valores obtidos no eixo e no bordo esquerdo das camadas apresentam melhor comportamento estrutural. Uma explicação para isso pode ser o fato de que nessa seção não ocorreu o confinamento lateral do bordo direito.

Este fato é melhor evidenciado nas Figuras 4.18 a 4.21, que demonstram essa relação entre tensão aplicada e deslocamento obtido nas estacas ensaiadas. O mesmo comportamento é observado para os valores de d_e , apresentando uma média de 0,27 mm.

Para o módulo de reação para o ensaio em placa (k_{placa}), observa-se uma média de valores na ordem de 713,93 kPa/mm, apresentando valores mais elevados para a camada de base, nas estacas E 27 BD e E 28 EIXO.

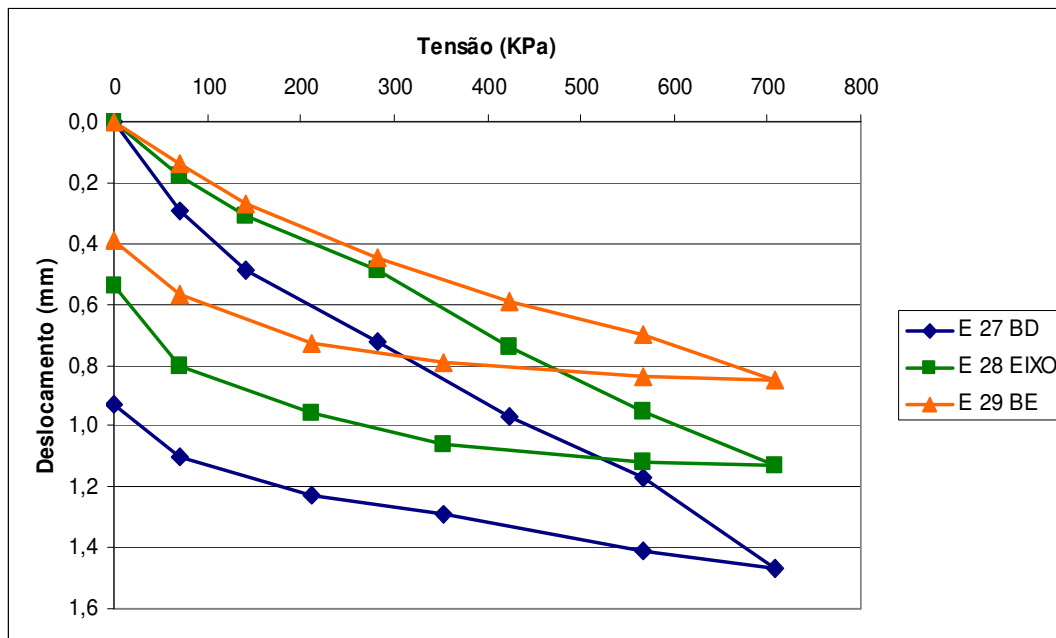


Figura 4.18 – Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 1 (subleito).

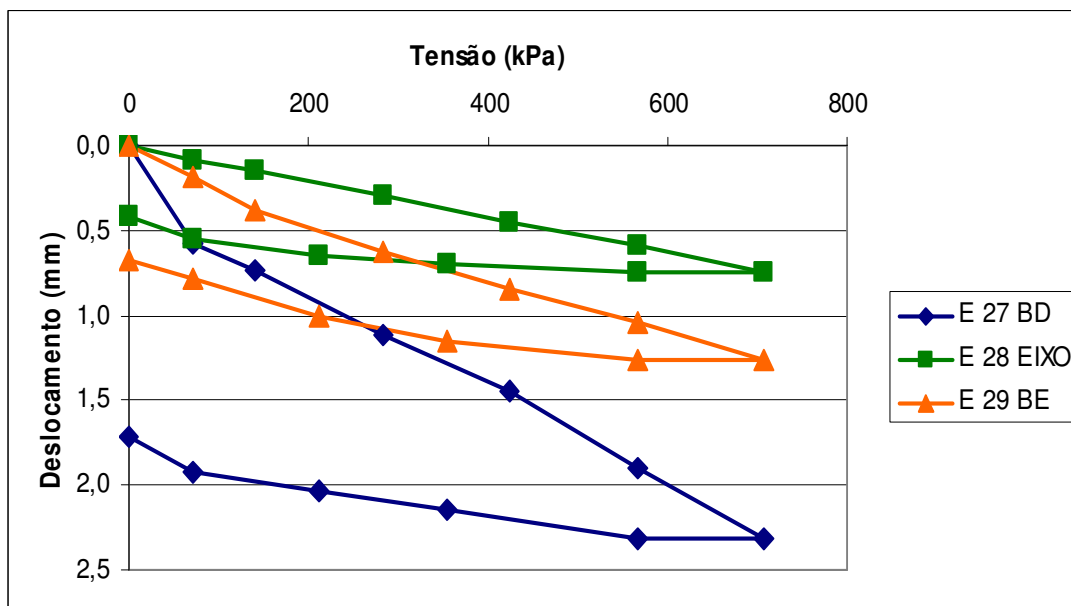


Figura 4.19 – Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 1 (sub-base).

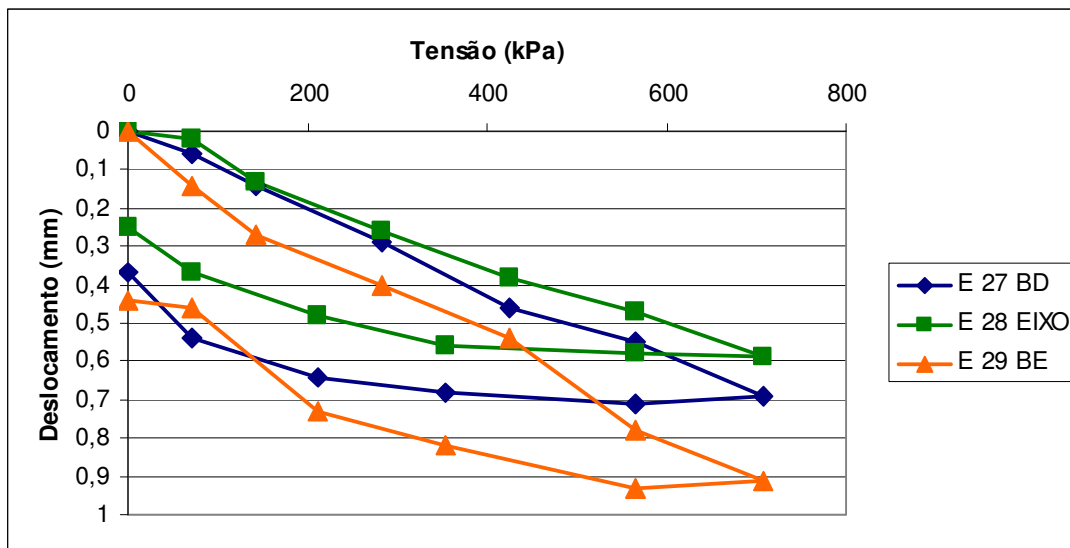


Figura 4.20 – Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 1 (base).

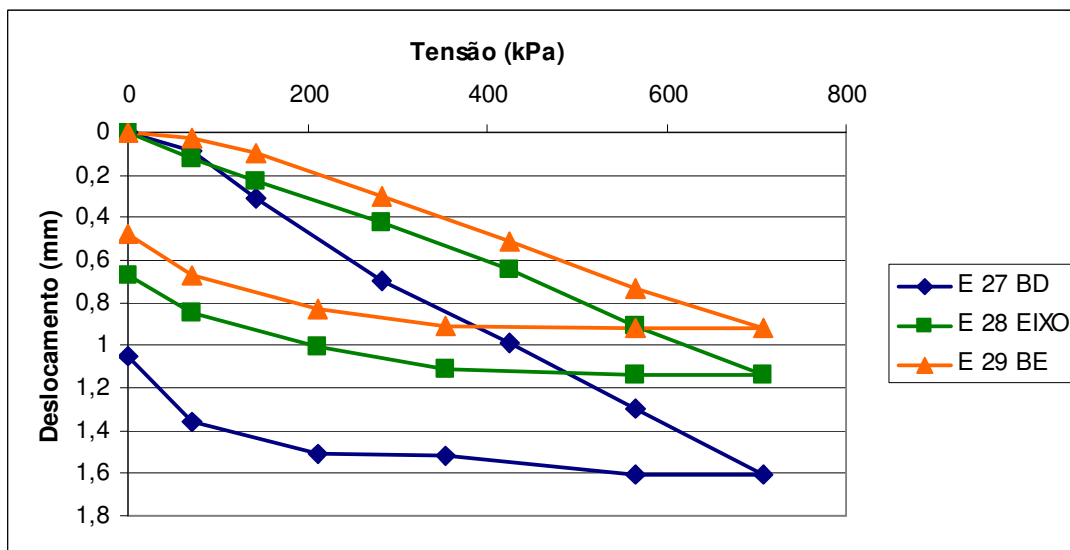


Figura 4.21 – Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 1 (revestimento).

4.3.2.2 Sub-Trecho Solo-Brita 1

A Tabela 6.9 apresenta os resultados do ensaio de prova de carga sobre placa, para o sub-trecho executado utilizando com material constituinte das camadas de sub-base e base, a mistura de solo (70%) e brita 1 (30%).

Os resultados obtidos mostraram que, assim como no sub-trecho anterior, o do solo-brita também apresentou valores baixos para d_t (média = 1,44 mm) demonstrando, com

isso, um bom comportamento estrutural do sub-trecho em questão. Um fato observado foram os valores obtidos para a camada de subleito (valores médios superiores a 1,20 mm), indicando uma provável falha na compactação dessa camada, visto que a mesma também apresentou valores mais baixos de GC, como visto na Tabela 4.7. Esse comportamento reflete nos resultados obtidos para as demais camadas do pavimento. No entanto, é possível constatar uma melhora significativa nos valores de deslocamento nos ensaios realizados sobre o revestimento. Comportamento semelhante é observado para d_e .

Para esse sub-trecho não fica totalmente evidenciada a influência nos valores do bordo direito provocada pelo confinamento existente nos demais bordos. Isso pode ser explicado devido a diminuição gradual da inclinação do *grade* ao longo da extensão do trecho.

Foram observados também, valores menores para o módulo de reação para o ensaio em placa, sendo este em média igual a 445,41 kPa/mm. Os maiores valores foram obtidos no eixo e no bordo esquerdo do revestimento.

Tabela 4.9 – Resultados obtidos nos ensaios de prova de carga no trecho 2 (solo-brita).

CAMADA	ESTACA	T = 560 kPa		k_{placa} (kPa/mm)
		d_t (mm)	d_e (mm)	
Subleito	E 07 BD	1,37	0,38	408,76
	E 08 EIXO	1,26	0,28	444,44
	E 09 BE	2,03	0,5	275,86
Sub-base	E 07 BD	1,66	0,2	337,35
	E 08 EIXO	1,88	0,45	297,87
	E 09 BE	1,28	0,32	437,50
Base	E 07 BD	1,88	0,41	297,87
	E 08 EIXO	2,27	0,41	246,70
	E 09 BE	1,04	0,21	538,46
Revestimento	E 07 BD	1,26	0,13	444,44
	E 08 EIXO	0,66	0,18	848,48
	E 09 BE	0,73	0,14	767,12
MÉDIA		1,44	0,30	445,41

Obs: E = estaca; BD = bordo direito; BE = bordo esquerdo; k_{placa} = módulo de reação para o ensaio em placa

As Figuras 4.22 a 4.25 demonstram o comportamento da relação tensão x deslocamento para as camadas do sub-trecho em questão. É possível avaliar a variação dos valores obtidos para o bordo direito em relação aos demais.

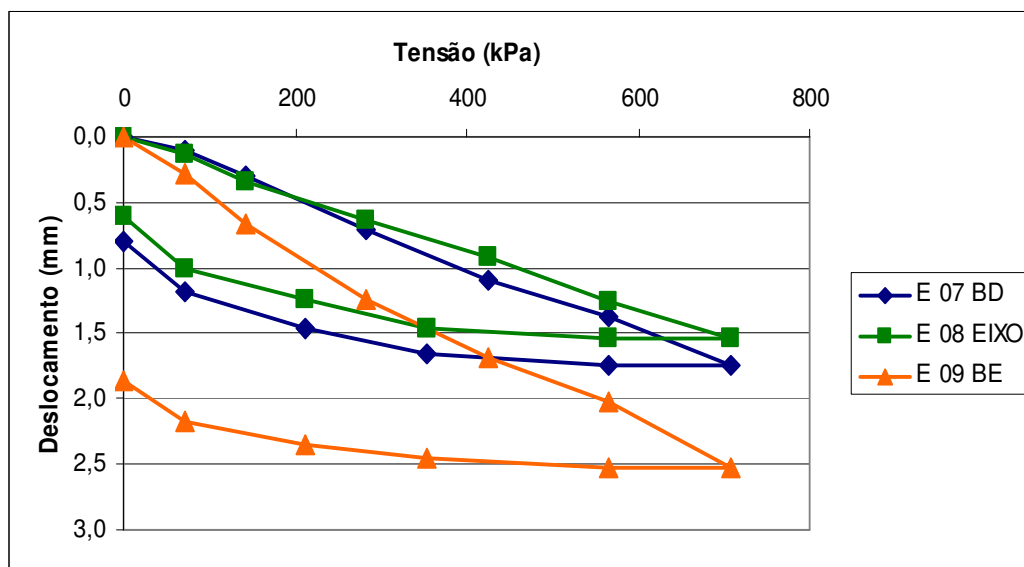


Figura 4.22 – Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 2 (subleito).

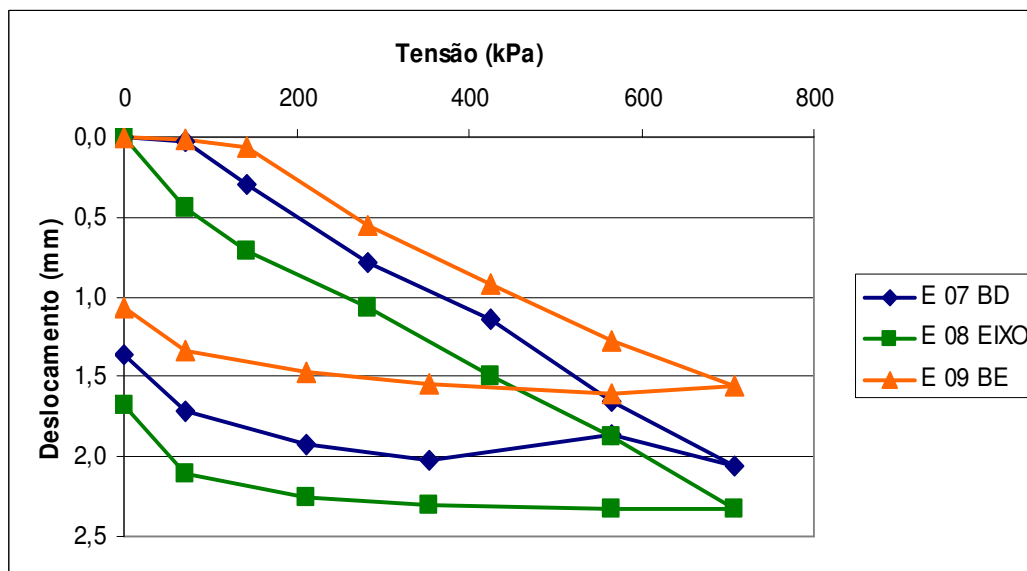


Figura 4.23 – Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 2 (sub-base).

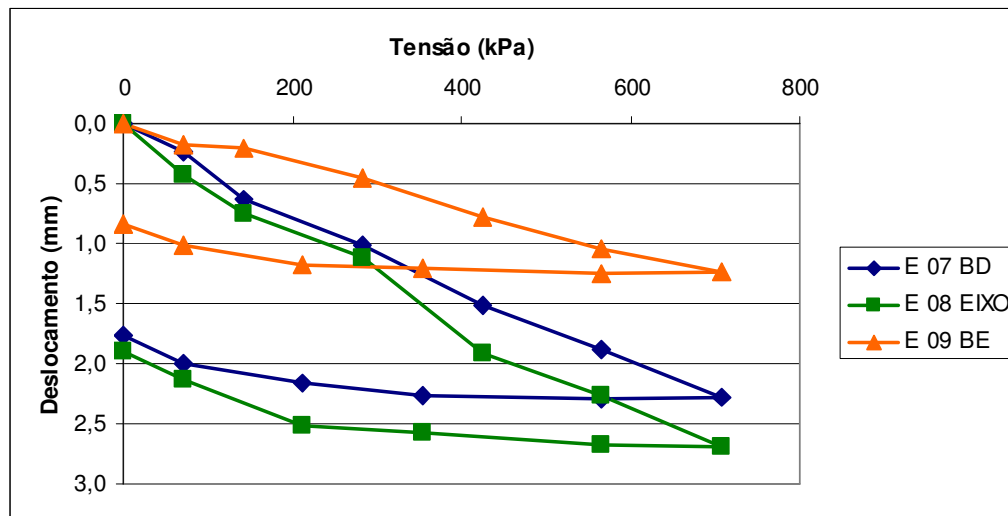


Figura 4.24 – Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 2 (base).

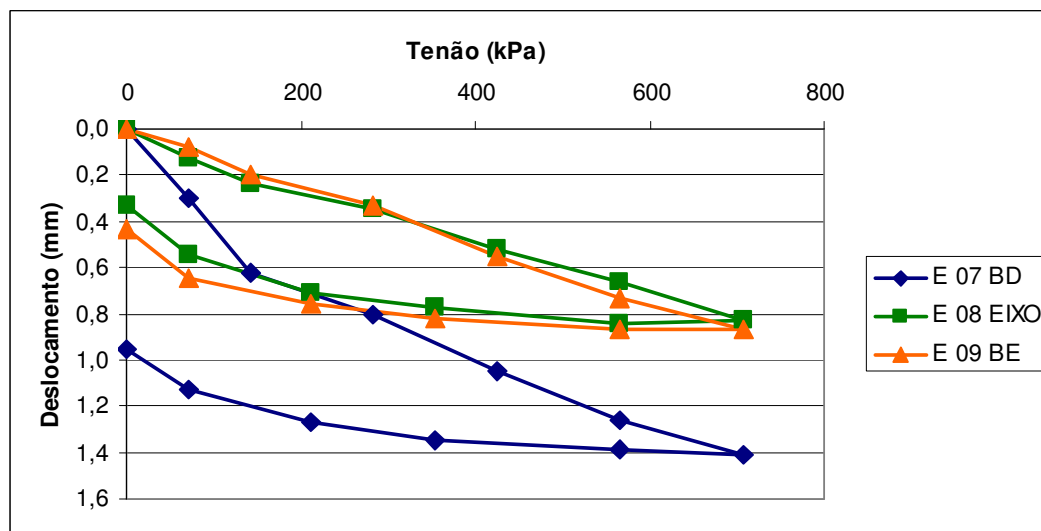


Figura 4.25 – Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 2 (revestimento).

4.3.2.3 Sub-Trecho Cascalho

Os resultados dos ensaios de prova de carga sobre placa realizados no sub-trecho 3 (cascalho), são apresentados na Tabela 4.10. Para esse sub-trecho foi obtido um d_i médio de 1,13 mm, demonstrando um bom comportamento estrutural também para esse material.

Foi observado também para esse sub-trecho uma oscilação para os valores encontrados, o que também acontece para d_e , que obteve um valor médio de 0,30 mm.

Tabela 4.10 – Resultados obtidos nos ensaios de prova de carga no trecho 3 (cascalho).

CAMADA	ESTACA	T = 560 kPa		k_{placa} (kPa/mm)
		d_t (mm)	d_e (mm)	
Subleito	E 17 BD	1,22	0,24	459,02
	E 18 EIXO	1,54	0,36	363,64
	E 19 BE	0,91	0,24	615,38
Sub-base	E 17 BD	0,88	0,09	636,36
	E 18 EIXO	1,07	0,57	523,36
	E 19 BE	1,58	0,36	354,43
Base	E 17 BD	1,98	0,51	282,83
	E 18 EIXO	1,06	0,31	528,30
	E 19 BE	1,53	0,65	366,01
Revestimento	E 17 BD	0,43	0,10	1302,33
	E 18 EIXO	0,74	0,10	756,76
	E 19 BE	0,63	0,10	888,89
MÉDIA		1,13	0,30	589,78

Obs: E = estaca; BD = bordo direito; BE = bordo esquerdo; k_{placa} = módulo de reação para o ensaio em placa

São observados os menores valores de d_t e d_e para os ensaios executados sobre o revestimento. Para o k_{placa} , constatou-se valores superiores nesta camada, atingindo um valor de 1.302,33 kPa/mm na estaca 17 no bordo direito. As curvas demonstrando o comportamento da relação tensão x deslocamento para as camadas deste sub-trecho são mostradas nas Figuras 4.26 a 4.29.

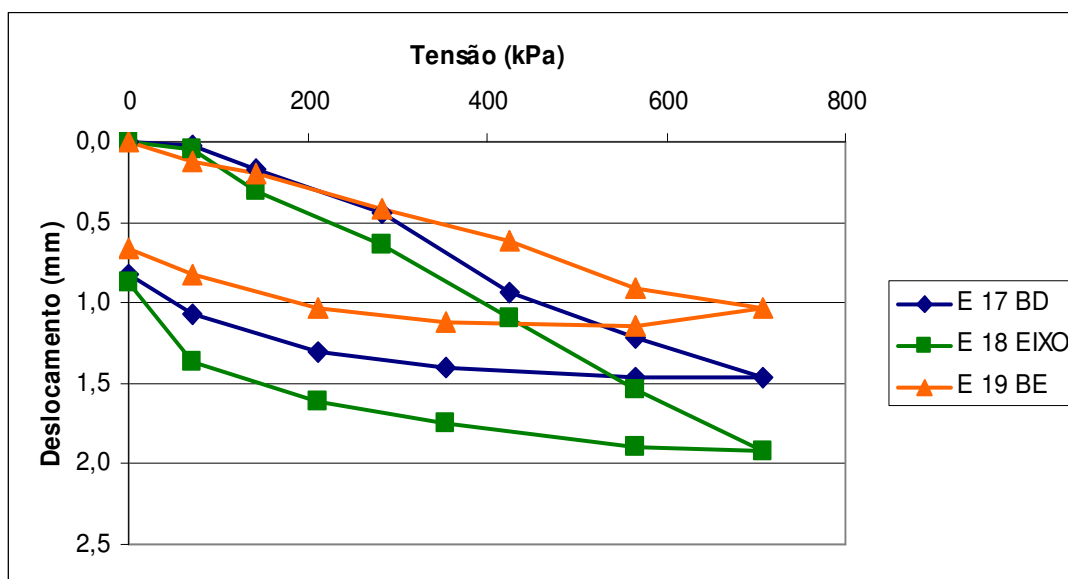


Figura 4.26 – Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 3 (subleito).

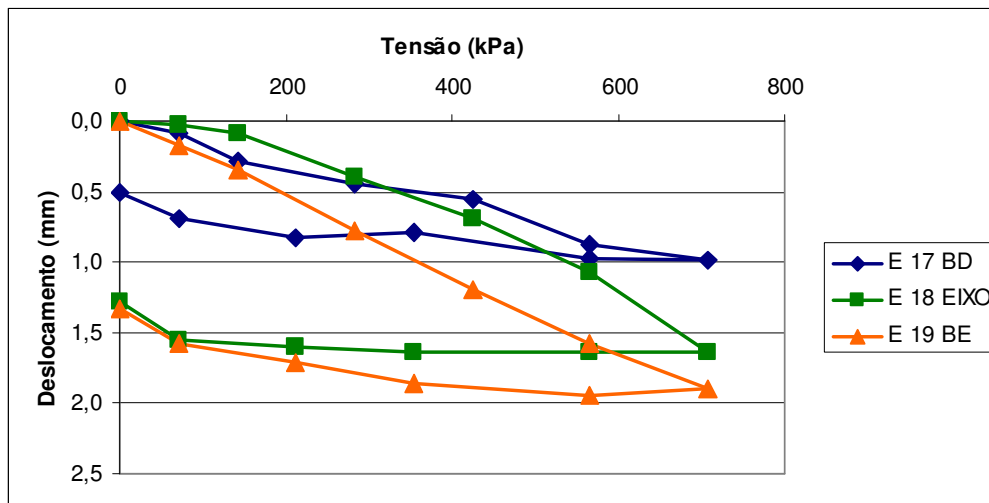


Figura 4.27 – Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 3 (sub-base).

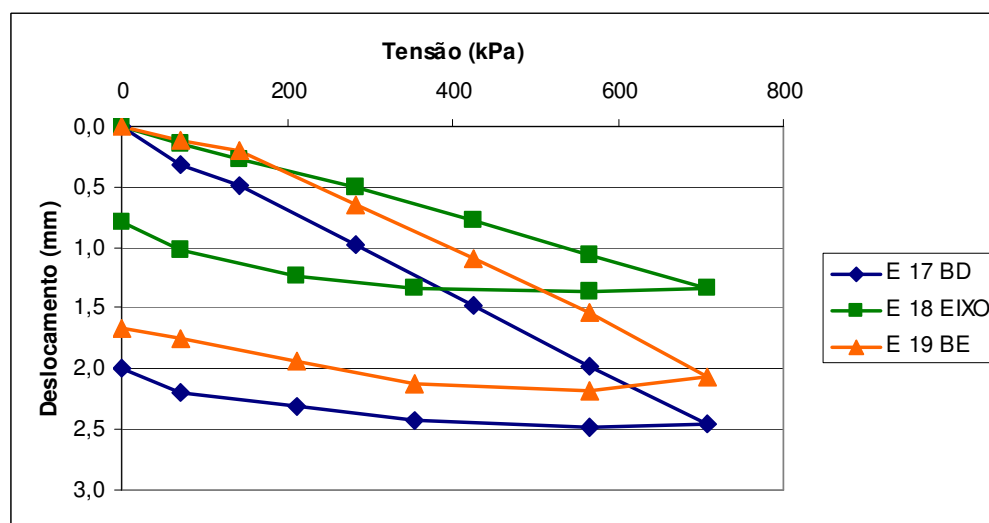


Figura 4.28 – Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 3 (base).

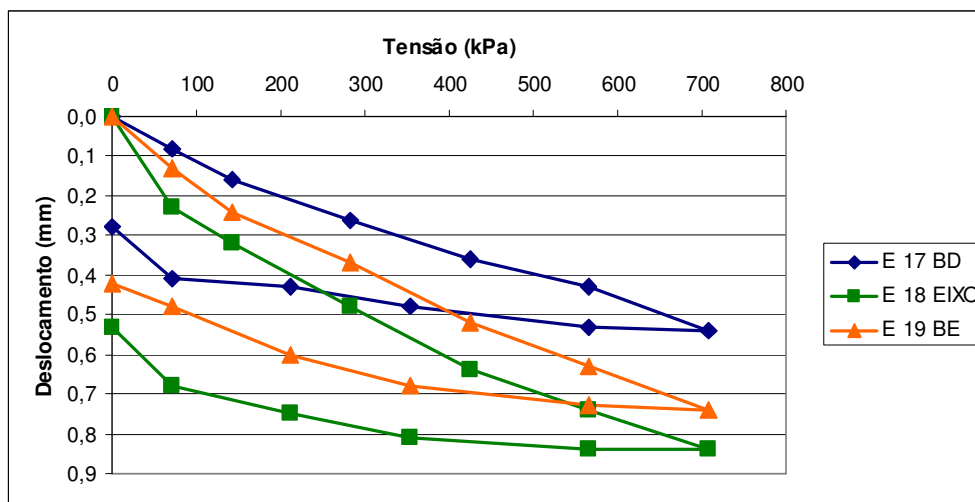


Figura 4.29 – Curvas Tensão x Deslocamento no trecho 3 (revestimento).

4.3.3 Penetrômetro Dinâmico de Cone

4.3.3.1 Sub-Trecho Solo-Pó de Micaxisto

A Tabela 4.11 demonstra os resultados da profundidade (conseguida com a penetração da aste), espessura (das camadas) e DN (índice de penetração) obtidos no ensaio de Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP) para o sub-trecho 1 (solo + pó de micaxisto).

Tabela 4.11 – Resultados obtidos no ensaio de DCP para o trecho solo-pó de micaxisto.

Camada	Estaca	Profundidade (cm)	Espessura (cm)	DN (mm/golpe)
SUBLEITO	E 17 BD	1	13,5	7,5
		2	31,5	26,5
		3	42,5	70,3
	E 18 EIXO	1	10,0	6,7
		2	21,0	11,7
		3	57,0	63,3
	E 19 BE	1	14,0	7,6
		2	17,0	19,0
		3	57,0	63,4
BASE	E 17 BD	1	9,0	5,6
		2	35,0	11,2
		3	39,0	65,0
	E 18 EIXO	1	21,0	10,3
		2	43,0	10,8
		3	21,0	35,0
	E 19 BE	1	9,0	5,0
		2	35,0	19,4
		3	40,0	65,0

Obs: BE = bordo esquerdo; BD = bordo direito; DN = índice de penetração obtido com ensaio de DCP.

O subleito apresenta uma primeira camada, com uma espessura média de 13,5 cm mais resistente, podendo ser interpretada como resultado da compactação sofrida pelo material. Para camada de base, observa-se também a presença de uma primeira camada mais resistente em torno de 9,0 cm, sendo explicada pelo trincamento proposital gerado nesta camada, conforme procedimento detalhado no Capítulo 5 desta dissertação. Sendo assim, fica comprovada a melhoria da resistência da camada compactada que apresenta material argiloso em sua composição quando é adotado o procedimento proposto por Nogami e Villibor (1995).

Não é possível identificar as duas camadas de 15 cm (sub-base e base) executadas conforme o projeto da via, podendo com isso evidenciar um comportamento de resistência similar para as misturas utilizadas em cada uma das camadas citadas.

Nas Figuras 4.30 e 4.31, têm-se as curvas de DCP que consistem em uma representação gráfica do número de golpes (abscissas) acumulado para a penetração do equipamento, com a profundidade (ordenadas). É possível identificar as curvas traçadas um comportamento homogêneo entre os valores dos bordos ensaiados, e para o eixo tem-se curvas mais alongadas, demonstrando uma resistência nesses pontos.

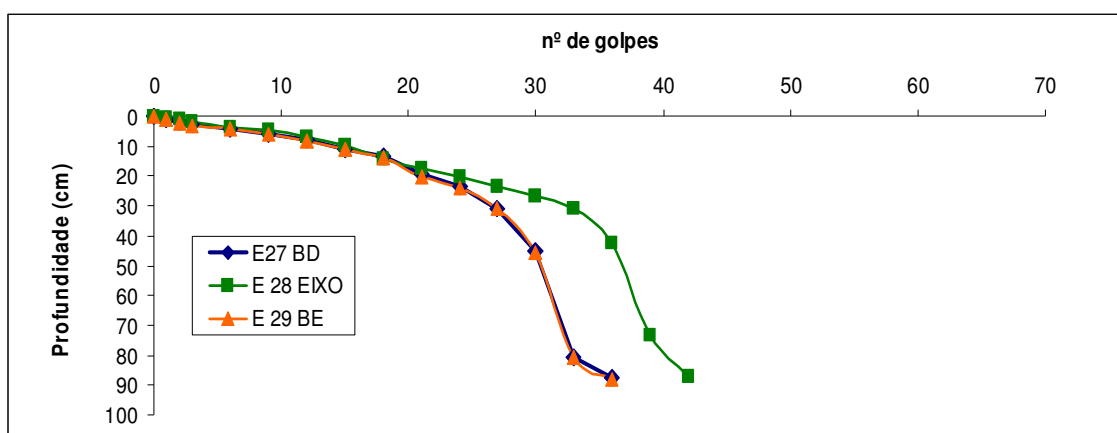


Figura 6.30 – Curvas DCP para o trecho solo-pó de micaxisto após execução do subleito.

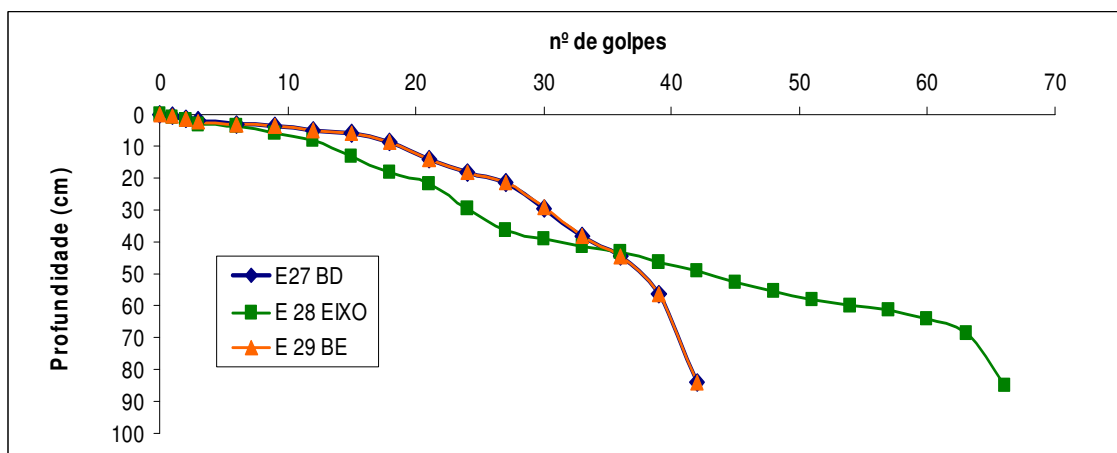


Figura 6.31 – Curvas DCP para o trecho solo-pó de micaxisto após execução da base.

Nas Figuras 4.32 e 4.33 tem-se a relação entre os índices de penetração (DN) em mm/golpes e a profundidade. Nesses gráficos, é possível observar os locais onde ocorrem as mudanças de comportamento dos materiais e as camadas do pavimento.

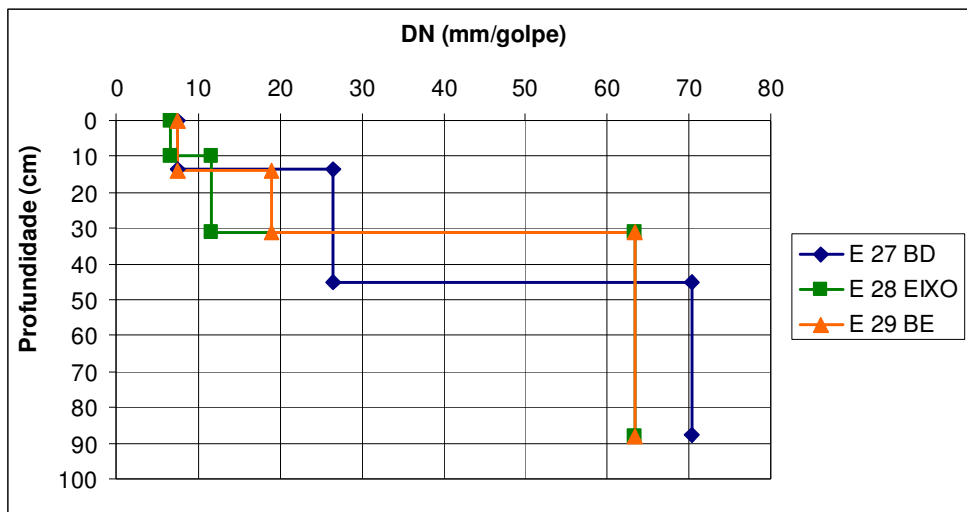


Figura 4.32 – Diagrama Estrutural no ensaio de DCP no trecho solo-resíduo após regularização do subleito.

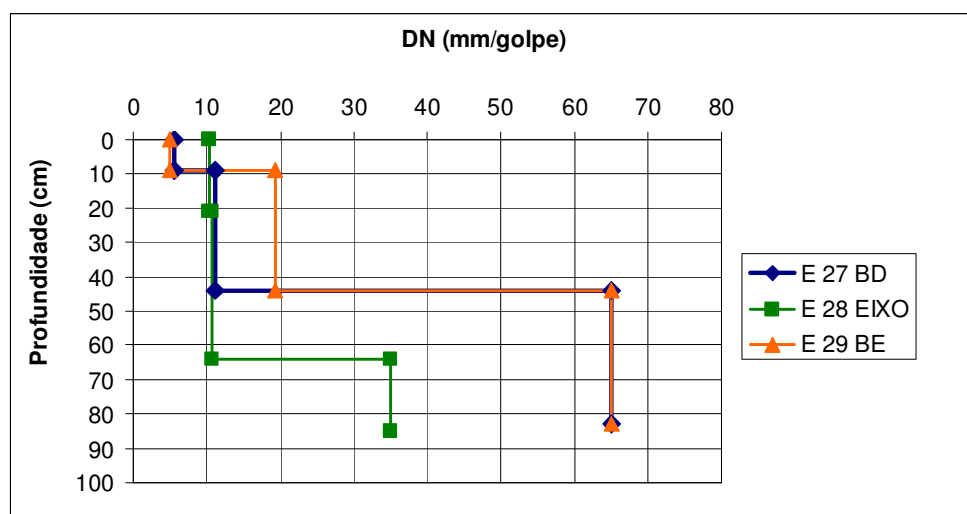


Figura 4.33 – Diagrama Estrutural no ensaio de DCP no trecho solo-resíduo após execução da base.

É possível observar nas Figuras 6.32 e 6.33 valores menores de DN para as primeiras camadas, observando um aumento progressivo de DN conforme o aumento da profundidade.

Na literatura, existem várias correlações para calcular o valor de CBR em função do Índice de Penetração (DN). Nesta pesquisa adotou-se algumas das correlações realizadas em pavimentos brasileiros. Neste sentido, Heyn (1986 *apud* RESPLANDES, 2007) realizou

estudos com DCP em rodovias no estado do Paraná, resultando na correlação apresentada na Equação 4.1:

$$CBR = 443,5 \times (DN)^{-1,3} \quad (4.1)$$

onde:

CBR = capacidade de suporte (%);

DN = índice de penetração obtido no ensaio com DCP (mm/golpes).

Outra correlação entre CBR e DN foi obtida no Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) pelos pesquisadores Oliveira e Vertamtti (1997 *apud* RESPLANDES, 2007), estudando solos tradicionais empregados em rodovias no estado de São Paulo, chegando à seguinte Equação 4.2:

$$\log CBR = 2,49 - 1,057 \times (\log DN) \quad (4.2)$$

onde:

CBR e DN são variáveis já definidas anteriormente

Lopes *et al.* (2007) traz em seu trabalho uma correlação para o solo estudado nesta pesquisa, obtendo a Equação 6.3 descrita a seguir:

$$\log (CBR) = \log (-1,4799 \cdot DN + 39,68) \quad (6.3)$$

onde:

CBR e DN são variáveis já definidas neste item.

Na Tabela 6.12 têm-se os valores de CBR do solo do subleito e mistura (20% pó de micaxisto e 80% solo) utilizada na construção da base, obtidos por meio das correlações descritas anteriormente para o sub-trecho 1 (solo + pó de micaxisto).

Observando os valores obtidos, percebe-se que a mistura solo-pó de micaxisto, não obteve bons resultados utilizando a correlação apresentada por Lopes *et al.* (2007), para o subleito e base.

Tabela 4.12 – Valores de CBR obtidos por correlação de três autores para o subleito e base.

Camada	Estaca		Espessura (cm)	DN (mm/golpe)	CBR (%)		
					Heyn	O. e V.	Lopes
SUBLEITO	E 17 BD	1	13,5	7,5	32,3	36,7	28,6
		2	31,5	26,5	6,3	9,7	0,5
		3	42,5	70,3	1,8	3,4	-
	E 18 EIXO	1	10,0	6,7	37,4	41,4	29,8
		2	21,0	11,7	18,1	23,0	22,4
		3	57,0	63,3	2,0	3,9	-
	E 19 BE	1	14,0	7,6	32,0	36,4	28,5
		2	17,0	19,0	9,6	13,8	11,6
		3	57,0	63,4	2,0	3,8	-
BASE	E 17 BD	1	9,0	5,6	47,7	50,4	31,5
		2	35,0	11,2	19,1	24,0	23,1
		3	39,0	65,0	2,0	3,7	-
	E 18 EIXO	1	21,0	10,3	21,3	26,2	24,4
		2	43,0	10,8	20,0	24,9	23,6
		3	21,0	35,0	4,4	7,2	-
	E 19 BE	1	9,0	5,0	54,7	56,4	32,3
		2	35,0	19,4	9,4	13,4	10,9
		3	40,0	65,0	2,0	3,7	-

Obs: BE = bordo esquerdo; BD = bordo direito; DN = índice de penetração obtido com ensaio de DCP.

- valores não detectados pela correlação, O. e V. = Oliveira e Vertamtti

Avaliando os valores encontrados para o subleito, pode-se constatar valores de CBR acima de 28 %, demonstrando uma boa capacidade de suporte para a camada mais compactada do subleito. Este comportamento também é observado para a base desse sub-trecho, com valores de CBR acima de 21%, chegando a atingir 56,4 % na estaca 19.

4.3.3.2 Sub-Trecho Solo-Brita 1

Os resultados de profundidade, espessura e DN (índice de penetração) obtidos no ensaio de Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP) para o sub-trecho 2 (solo + brita 1), estão dispostos na Tabela 4.13 e nas Figuras 4.34 a 4.37. São observados valores médios de

espessura de 22,3 para uma primeira camada no subleito como um reflexo da compactação executada no mesmo.

Para os ensaios realizados após a execução da base deste sub-trecho, verifica-se presença de uma camada mais resistente, com espessura de 16,0 cm em média. Esta camada corresponde à base do pavimento. Em seguida, é identificada a sub-base, ligeiramente menos resistente que a base, mas com uma espessura média de 25,0 cm maior do que aquela definida em projeto (15 cm).

Nesta profundidade, provavelmente o equipamento não registrou diferença de resistência entre a sub-base e a camada superficial do subleito que está mais compactada. Após a sub-base e o subleito superficial, tem-se o subleito natural com valores de DN bem maiores.

Tabela 4.13 – Resultados obtidos no ensaio de DCP para o trecho solo-brita.

Camada	Estaca		Profundidade (cm)	Espessura (cm)	DN (mm/golpe)
SUBLEITO	E 17 BD	1	22,7	22,7	18,9
		2	50	27,3	30,3
		3	87,8	37,8	63,0
	E 18 EIXO	1	10,5	22,3	11,7
		2	27,4	16,9	28,2
		3	87,8	60,4	100,7
	E 19 BE	1	21	21	17,5
		2	50,2	29,2	32,4
		3	87,8	37,6	61,0
BASE	E 17 BD	1	16,6	16,6	13,8
		2	45,8	29,2	16,2
		3	85	39,2	65,3
	E 18 EIXO	1	14,7	14,7	9,8
		2	36,1	21,4	11,9
		3	85,1	49	81,7
	E 19 BE	1	16,9	16,9	14,1
		2	46	29,1	16,2
		3	85	39	65,0

Obs: BE = bordo esquerdo; BD = bordo direito; DN = índice de penetração obtido com ensaio de DCP.

Nas curvas representadas pelas Figuras 4.34 e 4.35, demonstrando a relação entre o número de golpes aplicado com as profundidades obtidas, pode-se observar um comportamento similar para os bordos direito e esquerdo.

No entanto, na curva da Figura 4.34 a curva representativa do eixo, para o ensaio executado no subleito, demonstra que para este ensaio o eixo atingiu valores de resistência inferiores aos observados nos bordos.

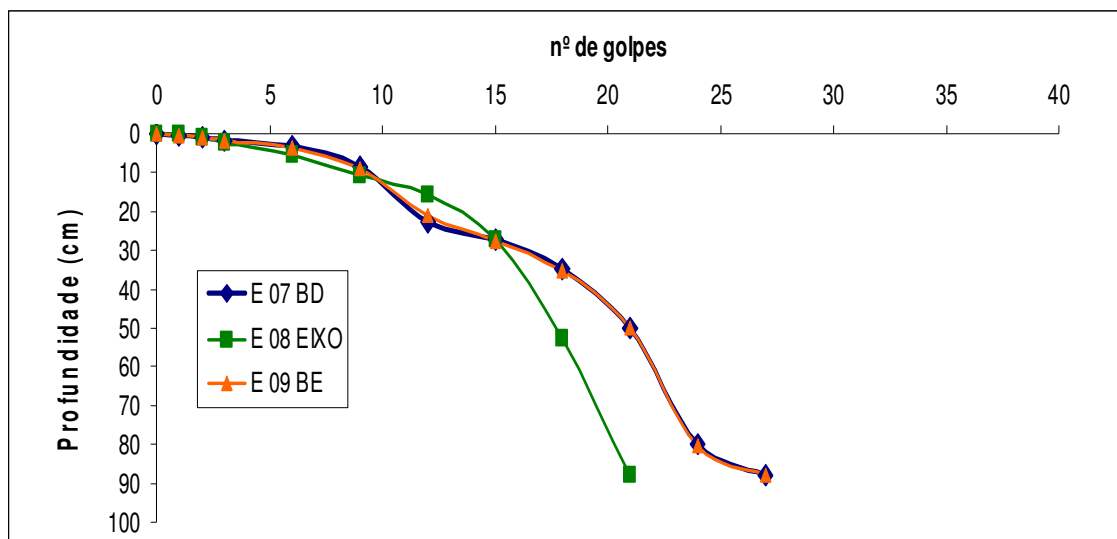


Figura 4.34 – Curvas DCP para o trecho solo-brita após regularização do subleito.

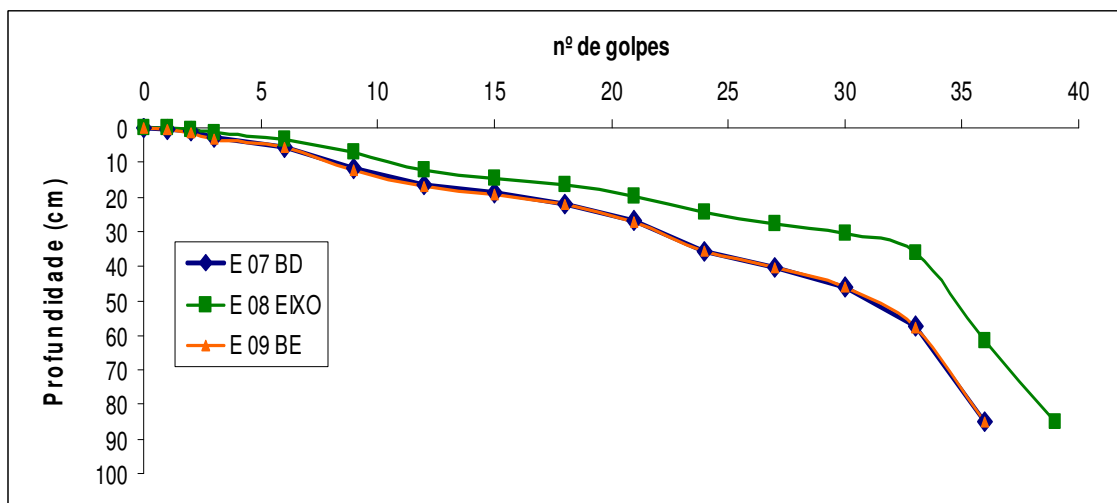


Figura 4.35 – Curvas DCP para o trecho solo-brita após execução da base.

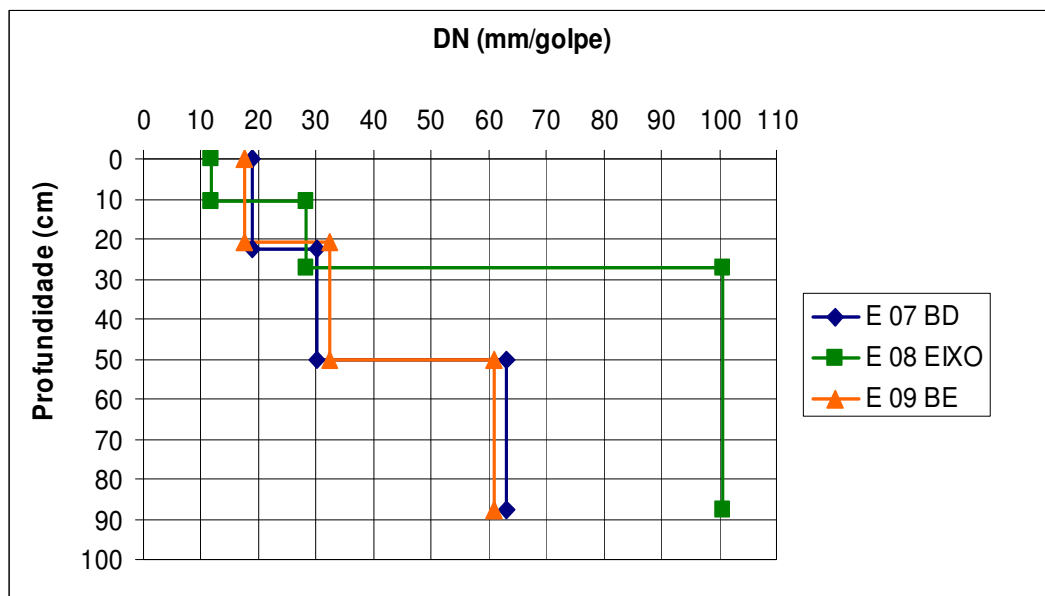


Figura 4.36 – Diagrama Estrutural no ensaio de DCP no trecho solo-brita após a execução do subleito.

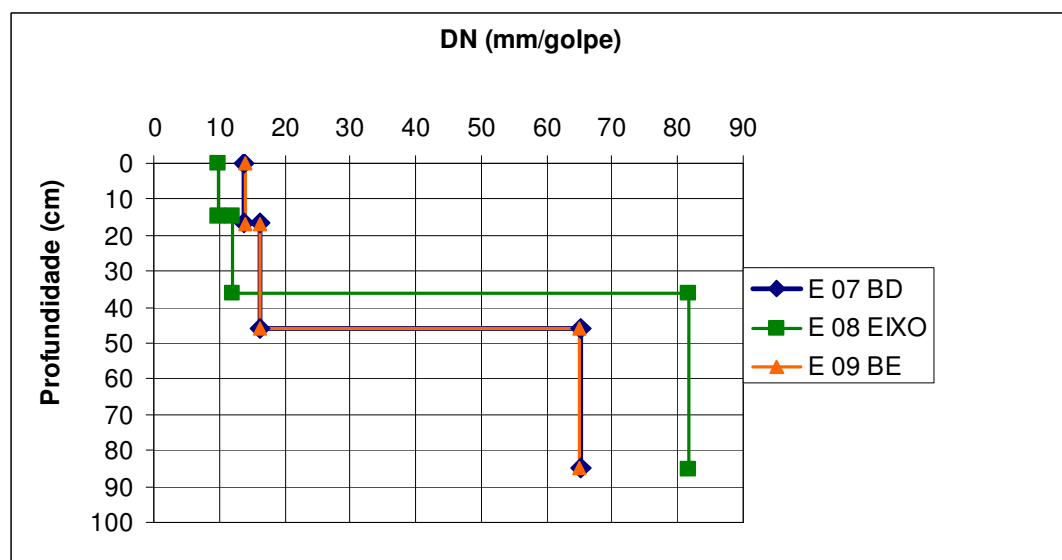


Figura 4.37 – Diagrama Estrutural no ensaio de DCP no trecho solo-brita após a execução da base.

Utilizando as mesmas correlações entre DN e CBR aplicadas para as análises realizadas no sub-trecho solo-pó de micaxisto, na Tabela 6.14 tem-se os valores de CBR determinados para o subleito do sub-trecho composto por solo-brita 1.

Tabela 4.14 - Valores de CBR obtidos por correlação de três autores para o subleito.

Camada	Estaca		Espessura (cm)	DN (mm/golpe)	CBR		
					Heyn	ITA	Lopes
SUBLEITO	E 17 BD	1	22,7	18,9	9,7	13,8	11,7
		2	27,3	30,3	5,3	8,4	-
		3	37,8	63,0	2,0	3,9	-
	E 18 EIXO	1	22,3	11,7	18,2	23,0	22,4
		2	16,9	28,2	5,8	9,1	-
		3	60,4	100,7	1,1	2,4	-
	E 19 BE	1	21	17,5	10,7	15,0	13,8
		2	29,2	32,4	4,8	7,8	-
		3	37,6	61,0	2,1	4,0	-

Obs: BE = bordo esquerdo; BD = bordo direito; DN = índice de penetração obtido com ensaio de DCP.

Com os dados obtidos na Tabela 4.14, observa-se que para as correlações utilizadas, o CBR apresentou melhores valores para a primeira camada do material compactado na estaca 18 eixo. Os demais valores encontrados estão em sua maioria abaixo de 10%, ilustrando uma menor capacidade de suporte desta camada (subleito natural).

Para avaliação dos valores de CBR em relação ao DN da camada de base da mistura (solo-brita 1) empregada nesse sub-trecho, além da correlação de Oliveira e Vertamtti (1997 *apud* RESPLANDES, 2007) citadas anteriormente, utilizou-se a correlação elaborada por Angelone *et al.* (1991 *apud* RIBEIRO, 2006), através de ensaios realizados na Argentina, obtendo a Equação 4.4:

$$CBR = 450 \times (DN)^{-1,05} \quad (4.4)$$

onde: *CBR* e *DN* são variáveis já definidas anteriormente.

A terceira correlação utilizada para avaliação da base, consiste na Equação 4.5 formulada nos estudos de Harison (1987 *apud* RIBEIRO, 2006):

$$\log(CBR) = 2,81 - 1,32 \times (\log DN) \quad (4.5)$$

onde: *CBR* e *DN* são variáveis já definidas anteriormente.

Os resultados encontrados para a camada de base desse sub-trecho (solo-brita 1) são apresentados na tabela 4.15.

Tabela 6.15 - Valores de CBR obtidos por correlação de três autores para a base.

Camada	Estaca		Espessura (cm)	DN (mm/golpe)	CBR		
					Heyn	O. e V.	Harison
BASE	E 17 BD	1	16,6	13,8	28,5	19,2	20,1
		2	29,2	16,2	24,1	16,3	16,3
		3	39,2	65,3	5,6	3,7	2,6
	E 18 EIXO	1	14,7	9,8	41,0	27,7	31,7
		2	21,4	11,9	33,4	22,6	24,6
		3	49	81,7	4,4	2,9	1,9
	E 19 BE	1	16,9	14,1	28,0	18,9	19,7
		2	29,1	16,2	24,2	16,3	16,4
		3	39	65,0	5,6	3,7	2,6

Obs: BE = bordo esquerdo; BD = bordo direito; DN = índice de penetração obtido com ensaio de DCP, O. e V. = Oliveira e Vertamti.

Os resultados obtidos mais expressivos foram para correlação proposta por Heyn, com uma média de CBR = 32,5 %, não se aproximando muito dos valores de CBR obtidos em laboratório (45,3 % - intermediária e 56,2 % - modificada). Este fato pode ser explicado devido os materiais estudados não se enquadrarem aos materiais originais que foram utilizados para o desenvolvimento das correlações utilizadas.

4.3.3.3 Sub-Trecho Cascalho

A Tabela 4.16 e as Figuras 4.38 a 4.41, demonstram os resultados da profundidade, espessura e DN (índice de penetração) obtidos no ensaio de Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP) para o sub-trecho 3 (cascalho). Em termos de espessura compactada, o subleito desse sub-trecho obteve um valor médio de 19,1 cm, representando a camada superficial que foi compactada. Para essa primeira camada foi encontrado um valor médio de 14,6 mm/golpes para DN.

Os ensaios realizados sobre a base evidenciaram a existência de três camadas (base, sub-base e subleito) com as seguintes médias de espessuras: 11,8 cm; 20,7 cm; 52,9 cm, respectivamente. Assim, não foi possível obter espessuras de camadas iguais àsquelas determinadas no projeto da pista. Provavelmente, o DCP não tem sensibilidade suficiente para distinguir a transição de camadas executadas com o mesmo material, como é o caso da base e

da sub-base desse sub-trecho. Na curva da Figuras 4.38 observa-se um comportamento distinto para as curvas dos bordos, diferentemente do que ocorre no ensaio executado sobre a base (Figura 4.39).

Tabela 4.16 – Resultados obtidos no ensaio de DCP para o trecho cascalho.

Camada	Estaca	Profundidade (cm)	Espessura (cm)	DN (mm/golpe)
SUBLEITO	E 17 BD	1	23,2	19,3
		2	51,2	31,1
		3	85	56,3
	E 18 EIXO	1	14,2	7,9
		2	31	11,2
		3	87	63,1
	E 19 BE	1	20	16,7
		2	49,2	32,4
		3	86,9	62,8
BASE	E 17 BD	1	13,6	7,6
		2	35,2	14,4
		3	84	54,2
	E 18 EIXO	1	10	6,7
		2	31	11,7
		3	88	63,3
	E 19 BE	1	11,8	5,0
		2	31,3	19,4
		3	84,2	65,0

Obs: BE = bordo esquerdo; BD = bordo direito; DN = índice de penetração obtido com ensaio de DCP.

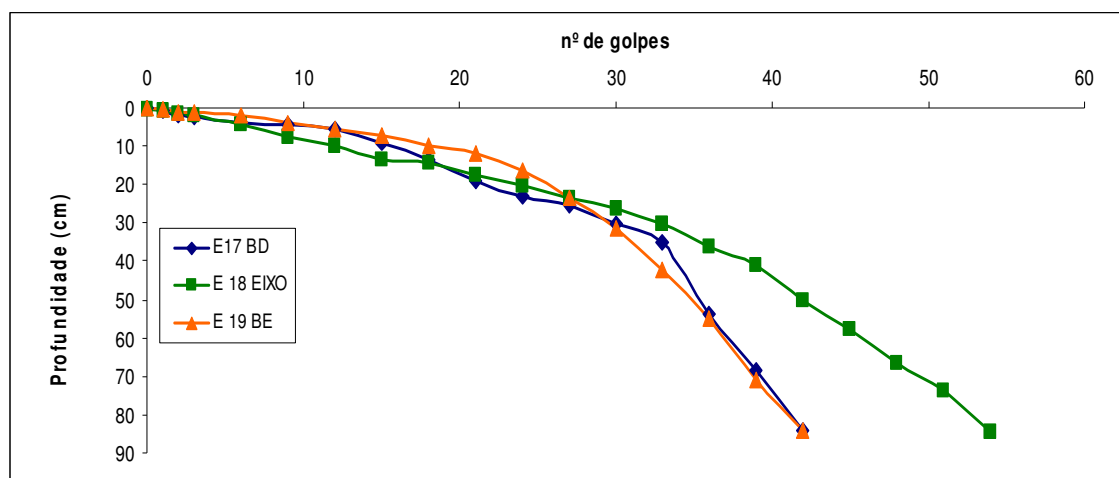


Figura 4.38 – Curvas DCP para o trecho cascalho após execução da base.

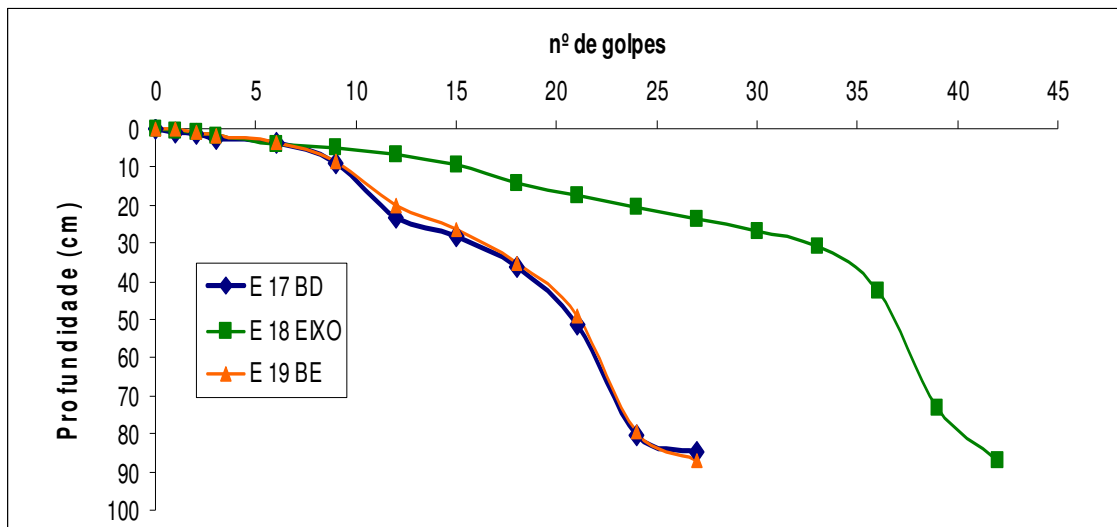


Figura 4.39 – Curvas DCP para o trecho cascalho após construção do subleito.

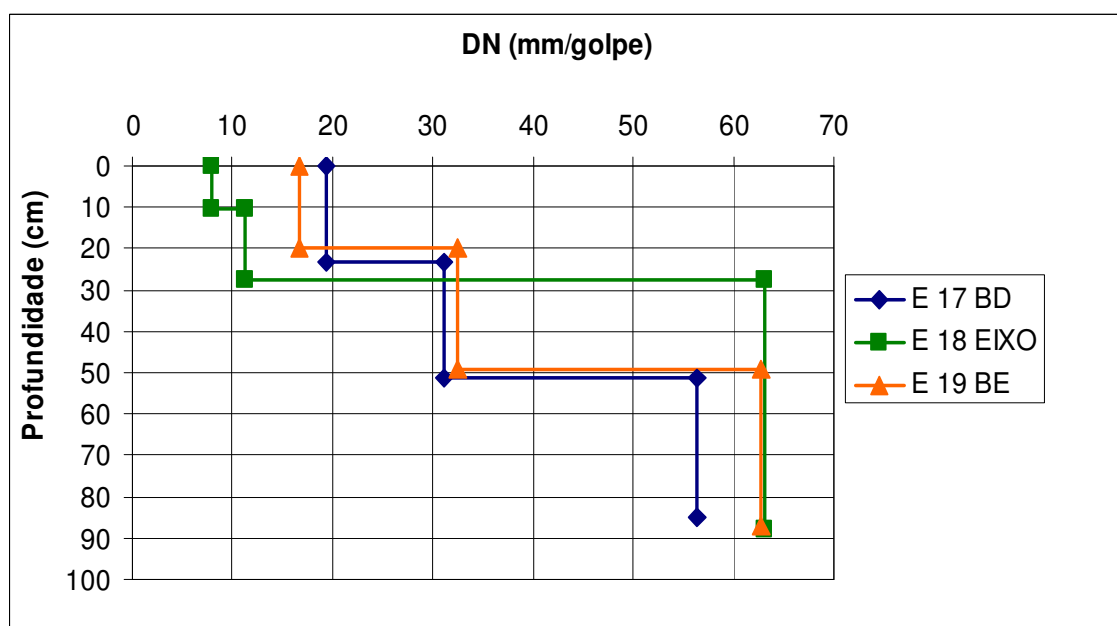


Figura 4.40 – Diagrama Estrutural no ensaio de DCP no trecho cascalho após a execução da base.

Nas Figuras 6.39 e 6.40, representando os diagramas estruturais das camadas compactadas, é possível observar a discrepância de espessuras das camadas encontradas para o sub-trecho executado com cascalho.

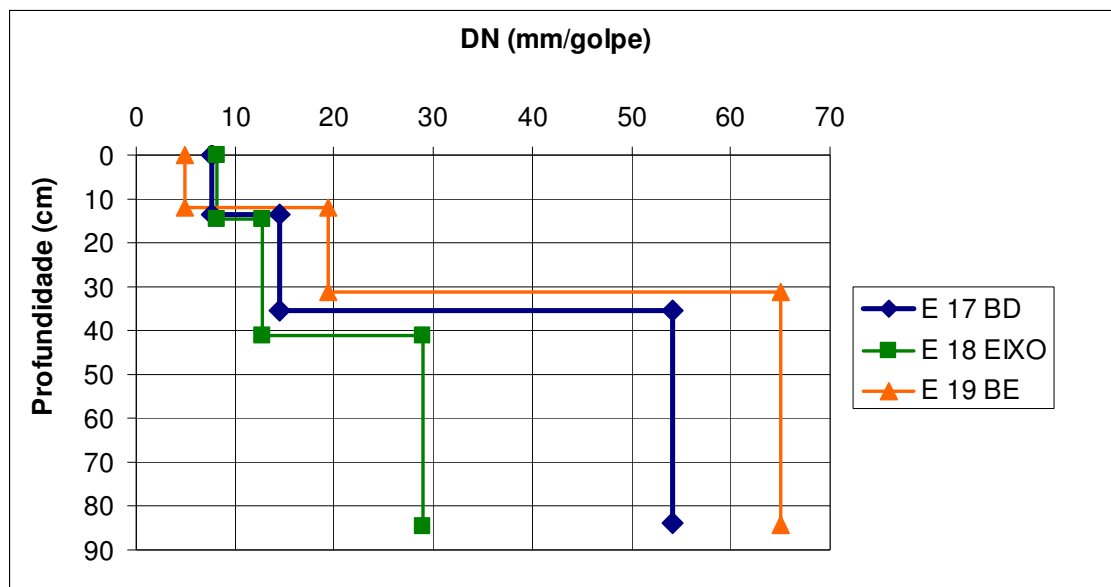


Figura 4.41 – Diagrama Estrutural no ensaio de DCP no trecho cascalho após a execução da base.

Utilizando as mesmas correlações entre DN e CBR aplicadas para as análises realizadas nos sub-trechos citados nos itens anteriores, foram estabelecidos os valores de CBR para o sub-trecho construído com cascalho. Na Tabela 4.17 tem-se os valores de CBR determinados para o subleito deste sub-trecho.

Tabela 4.17 – Valores de CBR obtidos por correlação de três autores para o subleito.

Tabela 11.1 - Valores de CBR obtidos por comparação de dois autores para o subleito.							
Camada	Estaca		Espessura (cm)	DN (mm/golpe)	CBR		
					Heyn	O. e V.	Lopes
SUBLEITO	E 17 BD	1	23,2	19,3	9,4	13,5	11,1
		2	28	31,1	5,1	8,2	-
		3	33,8	56,3	2,3	4,4	-
	E 18 EIXO	1	14,2	7,9	30,3	34,8	28,0
		2	16,8	11,2	19,2	24,0	23,1
		3	56	63,1	2,0	3,9	-
	E 19 BE	1	20	16,7	11,4	15,8	15,0
		2	29,2	32,4	4,8	7,8	-
		3	37,7	62,8	2,0	3,9	-

Obs: BE = bordo esquerdo; BD = bordo direito; DN = índice de penetração obtido com ensaio de DCP.

- valores não detectados pela correlação, O. e V. = Oliveira e Vertamti.

Observa-se na Tabela 4.17, que a correlação proposta por Lopes *et al.* (2007) para o subleito não gerou bons resultados, sendo obtido apenas valores para a primeira camada compactada.

Na análise da correlação de DN x CBR para materiais granulares, foram utilizadas as equações, descrita por Heyn (1986 *apud* RESPLANDES, 2007), por Harison (1987 *apud* RIBEIRO, 2006), já demonstradas anteriormente, e ainda a Equação 4.8 descrita por Lopes (2007). Na Tabela 4.18 estão os resultados de CBR obtidos utilizando as correlações.

$$\text{CBR (\%)} = -10,547 \times \text{Ln}(\text{DN}) + 140,71 \quad (4.6)$$

onde: *CBR* e *DN* são variáveis já definidas anteriormente.

Tabela 4.18 – Valores de CBR obtidos por correlação de três autores para a base.

Camada	Estaca		Espessura (cm)	DN (mm/golpe)	CBR		
					Heyn	Harison	Lopes
BASE	E 17 BD	1	13,6	7,6	32,0	44,7	119,4
		2	21,6	14,4	13,8	19,1	112,6
		3	48,8	54,2	2,5	3,3	98,6
	E 18 EIXO	1	10	6,7	37,7	52,8	120,7
		2	21	11,7	18,2	25,2	114,8
		3	57	63,3	2,0	2,7	97,0
	E 19 BE	1	11,8	5,0	54,7	77,2	123,7
		2	19,5	19,4	9,4	12,8	109,4
		3	52,9	65,0	2,0	2,6	96,7

Obs: BE = bordo esquerdo; BD = bordo direito; DN = índice de penetração obtido com ensaio de DCP.

Os valores encontrados por meio das correlações de Heyn e Harison demonstraram-se mais próximos dos valores observados em laboratório para esse material. Os valores obtidos pela correlação de Lopes *et al.* (2007) mostraram-se super estimados, fugindo do comportamento observado para as demais correlações utilizadas.

Exceto pela camada que representa a sub-base da estaca 19, todos os valores de CBR encontrados ficaram acima de 10 %. Os melhores valores de CBR foram encontrados para a estaca 19, bordo esquerdo, apresentando valores acima de 54 % para a base.

4.3.4 Comparação entre os Sub-Trechos

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de campo, pode-se concluir que as amostras estudadas apresentam potencial para serem utilizadas na construção de pavimentos flexíveis.

Os ensaios de frasco de areia e *Speedy* demonstraram um controle de execução satisfatório em todos os sub-trechos construídos, onde o cascalho demonstrou um melhor desempenho em termos de grau de compactação, seguido do pó de micaxisto (20%) e solo-brita, ambos com um GC médio de 100 %.

No ensaio de prova de carga sobre placa, realizado sobre todas as camadas dos sub-trechos construídos, foi possível observar a existência de uma oscilação entre os valores obtidos para d_t e d_e em todos os sub-trechos, mesmo assim, os valores encontrados para esses parâmetros foram baixos, indicando com isso um bom comportamento estrutural dos pavimentos executados. Outro aspecto visualizado neste ensaio foi a influência do confinamento das camadas sobre o grau de resistência das mesmas. Foi observado um aumento no valor de d_t para o bordo direito (não confinado) em relação aos demais. Analisando os valores obtidos neste ensaio para o subleito, pode-se constatar que no sub-trecho composto pela mistura solo-brita, foram encontrados os valores mais elevados de d_t , o que refletiu nos valores desse índice encontrados para as demais camadas desse sub-trecho.

Outro detalhe observado no ensaio de prova de carga sobre placa foi o ganho de resistência devido a presença da camada de revestimento (CBUQ). Esse aumento foi constatado em todos os sub-trechos.

Para o ensaio do penetrômetro dinâmico de cone, verificou-se em todos os sub-trechos a não obtenção das espessuras das camadas conforme o determinado no projeto executivo dos pavimentos, podendo ser visualizada nos diagramas de estruturais do DCP. Uma explicação apontada para tal fato é a possível falta de sensibilidade do equipamento para o reconhecimento da mudança dos materiais presentes em cada camada executada, como por exemplo, as camadas de sub-base e base do sub-trecho 1 (solo-pó de micaxisto). Para as correlações de DN x CBR realizadas tem-se resultados de CBR mais próximos dos encontrados em laboratório, para a base do sub-trecho executado com cascalho, utilizando para tanto, correlações obtidas para materiais granulares.

Capítulo 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÕES

O aumento da demanda por agregado para construção civil tem provocado uma expansão no número de pedreiras nas áreas periféricas dos grandes centros urbanos, refletindo de forma direta, no aumento do volume de resíduos oriundos do processo de britagem da rocha para a obtenção desses materiais. Por não haver um mecanismo capaz de absorver esse resíduo gerado, os mesmos são armazenados em pilhas nas áreas das pedreiras, gerando dessa forma uma série de danos sócio-ambientais indesejados, conhecidos com externalidades.

Aliado a esse crescimento do consumo de agregado, observa-se uma igual expansão na ocupação territorial dos grandes centros, de forma desordenada, que reduz cada vez mais a distância entre os aglomerados urbanos e as pedreiras. Essa proximidade faz com que as externalidades provocadas pela presença dessa atividade produtiva, sejam sentidas com mais intensidade, surgindo com isso, conflitos entre os moradores circunvizinhos e as mineradoras. Esta situação pode ser constatada no eixo Goiânia-Brasília, terceiro maior consumidor de agregados do país.

Com os dados obtidos a partir de ensaios de laboratório realizados nesta pesquisa tem-se que:

- Avaliando as curvas granulométricas dos materiais estudados, conclui-se que o pó de micaxisto (Amostra 1) demonstrou apresentar baixo teor de finos, sendo enquadrado como uma areia pedregulhosa. Ainda para a Amostra 1, ficou evidente com o uso do defloculante, a inexistência de aglomeração entre as partículas do material. O solo utilizado enquadrou-se com uma areia argilo-siltosa. Nas Amostras 2 (20% pó de micaxisto + 80% solo) e 3 (30% pó de micaxisto + 70% solo) foi verificada a alteração granulométrica sofrida pelo incremento progressivo do resíduo ao solo, mudando de um material argilo-siltoso para silto-arenoso, respectivamente. Para o cascalho utilizado (Amostra 5), observou-se um material granular, mal distribuído e

com baixa porcentagem de finos. Na mistura solo-brita 1 (Amostra 6) também foi observada uma má distribuição granulométrica devido o uso apenas da brita 1 adicionada ao solo;

- A massa específica dos grãos, para as Amostras 4 (solo) e 5 (cascalho) com valores acima de 2,80, indicou a presença de óxido de ferro, podendo caracterizá-los como materiais laterizados. O pó de micaxisto obteve os menores valores de massa específica, e o acréscimo desse material ao solo ocasionou uma redução dos valores obtidos para as Amostras 2 e 3, em relação a Amostra 4;
- O pó de micaxisto não apresenta limites de consistência, devido a baixa trabalhabilidade do material. Neste sentido, quando do aumento desse resíduo ao solo, constatou-se uma redução na plasticidade, se comparado ao solo puro (Amostra 4), como observada nas Amostras 2 (20% pó de micaxisto + 80% solo) e 3 (30% pó de micaxisto + 70% solo). A presença de finos na brita devido a mesma não ter sido lavada, foi observado valores inferiores aos da Amostra 4 (solo) para a Amostra 6 (solo-brita 1);
- O pó de micaxisto sozinho (Amostra 1) demonstrou-se de difícil trabalhabilidade, não sendo possível dessa forma realizar o ensaio de compactação nas energias Proctor intermediária e modificada para esse material. Quando da dosagem do mesmo ao solo, foi constatado uma redução para os valores de umidade ótima seguido de um incremento para os valores de peso específico aparente seco máximo, como observado nas misturas representadas pelas Amostras 2 e 3. O mesmo comportamento também foi constatado para Amostra 6 (solo-brita);
- Foram obtidos valores baixos de expansão para todos os materiais estudados;
- Devido a impossibilidade da realização do ensaio de compactação para Amostra 1 (pó de micaxisto), pode-se dizer que o mesmo não apresenta capacidade de suporte, não podendo, portanto, ser empregado sozinho em obras de pavimentação. Para os materiais compactados na energia Proctor Intermediária, constata-se que com exceção da Amostra 4, todas as amostras apresentam potencialidade de aplicação, podendo ser utilizadas em camadas de sub-base de pavimentos ($\text{CBR} \geq 20\%$). Na energia Proctor modificada, exceto a Amostra 4 (solo), poderiam ser empregadas na execução de sub-base e base de vias de baixo volume de tráfego, apresentando valores de $\text{CBR} > 40\%$. Contudo, a Amostra 5 (cascalho) demonstrou ter a melhor capacidade de suporte em ambas às energias de compactação utilizadas, justificando

com isto, o motivo do uso predominante deste material nas obras de pavimentação, culminando no atual estado de escassez dessa matéria prima;

Nesta pesquisa, com os ensaios de campo realizados durante a execução do trecho experimental, conclui-se:

- Os sub-trechos apresentaram bom controle de compactação, sendo monitorados por meio dos ensaios de frasco de areia e *Speedy*, apresentando valores de Grau de Compactação (GC) acima de 95% para o sub-leito e 100% para sub-base e base. Contudo, pode-se observar valores inferiores de GC para o subleito do sub-trecho executado com a mistura solo-brita, indicando com isso a execução dessa camada fora da umidade ótima de compactação.
- No ensaio de prova de carga sobre placa, foram observados valores de d_t e d_c muito baixo, indicando um bom comportamento estrutural dos mesmos, sendo obtidos os menores valores desses parâmetros no sub-trecho executado com solo-resíduo (sub-base: 30% pó de micaxisto + 70% solo; base: 20% pó de micaxisto + 80% solo). No entanto, o ensaio demonstrou em todos os sub-trechos uma oscilação entre os valores obtidos para cada camada, sendo estabilizada após a execução do revestimento. Os valores inferiores foram obtidos em sua maioria no bordo direito, colocando em discussão a influência do confinamento da camada, com o aumento da sua resistência, visto que na maior parte do trecho o bordo direito não foi executado em confinamento.
- O ensaio com o Penetrômetro Dinâmico de Cone comprovou o ganho de resistência do pavimento quando o mesmo é submetido ao trincamento, segundo a metodologia descrita por Nogami e Villibor (1995). É possível identificar em todos os sub-trechos uma camada com espessura variando entre 5,0 a 9,0 cm com uma resistência superior as demais. Também para todos os sub-trechos, o ensaio não detectou as espessuras de camadas especificadas e executadas conforme projeto. A falta de sensibilidade do equipamento para distinguir a mudança da composição do material é apontada com a causa do comportamento apresentado. Esse comportamento é mais evidente no traçado dos diagramas estruturais. Por meio da relação profundidade x número de golpes, observa-se uma resistência uniforme entre os bordos e outra superior para o eixo, indicada por linhas mais alongadas;

- Os resultados de CBR obtidos por meio da correlação DN x CBR, que mais se aproximaram dos obtidos em laboratório, foram estabelecidos por meio das correlações para materiais granulares de Heyn (1986) e Harison (1987), para o sub-trecho executado com cascalho.

O sub-trecho construído com o cascalho obteve os melhores resultados, comprovando assim a eficiência desse material já consagrado na área da pavimentação. Contrariando os resultados obtidos em laboratório, o desempenho do sub-trecho executado com a mistura solo-pó de micaxisto (Amostras 2 e 3) apresentou ser superior a mistura solo-brita (Amostra 6). Porém, mediante ao problema de execução do subleito detectado no sub-trecho do solo-brita, não é possível afirmar com exatidão a superioridade da mistura das Amostras 2 e 3 em relação a da Amostra 6.

O resíduo de pedra, aqui denominado de pó de micaxisto, possui viabilidade técnica para ser utilizado na estrutura de pavimentos flexíveis. Foi observado o ganho de resistência quando do acréscimo desse resíduo ao solo tropical fino estudado. Dentre as porcentagens de resíduo estudado, a dosagem de pó de micaxisto que apresentou melhor desempenho foi de 20 %, sendo esta a proporção empregada na confecção da base do sub-trecho executado com esse material. Contudo, sabendo que a dosagem de 30 % também oferece condições mecânicas para ser empregada na execução de sub-base, sobre o aspecto ambiental essa combinação de dosagens empregada no sub-trecho 1 torna-se mais eficiente, absorvendo um volume maior desse resíduo.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos dados obtidos nesta pesquisa, sugere-se a continuidade nesta linha, conforme listado a seguir:

- Realizar o monitoramento do trecho experimental periodicamente por meio de ensaios de campo;
- Realizar uma avaliação da viabilidade econômica do emprego do pó de micaxisto em relação aos materiais tradicionais utilizados;
- Realização de ensaios complementares tais como: microscopia eletrônica de varredura, módulo resiliente, metodologia MCT, entre outros, visando uma melhor caracterização do resíduo e das misturas estudadas;

- Avaliação mais específica do pó de micaxisto estudado, por meio de análise química, mineralógica, análise de sucção, que possam auxiliar na avaliação do comportamento do grau de saturação desse material e sua influência nos ensaios de compactação e CBR;
- Investigar a alteração da granulometria do material após a compactação tanto em laboratório quanto em campo, buscando identificar as principais consequências dessa alteração;
- Estudar o comportamento do pó de micaxisto para outros tipos de solo, buscando avaliar as dosagens ótimas do resíduo para os mesmos.
- Estudar o incremento de resistência da mistura solo-resíduo por meio do acréscimo de dosagens de cal ou cimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6459: *Solo – determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro. 1984a

_____. NBR 6502: *Rochas e solos*. Rio de Janeiro – RJ. 18p. 1995.

_____. NBR 6508: *Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm - determinação da massa específica*. Rio de Janeiro - RJ. 1984b

_____. NBR 6458. *Solo – Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8mm- Determinação da Massa Específica, da Massa Específica Aparente e da Absorção de Água*. Rio de Janeiro, 1984c.

_____. NBR 7180: *Solo – determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro - RJ. 1984c

_____. NBR 7181: *Solo – análise granulométrica*. Rio de Janeiro - RJ. 1984d

_____. NBR 7182: *Solo – ensaio de compactação*. Rio de Janeiro - RJ. 1984e

_____. NBR 7185: *Determinação da massa específica aparente, “in situ”, com emprego de frasco de areia*. Rio de Janeiro - RJ, 7 p. 1986.

_____. NBR 9895: *Solo – Índice de Suporte Califórnia*. Rio de Janeiro - RJ, 7 p. 1987.

AMARAL, S. C. *Estudo de misturas laterita - asfalto da região metropolitana de Belém-PA para revestimento de pavimento*. Tese de Doutorado. Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo. São Paulo-SP. 198p. 2004.

AMARAL, S. C. *Estudo da misturas asfálticas densas com agregado do Estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)*. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo. São Paulo-SP. 218p. 2000.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. *Variabilidade dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados*. e-Mat – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. Vol. 1, n. 1, p. 22-32, Maio 2004.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL - ANEPAC. *Mercado produtor de brita de Goiânia*. Areia & Brita, nº 26. Publicação trimestral – Abr/Mai/ Jun de 2004.

BACCI, D.L.C.; LANDIM, P.M.B.; ESTON, S.M. *Aspectos e impactos ambientais de pedreiras em área urbana*. R. Esc. Minas, Ouro Preto, 59(1): 47 – 54, jan. mar. 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rem/v59n1/v59n47a54.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2007.

BAPTISTA, C. N. *Pavimentação*. Tema II. 2ª Edição. Editora Globo. Rio de Janeiro. 1976. 275p.

BATALIONE, G. *Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedreira de uma rocha granítica*. Dissertação de Mestrado, Publicação GDM 158/07. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 172p.

BRASILEIRO, F.E. *Agregados lateríticos – Propriedades e uso em concretos betuminosos usinados a quente*. 1990, 10º. Anais do 10º Encontro de Asfalto do IBP, p.147-154. 1990.

BRITO, J. A. *Cidade versus entulho*. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1999, São Paulo, Anais eletrônicos do 2º SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. [CD ROM]. São Paulo: Comitê Técnico CT 206 Meio Ambiente (IBRACOM), 1999. p. 56-67.

CANUT, M. M. C. *Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte - MG. 154p. 2006. Disponível em: <<http://www.pos.demc.ufmg.br/Defesas/Mariana/Disserta%E7%E3o%20final1.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2007.

CAPUTO, H. P. *Mecânica dos Solos e suas Aplicações*. 3ª Edição. Vol. 1. Ed. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro. 1973. 242p

CARNEIRO, A.P. *et al. Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção*. Salvador. Ed. EDUFBA. 2001. 312 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 307 de 5 de julho de 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 2 out. 2006.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Ministério do Meio Ambiente. Resolução Nº. 010 de 6 de dezembro de 1990. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res90/res1090.html>>. Acesso em: 5 out. 2007.

CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E AGRONOMIA DE GOIÁS – CREA/GO. *Sem destino – Construção civil gera em Goiânia, quase 500 mil toneladas de rejeitos por ano, mas a cidade ainda não tem plano de gestão para o setor*. Revista do CREA-GO. Ano II, nº. 3. Abr, 2007.

D'AGOSTINO, L.Z.; SOARES, L. *Preparo de argamassas com emprego de finos de pedreira*. In: IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclados e suas Aplicações, 2001, São Paulo. Anais eletrônicos do IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. São Paulo,

2001, n.p. Disponível em: <
<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/Anais%20Comite%20CT%202006%20%20IV%20-%20semin%C3%A1rio.pdf>>. Acesso em: 30 mai. 2007.

Decreto Federal 97.632, de 10 de abril de 1989. *Dispõe sobre a regulamentação do artigo 2º, Inciso VIII, da Lei No.6.938, de 31 de agosto de 1981, e dá outras providências.* Disponível em: <
http://sigam.ambiente.sp.gov.br/Sigam2/legisla%C3%A7%C3%A3o%20ambiental/decreto%20federal%201989_97632.pdf>. Acesso em: 2 out. 2007.

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA TERRA DA UNIVERSIDADE DE MINHO (DCT/UM). *Rochas Metamórficas*. Materiais e Recursos Geológicos – Lic. em Geografia e Planejamento. Notas de aula. Disponível em: < http://www.dct.uminho.pt/docs/mat_rec/7.pdf >. Acesso em: 15 mai. 2007.

DIAS, E. G.C.S. *Avaliação de impacto ambiental de projetos de mineração no Estado de São Paulo: a etapa de acompanhamento*. Tese Doutorado. Engenharia Mineral. Universidade de São Paulo, São Paulo - SP. 2001.

DIAS, C.R.C. *Estudo de misturas de areia-asfalto e cinza-cal para emprego em pavimentos urbanos*. Dissertação de Mestrado. Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 127p. 2004. Resumo.

DIAS, C.R.C.; DIAS, C.R.R.; CERATTI, J.A. *Soluções para pavimentos urbanos utilizando resíduos industriais e solos locais*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 36. 2005, Curitiba. Anais eletrônicos do 36^a Reunião Anual de Pavimentação [CD-ROM]. Curitiba, 2000. n.p.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. *Agregados para a construção civil*. 2001. Disponível em:
 <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/agregados.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2007.

DER/SP - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. *Projeto – Projeto de pavimento*. Disponível em:
 <http://www.der.sp.gov.br/_informativos/normas_projetos_conteudo/normas_pav01.asp>. Acesso em: 28 ago. 2006.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER-ME 024. *Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman*. 1994a. Disponível em:<
http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/normas/metodo.htm>. Acesso em: 05 set. 2006.

_____. DER-PR. *Pavimentação: pavimento rígido*. 2005. Disponível em: <
http://www.pr.gov.br/derpr/pdf/PDF/pdf_Pavimentacao/ES-P35-05PavimentoRigido.pdf >. Acesso em: 24 abr. 2007.

_____. DNER – PRO 175. *Aferição de Viga Benkelman*. 1994b

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. NORMA DNIT 061/2004 – TER. *Pavimento rígido – Defeitos – Terminologia*. Disponível em:

<http://www.dnit.gov.br/menu/servicos/ipr/produtos/arquivos/DNIT061_2004_TER.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2007.

FARIAS, C.E.G. *Mineração e Meio Ambiente no Brasil. Relatório*: preparado para o CGEG. 2002. 40p. Disponível em:< http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo011_02.pdf>. Acesso em 15 mai. 2007.

KOBAYASHI, A. R. K. *Avaliação o tipo de cimento na expansibilidade de misturas de fosfogesso e cimento*. Dissertação de mestrado – São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 113p. 2000.

KUMAR, P.; CHANDRA, S. VISHAL, R. *Comparative Study of Different Subbase Materials*. Journal of Materials in Civil Engineering. American Society of Civil Engineers – ASCE. July/August 2006. Disponível em: <<http://ascelibrary.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=JMCEE700001800004000576000001&idtype=cvips>>. Acesso em: 06 dez. 2006.

LAMBE, W.T. *Soil Testing for engineerers*. 12. ed. New York. John Wiley & Sons, Inc. 1967. 165p.

LEANDRO, R.P.; FABBRI, G.T.P. *Utilização de cinza pesada do carvão mineral em bases e sub-bases de pavimentos*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 36., 2005, Curitiba. Anais eletrônicos do 36^a Reunião Anual de Pavimentação [CD-ROM]. Curitiba, 2005. n.p.

LIMA, L.C. *O ensaio DCP aplicado no controle de qualidade de compactação de obras viárias executadas com solos lateríticos de textura fina*. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infra-Estrutura de Transporte) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2000. Disponível em: <http://www.bd.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=000450964>. Acesso em: 05 set. 2006.

LUZ, M. P., SILVA, A. L. A., ARAUJO, W. E. L., MAIA, C. H. *Avaliação preliminar da utilização de resíduo de pedra dosado no solo em pavimentação flexível urbana na região metropolitana de Goiânia*. In: Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 8., 2005, Rio de Janeiro. Anais eletrônicos do VIII ENGEMA - Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente [CD-ROM]. Rio de Janeiro, 2005. n.p.

LUZ, M. P., CASTRO, S. S.; REZENDE, L. R.; ARAUJO, W. E. L.; MAIA, C. H.; SILVA, W. S. *Análise da Viabilidade Técnica da Utilização de Rejeito de Pedreira Dosado ao Solo como Material de Pavimentação*. In: Jornada Científica da Engenharia da Universidade Católica de Goiás – UCG., 4., 2006, Goiânia. n. p. (No prelo)

MACHADO, L.A.; MEDEIROS, I.; HIGASHI, R.R.; LIMA, T. L.; SILVA, V.M.; SPRICIGO, T.; VEZZARO, L.C. *Resistance test in soil/bottom ash aiming its aplicability in paving* . In: International Symposium on Pavement Recycling, 2005, São Paulo. Anais eletrônicos do International Symposium on Pavement Recycling [CD-ROM]. São Paulo, 2005. n.p.

MARTINHO, F. G.; RAMOS, C. R.; LÁO, V. L. E. S. *Controle alternativo com emprego da viga Benkelman*. 36ª Reunião Anual de Pavimentação. Curitiba/PR, 2005.

MAZUMDER, A.R.; KABIR, A.; YAZDANI, P.E. *Performance of Overburnt Distorted Bricks as Aggregates in Pavement Works*. Journal of Materials in Civil Engineering. American Society of Civil Engineers – ASCE. November/December 2006. Disponível em: <<http://ascelibrary.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=JMCEE7000018000006000777000001&idtype=cvips>>. Acesso em: 16 dez. 2006.

MESQUITA, G.M.; REZENDE, L.R. *Aplicação de misturas de fosfogesso em solos tropicais finos na pavimentação*. In: CONGRESSO DE PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO DA UFG – CONPEEX, 2., 2005, Goiânia. Anais eletrônicos do XIII Seminário de Iniciação Científica [CR-ROM]. Goiânia: UFG, 2005, 3.p.

MESQUITA, G.M. *Aplicação de misturas de fosfogesso e solos tropicais finos na pavimentação*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente – PPGEMA. Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia – GO. 144p. 2007.

MICAXISTO. *Rochas metamórficas*. 2007. Disponível em: <<http://www.eb23paranhos.rcts.pt/Pagina%20Internet/micaxisto.html>>. Acesso em: 15 mai. 2007.

NASCIMENTO, J. F. *Estudo da Expansibilidade em Escória de Aciaria para Uso em Pavimentação Rodoviária*. Dissertação de Mestrado. Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG. 197p. 2003. Disponível em: <<http://www.desa.ufmg.br/sigers/rsi-minimizacao.htm#>>. Acesso em: 16 dez. 2006. Resumo.

NOGAMI, J.S; VILLIBOR, D.F. *Características e desempenho de segmentos de pavimentos rodoviários com base em argila laterítica*. In: 24ª. Reunião Anual de Pavimentação, 24., Belém. Anais eletrônicos da 24ª. Reunião Anual de Pavimentação [CD-ROM]. Belém, PA. 1990. 1: 291 - 304.

NOGAMI, J.S.& VILLIBOR, D.F. *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. Vilibor, São Paulo, SP. 1995. 213 p.

OLIVEIRA, J. C.; REZENDE, L. R.; GUIMARÃES, R. C.; CAMAPUM, J. C.; SILVA, A. L. A. *Evaluation of a flexible pavement executed with recycled aggregates of construction and demolition waste in the municipal district of Goiânia – Goiás*. In: International Symposium on Pavement Recycling, 2005, São Paulo. Anais eletrônicos do International Symposium on Pavement Recycling [CD-ROM]. São Paulo - SP, 2005. n.p.

OLIVEIRA, C.; ARAÚJO, A.P.; MAZUR, N. *Fundamentos da ciência do solo IA 321 – Roteiro de Aulas práticas*. Seropédica – RJ, 2002. 48p. Notas de aula. Disponível em: <<http://www.ia.ufrj.br/ds/IA321.pdf>>. Acesso em 17 mai. 2007.

PAGNUSSAT, D. T. *Utilização de Escória Granulada de Fundação (EGF) em Blocos de Concreto para Pavimentação*. Dissertação de Mestrado. Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 132p. 2004. Resumo.

PALOCCI, L. P.; VARGAS, C. A. L. *Desenvolvimento e Utilização da Viga Benkelman*. In: CONGRESSO DE PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO DA UFG - CONPEEX, 2., 2005, Goiânia. Anais eletrônicos do XIII Seminário de Iniciação Científica [CD-ROM]. Goiânia, 2005. Disponível em:

http://www.ufgvirtual.ufg.br/conpeex2005/resumos_expandidos/porta_arquivos/pibic_pivic/LucasdePaulaPalocci_Desenvol.pdf. Acesso em: 05 set. 2006.

PARENTE, E. B, BOAVISTA, A.H., SOARES, J. B. *Estudo do comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria para aplicação na construção rodoviária na região metropolitana de Fortaleza*. ANPET, Rio de Janeiro Vol. 1. 2003.

PARREIRA, A. B. ; TAKEDA, M. C. *The use of cement-stabilized phosphogypsum mixes in road construction*. In: GeoEng - An international Conference on Geotechnical & Geological Engineering, 2000, Melbourne, 2000. Disponível em: <<http://lib.hpu.edu.cn/geoeng/PAPERS/EG/EG0966.PDF> >. Acesso em: 19 abr. 2007.

PISSATO, E. *A utilização de finos de pedra em solo-cimento ensacado*. Dissertação de Mestrado. Engenharia Mineral. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo. São Paulo-SP. 116p. 2001.

PISSTO, E.; SOARES, L. *Adição de finos de pedra em misturas de solo-cimento*. In: IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclados e suas Aplicações, 2001, São Paulo. Anais eletrônicos do IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. São Paulo, 2001, n. p. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/Anais%20Comite%20CT%20206%20%20IV%20-%20semin%C3%A1rio.pdf> >. Acesso em: 30 mai. 2007.

PORTAL DO CONCRETO. *Concreto para Pavimento Rígido*. Disponível em: <<http://www.portaldoconcreto.com.br/?pagina=pavimentos>>. Acesso em: 22 abr. 2007.

RESPLANDES, H.M.S. *Estudo ambiental e técnico da aplicação do agregado reciclado na estruturação de pavimentos flexível*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente – PPGEMA. Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia –GO. 210p. 2007.

REZENDE. L.R. *Técnicas alternativas para a construção de bases de pavimentos rodoviários*. Dissertação de mestrado, G. DM-055 A/99, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília – DF, 169p. 1999.

REZENDE, L.R. *Estudo do comportamento de materiais alternativos utilizados em estruturas de pavimentos flexíveis*. Tese apresentada na Universidade de Brasília. 2003. 372p. Brasília – DF.

RIBEIRO, F. *Estudo da aplicação do agregado reciclado na base de um pavimento flexível*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente – PPGEMA. Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia –GO. 159p. 2006.

ROHDE, L., CONSOLI, N.C., NÚÑEZ, W. P. *O uso da escória de aciaria como agregado para base e sub-base de pavimentos*. Relatório de teses e dissertações em andamento. ANPET, Campinas - SP. 2001.

SANTOS, A. J. G. *Avaliação do impacto radiológico ambiental do fosfogesso brasileiro e lixiviação de Ra-226 e Pb-210*. Tese de Doutorado – São Paulo. Tecnologia Nuclear, Universidade de São Paulo. 122p. 2002. Resumo.

SENÇO, W. DE. *Manual de técnicas de pavimentação*. Vol. I, Ed. Pini. São Paulo, 1997. 746p.

SILVA, A. L. A.; GUIMARÃES, R. C.; CASTRO, C. H.; MANSO, E. A. *Using building site waste in bases and sub-bases of flexible pavements*. In: International Symposium on Pavement Recycling, 2005, São Paulo. Anais eletrônicos do International Symposium on Pavement Recycling [CD-ROM]. São Paulo, 2005. n.p.

SILVA, P.A.D. *Estudos Geotécnicos na Recuperação Ambiental da Pedreira de Pirenópolis*. Dissertação de Mestrado, publicação GDM – 074A/00, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2000 141p. Disponível em: <<http://www.geotecnia.unb.br/>>. Acesso em: 22 fev. 2008.

SILVESTRE, O.B., PARREIRA, A. B., KOBAYASHI, A. R. K. *Influência do tipo de cimento na resistência e deformabilidade das misturas de fosfogesso e cimento*. ANPET, Rio de Janeiro - RJ. vol. 1. 2001.

SINDIBRITA - Sindicato das Empresas de Brita e Argila do Estado de Goiás e Indústrias. *Panorama do Mercado de Agregados para Construção Civil no Estado de Goiás*. 2007. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=1534>. Acesso em: 23 dez. 2007.

SOARES, L.; MENDES, K.S. *O aproveitamento de finos de pedreiras*. Relatório Técnico, Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 17p. 1999

TERRA PLANETA “VIVO”. *Rochas - metamorfismo*. 2007. Disponível em: <http://domingos.home.sapo.pt/rochas_3.html>. Acesso em: 15 mai. 2007.

VALLE, C.C.L. *Considerações geotécnicas na recuperação de uma área degradada por mineração de calcário*. Dissertação (Mestrado), G.DM.-062 A/99, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília – DF, 106p. 1999.

VILLIBOR, D.F., NOGAMI, J.S., BELIGNI, M. & CINCERRE, J.R. *Pavimentos com solos lateríticos e gestão de manutenção de vias urbanas*. Associação Brasileira de Pavimentação/ Universidade Federal de Uberlândia, São Paulo, SP. 2000. 138p.

ZORDAN, S.E. *A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto*. Campinas. 1997. 140p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP. Disponível em [http://www.reciclagem.pcc.usp.br/entulho_ind_ccivil.htm]. Acesso em: 27 jul. 2006.