

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

HELAINÉ DA MOTA SANTOS RESPLANDES

**ESTUDO AMBIENTAL E MECÂNICO DA
APLICAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO
NA ESTRUTURA DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS**

Goiânia
2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

HELAINÉ DA MOTA SANTOS RESPLANDES

**ESTUDO AMBIENTAL E MECÂNICO DA APLICAÇÃO DO
AGREGADO RECICLADO NA ESTRUTURA DE 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: Prof^a Dr^a. Lilian Ribeiro de Rezende

Goiânia
2007

CIP. Brasil. Catalogação - na - Fonte

R342e Resplandes, Helaine da Mota Santos.
Estudo ambiental e mecânico da aplicação do agregado reciclado na estrutura de pavimentos flexíveis / Helaine da Mota Santos Resplandes. – Goiânia, 2007.
206.f.: il., color., figs., tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2007.

“Orientação: Prof^ª. Dr.^ª Lilian Ribeiro de Rezende.”

Bibliografia: f. 193-201.

Inclui listas de figuras, tabelas e de abreviaturas e símbolos.
Apêndices.

1. Reciclagem – indústria da construção – Goiânia (GO). 2. Agregados (materiais de construção) – aspectos ambientais. 3. Agregados reciclados - pavimentação. 4. Resíduos industriais – construção civil. 5. Saneamento ambiental. 6. Engenharia ambiental. 7. Meio ambiente 8. Desenvolvimento sustentável. I. Título.

CDU: 628.4:504(817.3 Goiânia)

HELAINÉ DA MOTA SANTOS RESPLANDES

**ESTUDO AMBIENTAL E MECÂNICO DA APLICAÇÃO DO
AGREGADO RECICLADO NA ESTRUTURA DE 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 27 de Abril de 2007, pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof^ª Dr^ª Lilian Ribeiro de Rezende – UFG

(Orientadora)

Prof^ª Dr^ª Maria das Graças Gardoni de Almeida - UFG

(Examinadora Externa)

Prof. Dr. Edgar Bacarji – UFG

(Examinador Interno)

Goiânia
2007

Aos meus pais, Lino e Helena pela paciência, compreensão e por sempre terem apoiado e incentivado aos meus estudos, a minha irmã, Eliana, que a todos os momentos da minha vida esteve e estará ao meu lado e a meu esposo, Marcos, pelo apoio e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, toda honra e toda glória. O mestre por excelência por me proporcionar vida e oportunidade de aprender, dedicando os meus conhecimentos à defesa do meio ambiente.

Ao CNPq pela bolsa de mestrado.

A Professora Lilian Ribeiro de Rezende, pela oportunidade, paciência e confiança. Durante a nossa convivência aprendi muito com seus conhecimentos e sabedoria, espelharei em ti minha vida profissional.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação ao Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás e ao Professor Osmar Mendes pelos ensinamentos oportunos.

Aos colegas do curso pela amizade e colaboração recebida, principalmente, à Glaucia pelo companheirismo durante a execução dos ensaios e a Karla pela amizade durante todos esses anos.

Ao amigo Fabrício pela disponibilidade e preciosa contribuição na execução dos ensaios de campo e orientações afins.

Ao amigo João Carlos pelos dados disponíveis que enriqueceu minha pesquisa.

Aos técnicos do laboratório de solos da Universidade Federal, em especial ao Elias que com seu conhecimento contribui de maneira significativa para a execução dos ensaios de laboratório.

Ao Departamento de Estrada de Rodagem do Município de Goiânia (DERMU), à Companhia Urbana do Município de Goiânia (COMURG) e às Centrais de Abastecimento de Goiás S/A (CEASA) pelo apoio na realização dos ensaios de campo.

Ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Goiás, pela disposição dos equipamentos laboratoriais e de campo para a execução dos ensaios.

À Furnas Centrais Elétricas pela disponibilidade do material utilizado nos ensaios laboratoriais.

Enfim, a todos professores, funcionários e amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa.

Aos meus pais, Lino e Helena, por terem acreditado que a educação era o maior bem que poderiam me deixar como herança. Sei que não existem palavras que possam expressar a gratidão por tudo que fizeram para me ajudar a vencer os obstáculos, só posso dizer a vocês o quanto eu vos amo.

A minha querida irmã, Eliana, que sofre quando eu sofro, que sorri quanto estou contente... que não mediu esforços, quando o precisei e sempre está de braços abertos para me apoiar e me abraçar quando preciso.

Ao meu esposo, Marcos Antônio, quantas vezes deixou de trabalhar para me acompanhar nos ensaios de campo e nos momentos precisos. Vivemos a “loucura” dos preparativos para o casamento e ao mesmo tempo a “loucura” de um mestrado, mas enfim vencemos!

Aos meus familiares por fazerem parte da minha vida e me ensinar a acreditar que sempre é possível ir um pouco além, basta acreditar e querer.

RESUMO

A sociedade moderna possui, como uma de suas características, a elevada geração de resíduos. Neste aspecto, o destino dos resíduos sólidos da construção civil (RCC) torna-se uma das grandes dificuldades ambientais, econômicas e até sociais da atualidade. Portanto, a principal justificativa e relevância desta pesquisa é de cunho ambiental dado que a alta produção de resíduos e sua disposição indevida acabam trazendo sérios problemas ao meio ambiente. Assim, uma alternativa interessante para a utilização do RCC é a sua aplicação nas vias urbanas da cidade de Goiânia, já que 60% deste resíduo é passível de reciclagem. O objetivo principal desta pesquisa é avaliar, a partir de ensaios laboratoriais e de campo, a aplicação ambiental e técnica do agregado reciclado na estrutura de pavimentos flexíveis. Para com provar a situação da disposição final do RCC nesta cidade, foram realizadas vistorias em oito pontos, nos meses de abril, maio, dezembro de 2006 e abril de 2007. Para avaliar a questão técnica, foram realizados ensaios de campo em dois trechos experimentais executados com agregado reciclado nas camadas de base e sub-base de pavimentos. O comportamento desses trechos foi analisado por meio dos ensaios Viga Benkelman, prova de carga sobre placa e penetrômetro dinâmico de cone realizados em novembro de 2006. Com os dados obtidos foram executados procedimentos de retroanálises com o programa SIGMA/W para a determinação do módulo de elasticidade das camadas. Os resultados obtidos foram comparados com outras pesquisas anteriormente realizadas nos mesmos trechos experimentais. Foram, ainda, executados ensaios laboratoriais e ambientais para caracterização do solo e do agregado reciclado da construção civil. Com os dados obtidos pode-se verificar que os dois trechos experimentais apresentam, até o momento, bom desempenho, destacando, o trecho do CEASA que mostrou melhor comportamento do que o trecho do Recanto. Isto pode ter ocorrido pela falta de controle tecnológico rigoroso durante a construção do pavimento do trecho do Recanto. De uma maneira geral, conclui-se que a mistura de agregado reciclado e solo local possui propriedades físicas e mecânicas satisfatórias, comparáveis a materiais tradicionais. Em relação aos ensaios ambientais verificou-se que não há riscos de contaminação, pois os materiais foram classificados como não inerte, não-perigoso e Classe II-A, mostrando a viabilidade técnica e ambiental da utilização do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos de baixo a médio volume de tráfego. Se esta técnica for adotada em grande escala pelo município, os problemas detectados na vistoria poderão ser solucionados a curto prazo.

Palavras-Chave: Agregado reciclado. Pavimentação. Ensaios de laboratório. Ensaios de campo.

ABSTRACT

Modern society has, as one of its characteristics, high waste production. In this aspect, the fate of civil construction solid wastes (CCW) becomes one of the great environmental, economical and even social problems of the present time. Therefore, the main justification and relevance of this research has to do with the environment because of the great waste production and its improper disposal jeopardizing the environment. Therefore, an interesting alternative for the CCW is to use it in Goiânia's urban pavements, since 60% of this waste is susceptible to recycling. The main objective of this research is to evaluate, from laboratory and field tests, the environmental and technical applications of recycled aggregate in the structure of flexible pavements. To show the final disposal of CCW situation in Goiânia, inspections were done in eight locations in April, May, December 2006 and April 2007. To evaluate the technical subject, field tests were done in two experimental roads using recycled aggregate in the base and subbase pavements layers. The behavior of those roads was analyzed with Benkelman beam, test of plate load and dynamic cone penetration tests executed in November 2006. With these data, back analyses procedures were done with the SIGMA/W software to determine modules of elasticity of the layers. The results were compared with other tests previously done in the same experimental pavements. Laboratory and environmental tests were done on the soil and recycled aggregate characterization. One can verify that the two experimental roads present, until the moment, good behavior, emphasizing the CEASA segment that presented better behavior than the Recanto segment. This might have happened because of an inexistent rigorous technological control during the construction of the Recanto pavement. In a general way, one can note that the mixture of recycled aggregate and local soil has satisfactory physical and mechanical properties, comparing to traditional materials. In relation to the environmental tests it was verified that there are no risks of contamination, since the materials were classified as no inert, no-dangerous and Class II-A, showing the technical and environmental viability of the recycled aggregate use in base and subbase pavements layers with low or medium traffic volume. If this technique should be adopted in great scale by the municipal district, the problems detected in the inspection could be solved in short time.

Keywords: Recycled aggregate. Pavement. Laboratory tests. Field tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 As variáveis da reciclagem	54
Figura 2.2 Usina de Reciclagem de Entulho de Itaquera	60
Figura 2.3 Usina de Reciclagem de Ribeirão Preto	60
Figura 2.4 Usinas de Reciclagem de Entulho de Belo Horizonte	61
Figura 2.5 Usina de Reciclagem de Londrina (PR)	63
Figura 3.1 Camadas de um pavimento flexível	67
Figura 3.2 Esquema do Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP)	73
Figura 3.3 Equipamento utilizado para o ensaio de viga Benkelman	75
Figura 3.4 Equipamento utilizado para o ensaio de Prova de Carga	76
Figura 3.5 Utilização de agregados reciclados em pavimentação na cidade de Belo Horizonte	81
Figura 3.6 Pavimentação com agregado reciclado em Ribeirão Preto	82
Figura 3.7 Análise comparativa	83
Figura 3.8 Análise comparativa	84
Figura 3.9 Distribuição granulométrica dos materiais estudados	85
Figura 3.10 Detalhe dos agregados obtidos	97
Figura 3.11 Homogeneização da mistura no campo	97
Figura 3.12 Evolução na execução do pavimento em Goiânia	98
Figura 3.13 Material de concreto empregado no estudo	99
Figura 3.14 Material cerâmico empregado no estudo	99
Figura 4.1 Realização da coleta do solo no mês de maio de 2006	106
Figura 4.2 Chegada dos resíduos	106
Figura 4.3 Preparação do solo	107
Figura 4.4 Britador de Mandíbula	107
Figura 4.5 Separação do material	108
Figura 4.6 Detalhe do material estudado	108
Figura 4.7 Ensaio de granulometria	109
Figura 4.8 Ensaio de limite de plasticidade	109
Figura 4.9 Determinação do limite de liquidez	110
Figura 4.10 Ensaio de massa específica	110
Figura 4.11 Realização do ensaio de Compactação	111
Figura 4.12 Realização dos ensaios de CBR e expansão	112
Figura 4.13 Moldagem dos corpos-de-prova	112
Figura 4.14 Cura dos corpos-de-prova	113
Figura 4.15 Amostras depois da realização do ensaio de CBR	113

Figura 4.16 Execução do Ensaio de Abrasão <i>Los Angeles</i>	114
Figura 4.17 Vista aérea do trecho do CEASA	116
Figura 4.18 Estrutura do trecho experimental do CEASA	116
Figura 4.19 Granulometrias estudadas para o RCC	117
Figura 4.20 Execução da pista do CEASA	117
Figura 4.21 Desenho esquemático dos locais de ensaios na pista de acesso ao CEASA	118
Figura 4.22 Vista aérea da Rua SR-68 no setor Recanto das Minas Gerais	119
Figura 4.23 Seção do pavimento da pista do Setor Recanto das Minas Gerais	119
Figura 4.24 Pista executada com resíduo da construção civil	120
Figura 4.25 Desenho esquemático dos locais de ensaios na pista do Setor Recanto das Minas Gerais	120
Figura 4.26 Preparação do caminhão para os ensaios	121
Figura 4.27 Ensaio de viga Benkelman	122
Figura 4.28 Ensaio de prova de carga	122
Figura 4.29 Realização do ensaio de DCP no trecho do CEASA	123
Figura 4.30 Modelo das Malhas de elementos finitos utilizadas	124
Figura 5.1 Vista geral do município de Goiânia com localização dos pontos vistoriados	126
Figura 5.2 Ponto 1: Resíduos da Construção Civil depositados nas proximidades do Condomínio Alphavile (05/12/2006)	127
Figura 5.3 Ponto 2: Resíduos da Construção Civil depositados nas proximidades (Ponto 2a) e nas margens (Ponto 2b) do Córrego Água Branca (02/05/2006) .	128
Figura 5.4 Ponto 3: Resíduos da Construção Civil depositados nas proximidades do Rio Meia Ponte (06/05/2006)	129
Figura 5.5 Ponto 4: Resíduos da Construção Civil depositados nas proximidades do Córrego São José (23/04/2006)	130
Figura 5.6 Ponto 5: Resíduos da Construção Civil depositados na margem e no leito do Córrego Macambira (02/04/2007)	131
Figura 5.7 Ponto 6: Resíduos da Construção Civil depositados nas proximidades) da Avenida Perimetral (02/04/2007)	132
Figura 5.8 Ponto 7: Resíduos da Construção Civil depositados em lotes vagos no Bairro Criméia Leste (02/04/2007)	133
Figura 5.9 Ponto 8: Resíduos da Construção Civil depositados nas proximidades da BR-153 (05/12/2006)	134
Figura 5.10 Curvas granulométricas dos agregados reciclados estudados	135
Figura 5.11 Curva granulométrica do solo com e sem defloculante	136
Figura 5.12 Obtenção da amostra L1 enquadrada na faixa B do DNER (1997)	138
Figura 5.13 Obtenção da amostra L2 enquadrada na faixa D do DNER (1997)	138

Figura 5.14 Obtenção da amostra L3 enquadrada na faixa F do DNER (1997)	139
Figura 5.15 Resultado do ensaio de limite de liquidez do solo e das amostras L2 e L3	141
Figura 5.16 Curvas de compactação das amostras estudadas	143
Figura 5.17 Curvas de CBR das amostras estudadas	144
Figura 5.18 Curvas de expansão das amostras estudadas	145
Figura 5.19 Amostras L3, L2 e L1, após a extração do corpo-de-prova	146
Figura 5.20 Tendência entre o CBR e Abrasão <i>Los Angeles</i>	155
Figura 5.21 Curvas granulométricas dos materiais retirados da base do trecho do CEASA	156
Figura 5.22 Curvas granulométricas dos materiais retirados da sub-base do trecho do CEASA	156
Figura 5.23 Curvas granulométricas dos materiais retirados da base do trecho do Recanto	157
Figura 5.24 Bacias de deslocamento do bordo esquerdo do trecho do CEASA	162
Figura 5.25 Bacias de deslocamento do bordo direito do trecho do CEASA	162
Figura 5.26 Bacia de deflexão média do trecho do CEASA	163
Figura 5.27 Bacias de deslocamento do bordo esquerdo do trecho do Recanto	165
Figura 5.28 Bacias de deslocamento do bordo direito do trecho do Recanto	165
Figura 5.29 Bacia de deflexão média do trecho do Recanto	167
Figura 5.30 Curvas Tensão x Deslocamento no trecho do CEASA	168
Figura 5.31 Curvas tensão x deslocamento no trecho Recanto	169
Figura 5.32 Médias de DN obtidas para a camada de base do trecho do CEASA em diferentes períodos	172
Figura 5.33 Médias de DN obtidas para a camada de sub-base do trecho do CEASA em diferentes períodos	172
Figura 5.34 Médias de DN obtidas para o subleito do trecho do CEASA em diferentes períodos	173
Figura 5.35 Diagrama Estrutural nos ensaios de DCP no trecho do CEASA	176
Figura 5.36 Perfis obtidos no ensaio de DCP para o trecho do CEASA	176
Figura 5.37 Médias de DN obtidas para a camada de base em diferentes períodos no trecho do Recanto	178
Figura 5.38 Médias de DN obtidas para a camada de subleito compactado em diferentes períodos no trecho do Recanto	178
Figura 5.39 Médias de DN obtidas para a camada de subleito natural em diferentes períodos no trecho do Recanto	179
Figura 5.40 Diagrama Estrutural nos ensaios de DCP no trecho do Recanto	181
Figura 5.41 Perfis obtidos no ensaio de DCP no trecho do Recanto	182
Figura 5.42 Exemplo de uma malha de elementos retangulares	183

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Tempo aproximado de decomposição	32
Tabela 2.2 Destinação do lixo no Brasil e em Goiás	33
Tabela 2.3 Geração de resíduos em países da União Européia	46
Tabela 2.4 Geração de resíduos nas principais cidades brasileiras	47
Tabela 2.5 Composição do entulho de algumas cidades brasileiras, em porcentagem ...	49
Tabela 2.6 Geração de RCC em países da União Européia	58
Tabela 3.1 Faixas granulométricas especificadas pela ES 303	69
Tabela 3.2 Requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação	77
Tabela 3.3 Requisitos específicos para agregado reciclado destinado a pavimentação .	78
Tabela 3.4 Produtos obtidos a partir do RCC e utilização na pavimentação	79
Tabela 3.5 Proporções das amostras ensaiadas	82
Tabela 3.6 Condições de compactação	85
Tabela 3.7 Valores de <i>California Bearing Ratio</i> (CBR)	86
Tabela 3.8 Porcentagens passantes antes e depois da compactação	87
Tabela 3.9 Resultado do controle de compactação	87
Tabela 3.10 Resultados de atividade pozolânica do agregado reciclado obtidos pelo Método de Chappelle Modificado	90
Tabela 3.11 Resultados dos ensaios de CBR	91
Tabela 3.12 Tipo de agregado reciclado de telha obtido da britagem	92
Tabela 3.13 Características dos solos utilizados	92
Tabela 3.14 Origem do material e proporções aplicadas nas pistas	95
Tabela 3.15 Resultados dos ensaios de CBR e Expansão	95
Tabela 3.16 Resumo dos ensaios de CBR e Expansão na energia normal	96
Tabela 3.17 Parâmetros de compactação e CBR do solo argiloso	101
Tabela 3.18 Resumo dos Ensaios de Prova de Carga	102
Tabela 3.19 Correlações utilizadas por Oliveira (2007)	103
Tabela 3.20 Ensaios de Cone (DCP) – Correlações com o CBR	103
Tabela 4.1 Estacas onde foram realizados os ensaios de Prova de Carga, DCP e Viga Benkelman no trecho de acesso ao CEASA	118
Tabela 5.1 Percentuais de frações granulométricas dos materiais estudados	137
Tabela 5.2 Composição das dosagens de agregado reciclado e solo do CEASA	137
Tabela 5.3 Percentuais de frações granulométricas das misturas estudadas	139

Tabela 5.4 Valores obtidos nos ensaios de caracterização das amostras estudadas	140
Tabela 5.5 Valores obtidos nos ensaios de limite de plasticidade e liquidez das amostras	142
Tabela 5.6 Valores obtidos no ensaio de massa específica dos grãos	142
Tabela 5.7 Classificação segundo SUCS e TRB do solo e das amostras estudadas	143
Tabela 5.8 Resultados encontrados no ensaio de compactação	144
Tabela 5.9 Valores encontrados nos ensaios de CBR e expansão	145
Tabela 5.10 Possíveis utilizações das amostras estudadas	146
Tabela 5.11 Resultados das características químicas da massa bruta das amostras estudadas	148
Tabela 5.12 Resultados das características químicas do extrato lixiviado das amostras e solo CEASA	149
Tabela 5.13 Resultados das características químicas do extrato solubilizado das amostras e solo CEASA	150
Tabela 5.14 Resumo dos valores encontrados nos ensaios laboratoriais	151
Tabela 5.15 Teor de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo obtidos em algumas pesquisas	152
Tabela 5.16 Valores obtidos no ensaio de CBR após o período de cura	153
Tabela 5.17 Comparação dos resultados obtidos no ensaio de CBR ao longo do tempo com a pesquisa de Motta (2005)	154
Tabela 5.18 Valores obtidos no ensaio de Abrasão <i>Los Angeles</i> após o período de cura	155
Tabela 5.19 Percentuais de frações granulométricas das camadas dos trechos estudados	157
Tabela 5.20 Resultados das características químicas da massa bruta das amostras dos trechos	158
Tabela 5.21 Resultados das características químicas dos extratos solubilizados e lixiviados dos materiais retirados dos trechos do CEASA e do Recanto ...	160
Tabela 5.22 Parâmetros obtidos nos ensaios de viga Benkelman no trecho do CEASA.	161
Tabela 5.23 Médias obtidas nos ensaios de viga Benkelman em diferentes períodos	163
Tabela 5.24 Parâmetros obtidos nos ensaios de viga Benkelman no trecho do Recanto.	164
Tabela 5.25 Médias obtidas nos ensaios de viga Benkelman em diferentes períodos	166
Tabela 5.26 Resultados obtidos nos ensaio de prova de carga no trecho do CEASA	167
Tabela 5.27 Resultados médios obtidos nos ensaios de prova de carga	168
Tabela 5.28 Resultados obtidos nos ensaios de prova de carga no trecho do Recanto ...	169
Tabela 5.29 Resultados obtidos no ensaio de DCP no trecho do CEASA	170
Tabela 5.30 Resultados obtidos no ensaio de DCP em diferentes períodos no trecho CEASA	171

Tabela 5.31 Valores de CBR obtidos por correlação específica para agregado reciclado em base e sub-base de pavimentos, com os dados obtidos no trecho do CEASA	174
Tabela 5.32 Valores de CBR obtidos por correlação de dois autores para subleito de pavimentos	175
Tabela 5.33 Valores médios de DN e CBR obtidos por camadas no trecho do CEASA	175
Tabela 5.34 Resultados obtidos no ensaio de DCP no trecho do Recanto	177
Tabela 5.35 Resultados obtidos no ensaio de DCP em diferentes períodos para o trecho do Recanto	178
Tabela 5.36 Valores de CBR obtidos por correlação específica para agregado reciclado em base e sub-base de pavimentos	179
Tabela 5.37 Valores de CBR obtidos por correlação de dois autores para subleito de pavimentos	180
Tabela 5.38 Valores médios de CBR obtidos por camadas para o trecho do Recanto ...	181
Tabela 5.39 Resultados dos módulos retroanalisados dos ensaios de viga Benkelman no trecho do CEASA	184
Tabela 5.40 Resultados dos módulos retroanalisados dos ensaios de viga Benkelman no trecho do Recanto das Minas Gerais	185
Tabela 5.41 Resultados dos módulos obtidos nas retroanálises no trecho do CEASA ..	186
Tabela 5.42 Resultados do deslocamento total médio (dt médio) e os módulos correspondentes, em diferentes períodos no trecho do CEASA	186
Tabela 5.43 Resultados do deslocamento elástico médio (de médio) e dos módulos correspondentes, em diferentes períodos no trecho do CEASA	186
Tabela 5.44 Resultados dos módulos obtidos nas retroanálises no trecho do Recanto ..	187
Tabela 5.45 Resultados do deslocamento total médio (dt médio) e os módulos correspondentes, em diferentes períodos no trecho do Recanto	187
Tabela 5.46 Resultados do deslocamento elástico médio (de médio) e os módulos correspondentes, em diferentes períodos no trecho do Recanto	188

LISTAS DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ALT – MAT	<i>Alternative Materials in Road Construction</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
CMMAD	Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cu	Coefficiente de uniformidade
D	deflexão
D ₀	deflexão real ou verdadeira medida no ponto de prova
D ₂₅	deflexão medida a 25 cm do ponto de prova
DCP	penetrômetro dinâmico de cone
d _e	deslocamento elástico
DN	índice de penetração
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
d _t	deslocamento total
ECO 92	Conferências das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
E _e	Módulo de elasticidade
EMURB	Empresa Municipal de Urbanização
E _t	Módulo de deformabilidade
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
G	pedregulho
GC	grau de compactação
H	alta
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IG	Índice de Grupo
IP	índice de plasticidade
IPT	Instituto de Pesquisa Tecnológica
ISC	Índice de Suporte Califórnia
L	baixa
LAS	Licenciamento Ambiental Simplificado
LI	Licença de Instalação
LO	Licença de Operação
LP	Licença Prévia
LIMPURB	Limpeza Urbana de Salvador
LEVEC	Local de Entrega Voluntária de Entulho da Construção Civil
M	silte
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
NP	não plástico
ONU	Comissão de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas
PMSP	Prefeitura Municipal de São Paulo
PRAD	Projeto de Recuperação de Área Degradada
R	Raio de curvatura
RCC	Resíduos da Construção Civil
RCD	Resíduos Sólidos da Construção e Demolição
RIO + 5	Conferência sobre Mudança no Clima
RIO + 10	Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável

RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SGA	Sistema de Gestão Ambiental
SEMMA	Secretaria Municipal do Meio Ambiente
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UICN	União Internacional para Conservação da Natureza
W	umidade
w_{ot}	umidade ótima
w_C	limite de contração
w_L	limite de liquidez
w_P	limite de plasticidade
γ_d	peso específico aparente seco
γ_{dmax}	peso específico aparente seco máximo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 ASPECTOS GERAIS	19
1.2 JUSTIFICATIVA	21
1.3 OBJETIVOS	22
1.3.1 OBJETIVO GERAL	22
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1.4 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO	23
2 INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL E MEIO AMBIENTE	25
2.1 BREVE HISTÓRICO	25
2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS	30
2.2.1 CONCEITOS E CLASSIFICAÇÕES	30
2.3 RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	36
2.3.1 LEGISLAÇÕES E NORMAS TÉCNICAS VIGENTES	36
2.3.1.1 Nacional	36
2.3.1.2 Estadual	37
2.3.1.3 Municipal	38
2.3.1.4 Normas Técnicas	39
2.3.2 CONCEITOS E CLASSIFICAÇÕES	40
2.3.3 A PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DO RCC	42
2.3.3.1 Introdução	42
2.3.3.2 Geração	45
2.3.3.3 Deposição inadequada	47
2.3.3.4 Composição	49
2.4 RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	50
2.4.1 EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS	57
2.4.2 EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS	59
2.4.3 EQUIPAMENTOS	63
2.4.4 RECICLAGEM “IN LOCO”	64
3 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL APLICADOS NA PAVIMENTAÇÃO	66
3.1 NOÇÕES SOBRE PAVIMENTAÇÃO	66
3.1.1 ESTRUTURA E CLASSIFICAÇÃO DE PAVIMENTOS	66
3.1.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO	67

3.1.2.1	Preparação de Amostras de Solo	67
3.1.2.2	Análise Granulométrica	68
3.1.2.3	Teor de Umidade	70
3.1.2.4	Massa Específica	70
3.1.2.5	Limites de Consistência	70
3.1.2.6	Compactação, <i>California Bearing Ratio</i> (CBR) e Expansão	71
3.1.2.7	Abrasão <i>Los Angeles</i>	72
3.1.3	ENSAIOS DE CAMPO	72
3.1.3.1	Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP)	72
3.1.3.2	Viga Benkelman	74
3.1.3.3	Prova de Carga Sobre Placa	75
3.1.4	ESPECIFICAÇÕES PARA EXECUÇÃO DE CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO UTILIZANDO AGREGADOS RECICLADOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	76
3.2	ALGUMAS PESQUISAS REALIZADAS COM RCC APLICADOS NA PAVIMENTAÇÃO	78
3.3	EXECUÇÃO DE TRECHOS EXPERIMENTAIS NA CIDADE DE GOIÂNIA	95
4	METODOLOGIA	105
4.1	INTRODUÇÃO	105
4.2	DEPOSIÇÃO INADEQUADA DE RCC	105
4.3	ENSAIOS DE LABORATÓRIO	106
4.3.1	COLETA DE MATERIAIS	106
4.3.2	PREPARAÇÃO E SELEÇÃO DAS AMOSTRAS	107
4.3.3	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	109
4.3.4	ENSAIO DE LIMITES DE CONSISTÊNCIA	109
4.3.4.1	Limite de plasticidade	109
4.3.4.2	Limite de liquidez	110
4.3.5	MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS	110
4.3.6	COMPACTAÇÃO	111
4.3.7	ENSAIO DE <i>CALIFORNIA BEARING RATIO</i> (CBR) E EXPANSÃO	111
4.3.8	MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA	112
4.3.9	LIXIVIAÇÃO	114
4.3.10	SOLUBILIZAÇÃO	114
4.4	PISTAS EXPERIMENTAIS ESTUDADAS	115
4.4.1	PISTA DO CEASA	115
4.4.2	PISTA DO RECANTO DAS MINAS GERAIS	119

4.5 ENSAIOS DE CAMPO	121
4.5.1 VIGA BENKELMAN	121
4.5.2 CARGA SOBRE PLACA	122
4.5.3 PENETRÔMETRO DINÂMICO DE CONE (DCP)	123
4.6 ANÁLISES NUMÉRICAS	123
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	125
5.1 INTRODUÇÃO	125
5.2 DEPOSIÇÃO INADEQUADA DE RCC	125
5.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO	135
5.3.1 PREPARAÇÃO E SELEÇÃO DAS AMOSTRAS	135
5.3.1.1 Análise Granulométrica	135
5.3.2 LIMITES DE CONSISTÊNCIA	141
5.3.3 MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS	142
5.3.4 CLASSIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS	142
5.3.5 COMPACTAÇÃO	143
5.3.6 CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) E EXPANSÃO	144
5.3.7 LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO	147
5.3.8 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA	151
5.3.8.1 California Bearing Ratio (CBR)	152
5.3.8.2 Abrasão Los Angeles	154
5.3.9 AMOSTRAS RETIRADAS DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS	155
5.3.9.1 Análise Granulométrica	156
5.3.9.2 Lixiviação e Solubilização	158
5.4 ENSAIOS DE CAMPO	160
5.4.1 VIGA BENKELMAN	161
5.4.2 PROVA DE CARGA SOBRE PLACA	167
5.4.3 PENETRÔMETRO DINÂMICO DE CONE	170
5.5 RETROANÁLISES	182
5.5.1 VIGA BENKELMAN	184
5.5.2 PROVA DE CARGA SOBRE PLACA	185
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	189
6.1 CONCLUSÕES	189
6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	192
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	193
APÊNDICE A	202

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

A sociedade moderna possui, como uma de suas características, a elevada geração de resíduos e uma das grandes dificuldades ambientais nos dias atuais, refere-se ao destino dos resíduos sólidos gerados pelas indústrias, resíduos domésticos e, principalmente, resíduos gerados pela demolição e construção de obras civis. No Brasil, Pinto (1999) estima-se uma produção de 230 a 760 kg/hab.ano de resíduos de construção e demolição.

Comparando a construção civil aos outros setores da economia, nota-se que este age com grande intensidade sobre o meio ambiente, já que trabalha com a transformação em todas as suas etapas, seja de matérias-primas (que provocam impactos no ato da extração e posteriormente na geração de resíduos), seja das áreas que sofrerão impactos pelas alterações naturais no ato da construção.

Os resíduos da construção civil definidos como restos de materiais provenientes de obras de construções e demolições, são geralmente descartados em aterros sanitários, provocando grandes problemas, já que estes são materiais não degradáveis e seu acúmulo diminui a vida útil dos aterros, e quando descartados em locais inadequados causam inúmeros problemas sócio-ambientais como enchentes, o assoreamento de córregos e rios, o entupimento de redes de drenagem, os quais podem ser provocados pela ocupação urbana próximo as margens dos cursos d'água juntamente com a deposição de entulhos o pré-aterramento dessas áreas, provocando grandes conseqüências ao meio ambiente e a saúde humana, além de custos para a Prefeitura para o remanejamento desses resíduos.

Um outro aspecto de relevância é o mal uso de recursos naturais não renováveis, pois ao comprometimento de valas, várzeas e áreas de baixada no meio urbano, ocorre nas regiões de jazidas, a geração de crateras e mais crateras para a extração de recursos minerais, os quais atualmente estão ficando cada vez mais escassos. Segundo Rezende (2003), em Goiânia observa-se um esgotamento das jazidas de cascalho, isso significa que a busca por

este material é feita em lugares cada vez mais distantes, aumentando consideravelmente o custo total da construção.

Por estes motivos, torna-se maior a preocupação da população mundial com a preservação do meio ambiente. Pesquisadores de todo mundo vem buscando estudar alternativas para que os impactos ambientais provocados sejam minimizados, buscando sempre encontrar a sustentabilidade, através do desenvolvimento e implantação de tecnologias adequadas, que busquem a redução, reutilização e reciclagem desses resíduos.

Foi elaborado em Goiânia, o Plano Integrado de Gerenciamento dos Resíduos Sólidos da Construção Civil onde, no relatório apresentado em setembro de 2003 (PMGRSIC, 2004), foram indicados os principais problemas relacionados à gestão dos resíduos sólidos da construção na cidade e seus impactos, de acordo com dados existentes em cada órgão participante do projeto piloto. Dados coletados para este estudo demonstraram que o entulho de obra responde por metade dos resíduos urbanos coletados pelo serviço de limpeza pública em Goiânia - GO.

No mesmo relatório foi apresentado que a Prefeitura recolhe somente 50% do total dos resíduos da construção civil sendo que o restante é disposto irregularmente, gerando um gasto em torno de 2 milhões de reais por mês na coleta destes resíduos.

Em entrevista com o presidente de uma empresa que executa serviços de coleta de resíduos da construção civil (LIMP-ENTULHO, 2006), verificou-se que, existem, atualmente, 36 empresas cadastradas que coletam entulho na cidade de Goiânia, e segundo informações de técnicos da Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SEMMA), o licenciamento dessas empresas não pode ser renovado até que a prefeitura indique um local apropriado para a deposição do entulho. A SEMMA informa também que, atualmente, somente as maiores empresas estão depositando os resíduos em locais definidos pela Secretaria, não sendo informado o local exato. O restante das empresas de entulho não possui local definido, ou seja, provavelmente, os resíduos da construção civil estão sendo levados ou para o Aterro Sanitário de Goiânia ou para margens de córregos e lotes vagos.

Portanto, verifica-se o não cumprimento da Instrução Normativa nº 18 promulgada em 26 de dezembro de 2005 (PREFEITURA DE GOIÂNIA, 2005), considerando o que dispõe a Resolução nº 307 (CONAMA, 2002). Tem-se a necessidade de criação de diretrizes para a efetiva redução dos impactos ambientais gerados pelos depósitos de resíduos oriundos

da construção civil, estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais e instituir as diretrizes básicas para o licenciamento ambiental dos transportadores de resíduos sólidos oriundos da construção civil, para locais de transbordo e de destinação final destes resíduos no Município de Goiânia.

Diante desta situação, vê-se a necessidade de pesquisar a reutilização ou reciclagem dos resíduos da construção civil nesta cidade, já que segundo o PMGRSIC (2004) 60% do entulho gerado em Goiânia é passível de reutilização. De acordo com várias pesquisas e experiências práticas desenvolvidas em todo o Brasil, os entulhos são utilizados na confecção de concretos, na produção de argamassa, blocos de concretos e na pavimentação.

Já foram executados dois pavimentos utilizando agregado reciclado da construção civil em Goiânia. Um está localizado na Rua do Cipreste, St. Mansões Bernardo Sayão, acesso lateral ao CEASA, e o outro na Rua SR-68 Qd. 93 no trecho da Av. das Flores e rua SR-02, St. Recanto Minas Gerais. Portanto, nesta pesquisa será feito o acompanhamento das duas pistas que até no momento demonstraram a viabilidade técnica da utilização do agregado reciclado na construção de sub-base e base de pavimentos urbanos. Além disso, serão realizados ensaios laboratoriais para avaliar as questões ambientais e técnicas desses materiais.

1.2 JUSTIFICATIVA

Percebe-se, no entanto, que a principal justificativa e relevância deste trabalho é de cunho ambiental dado que a alta produção de resíduos e sua disposição indevida acabam trazendo sérios problemas ao meio ambiente.. Assim, uma alternativa interessante para a utilização do agregado reciclado proveniente de resíduos da construção civil é a aplicação do agregado reciclado nas vias da cidade de Goiânia.

Uma vez que, no Brasil apenas 9,5% da malha rodoviária do país é pavimentada, ou seja, aproximadamente 165.000 km dos mais de 1.700.000 km existentes (GEIPOT, 2000 apud MOTTA, 2005). Na cidade de Goiânia, de 36.247.022 m² de vias urbanas, 26.864.020 m² estão pavimentadas, restando-se aproximadamente 9.383 m² a pavimentar (PREFEITURA DE GOIÂNIA-SEMMA, 2006).

Uma pesquisa realizada na cidade de Salvador com a utilização da mistura de agregados reciclados e de solo laterítico e saprolítico apresentou como material adequado à aplicação em base e sub-base de pavimentos. Verificou-se, ainda, que os custos de construção desta é significativamente menor que as camadas produzidas com brita graduada ou brita adicionada ao solo. Essa redução pode representar uma economia entre 50% e 62% ao se utilizar o agregado reciclado em substituição aos materiais convencionais (CARNEIRO et al., 2001).

Percebe-se, portanto, o grande potencial de utilização dos resíduos de construção civil na execução de camadas de pavimentos. Esse potencial já é conhecido pelos gestores urbanos, sendo usual, em várias cidades brasileiras, o lançamento de entulho bruto para a regularização de camadas de vias periféricas e a manutenção de condições mínimas de tráfego. Apesar das experiências realizadas em muitas cidades se mostrarem satisfatórias, as condições nas quais foram executadas e o desempenho dos materiais utilizados apresentam variações significativas, de acordo com cada região, o que indica a necessidade de estudos regionais para a comprovação da viabilidade da utilização do agregado reciclado ou do entulho bruto na execução de pavimentos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo desta pesquisa é avaliar, a partir de ensaios laboratoriais e de campo, a aplicação ambiental e técnica do agregado reciclado na estrutura de pavimentos flexíveis.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos tem-se:

- Verificar a existência de pontos de descarte do entulho no município de Goiânia;
- Avaliar os riscos de contaminação ambiental do resíduo estudado;
- Investigar o comportamento mecânico das duas vias executadas em Goiânia por meio da realização de ensaios de campo e análises numéricas;
- Analisar a durabilidade de amostras em laboratório;

- Quantificar o ganho de resistência de amostras ao longo do tempo.

1.4 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em 7 capítulos e um apêndice. O Capítulo 1 apresenta os aspectos gerais do impacto causado pelo resíduo sólido da construção civil (RCC) e as vantagens de sua utilização como matéria-prima em substituição aos agregados convencionais, a justificativa, os objetivos e o escopo do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta um histórico ambiental, mostrando o surgimento da consciência ambiental e os conceitos contidos na Agenda 21 para o desenvolvimento sustentável. Relata ainda, os instrumentos legais, conceitos e classificações relacionados ao RCC, bem como, a problemática ambiental ocasionada pela geração, composição e deposição inadequada do RCC e finalmente as experiências internacionais e brasileiras com a reciclagem do resíduo da construção civil.

O Capítulo 3 descreve a aplicação do resíduo da construção civil em pavimentação, abordando algumas pesquisas relacionadas a ensaios laboratoriais e ensaios em trechos experimentais que foram utilizados RCC na confecção de sub-base e base de pavimentos flexíveis.

O Capítulo 4 traz algumas noções sobre pavimentação, ou seja, conceitos e classificações de pavimentos flexíveis, além da descrição dos principais ensaios de campo e laboratoriais realizados nos estudos em pavimentação.

O Capítulo 5 apresenta a metodologia aplicada na pesquisa, as características dos dois trechos experimentais estudados e a descrição detalhada dos ensaios de campo, das análises numéricas e dos ensaios de laboratório que foram realizados para esta pesquisa.

O Capítulo 6 apresenta os registros fotográficos obtidos na vistoria realizada na cidade de Goiânia, os resultados dos ensaios de campo realizados nos trechos experimentais estudados (Viga Benkelman, Prova de carga e Penetrômetro dinâmico de cone), das retroanálises e dos ensaios laboratoriais (Análise granulométrica, Limites de consistência, Massa específica dos grãos, Classificação das amostras, Compactação, *California Bearing Ratio*- CBR, Expansão, Solubilização e Lixiviação, Moldagem e cura dos corpos-de-prova,

além dos ensaios de Granulometria, Solubilização e lixiviação de amostras retiradas dos trechos experimentais estudados.

O Capítulo 7 traz as conclusões obtidas, considerações finais sobre a pesquisa e algumas sugestões para pesquisas futuras.

O Apêndice A apresenta as curvas obtidas nos ensaios com o Penetrômetro dinâmico de cone nos dois trechos experimentais estudados.

Capítulo 2

INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL E MEIO AMBIENTE

2.1 BREVE HISTÓRICO

Todos os bens materiais que existem um dia serão resíduo, sejam eles casas, automóveis, móveis, pontes, aviões e outros. Aliados a estes, existem os resíduos provenientes dos processos de extração de matérias-primas e de produção de bens. Desta forma, a quantidade de resíduos que são gerados todos os dias tende a superar a quantidade de bens que são consumidos (BARROS, 2005).

Muito se tem falado em ecologia, meio ambiente, relação homem-natureza e relação empresa-natureza. Estes assuntos estão tomando dimensões consideráveis, porque o ser humano está percebendo que a sua existência está sendo ameaçada pelo descontrole e abuso da exploração das fontes naturais de recursos.

As atividades humanas são caracterizadas pelo consumo de energia e matérias primas naturais, provocando alterações importantes no meio ambiente. As atividades produtivas industriais, uma das bases de sustentação do progresso, consomem além de energia, recursos renováveis e não renováveis. As atividades contemporâneas estão sempre em busca do desenvolvimento, demandando consumo de energia e insumos naturais, em quantidades crescentes, que utilizados em atividade produtivas, supostamente, se traduz em melhor qualidade de vida.

Problemas, como, poluição urbana do ar, chuva ácida, diminuição da camada de ozônio, aquecimento por efeito estufa e mudança de clima, indisponibilidade de água doce, desmatamento, a cada dia se tornam objeto de estudo e de muita preocupação no campo ambiental. De modo geral, todos esses problemas têm um grande número de causas, tais como, o aumento populacional, o crescimento e a mudança de padrões da indústria, transporte, agricultura e até mesmo o turismo.

Entre os setores que consomem recursos naturais e degradam o meio ambiente está o setor da construção civil. Ele afeta consideravelmente o meio ambiente pelo consumo de recursos minerais e de produção de resíduos, como a exploração de jazida de pedras, areias, calcário, zinco, alumínio, ferro, etc. É consumidor voraz de madeira e água, tendo como fornecedores os principais segmentos poluidores.

Ao longo da história da humanidade, a visão de progresso vem se confundindo com um crescente domínio e transformação da natureza. Nesse paradigma, os recursos naturais são vistos, equivocadamente, como ilimitados (JOHN, 2001).

Até a década de 50, a natureza era considerada somente como um pano de fundo em qualquer discussão que abordasse a atividade humana e suas relações com o meio. Acreditava-se que a natureza existia para ser compreendida, explorada e catalogada, desde que utilizada em benefício da humanidade. Por outro lado, o avanço da tecnologia no pós-guerra, dava sinais que não existiriam problemas que não pudessem ser resolvidos (SCHENINI et al., 2004).

Segundo Moura (1998 apud COSTA, 2003), já a partir da década de 60 é que se observaram as primeiras mudanças em relação ao meio ambiente. Os recursos começaram a ser valorizados e visualizou-se o seu esgotamento futuro (petróleo, madeira, água etc.). Nesse período, ocorreram grandes acidentes que alertaram a humanidade sobre a dimensão das agressões ao meio ambiente e suas repercussões.

Os anos 70 representaram a década da regulamentação e do controle ambiental. Em 1972, a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente, em Estocolmo, marcou uma diferença de percepção ambiental entre os países ricos e pobres. Após essa conferência, as nações começaram a estruturar seus órgãos ambientais (VALLE, 1995 apud COSTA, 2003).

Segundo o mesmo autor, a preocupação com o meio ambiente conjugada com a melhoria das condições socioeconômicas da população fez surgir o conceito de ecodesenvolvimento, substituído posteriormente pelo de desenvolvimento sustentável. O termo ecodesenvolvimento foi introduzido por Maurice Strong durante a Conferência de Estocolmo, e, amplamente, difundido por Ignacy Sachs, a partir de 1974.

A década de 80 foi um período de grande desenvolvimento econômico e técnico. O bem estar material voltou a ser relevante, independentemente dos prejuízos à natureza que sua produção pudesse provocar (SCHENINI et al., 2004). No entanto, o termo desenvolvimento sustentável passou a ser difundido globalmente. Isto ocorreu quando a União Internacional para a Conservação da Natureza (UICN) apresentou o documento intitulado Estratégia de Conservação Ambiental, o qual tinha como objetivo alcançar o desenvolvimento sustentável através da conservação dos recursos vivos, propondo garantir a sobrevivência e desenvolvimento do ser humano, preservar a diversidade genética e assegurar o aproveitamento sustentável das espécies dos ecossistemas que constituem a base da vida humana. Em 1987, ocorreu a Convenção de Basileia, que estabeleceu um acordo internacional com regras para o movimento de resíduos entre fronteiras (BARONI, 1992 apud ARAÚJO, 2002).

Em 1983, por decisão da Assembléia Geral da Organização das Nações Unidas, foi criada a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) também conhecida como Comissão Brundtland que se caracteriza pela importância no desenvolvimento de conceitos e propostas relacionados ao desenvolvimento sustentável.

Em 1987, a Comissão Brundtland encerrou seus trabalhos através do relatório *Our Common Future* (Nosso Futuro Comum). Neste relatório procurou-se formular os princípios do desenvolvimento sustentável, recomendando os principais objetivos de políticas derivados do conceito de desenvolvimento sustentável que seriam os seguintes: retomar o crescimento como condição necessária para erradicar a pobreza; mudar a qualidade do crescimento para torná-lo mais justo, equitativo e menos intensivo em matérias-primas e energia; atender às necessidades humanas essenciais de emprego, alimentação, energia, água e saneamento; manter um nível populacional sustentável; conservar e melhorar a base dos recursos; reorientar a tecnologia e administrar os riscos, e incluir o meio ambiente e a economia no processo decisório das políticas governamentais (BARBIERI, 1997 apud ARAÚJO, 2002).

Em 1988, foi promulgada a nova Constituição Federal Brasileira, onde o legislador constituinte reservou um capítulo inteiro sobre o meio ambiente, o artigo 225 contendo 6 parágrafos, procurando disciplinar a matéria diante de sua importância mundial, o qual estabelece que:

“Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações” (CONSTITUIÇÃO, 2006).

Entende-se por “todos” como sendo os brasileiros e estrangeiros residentes no País. “Meio ambiente” é o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas (SIRVINSKAS, 2005).

Durante a década de 90, realizou-se no Brasil a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (ECO 92), onde foi aprofundada a questão do Desenvolvimento Sustentável, inicialmente discutida na Comissão Brundtland, que se contrapunha à tese-chave que imperara até então de que é possível desenvolver sem destruir o meio ambiente. O documento resultante da RIO 92, a “Agenda 21”, resultou de um despertar sobre uma consciência ambiental, sobre a importância da conservação da natureza para o bem estar e sobrevivência das espécies, inclusive a humana. O documento propunha que a sociedade assumisse uma atitude ética entre a conservação ambiental e o desenvolvimento. Denunciava a forma perdulária com que até então eram tratados os recursos naturais e propunha uma sociedade justa e economicamente responsável, produtora e produto do desenvolvimento sustentável (SCHENINI et al., 2004).

Neste documento destacou-se ainda, a reciclagem de materiais que contribuiria de forma efetiva para a implantação de um sistema de gestão ambiental dos resíduos sólidos e, sendo a construção civil responsável por cerca de 75 % da geração destes resíduos, não poderia ser excluída deste contexto.

Em 1997, após cinco anos da realização da ECO 92, realizou-se em Kyoto, Japão, a Conferência sobre Mudança no Clima (RIO + 5). Conforme Lerípio (2001 apud ARAÚJO, 2002), o objetivo principal era estabilizar a concentração de gases que provocam o efeito estufa em níveis toleráveis que não impliquem em mudanças prejudiciais no clima. Aprovado em 11 de dezembro de 1997, o documento oficial da Conferência, conhecido como Protocolo de Kyoto, estabeleceu uma meta média de cerca de 6% de redução de emissões de gases de efeito estufa nos países industrializados até o período de 2008 a 2012. Observou-se também que os remédios até então propostos na ECO 92 não funcionaram ou sequer foram

ministrados e as iniciativas, de modo geral, se revelaram tímidas e pontuais, deixando pendentes os desafios na busca de um desenvolvimento sustentável (MILARÉ, 2004).

No ano de 2000, a Comissão de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU) sugeriu a realização de uma nova cúpula mundial, desta vez sobre Desenvolvimento Sustentável. Assim, em dezembro de 2000, a Assembléia Geral das Nações Unidas resolveu realizar, em 2002, a Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável em Johannesburgo, na África do Sul.

Segundo John (2000), a Rio+10, iniciada em 23 de agosto de 2002, concentrou as negociações oficiais sobre a Agenda 21, documento que também foi assinado durante a Rio 92 e gerou respostas muito diferentes em cada país, durante estes dez anos, variando de nenhuma reação a programas participativos, amparados por leis nacionais e locais. Sendo assim, o objetivo desta Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável foi discutir novos acordos sobre trechos da Agenda 21 que não funcionaram, visando sua implementação daqui para frente. Vale lembrar que o tipo de acordo que se obtém em negociações como estas reflete um compromisso de longo prazo, com um conjunto de diretrizes, cujo objetivo é mudar paradigmas, alterar os conceitos e princípios que regem as forças econômicas, políticas e sociais. Em outras palavras, serve para orientar os chamados tomadores de decisão nas suas decisões, ajustando-as ao desenvolvimento sustentável.

Conforme John (2000), o documento “Desafio Global, Oportunidades Globais” apresentado pela ONU, demonstrou que os resultados alcançados desde a ECO 92 ainda são insignificantes quando comparados à magnitude do problema ambiental e social que abarca o mundo. Confirma que a generosidade da Terra não é inesgotável, e que vivemos uma verdadeira encruzilhada ecológica. “Estamos nos alimentando de porções que pertencem às gerações ainda não nascidas. Os filhos de nossos filhos correm o risco de entrar neste mundo já carregando o peso da dívida criada por seus antepassados” (CARDOSO, 2002 apud MILARÉ, 2004).

Um passo importante foi a criação das normas ISO 14.000 publicadas em 1996, as quais fornecem ferramentas e estabelecem um padrão de Sistema de Gestão Ambiental (SGA) com o objetivo de contribuir para a melhoria da qualidade ambiental integrando o setor produtivo na otimização do uso de recursos naturais, e que vem certificando as empresas construtoras de forma gradativa (CASSA et al., 1998 apud BARBOSA, 2004).

Embora não tenham um caráter obrigatório, sua adoção representa uma forma das empresas brasileiras garantirem sua entrada ou permanência no mercado externo. Atualmente, existem no Brasil mais de 600 empresas certificadas. Portanto, a adoção dessa norma contribui para melhorar a conduta ambiental das organizações (COSTA, 2003).

No ano de 1998 foi criada a Lei 9.605, conhecida como A Lei dos Crimes Ambientais, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas aplicáveis às condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Representou um significativo avanço na tutela do ambiente, por inaugurar uma sistematização das sanções administrativas e por tipificar organicamente os crimes ecológicos (MILARÉ, 2004).

No Brasil, a preocupação com o meio ambiente instalou-se definitivamente no País a partir da ECO 92, despertando a necessidade de preservar a natureza, reduzindo os efeitos negativos das diversas atividades econômicas, pois a cada dia são criadas novas legislações, norma e tecnologias para este fim.

Portanto, a questão ambiental tem se tornado cada vez mais um ponto decisivo na continuidade ou não de um determinado empreendimento. A avaliação e a minimização dos impactos sobre o meio ambiente causados por todos os tipos de ações estão adquirindo cada vez maior importância, devido à evidente limitação dos recursos naturais disponíveis, à importância de se preservar o ambiente natural e a necessidade de se ter um desenvolvimento sustentável (CARNEIRO, 2003 apud LIMA, 2005).

Krause (1997, apud ARAÚJO, 2002), descreve de forma simples e em poucas palavras a relevância do tema: se o meio ambiente for destruído, não restará nada, nem empresários, nem matéria-prima, nem consumidor. Todos, sem exceção, devem buscar alternativas para um maior equilíbrio entre as atividades produtivas e o meio ambiente.

2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS

2.2.1 CONCEITOS E CLASSIFICAÇÕES

A Norma Brasileira Regulamentada NBR 10.004 (ABNT, 2004a) define os resíduos sólidos como sendo os resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de

varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistema de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. Os resíduos sólidos são classificados em:

- Classe I – Perigosos – são aqueles que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podem apresentar periculosidade à saúde pública e ao meio ambiente. E também por apresentarem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- Classe II – Não perigosos;
- Classe II A – Não inertes – aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
- Classe II B – Inertes – quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a NBR 10.007 (ABNT, 2004b), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10.006 (ABNT, 2004c), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Quanto à natureza ou origem os resíduos sólidos podem ser agrupados em cinco classes: lixo doméstico, lixo comercial, lixo público, lixo de fontes especiais e lixo domiciliar especial. Este último grupo compreende os entulhos de obras, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes e pneus (IBAM, 2001).

Os entulhos de obra, também conhecido como resíduos da construção civil, só estão enquadrados nesta categoria por causa da grande quantidade de sua geração e pela importância que sua recuperação e reciclagem vem assumindo no cenário nacional.

Um dos problemas ambientais das cidades contemporâneas é a geração excessiva de resíduos sólidos urbanos (RSU), constituídos de sobras de civilização, lixo, restos orgânicos das cozinhas, embalagens que envolvem os produtos consumidos no dia-a-dia,

desperdício de pneus, garrafas, latas de alumínio, papel e toneladas de resíduos gerados pelos milhões de pessoas que moram nas grandes cidades.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2006), estima-se que, atualmente, apenas 10% do esgoto coletado é tratado antes de ser lançado nos rios, lagos, praias e outros corpos de água receptores; 57,6 % da população ainda não dispõe de coleta de esgotos; a rede de abastecimento de água deixa de atender a 21,2% da população; 58,2% dos resíduos sólidos contabilizados pelo IBGE para este censo (cerca de 132.000 toneladas por dia) são descarregados em vazadouros à céu aberto (lixões) ou aterros controlados.

Essa excessiva quantidade de resíduos, gerados na habitação, comércio e serviços e na manutenção das cidades, tem sido causada pelo modelo atual de desenvolvimento econômico, pelo crescimento acelerado da população e sua concentração em cidades, e pela mudança de padrão de consumo ocorrida nas últimas décadas (AZEVEDO, 2004). O grande problema é que o lixo produzido atualmente pelos seres humanos contém muitos produtos industrializados que não se decompõem tão facilmente como os resíduos naturais. A Tabela 2.1 mostra o tempo necessário para decomposição de cada categoria de resíduo.

Tabela 2.1 Tempo aproximado de decomposição (FACHIN, 2004)

Papel	2 a 4 semanas
Tecidos de algodão	1 a 5 meses
Corda	3 a 14 meses
Meia de lã	1 ano
Vara de bambu	1 a 3 anos
Chiclete	5 anos
Estaca de madeira	13 anos
Lata de conserva	100 anos
Lata de alumínio	200 a 500 anos
Plástico	Até 450 anos
Fralda descartável	Indeterminado
Garrafa de vidro	indeterminado
Pneu	Indeterminado

Segundo o Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM, 2001), são 241.614 toneladas de resíduos sólidos urbanos produzidos diariamente no Brasil, das quais

cerca de 90.000 toneladas por dia são de resíduos sólidos domésticos. A estimativa é que cada brasileiro produz de meio a um quilograma de lixo por dia.

A cidade de Goiânia que foi projetada para abrigar 50 mil habitantes, conta atualmente com cerca de 1,2 milhões de habitantes. A estimativa é que o goianiense produz um quilograma de lixo por dia (1 kg/hab/dia), os quais são depositados no aterro sanitário da cidade. A Tabela 2.2 mostra a destinação do lixo produzido no Brasil e em Goiás (IBGE, 2006).

Tabela 2.2 Destinação do lixo no Brasil e em Goiás (IBGE, 2006)

DESTINAÇÃO	BRASIL	GOIÁS
Lixão	63%	75%
Aterro Controlado	18,4%	22%
Aterro Sanitário	13,6 %	3%
Outros	5%	-

A quantidade e qualidade do lixo produzido pelos habitantes de uma cidade variam de acordo com diversos fatores culturais e econômicos: nível de renda familiar mais elevado significa maior poder aquisitivo, que se traduz em maior consumo e maior ocorrência de embalagens. Grau de industrialização dos alimentos: implica em maior quantidade de embalagens e menor volume de resíduos orgânicos. Hábitos da população: aquisição de bebidas em embalagens descartáveis com maior volume em épocas de feiras livres, grandes festas, consumo de determinados produtos em função de fatores sazonais, nível de consciência das pessoas com relação ao destino do seu lixo, etc. (OLIVEIRA et al., 1998).

Segundo Azevedo (2004), o manejo impróprio dos resíduos provoca pontos críticos com lixo acumulado por toda parte, concentrações de entulho, áreas degradadas por disposição inadequada de resíduos, provocando a proliferação de moscas, ratos, baratas, transmissores potenciais de doenças; polui o ar, o solo e a água; e, ainda, a água da chuva arrasta os agentes poluentes presentes nas montanhas de lixo, infiltrando-se no solo e podendo atingir as águas subterrâneas.

A mesma autora destaca que as áreas próximas aos centros urbanos estão escasseando, o que dificulta cada vez mais a obtenção de áreas adequadas para abrigar sistemas de disposição final, existindo, ainda, forte rejeição da população com relação à implantação de tais sistemas. É grande a preocupação existente com a saturação dos aterros

sanitários, com a contaminação do lençol freático e com o impacto resultante do consumo desmedido de recursos naturais. A poluição do meio ambiente é um problema grave.

A Agenda 21 (2000) considera que os resíduos sólidos, em geral, constituem um dos principais causadores da degradação ambiental, tanto pelo volume gerado como por seu tratamento e sua destinação inadequada. Sua gestão representa um dos principais problemas a serem resolvidos por organismos do governo e prefeituras municipais. Na Agenda 21, são apresentados quatro princípios que guiam os programas relacionados aos resíduos, apoiados numa hierarquia de objetivos, a saber:

- Redução ao mínimo dos resíduos;
- Aumento ao máximo da reutilização e reciclagem ambientalmente saudáveis dos resíduos;
- Promoção do depósito e tratamento ambientalmente saudáveis dos resíduos;
- Ampliação do alcance dos serviços que se ocupam dos resíduos.

A partir dessa descrição, observa-se o grande papel que têm a redução e a reciclagem de resíduos como estratégia para o desenvolvimento sustentável (COSTA, 2003).

Segundo Fachin (2004), uma possível solução para a problemática dos resíduos sólidos é o chamado 7R's, um sistema internacionalmente reconhecido por administrar desperdício, também conhecido como Hierarquia da Administração do Desperdício. Dentro desta hierarquia, a organização deve em primeiro lugar procurar a redução e reutilização dos seus recursos. Caso não consiga reduzir ou re-utilizar, então a reciclagem dos resíduos pode ser um bom meio de diminuir os impactos ambientais. Caso ainda sobre resíduos, um caminho pode ser a recuperação dos resíduos ou de seu conteúdo energético. O último recurso, caso ainda existam resíduos, seria o gerenciamento de resíduos. Existem mais dois conceitos importantes que podem diminuir o início de todo esse ciclo: revalorizar e repensar.

A seguir são apresentadas as principais definições:

- Redução: Reduzir a quantidade de lixo é um compromisso importante e permanente. Cada pessoa produz cerca de 180 quilos de lixo num ano. Então, é fácil perceber que diminuir o desperdício depende muito da atitude de cada um de nós. É a melhor opção, porque significa que haverá menos resíduos a administrar. Caso seja realmente necessário adquirir algo, é importante pensar se podemos reduzir a quantidade de resíduos resultantes de sua utilização. Algumas atitudes contribuem para a redução de resíduos para o meio ambiente, como otimizar a utilização de folhas de papel, pesquisar e desenvolver novos produtos e

processos fabris, evoluir o "ecodesign" de produtos, promover a regulação/manutenção de máquinas e equipamentos, etc.

- **Reutilização:** Depois de reduzir o que nós usamos e conseqüentemente o resíduo, o próximo passo é pensar em reutilizar materiais. Trocar, doar à caridade, usar novamente de outra forma são modos efetivos para reutilização de materiais. Algumas atitudes contribuem para a se reutilizar materiais, como encaminhar de volta ao fornecedor, quando possível, bombonas, tonéis, barris, vidros, entre outros materiais reutilizáveis, reutilizar papéis de fotocópias como rascunho, encaminhar cartuchos de impressora e de *toners* para empresas licenciadas pelos órgãos ambientais que possam recarregá-los etc.
- **Reciclagem:** Todo o material descartado e que se transforma em resíduo nas cidades, em grande parte, deveriam ser retirados do lixo comum para serem recuperados como matéria-prima, podendo assim ser reutilizados na fabricação de um novo produto. Reciclar é aproveitar o material de que foi feito um objeto, uma embalagem ou qualquer coisa fabricada e que já tenha sido usada. Dessa maneira evita-se que o material acabe no aterro sanitário. Implantar ou utilizar programas de coleta seletiva de resíduos existente nas cidades é uma ótima opção, pois pode-se economizar na utilização dos recursos naturais e dar destino adequado aos resíduos que levarão muitos anos para serem decompostos pelo solo.
- **Recuperação:** Esta é a recuperação de materiais ou conteúdo de energia de um resíduo. Pode ser recuperada muita energia através dos materiais e biomassas residuais. Energia também pode ser gerada recuperando gás metano de aterros sanitários. É possível recuperar materiais para reutilização como óleos lubrificantes, solvente, ácidos, pneus de carros, areia de molde de fundição, água etc.
- **Gerenciamento de resíduos:** Esta é a disposição final do tratamento de um resíduo, uma vez que o material não pode ser mais usado de qualquer outro modo, devendo ser visto como última opção de recurso. Faz-se necessário criar ou terceirizar processos de tratamento que mudam o volume ou caráter do resíduo para minimizar seu impacto no meio ambiente. A estocagem de materiais recicláveis e resíduos deve seguir rígidos padrões de segurança e higiene. Recomenda-se que a área de estocagem seja distinta do lixo comum gerado.
- **Revalorização:** Devemos rever os valores ocidentais de maximização de lucros, e a exploração dos recursos naturais de maneira cartesiana, como se fossem infinitos. A prioridade para a utilização de energia "limpa" como a eólica, o do uso de meios

alternativos de transporte, como o da bicicleta, que além de reduzir os acidentes de trânsito, proporciona melhoria da qualidade do ar e redução do uso de combustíveis fósseis, que são finitos, além dos benefícios que proporciona à saúde devido ao gasto de energia física que requer para a locomoção. A redução do uso de embalagens descartáveis é outro exemplo do que se pode fazer em termos de racionalidade no uso de recursos naturais do planeta.

- **Repensar:** Estamos tão acostumados a consumir produtos acondicionados em embalagens descartáveis, altamente poluentes, que nem nos damos conta da montanha de lixo produzido diariamente nas nossas cidades, da qual uma parcela é responsabilidade nossa. Antes de nos preocuparmos em separar o lixo, deveríamos repensar, qual o lixo que temos realmente necessidade de produzir, reduzindo assim, o montante de resíduos que se acumulam diariamente tornando-se um problema para todo o ecossistema. Um exemplo de repensar o consumo, é a produção doméstica de sucos, ao invés da compra do produto pronto, acondicionado em embalagens multicamada ou PET. Atitudes dessa natureza, reduziriam em muito a quantidade e a qualidade do lixo produzido.

2.3 RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.3.1 LEGISLAÇÕES E NORMAS TÉCNICAS VIGENTES

Neste item, serão abordadas as legislações vigentes, no âmbito municipal, estadual e nacional, e também as normas técnicas existentes relacionadas com os resíduos da construção civil.

2.3.1.1 Nacional

No caso dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) existe, atualmente, abundância de dispositivos legais, uma vez que foi criado através da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981 (BRASIL, 2006), o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que além de outras competências, é responsável por estabelecer normas, critérios e padrões relativos ao controle e à manutenção da qualidade do meio ambiente através de suas resoluções.

No que se refere aos resíduos provenientes de atividades da indústria da construção civil, somente a partir de janeiro de 2003, quando entrou em vigor a Resolução nº

307 do CONAMA, é que se passou a ter um dispositivo legal capaz de tratar questões específicas dos Resíduos Sólidos da Construção e Demolição (RCD). Tal resolução estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos de construção, definindo e ressaltando a responsabilidade do gerador sobre os seus resíduos.

Dentre os muitos aspectos tratados pela Resolução nº 307 (CONAMA, 2002a), pode-se destacar alguns pontos:

- A classificação dos resíduos da construção de acordo com o seu potencial para reutilização e reciclagem (Art. 3º);
- A proibição da disposição dos resíduos da construção em aterros de resíduos domiciliares (Art. 4º);
- A obrigatoriedade da elaboração, como instrumento de gestão dos resíduos de construção, do Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (Art. 5º), o qual deverá incorporar:

- Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, a ser elaborado, implementado e coordenado pelos municípios e pelo Distrito Federal, e deverá estabelecer diretrizes técnicas e procedimentos para o exercício das responsabilidades dos pequenos geradores (Art. 7º);

- Projetos de gerenciamento dos resíduos da construção civil, que deverão ser elaborados e implementados pelos grandes geradores e terão como objetivo estabelecer os procedimentos necessários para manejo e destinação ambientalmente adequados dos resíduos (Art. 8º).

Esta Resolução entrou em vigor em 2 de janeiro de 2003. No entanto, até o momento nem todos os municípios implantaram as diretrizes apresentadas nesta resolução.

A resolução nº 313 (CONAMA, 2002b) dispõe, ainda, sobre o Inventário Nacional de Resíduos Industriais e obriga as indústrias a fornecerem ao Estado informações sobre a geração, características, armazenamento, transporte, tratamento, reutilização, reciclagem, recuperação e disposição final dos resíduos sólidos gerados pelas indústrias do país.

2.3.1.2 Estadual

De uma maneira geral, as leis estaduais vigentes no Brasil tratam de forma global

a questão dos resíduos sólidos, estabelecendo critérios e proibições para seu acondicionamento, transporte e disposição final.

Dessa forma, pode-se destacar na esfera estadual, a lei nº 14.248 de 29 de julho de 2002 (GOIÂNIA, 2006a) que dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá outras providências. E em seu artigo 73 relata que o gerador de resíduos sólidos de qualquer origem ou natureza responde civilmente pelos danos ambientais, efetivos ou potenciais, decorrentes de sua atividade, cabendo-lhe proceder, à suas expensas, as atividades de prevenção, recuperação ou remediação, em conformidade com a solução técnica exigida pelo órgão público competente, nos prazos assinalados, ou, em caso de inadimplemento, ressarcir, integralmente, todas as despesas realizadas pela Administração Pública para a devida correção ou reparação do dano ambiental.

Também está em vigor o Decreto nº 1.745 de 06 de dezembro de 1979 (GOIÂNIA, 2006b) que aprova o Regulamento da Lei nº 8.544, de 17 de outubro de 1978 e dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. O artigo 62 relata que o tratamento, quando for o caso, o transporte e a disposição de resíduos de qualquer natureza, de estabelecimentos industriais, comerciais e de prestação de serviços, quando não forem de responsabilidade do Município, deverão ser feitos pela própria fonte de poluição.

2.3.1.3 Municipal

Além das leis e decretos municipais que tratam dos resíduos sólidos urbanos de uma forma geral e aquelas que tangem ao transporte e disposição desses resíduos, algumas cidades brasileiras possuem legislação própria para a questão dos resíduos sólidos da construção civil.

Na cidade de Goiânia, no dia 26 de dezembro de 2005, foi promulgada a Instrução Normativa nº 018 (PREFEITURA DE GOIÂNIA, 2005), que estabelece, que os locais de destinação final dos resíduos da construção civil deverão ser previamente licenciados pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SEMMA), atendendo diretrizes técnicas e legislação pertinente ao licenciamento ambiental da atividade. Ficando vedada a disposição dos RCD em aterros de resíduos domiciliares, em encostas, corpos d'água ou em suas margens, lotes vagos, áreas protegidas por lei, áreas recobertas com vegetação de cerrado nativo ou em regeneração,

áreas alagadiças ou com lençol freático aflorante, margens das rodovias, estradas vicinais e ferrovias e as demais áreas não licenciáveis.

A SEMMA poderá autorizar, excepcionalmente, a disposição do entulho limpo para recuperação de áreas urbanas, de expansão urbana e rural, degradadas como erosões e voçorocas, mediante apresentação e aprovação de Projeto de Recuperação de Área Degradada (PRAD) no processo específico.

A referida norma estabelece ainda, que a responsabilidade pelos resíduos da construção civil pertence ao gerador, sendo o transportador co-responsável a partir do momento da retirada dos resíduos do local de origem. Todas as transportadoras que exerçam suas atividades no município de Goiânia deverão obrigatoriamente proceder junto à SEMMA o Licenciamento Ambiental.

2.3.1.4 Normas Técnicas

Com o despertar da sociedade para a importância da questão dos resíduos provenientes de atividades de construção e a conseqüente percepção da ineficácia dos modelos de gestão normalmente adotados pelos municípios, houve a necessidade de adoção de novas práticas nas cidades brasileiras (CARNEIRO, 2005).

No sentido de padronizar e normatizar essas ações, foi criada uma série de normas técnicas voltadas para o tema dos RCC, sendo elas:

- NBR 15.112 (ABNT, 2004d) – Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15.113 (ABNT, 2004e) – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15.114 (ABNT, 2004f) – Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de Reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15.115 (ABNT, 2004g) – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;
- NBR 15.116 (ABNT, 2004h) – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

2.3.2 CONCEITOS E CLASSIFICAÇÕES

Na literatura, diversos autores utilizam o termo Resíduos da Construção Civil (RCC), outros Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e outros preferem chamá-los apenas de entulho, não havendo um consenso na terminologia para o material estudado.

A Resolução N° 307 (CONAMA, 2002a), que entrou em vigor em janeiro de 2003, em seu artigo 2° define os resíduos da construção civil como aqueles provenientes de construções, reformas e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de aterros, tais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassas, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica e os comumente chamados de entulhos de obras, calça ou metralha. Define ainda, outros termos importantes para este estudo, como:

- Geradores: são pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos que gerem os resíduos definidos nesta Resolução;
- Transportadores: são as pessoas, físicas ou jurídicas, encarregadas da coleta e do transporte dos resíduos entre as fontes geradoras e as áreas de destinação;
- Agregado reciclado: é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infra-estrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia;
- Reutilização: é o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo;
- Reciclagem: é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação;
- Beneficiamento: é o ato de submeter um resíduo à operações ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto.

No artigo 3° da referida lei, os resíduos da construção civil são classificados em:

- Classe A – São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
 - De construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplenagem;
 - De construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes

cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, etc.), argamassa e concreto;

- De processo de fabricação ou demolição de peças pré-moldadas de concreto (blocos, tubos, meio-fios, etc.) produzidas nos canteiros de obras;

- Classe B – São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;
- Classe C – São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem / recuperação como os produtos oriundos do gesso.
- Classe D – São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2003 apud RIBEIRO; SERRA, 2001), os resíduos da construção civil apresentam em sua composição vários tipos de materiais, os quais são divididos em três grupos:

- Grupo I – Entulho Branco – são materiais compostos basicamente de cimento, areia, cal e brita. Ex: concreto, argamassa e blocos;
- Grupo II – Entulho Vermelho – são os materiais cerâmicos. Ex: telhas, tijolos e azulejos;
- Grupo III – Outros Materiais – são aqueles materiais passíveis de reciclagem, porém não como agregados. Ex: solo, gesso, metal, madeira, papel, plástico, matéria orgânica, vidro e isopor.

Os resíduos da construção civil são classificados pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a) como resíduos inertes – Classe II B, ou seja, estes resíduos não reagem quimicamente mesmo contendo elementos minerais. Esta classificação está sendo muito discutida no meio técnico, pois em muitos casos dependendo da origem, da composição ou do acondicionamento destes resíduos, eles podem apresentar níveis elevados de contaminantes que os classificam em uma das outras classes (VIEIRA; DAL MOLIN, 2004).

Zordan (1997), em seu estudo, enfatiza que o resíduo de construção a depender de sua origem e materiais constituintes, pode estar inserido em qualquer das classes apresentadas pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a), ou seja, perigoso, não-inerte ou inerte. Alerta ainda com relação a esta norma, que estes resíduos são analisados isoladamente e não está disponível um estudo feito com o RCC como um todo em que se garanta que ele ainda seria classificado

como resíduos inertes. Além disso, os RCC possuem uma tendência direta com a obra que os originou, ou seja, algumas construções poderiam apresentar materiais que os classificariam como não-inertes.

Daí a importância da realização dos ensaios de solubilização e lixiviação, a fim de se detectar a existência e os tipos de contaminantes. Estes estudos devem relacionar os possíveis elementos químicos considerados contaminantes que são passíveis de serem encontrados nos RCC e explicitar os seus valores orientadores, para viabilizar ou não a sua reutilização.

Os ensaios de lixiviação são realizados segundo a norma NBR 10.005 (ABNT, 2004i), que descreve os procedimentos para realização deste. O objetivo do ensaio é identificar a concentração de substâncias que se separam do material por meio de lavagem e percolação.

Os ensaios de solubilização são realizados segundo a norma NBR 10.006 (ABNT, 2004c), que descreve os procedimentos a serem utilizados para sua realização. Tem como objetivo a identificação da concentração de substâncias solúveis em água que estão presentes no material.

2.3.3 A PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DO RCC

2.3.3.1 Introdução

A construção civil se relaciona de forma intensa com o meio ambiente, já que é um setor que se utiliza dos espaços naturais e seus respectivos componentes para construir áreas adequadas para o convívio humano. O problema é que esta relação sempre tem como consequência o benefício para um lado e o prejuízo para o outro. Para se ter uma idéia do que a construção civil representa em maior escala, em termos de impactos ao meio ambiente, é necessário fazer algumas observações acerca das atividades ligadas a ela (BARBOSA, 2004).

Várias das suas etapas de produção geram impactos significativos, como por exemplo: quando é feito movimento de terras, deixando um talude exposto, isso pode provocar erosão do solo, desgastando a vegetação e podendo até gerar deslizamentos. Ou

mesmo quando é feita locação de uma obra em uma área preservada e se necessita retirar uma grande quantidade de espécies vegetais.

Os resíduos sólidos da construção civil brasileiros, *per se*, não representam grandes riscos ambientais em razão de suas características químicas e minerais serem semelhantes aos agregados naturais e solos. Entretanto, eles podem apresentar outros tipos de resíduos como óleos de maquinários utilizados na construção, pinturas e asbestos de telhas de cimento amianto. Nos Estados Unidos, a quantidade de resíduos perigosos presentes na massa de resíduos sólidos da construção civil é de 0,4% (ÂNGULO et al., 2003).

Continuando esta abordagem, pode-se dizer ainda que a construção civil é um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais, entre 15 e 50% do total consumido, e que o transporte destes é responsável por produzir grande poluição, considerando as distâncias e o grande volume de materiais transportados. Além disso, não se pode esquecer o alto valor de energia consumido na produção e transporte destas matérias-primas, o que em outras palavras, significa maior exploração natural à procura de fontes combustíveis (CASSA, 2001).

Segundo Schneider (2003), os impactos negativos advindos da extração de matéria prima para uso da construção civil são enormes. No Brasil, o consumo de agregados naturais somente na produção de concreto e argamassa é de 220 milhões de toneladas. Em todo o mundo, a mineração e o processamento de minerais desempenham um importante papel na determinação de problemas do meio ambiente como o desmatamento, a erosão do solo e a poluição do ar e da água. Globalmente, o setor minerário é um dos maiores usuários de energia, contribuindo assim para a poluição do ar e o aquecimento global.

Em volta das grandes cidades, areia e agregados naturais começam a ficar escassos. O crescente controle ambiental da extração das matérias primas também tem reduzido a liberação de jazidas e áreas de exploração. Em São Paulo, a areia natural, em sua grande maioria viaja distâncias superiores a 100 quilômetros.

Segundo Rezende (2003), em Goiânia observa-se um esgotamento das jazidas de cascalho, passíveis de utilização em pavimentação fazendo com que as construtoras busquem este agregado em Abadia de Goiás, aproximadamente 30 quilômetros de Goiânia. A tendência à médio prazo é que essas distâncias sejam cada vez maiores.

A construção civil consome cerca de 2/3 da madeira natural extraída e a maioria das florestas não são manejadas adequadamente. Algumas matérias primas tradicionais da construção civil têm reservas mapeadas escassas. O cobre e o zinco, por exemplo, têm reservas suficientes apenas para 60 anos. Embora estes valores possam sempre ser questionados, certamente exercem influência no preço dos produtos, dificultando o uso (SCHNEIDER, 2003).

Os profissionais da indústria da construção civil, não tinham nenhuma preocupação quanto ao esgotamento dos recursos não renováveis utilizados ao longo de toda sua cadeia de produção e, muito menos, com os custos e prejuízos causados pelo desperdício de materiais e destino dados aos rejeitos produzidos nesta atividade. No Brasil, em particular, a falta de uma consciência ecológica na indústria da construção civil resultou em estragos ambientais irreparáveis, agravados pelo maciço processo de migração ocorrido na segunda metade do século passado, quando a relação existente de pessoas no campo e nas cidades, de 75 (setenta e cinco) para 25% (vinte e cinco por cento), foi invertida, ocasionando uma enorme demanda por novas habitações (SCHENINI et al., 2004).

Segundo Cassa (2001), a falta de planejamento em infra-estrutura das cidades brasileiras, no ato de suas construções, provocou grandes problemas ao longo dos anos para as administrações municipais. Assim têm sido no caso da gestão do RCC, que em décadas passadas não representava uma preocupação, mas hoje é um ponto crítico em função das altas taxas de crescimento populacional e conseqüente aceleração no processo de urbanização das cidades.

Por não terem sido preparadas para suportar toda essa carga de resíduos de construção gerada atualmente, as cidades têm atuado através de suas administrações públicas apenas de forma corretiva sobre esta questão, ao que é dado o nome de Gestão Corretiva (CASSA, 2001).

Segundo o mesmo autor, a prática da Gestão Corretiva tornou-se um vício de administração onde o processo ocorre da seguinte forma: grande parte do RCC gerado é disposto de forma irregular sem fiscalização ou sequer punição dos infratores, devido à inexistência de um sistema funcional. Essas práticas então seguem acontecendo, até que a situação atinja um ponto de saturação quando as deposições ultrapassam os limites dos terrenos utilizados ilegalmente e começam a obstruir canais de drenagem ou acumular-se em

encostas, ocasionando danos aos meios social e ambiental e exigindo medidas corretivas do órgão responsável.

2.3.3.2 Geração

A construção civil gera resíduos na produção de materiais e componentes, nas atividades de canteiros de obra, durante a manutenção, modernização e finalmente na demolição (JOHN, 2001). Em vários lugares do mundo, a geração de resíduos da construção civil, tem sido motivo de preocupação para os pesquisadores devido à expressiva geração destes resíduos.

Adicionalmente ao problema de poluição por resíduos sólidos urbanos, industriais e efluentes líquidos, tem-se o problema do aumento da geração dos resíduos de construção e demolição. Supõe-se que são gerados de 2 a 3 bilhões de toneladas de entulho por ano em todo mundo. Esses resíduos, segundo Chung e Lo (2003 apud BARROS, 2005), representam aproximadamente de 20 a 30% do fluxo de resíduos sólidos gerados pelas cidades dos países mais desenvolvidos, sendo que muitas vezes esse potencial pode chegar a mais de 50% do total de resíduos sólidos produzidos.

Nos Estados Unidos, calcula-se que, no ano de 1994, a produção de resíduos da construção e demolição chegou a aproximadamente 25 milhões de toneladas. Já no ano de 1996, a estimativa aumentou para 136 milhões de toneladas, perfazendo um total per capita de 1,27 kg de material por habitante dia, devendo-se ressaltar que não estão incluídos nesse montante os resíduos de pavimentos e pontes (EPA, 2000).

Na Inglaterra e no País de Gales, a indústria da construção gera 53,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos da construção civil anualmente, dos quais 51% vão para os aterros, 40% são utilizados para recuperação de áreas degradadas e somente 9% são britados para uso futuro ou recuperados diretamente (LAWSON et al., 2001).

Em Hong Kong, a indústria da construção é a maior geradora de resíduos sólidos, sendo produzidos, em 1998, aproximadamente 32.710 toneladas por dia de RCC. Para gerenciar essa grande quantidade de resíduos, o governo do país adotou como política utilizar a porção inerte do resíduo para enchimento de áreas públicas que se encontram degradadas e a porção não inerte, em aterros de resíduo sólido urbano (POON et al., 2004).

A produção de grandes volumes de materiais de construção e a atividade de canteiro (construção, manutenção e demolição) são responsáveis por cerca de 20 a 30% dos resíduos gerados pelos países membros da União Europeia (EC, 1999). Este percentual corresponde a um valor compreendido entre 221 e 334 milhões de toneladas por ano (VAZQUEZ, 2001).

Na Europa, a geração de resíduos sólidos da construção civil em alguns de seus países podem ser analisadas através da Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Geração de resíduos em países da União Europeia (EC, 1999)

País	População aproximada [x 10³ hab]	Geração de resíduos sólidos da construção [x 10³ ton/dia]	Geração de resíduos sólidos da construção per capita [kg/ano]
Alemanha	82.012	965,5	3658
Bélgica	10.170	111,1	3408
Áustria	8.068	84,6	3272
Dinamarca	5.275	34,3	2030
Finlândia	5.132	30,3	1841
Holanda	15.567	64,4	1291
Reino Unido	58.902	214,7	1137
Suécia	8.844	18,9	666
Irlanda	3.652	6,1	518
França	58.492	75,6 ^(a)	403
Itália	57.461	64,1 ^(a)	348
Espanha	39.299	41,7 ^(a)	331
Portugal	9.934	9,6 ^(a)	302
Grécia	10.487	6,4 ^(a)	191

^(a) Não são considerados resíduos de pavimentação, escavação, vegetação e tubulações de drenagem, água, gás ou eletricidade.

De acordo com a Tabela 2.3, percebe-se que em países como Alemanha, Bélgica, Áustria e Dinamarca a geração anual per capita atinge números extremamente elevados quando comparada a países como Suécia, Irlanda, França ou Espanha (mesmo considerando que tais países, exceto a Suécia, não incluem em alguns tipos de resíduos no montante estimado).

No Brasil, os dados disponíveis ainda são insipientes, mas em estudos realizados em 10 cidades, a geração de resíduos da construção e demolição variou de 230 à 760 kg por habitante por ano, o que representa de 40% a 70% do resíduo sólido municipal. A estimativa é que 50% dos resíduos de construção e demolição nas grandes cidades brasileiras sejam

gerados nos canteiros de obras e outros 50% são gerados pelas atividades de demolição e manutenção de obras (PINTO, 1999).

Segundo Pinto (2001), na cidade de Salvador em 1998 a quantidade de resíduos da construção civil ultrapassou a marca das 500.000 toneladas por ano. Já em São Paulo, a produção diária ficou em torno de 16.000 toneladas no ano de 2003. Estima-se que somente cerca de um terço do total gerado (em torno de 5.300 toneladas por dia) chegou aos aterros públicos. Isto significa que aproximadamente 70% do montante produzido na cidade acaba sendo descartado ilegalmente (SCHNEIDER, 2003).

A Tabela 2.4 mostra uma simulação da geração per capita dos resíduos da construção civil com dados da população retirados do IBGE (2006).

Tabela 2.4 Geração de resíduos nas principais cidades brasileiras modificado de Pinto (1999)

Cidade	População aproximada (x10³ hab)	Geração de RCC (ton/dia)	Geração de RCC per capita (kg/ano)	Ano
São Paulo	10.927	16.000	457	2003
Ribeirão Preto	456	1.043	714	1995
Rio de Janeiro	6.094	1.038	53	1997
Belo Horizonte	2.375	3.923	515	1997
Porto Alegre	1.428	2.231	487	1997
Salvador	2.673	2.746	320	1997
Recife	1.501	692	144	1997
Curitiba	1.757	2.846	505	1997
Fortaleza	2.374	1.923	253	1997
Florianópolis	396	1.269	999	1997
Brasília	2.333	3.269	437	2007
Goiânia	1.201	500	156	2007

2.3.3.3 Deposição inadequada

Percebe-se que a cada dia aumenta o número de resíduos da construção civil e a preocupação com os grandes montantes de entulhos gerados vai mais além, em função de um agravante que é a disposição irregular, já que nem sempre o Estado dota de locais de fácil acesso e ambientalmente corretos, provocando a geração de custos e agravando problemas urbanos, como: comprometimento da paisagem, do tráfego de pedestres e de veículos e da drenagem urbana, atração de resíduos não inertes, multiplicação de vetores de doenças e outros efeitos.

Pesquisa realizada sobre riscos à saúde pública decorrentes dos resíduos da construção civil acondicionados em caçambas metálicas localizadas em vias públicas, observou a presença de material orgânico, produtos perigosos e de embalagens vazias que podem reter água e outros líquidos e favorecer a proliferação de mosquitos e outros vetores de doenças (ARAÚJO, 2002).

Apesar da sociedade ter demonstrado uma certa preocupação com os resíduos da construção civil, em função da quantidade gerada e, principalmente, pelos problemas causados pela deposição indevida, eles têm recebido pouca atenção e regulamentação do governo e do próprio setor de construção. Principalmente, por serem gerados por uma atividade que é fundamental para o desenvolvimento econômico e para o suprimento de necessidades básicas, como moradia, saneamento e infra-estrutura, bem como por apresentarem características inertes. A falta de gerenciamento desses resíduos acarreta sua deposição indevida, sendo eles jogados em terrenos baldios, beiras de estrada, córregos e, quando dispostos em lixões e aterros, pelo seu alto volume, acabam por saturar rápido a capacidade do local. Esses resíduos têm se convertido para as prefeituras num problema de limpeza pública, pois elas têm de arcar com os custos de sua remoção, quando os infratores não são identificados (BARROS, 2005).

Às vezes, estes resíduos são aceitos por proprietários de imóveis que os empregam como aterro, normalmente sem maiores preocupações com o controle tecnológico do processo. Esta prática pode levar a problemas futuros nas construções erguidas nestas áreas quando não a acidentes piores, como o da Favela Nova República em São Paulo, onde o desabamento de um aterro composto de resíduo de construção causou a morte de várias pessoas (JOHN; AGOPYAN, 2001).

Segundo Brito Filho (1999) a Prefeitura Municipal de São Paulo recolhe diariamente 4 mil toneladas de entulho a um custo mensal de R\$ 4,5 milhões, o que permite estimar um custo de US\$30/ton.

Estima-se que os gastos variam entre R\$ 1 milhão e R\$ 1,5 milhões com recolhimento de entulho disposto irregularmente, em municípios acima de 1 milhão de habitantes. Em Goiânia, gasta-se em torno de R\$ 2 milhões/mês na coleta dos RCC disposto irregularmente. Destaca-se ainda, que a produção das construções informais e autoconstruções responde por 75% a 80% dos entulhos produzidos (PMGRSIC, 2004).

2.3.3.4 Composição

A composição dos resíduos de construção pode variar significativamente e está condicionada aos fatores regionais. As diferenças observadas na composição do entulho podem ser atribuídas ao período de amostragem, à técnica de amostragem utilizada, ao local de coleta da amostra (canteiro/aterro) e ao tipo de obras predominantes, tais como trabalhos rodoviários e sobras de demolição.

Os seguintes componentes podem ser considerados como parte dos resíduos de construção: blocos cerâmicos, tijolos, outros materiais de alvenaria, materiais cerâmicos de revestimento, argamassas a base de cimento e cal, concretos armados ou não, solos, resíduos de vegetação, rochas, madeiras e compensados, forros, gessos, telhas, pavimentos asfálticos, encanamentos, tubulações sanitárias, vidros, plásticos, papel, papelão e outras embalagens, metais, fiações elétricas, resinas, colas, tintas entre outros e em proporção que podem variar de acordo com o tipo de obra em que é originado, dos aspectos sócio-econômicos de cada região e dos processos construtivos adotados (SILVEIRA, 2005).

Segundo estudos realizados em Madri, na Espanha, a composição dos resíduos de construção e demolição é 75% de entulho, sendo 54% ladrilhos, azulejos e outros materiais cerâmicos, 12% concreto de cimento Portland, 5% pedras e 4% areias e outros agregados (EC, 1999). Na Holanda, mais de 90% dos resíduos de construção e demolição contém alvenaria e concreto e do restante fazem parte materiais como madeiras, metais, embalagens e plásticos (DORSTHORST, 2000).

Embora há escassez de estatísticas no Brasil, a Tabela 2.5 apresenta dados da composição do entulho para algumas cidades brasileiras.

Tabela 2.5 Composição do entulho de algumas cidades brasileiras, em porcentagem (CARNEIRO et al., 2001).

Material	Origem			
	São Carlos	São Paulo	Ribeirão Preto	Salvador
Concreto e argamassa	69	33	59	53
Solo e areia	-	32	-	22
Cerâmica	29	30	23	14
Rochas	1	-	18	5
Outros	1	5	-	6

Segundo Corcuera Cavalcanti (2003), em média, o entulho que sai dos canteiros de obras brasileiras é composto basicamente por 64% de argamassa, 30% de componentes de vedação como tijolos e blocos e 6% de outros materiais como concreto, rocha, areia, metálicos e plásticos.

2.4 RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A indústria da construção civil é, com certeza, um dos setores mais fortes da economia e principal consumidora de matérias primas e energia. Dessa forma, acaba provocando um enorme impacto ambiental através da geração de resíduos e outras formas de poluição ambiental, havendo a necessidade de mudança em sua cadeia produtiva na busca do desenvolvimento sustentável. Uma das formas de se fazer essas mudanças é o que estão fazendo alguns governos municipais que vêm agindo ativamente na reciclagem de resíduos de construção e demolição.

Para melhor entendimento, a reciclagem pode ser definida, segundo Silveira (2005), como sendo o ato de introduzir o resíduo no seu ciclo de produção em substituição total ou parcial de uma matéria prima. Já de acordo com Paiva e Ribeiro (2005), todas as ações que tenham como objetivo permitir a reutilização de materiais ou produtos, de modo a estender seu ciclo de vida e diminuir os problemas com a forma de deposição dos resíduos ou de emissão de poluentes, são consideradas atividades de reciclagem.

Segundo Ângulo; Zordan e John (2005), a vida útil de um produto é sempre limitada, após a qual o produto se transforma em resíduo. Mesmo os produtos duráveis têm vida útil finita, pois as atividades de manutenção normalmente incorporam grandes quantidades de energia nos materiais e pela 2ª Lei da Termodinâmica, todo processo de transformação de energia dá-se a partir de uma forma mais nobre para uma menos nobre ou de menor qualidade. Assim, os produtos por mais duráveis que sejam, em algum momento vão se transformar em pós-consumo. Certos produtos não se enquadram de acordo com o especificado e acabam se tornando resíduos. Na verdade, sabe-se que ações isoladas não irão solucionar os problemas advindos por este resíduo e que a indústria deve tentar fechar seu ciclo produtivo de tal forma que minimize a saída de resíduos e a entrada de matéria-prima não renovável.

É necessário reciclar para que sejam preservados os recursos naturais não renováveis e que sejam elaboradas leis ambientais severas que dificultem a fabricação de produtos maléficis ao meio ambiente. É viável também seguir a orientação dos ambientalistas para a redução, reciclagem e a reutilização dos resíduos como um todo, evitando assim o sistema de descartes. A reutilização dispensa a extração de matéria prima da natureza, obtendo assim a conservação de matérias-primas não renováveis; a redução do consumo de energia; menores emissões de poluentes como CO₂ e conseqüente melhoria da saúde e segurança da população (LIMA, 2005).

O setor de construção civil permite grandes possibilidades de reciclagem e os diferentes ramos da cadeia produtivas estão presentes em todas as regiões facilitando projetos de simbiose industrial que permitem uma reciclagem local. Boa parte dos materiais consumidos pela construção civil são agregados para pavimentação, concreto, argamassa e elementos de alvenaria de produção regional. A maioria dos componentes de construção é de produção simples reduzindo os requisitos e simplificando os processos. Isto facilita a possibilidade de utilização de agregados diferentes dos tradicionais. Esta produção mais simples pode significar que a quantidade de capital para a implantação da unidade de reciclagem seja reduzida (JOHN, 2000).

Segundo o mesmo autor, existe enorme possibilidade de utilização de grandes volumes de produtos com baixa resistência mecânica se comparada com outros setores de engenharia, o que torna possível a convivência com materiais que apresentam defeitos microestruturais e impurezas. A reciclagem de resíduos na construção civil resulta em uma oferta maior de produtos alternativos para uma mesma função e, possivelmente, de soluções mais adequadas para situações específicas, com ganhos de eficiência geral do processo.

Apesar de todos os aspectos da reciclagem na construção civil, algumas barreiras necessitam serem vencidas. Há necessidade de desenvolver produtos com vantagem tecnológica em relação aos tradicionais. Há uma concepção por parte dos consumidores e até de técnicos da área de que um produto contendo resíduo possui qualidade inferior. Assim, é necessário que as resistências técnicas sejam vencidas pela demonstração, através de pesquisas, do desempenho técnico e ambiental igual ou superior ao produto tradicional (JOHN, 2000).

O mesmo autor conclui que a reciclagem é essencial para o desenvolvimento sustentável, uma vez que é impossível pensar em uma sociedade que não gerem resíduos, pois a reciclagem apresenta vantagens potenciais como a preservação de recursos naturais, redução de consumo de energia, redução da poluição e aterros, geração de empregos e aumento da competitividade da economia, apesar que cada situação específica deverá ser objeto de análise da situação, como a análise do ciclo de vida, na busca de melhores opções. Considera ainda que no Brasil as políticas de incentivo à reciclagem estão um pouco atrasadas em relação a vários países e existe um longo caminho a percorrer e concluiu também que a cadeia produtiva da construção civil já é a maior recicladora da economia e que possui um enorme potencial para aumentar o volume de materiais que recicla, dada a massa de materiais que consome, sua capilaridade regional e as características dos seus materiais. Assim a reciclagem dos resíduos sólidos da construção civil é um desafio a ser enfrentado.

Alguns aspectos metodológicos devem ser levados em consideração quando se pretende desenvolver um novo produto gerado por reciclagem de resíduos tais como: o estudo do processo de produção e gestão do resíduo; suas eventuais variações sazonais ou tendência a longo prazo e custos de gestão do resíduo.

A caracterização do resíduo deve ser a mais completa possível. O novo produto deve ser estudado profundamente seguindo os conceitos da ciência dos materiais. Aspectos químicos relevantes devem ser compreendidos assim como uma avaliação da durabilidade e mais fundamentalmente ainda, uma avaliação do impacto ambiental. O risco de contaminação ambiental deve ser analisado através de ensaios de lixiviação, haja visto que a lixiviação é um fenômeno complexo e depende da forma e das condições de exposição do produto, ao longo de seu ciclo de vida. O estudo de viabilidade econômica do novo produto pode ser realizado pelos métodos taxa de retorno e tempo de retorno. Contudo existe um forte risco de valorização do resíduo, caso a demanda por ele cresça. Assim, é desejável que o modelo de negócio envolva uma garantia de manutenção de preço de resíduo por período de tempo suficientemente longo para amortizar os investimentos, de acordo com a taxa de retorno selecionada pelo investidor (JOHN, 2000).

De uma forma geral, estes ciclos para a construção tentam aproximar a construção civil do conceito de desenvolvimento sustentável, entendido aqui como um processo que leva à mudanças na exploração de recursos, na direção dos investimentos, na orientação do desenvolvimento tecnológico e nas mudanças institucionais, todas visando à harmonia e ao

entrelaçamento nas aspirações e necessidades humanas presentes e futuras. Este conceito não implica somente multidisciplinariedade, envolve também mudanças culturais, educação ambiental e visão sistêmica (JOHN, 2000).

Embora a redução na geração de resíduo seja sempre uma ação necessária, ela é limitada, uma vez que existem impurezas na matéria-prima, envolve custos e patamares de desenvolvimento tecnológico. É necessário que o novo material a partir do resíduo não venha a contaminar, nem internamente e nem externamente, as construções que usam tais resíduos, seja pela contaminação da água, radiação ou volatilização de frações orgânicas (SILVEIRA, 2005).

Pesquisas sobre reciclagem de resíduos industriais vêm sendo desenvolvidas em todo mundo. A reciclagem pode ser classificada como primária, secundária e terciária (VAZQUEZ, 2001):

- Reciclagem primária é aquela em que o produto original passa a ser um material direto com a mesma finalidade que o gerou. Como exemplo tem-se a reciclagem do aglomerado asfáltico “in situ” e o resíduo de argamassa de revestimento que é reciclado no canteiro para ser utilizado como material de enchimento;
- Reciclagem secundária consiste na reintrodução do material no ciclo com um propósito que não a mesma que o gerou. Como exemplo tem-se a utilização do agregado reciclado no pavimento como material de sub-base de pavimentação e concreto resultante de demolição reciclado como agregado de um novo concreto;
- Reciclagem terciária é aquela em que se faz a decomposição do material usado para obter outro material. Como exemplo tem-se a despolimerização de um plástico para obter outro plástico polimérico.

A utilização de materiais secundários é do ponto de vista ambiental a melhor modalidade de reciclagem, pois possibilita a devolução da maior quantidade de material à sua aplicação original (VAZQUEZ, 2001).

A Figura 2.1 demonstra as ações que afetam diretamente as atividades de reciclagem. Ela exige investimentos, mas gera benefícios como a redução de custos.

O custo do impacto causado pela produção e disposição de resíduos da construção civil para a empresa é representado por penalidades como multa, ressarcimentos a terceiros

por prejuízos causados, recuperação de áreas degradadas e outros fatores que são usados para penalizar as empresas pela falta de mecanismos de proteção ambiental. A reciclagem compreende todas as ações realizadas para o reaproveitamento dos rejeitos produzidos pelo setor de construção civil (PAIVA; RIBEIRO, 2005).

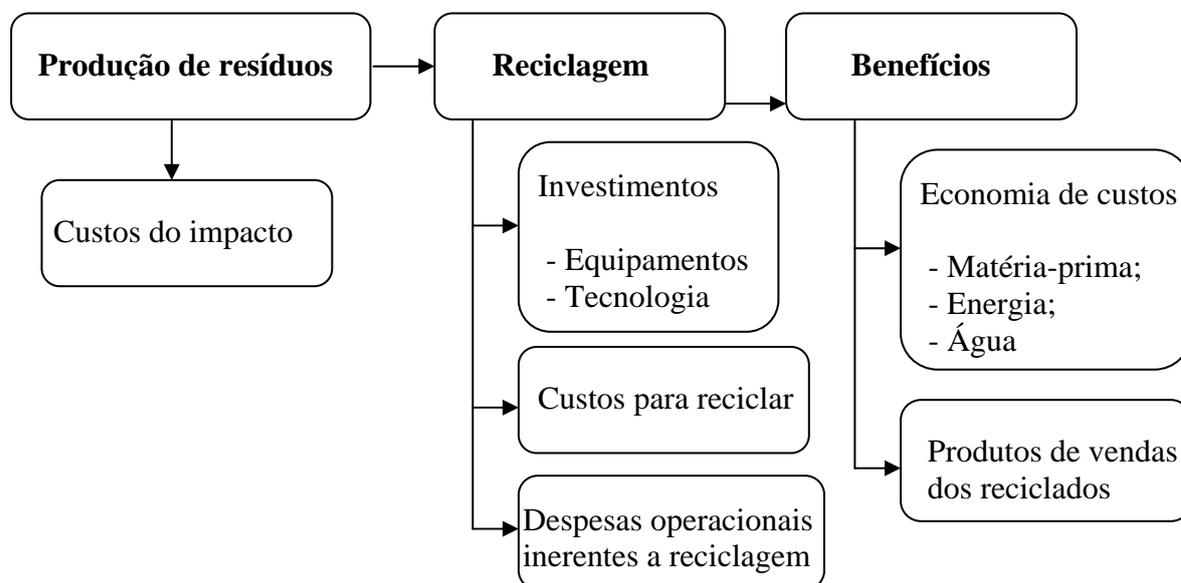


Figura 2.1 As variáveis da reciclagem (PAIVA; RIBEIRO, 2005)

Os investimentos são todos os ativos de longa duração usados na atividade de reciclagem. Enquanto os custos são todos os gastos necessários ao processo operacional da atividade de reciclagem, que seriam o manuseio das máquinas e equipamentos, mão de obra, insumos, etc.

Os benefícios são os retornos referentes à aplicação na reciclagem, que podem ser economia de custos e o produto da venda de materiais reciclados. A economia de custos existe quando consegue-se diminuir os gastos com os materiais que compõem a construção de uma obra, a partir do melhor aproveitamento das matérias-primas e da eliminação das perdas.

Produto da venda é valor de venda dos materiais reciclados, o qual se constituirá em redução de custos, tendo em vista que materiais que compuseram os resíduos têm seus custos inseridos no custo do produto vendido do período.

Uma empresa que quer se manter no mercado necessita ter suas contas enxutas, controladas e tendo o menor custo possível dentro dos objetivos propostos pelos seus acionistas ou proprietários. Dentro desta proposta, a empresa de construção civil também não foge à regra, ela tem que ser competitiva e estar sempre atenta ao mercado. Como benefícios

da reciclagem podem ter seus custos reduzidos, diminuir o desperdício e melhorar seu processo de produção.

Entendendo a reciclagem como um programa de preservação do meio ambiente, os custos necessários ao seu processamento são todos os gastos feitos para que o processo aconteça, como transporte do entulho, a mão de obra, o combustível usado no caminhão, a energia elétrica e outros (PAIVA; RIBEIRO, 2005).

No que se refere às vantagens econômicas na produção de agregados a partir dos entulhos, que é um das formas mais simples de seu reaproveitamento, tem-se economia de cerca de 80% (oitenta por cento) em relação ao preço dos agregados convencionais (SCHENINI et al., 2004). Pode-se ainda destacar a redução de até 75% (setenta e cinco por cento) do custo da remoção e tratamento de doenças para o município, o que produz uma cadeia de benefícios, que são resumidos a seguir (CARNEIRO et al., 2001):

- Redução dos custos com a remoção do material depositado clandestinamente ao longo das vias públicas, terrenos baldios, cursos d'água e encostas, impedindo a contaminação de novas áreas de despejo;
- Aumento da vida útil dos aterros sanitários, reduzindo a necessidade de áreas para a implantação de novos aterros;
- Diminuição nos custos de operação dos aterros sanitários, pela exclusão do entulho;
- Transformação de fonte de despesa em fonte de receita;
- Geração de empregos e aumento da competitividade da economia.

Os agregados reciclados devem obedecer a certas propriedades físicas e fatores econômicos para substituir os agregados naturais, tais como: disponibilidade e custos de transporte e propriedades físicas dos materiais que influenciam na possibilidade dos agregados reciclados poderem substituir os agregados naturais.

Vários fatores justificam a substituição:

- O preço do agregado reciclado ser menor que o do agregado natural;
- A pressão da comunidade sobre o funcionamento das pedreiras, que é intensa e obriga, em muitos casos, o seu fechamento;
- A luta pelo espaço ser grande, devido ao avanço da urbanização;
- O resíduo poder ser consumido pela própria indústria que o gera, com pouco nível de processamento.

O uso de materiais alternativos deve aumentar consideravelmente no futuro em virtude da existência de legislações ambientais mais severas e da escassez de agregados naturais (ALT-MAT, 1999 apud MOTTA, 2005).

Infelizmente o preconceito quanto a utilização de materiais reciclados ainda é muito grande e geralmente está relacionado à falta de informações e estudos que demonstrem ao usuário o desempenho do produto, garantindo, assim, o seu uso seguro. Com o objetivo de superar esse problema, torna-se necessário o desenvolvimento de projetos-piloto que comprovem, em condição de uso, o seu desempenho, permitindo, ainda, a avaliação da satisfação das necessidades do usuário do material reciclado e possibilitando o monitoramento das suas propriedades ao longo do tempo (CARNEIRO et al., 2001).

Segundo os mesmos autores, embora a reciclagem do RCC não seja uma atividade nova, a adequação desse processo a uma atividade econômica é bastante recente. Fatores como envolvimento da iniciativa privada e boa aceitação do mercado podem ser decisivos para o sucesso de uma linha de atuação como essa. Estudos econômicos preliminares demonstram que os agregados reciclados apresentam custos inferiores aos agregados convencionais, embora esses estudos devam ser aprofundados para atender à economia de mercado. Portanto, torna-se fundamental o desenvolvimento de pesquisas de mercado, para a análise da viabilidade econômica da reciclagem do entulho e dos materiais de construção produzidos a partir desse resíduo, incluindo o mapeamento dos possíveis parceiros e concorrentes e a quantificação das vantagens para os diversos agentes envolvidos no processo (gerador do resíduo, responsável pela reciclagem, produtor de materiais de construção, usuário do produto, poder público, entre outros).

Além disso, aspectos de *marketing* devem ser introduzidos no processo, buscando-se a aceitação do uso do material reciclado e a sua valorização como material ambientalmente correto. O recente destaque que o conceito de qualidade vem tendo nas empresas deve ser efetivamente aplicado através da redução de perdas, da gestão adequada dos resíduos e da sua reciclagem.

A sociedade só vai reciclar eficientemente quando esta prática se tornar vantajosa economicamente, ou seja, quando o recurso reciclado for mais barato que o não reciclado, ou ainda quando ele não estiver mais disponível na natureza. Portanto, a reciclagem só é viável se virar negócio. É necessário tornar o processo de destinação do entulho em áreas impróprias

inviável economicamente e o governo incentivar a iniciativa privada a adotar a reciclagem de resíduos da construção (JOHN; AGOPYAN, 2001).

2.4.1 EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS

A reciclagem é uma atividade que por razões de ordem prática e econômica vem sendo motivada desde a antiguidade (JOHN, 2000). Por volta de 1860, há notícias de blocos de concreto britados como agregado de novos concretos na Alemanha. E na Alemanha, em 1928, também iniciou-se os primeiros estudos sistemáticos sobre as características dos agregados reciclados.

Nos países desenvolvidos tem-se os melhores exemplos de reaproveitamento dos resíduos sólidos, apesar destes também enfrentarem, por ausência ou falha de fiscalização, problemas com entulho lançado na paisagem urbana, em aterros ou vias públicas. Nos Estados Unidos, por exemplo, existem fortes empresas que geram lucros enormes com a demolição de casas, transportando todo esse material para as usinas recicladoras onde são separados e montanhas de materiais estão prontos para serem vendidos como matéria-prima (LATTERZA, 1998).

Com relação à reciclagem dos resíduos sólidos da construção civil nos Estados Unidos, estima-se que, em 1996, 1.800 centrais de reciclagem estavam em operação. A taxa de reciclagem de resíduos da construção civil no ano de 1996 ficou aproximadamente entre 20 e 30% (EPA, 2000). Em função de medidas exercidas para desenvolver mercados para materiais recuperados, o número de instalações de reciclagem continua a crescer, estando em operação, em 1998, aproximadamente, por volta de 3.500. Os resíduos mais comumente recuperados e reciclados são: concreto, asfalto, metais, madeira e, em grau bem menor, paredes de gesso acartonado e pequenas pedras de asfalto (FRANKLIN ASSOCIATES, 1998).

Os países europeus movidos pela escassez financeira e de matérias primas, lançaram mão de britadeiras utilizadas em pedreiras, moendo os entulhos para a utilização na reconstrução de suas cidades (CORCUERA CAVALCANTI, 2003). A partir de 1983 a reciclagem de materiais vem sendo regularmente praticada na Europa, Japão e Estados Unidos e vem desde então se tornando uma alternativa viável na construção civil.

Em alguns outros lugares do mundo, a reciclagem destes materiais atinge números expressivos, como no caso da cidade de Sidney, na Austrália, onde 80% dos resíduos de demolição são reciclados, e também da Holanda, que recicla ou reutiliza 90% dos seus resíduos de construção, como descrita na Tabela 2.3, que relata as porcentagens reutilizadas ou recicladas destes materiais em países da União Européia, segundo a EC (1999).

É possível verificar de acordo com a Tabela 2.6, uma discrepância dos números relacionados à reciclagem ou reutilização de resíduos entre diferentes países da Comunidade Européia, pois Holanda, Bélgica e Dinamarca realizam em grande escala estes processos, e no entanto, Espanha, Grécia, Irlanda e Portugal não os fazem da mesma forma.

Conforme os dados da Tabela 2.3 e Tabela 2.6, que apresenta a geração de resíduos de construção em diversos países da Europa pode-se notar que embora a Alemanha seja o maior gerador de resíduos de construção dentre os países listados (3.658 kg/ano per capita), o índice de reutilização ou reciclagem é baixa (17%) quando comparada com a da Bélgica, que é o segundo país em quantidade produzida (3.408 kg/ano per capita) e em reutilização ou reciclagem (87%).

Tabela 2.6 Geração de resíduos sólidos da construção civil em países da União Européia (EC, 1999).

País	Porcentagem reutilizada ou reciclada (%)
Holanda	90
Bélgica	87
Dinamarca	81
Finlândia	45
Reino Unido	45
Austrália	41
Suécia	21
Alemanha	17
França	15
Itália	9
Espanha	<5
Grécia	<5
Irlanda	<5
Portugal	<5

De acordo com Sheneider (2003) a desigualdade de números referentes à reutilização ou reciclagem em diferentes países pode ocorrer em função de legislações vigentes, grau de desenvolvimento local, disponibilidade de recursos naturais, ou ainda de custo do processo ou transporte.

Na Holanda, o uso de materiais reciclados é amplamente promovido pelas autoridades e indústrias do país, principalmente em função do custo de disposição final de resíduos e das limitações impostas à extração de materiais naturais (DORSTHORST, 2000).

Segundo informações da Agência de Proteção Ambiental da Dinamarca, os componentes principais dos resíduos provêm de cimento, asfalto, pedra e madeira. A reciclagem desses resíduos chega a 81%. Esses resultados têm sido obtidos, dentre outras razões, graças à introdução de uma política de gestão adequada, incluindo um imposto estatal sobre os resíduos que não são reutilizados, além de acordos com a Associação Dinamarquesa do Setor de Construção sobre a demolição seletiva dos resíduos (DANISH, 1999).

Em Portugal, o baixo índice de reutilização ou reciclagem, equivalente a menos de 5%, provavelmente se deve à não aceitação de agregados reciclados de resíduos de construção pelas maiores autoridades do setor rodoviário português (EC, 1999). Na Itália, a quantidade reutilizada ou reciclada de 9% também não é significativa, mas isto pode ocorrer devido à cultura local de se restaurar ao invés de se demolir.

2.4.2 EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS

Segundo Corcuera Cavalcanti (2003), a reciclagem de entulho municipal envolve planejamento, infra-estrutura administrativa, pequenos locais de apoio para organização e triagem de entulho e a estação de reciclagem propriamente dita. O processo de reciclagem por britadores passa basicamente pela seleção, limpeza, trituração e classificação granulométrica dos materiais, para posterior utilização específica.

Desde 1983, o arquiteto Tarcisio de Paula Pinto pesquisa o desperdício na construção civil e a possibilidade de reaproveitamento desses materiais. A instalação das usinas de reciclagem no Brasil iniciou-se em 1991 com a Usina de Reciclagem de Entulho de Itaquera (Figura 2.2), a primeira com essa função no Hemisfério Sul, localizada no bairro de

Santo Amaro, zona Sul de São Paulo, com uma produção diária de até 700 m³, destinado à aplicação como revestimento primário, do tipo encascalhamento de ruas (LATTERZA, 1998).



Figura 2.2 Usina de Reciclagem de Entulho de Itaquera (FELDMAN, 2005)

Segundo o mesmo autor, esta usina esteve desativada por mal planejamento, pois sua localização condicionava em elevadas distância média de transporte e ainda por seus depósitos possuírem baixa capacidade. Depois de algum tempo a usina passou por uma reformulação. Atualmente a usina está em funcionamento, porém com capacidade abaixo de seu potencial máximo.

No final de 1996, entrou em operação uma estação de reciclagem de RCC na cidade de Ribeirão Preto, produzindo cerca de 970 t/dia de resíduo da construção civil (LATTERZA, 1998).



Figura 2.3 Usina de Reciclagem de Ribeirão Preto: (a) vista frontal; (b) área de estocagem de material (LATTERZA, 1998)

Atualmente, com produção diária abaixo da capacidade total, produz reciclados na forma de brita corrida. Os reciclados têm sido utilizados, em sua maior quantidade, na recuperação de vias públicas da periferia sem pavimentação asfáltica e, em menor proporção, na fabricação de blocos.

Na cidade de Belo Horizonte (MG), o elevado custo de remoção de entulhos depositados em 134 pontos de descarga clandestina, obrigou a prefeitura a elaborar um projeto visando a reciclagem destes materiais. O projeto prevê quatro estações de reciclagem com capacidade de 8,8 mil toneladas/mês e conseqüente produção de 5500 m³ de agregados reciclados. Atualmente, a cidade possui três usinas de reciclagem de entulho (Figura 2.4) (CORCUERA CAVALCANTI, 2003).

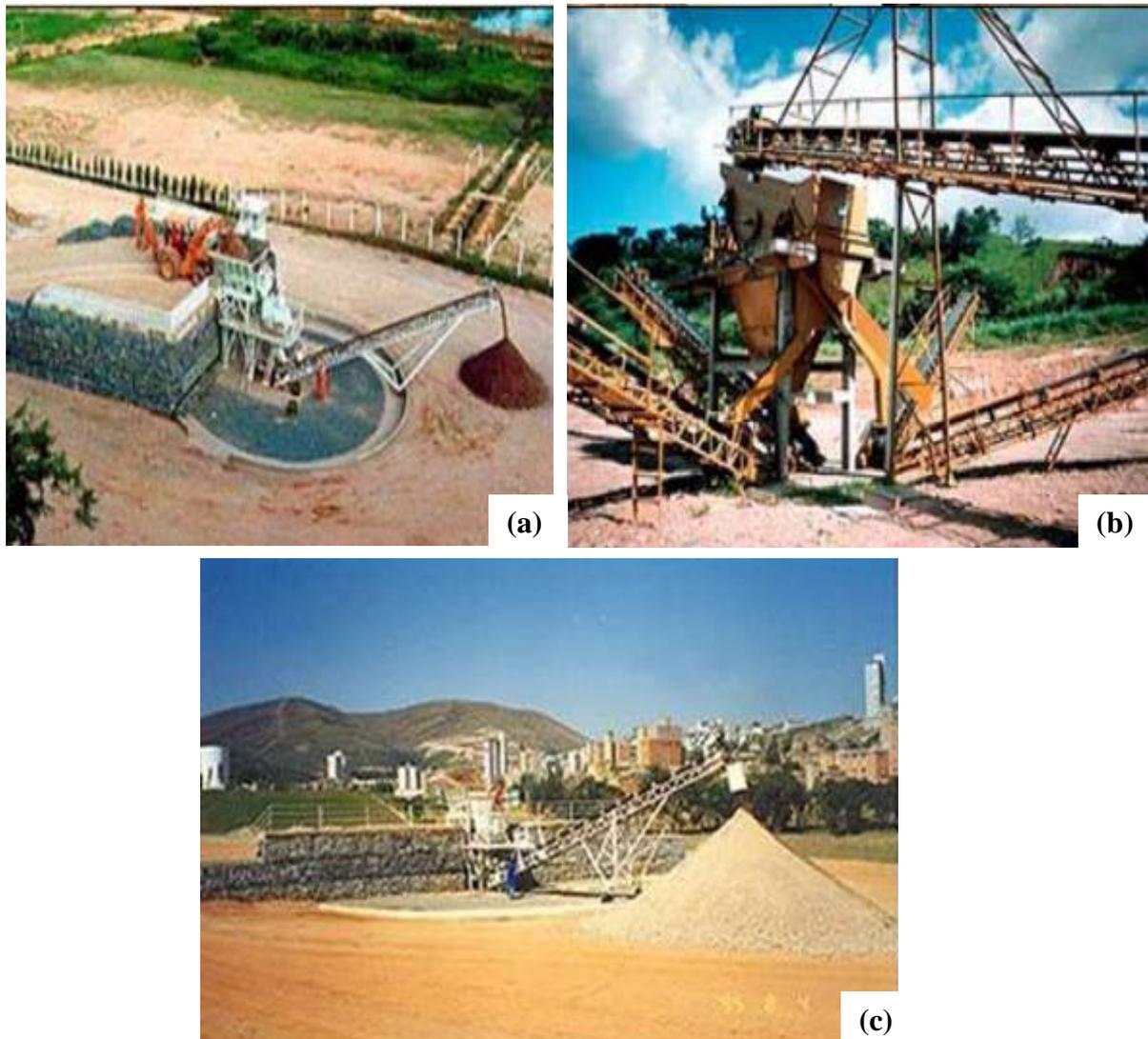


Figura 2.4 Usinas de Reciclagem de Entulho de Belo Horizonte: (a) Usina Pampulha; (b) Usina BR 040; (c) Usina Estoril (PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, 2006)

Em 1995, foi implantado a primeira usina de reciclagem de resíduos da construção civil (Figura 2.4), com capacidade para processar 120 tonelada/dia (SCHENINI et al., 2004). A usina é cercada por barreiras vegetais e dotada de aspersores de água para a contenção do pó. A usina possui uma área para seleção prévia do material, onde o mesmo é classificado conforme seu grau de pureza. O coração da usina é formado por uma britadeira de dentes que permitem a moagem do material em granulometrias pré-determinadas. Um eletroímã instalado sobre a correia transportadora de saída recolhe as barras de aço de armaduras não retiradas na seleção prévia, formando um “novelo” de fios e barras metálicas (PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, 2006).

Segundo o mesmo autor, o britador de trituração ocorre geralmente no britador primário, por intermédio de um rotor em alta velocidade, que lança o resíduo, ou através da pá-carregadeira ou descarga direta do caminhão, contra barras e placas de impacto, fixadas no interior do conjunto.

Outro exemplo de usina de reciclagem de resíduos da construção civil, localiza-se na cidade de Londrina no estado do Paraná, a aproximadamente 600 km de São Paulo. A usina tem uma produção estimada de 8 a 10 t/h de material reciclado dos quais 60% são areia, 8% pedriscos e 30% a 40% outras britas. Os blocos produzidos na usina estão sendo utilizados em construções habitacionais populares e em favelas (LATTERZA, 1998).

A usina fica estabelecida numa grande área afastada da cidade, onde o entulho chega, através de caminhões ou caçambas que, na maioria das vezes, são alugadas pelos construtores, com um procedimento semelhante às demais usinas, todo o material que chega é depositado num local onde passa por uma seleção prévia para separar o rejeito do que será moído, e então esta fração é levada para o “canteiro”, assim chamado naquela região. A grande diferença entre esta usina e as demais é que aqui, primeiramente o entulho passa por uma moagem “grossa”, num britador do tipo de mandíbulas, em que a principal função é diminuir o tamanho das peças de alvenarias e concretos recebidos.

Através de esteiras, o material é então levado para o 2º equipamento que faz o rebitamento por meio de um moinho de martelos. Os 2 britadores estão dispostos em série, um em seguida do outro, conforme mostra a Figura 2.5, que “produzem” o agregado todo misturado, do tipo bica corrida, seguindo-se a partir daí o “peneiramento” de todo este “produto”.



Figura 2.5 Usina de Reciclagem de Londrina (PR): (a) Vista geral da usina com dois britadores dispostos em série; (b) Peneiras rotativas (LATTERZA, 1998)

Este “peneiramento” ocorre da seguinte maneira: o material cai num cilindro giratório (ou peneira rotativa) que possui 2 partes; a 1ª com orifícios menores e a 2ª com orifícios um pouco maiores. Na primeira parte passam os materiais classificados como areia e pedrisco; na segunda, os materiais denominados brita 1. Este equipamento pode ser visto na Figura 2.5. Ainda no final do cilindro, que possui uma parte aberta, acabam por sair as britas maiores. Por fim, esta última parcela mais graúda do material é colocada novamente nos britadores de martelos, pois, por hora, o que interessa naquela usina é a produção de areias e pedriscos.

2.4.3 EQUIPAMENTOS

Nos últimos anos, várias empresas multinacionais especializadas em máquinas de britagem, tradicionalmente utilizadas em pedreiras, têm destinado uma parcela importante de sua produção para usinas de reciclagem em várias partes do mundo. Estes equipamentos são adequados para britagem de materiais com dimensão granulométrica grande, e com o material resultante, é possível fazer uma série de trabalhos dos quais, os principais até o momento, são de pavimentação ou de confecção de blocos para alvenaria (LATTERZA, 1998).

Segundo o mesmo autor, existem meios para que a indústria da construção civil possa absorver praticamente todo o resíduo por ela gerado. Britadores são os equipamentos do tipo que são usados em pedreiras, que aparecem quando se quer transformar uma peça feita

em concreto, por exemplo: parte de uma viga, de um pilar, pedaços de laje, ou mesmo uma caixa d'água de concreto que foi demolida; em partículas menores como pedra, pedrisco, areia, etc. Um equipamento de britagem de grande porte, basicamente, subdivide-se nas seguintes partes:

- Alimentador vibratório - recebe o entulho que é despejado pela pá carregadeira;
- Britador propriamente dito - pode ser de impacto (caso de BH), onde cai o entulho e possui capacidade que pode variar de 20 até mais de 100 m³/ hora de produção; e também de mandíbulas (como em outros casos);
- Calha vibratória - equipamento que capta o produto do britador e alimenta o transportador de correia;
- Transportador de correia - responsável pela condução do material para a área de estoque;
- Nebulizador - protege a saída dos agregados, evitando a formação de nuvens de poeira;
- Eletroímã - peça importante do conjunto, instalada acima do transportador, com a função de retirar todos os metais ferrosos, para não contaminar os agregados.

Existem dois tipos de britadores, o de impacto e o de mandíbula, a diferença está na maior produtividade dos britadores de impacto e secundariamente no formato dos grãos, onde se observa uma maior lamelaridade nos britadores de mandíbula e maior cubicidade nos agregados originais pelo britador de impacto (RIBEIRO; SERRA, 2001). Característica essa de grande importância para uso em pavimentação, uma vez que o formato lamelar do grão impede um melhor empacotamento dos grãos e ainda possui efeito prejudicial no concreto, já que produzirá na superfície do agregado um caminho preferencial para romper o corpo-de-prova.

2.4.4 RECICLAGEM “IN LOCO”

Uma das maneiras de facilitar o gerenciamento dos resíduos da construção civil está na separação dos resíduos no canteiro de obra. Não há necessidade de alterar a mão-de-obra, pois de uma forma geral necessita-se de apenas dois funcionários para organizar o entulho, o que já é mais ou menos feito (SILVA, 2004). O resíduo da construção é gerado basicamente em três momentos do ciclo de vida da construção (JOHN; AGOPYAN, 2001): Fase da construção (canteiro); Fase de manutenção e reformas e; Demolição de edifícios.

A geração de entulho durante a fase de construção é decorrência das perdas dos processos construtivos. Uma forma de redução das perdas de materiais de construção é a mudança de tecnologia de execução tais como a técnica de incorporação de instalações em paredes de alvenaria que exigem a quebra parcial da parede recém construída que pode ser abandonada com o aperfeiçoamento do projeto.

A geração de resíduos na fase da manutenção está associada a diversos fatores como a correção de patologias, modernização de edifícios e o descarte de materiais que tenham alcançado o fim da sua vida útil.

A partir da geração e coleta na reciclagem em obra, o entulho é encaminhado por dutos a uma mini-central de processamento, onde é triturado para ser normalmente utilizado como agregado. Por causa da menor homogeneidade do material processado, recomenda-se o reaproveitamento ou, ainda, na pavimentação de estacionamento e calçadas (PINTO, 1999).

Como a reciclagem dentro da obra tem menos abrangência e volume, não exige equipamentos sofisticados. Em geral, pode ser utilizado um moinho de rolo para triturar o entulho. A principal vantagem de processar e reaproveitar os resíduos no próprio canteiro onde foram gerados é financeira. O fato da construtora não ter que desfazer de um material que já pagou somado ao custo com o transporte dos resíduos ate sua destinação adequada, contribuirá para uma redução de custo de obra (RIBEIRO; SERRA, 2001).

Segundo Silva (2004) a viabilidade econômica atua como principal fator no reaproveitamento de resíduos no canteiro de obras, uma vez que a britagem *in loco* do entulho implica na redução dos grãos e conseqüente diminuição do índice de vazio o que produzirá um material mais denso diminuindo, então, o número de viagens a serem realizadas pelas construtoras para a remoção deste material.

Capítulo 3

RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL APLICADOS NA PAVIMENTAÇÃO

3.1 NOÇÕES SOBRE PAVIMENTAÇÃO

Como o objetivo geral desta pesquisa é avaliar a aplicação do agregado reciclado na estrutura de pavimentos flexíveis é interessante frisar as principais características das estruturas dos pavimentos, desde a terminologia, materiais constituintes das bases e sub-bases e metodologias de caracterização e classificação, as quais podem ser pouco conhecidas dos técnicos que militam em outra área que não seja a de pavimentos.

3.1.1 ESTRUTURA E CLASSIFICAÇÃO DE PAVIMENTOS

Segundo a NBR 7.207 (ABNT, 1982), o pavimento é uma estrutura construída após terraplenagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto a: resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego; melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança; resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

Os pavimentos são classificados em pavimentos rígidos e pavimentos flexíveis (foco deste estudo), os quais são constituídos de uma ou mais camadas de espessura finita, assente sobre um semi-espaço infinito. Geralmente, é composto por um revestimento betuminoso sobre uma base granular ou solo estabilizado granulometricamente. Neste tipo de estrutura podem existir as seguintes camadas (Figura 3.1):

- Subleito: terreno de fundação do pavimento ou do revestimento;
- Regularização do subleito: camada de espessura variável executada quando se torna necessário preparar o leito da estrada para receber da estrutura do pavimento, pois sua espessura é variável, podendo inclusive não existir;

- Reforço do subleito: camada de espessura constante, construída, se necessário, existente no caso de pavimentos muito espessos, executada com o objetivo de reduzir a espessura da sub-base;
- Sub-base: camada corretiva do subleito (quando por qualquer circunstância não for aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplenagem) ou complementar à base (quando se deseja reduzir a espessura da base);
- Base: camada destinada a resistir e distribuir esforços verticais oriundos dos veículos;
- Revestimento: camada impermeável que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos. É responsável pela melhoria das condições de trafegabilidade (conforto e segurança) e pela resistência aos esforços horizontais que nele atuam (durabilidade).

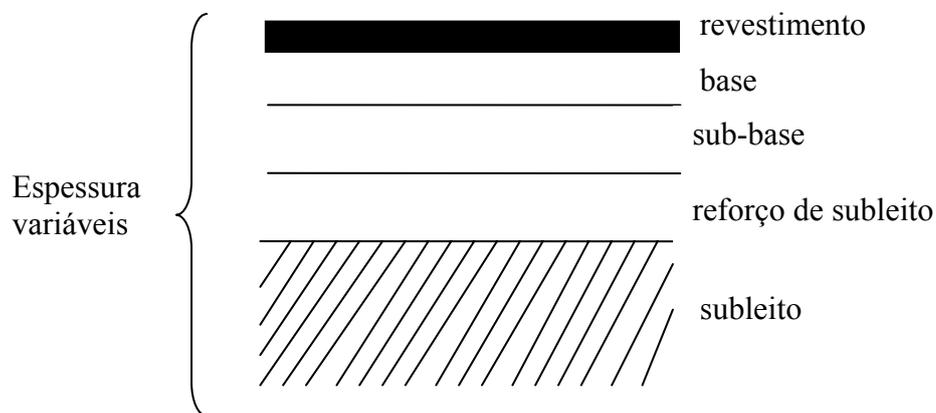


Figura 3.1 Camadas de um pavimento flexível

3.1.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Para serem pesquisados materiais e tecnologias visando suas aplicações na construção de novos pavimentos e na recuperação de estruturas já existentes, podem ser realizados ensaios de laboratório, ensaios de campo e análises numéricas. A seguir, são detalhados os ensaios realizados para caracterização dos materiais utilizados para camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis.

3.1.2.1 Preparação de Amostras de Solo

De acordo com Ribeiro e Serra (2001), devem ser adotados procedimentos para preparação de amostras para a análise granulométrica com sedimentação, para a determinação dos limites de liquidez e plasticidade, fatores de contração, densidade real e umidade higroscópica.

Quando recebida do campo, a amostra deve ser seca ao ar ou com uso de aparelho secador, de modo que a temperatura da amostra não exceda a 60 °C. Em seguida, desagregam-se completamente os torrões no almofariz com a mão de grau recoberta de borracha ou com o auxílio de dispositivo mecânico, de maneira que evite reduzir o tamanho natural das partículas individuais do material.

Com o auxílio do repartidor de amostras ou pelo quarteamento, obtêm-se uma amostra representativa para ensaios desejados, sendo cerca de 1500g para solos argilosos e siltosos, e de 2000g para solos arenosos ou pedregulhosos.

Passa-se a amostra na peneira de 2,0 mm, tomando precaução de desagregar todos os torrões que existam eventualmente, de modo a assegurar a retenção na peneira somente dos grãos maiores que a abertura da malha.

A NBR 6.457 (ABNT, 1986a) refere-se à preparação de amostra de solo para ensaios de compactação e caracterização.

3.1.2.2 Análise Granulométrica

O objetivo da análise granulométrica é agrupar as partículas em diferentes intervalos de tamanho e determinar a porcentagem relativa, em peso seco, de cada uma das faixas. Dois métodos distintos são usados na análise granulométrica para cobrir a enorme diversidade de tamanhos das partículas existentes, que são o peneiramento e a sedimentação (CAPUTO, 1973).

O peneiramento é composto de um jogo de peneiras, onde faz-se o material passar em cada uma delas, utilizando uma peneiradora mecânica que dá ao jogo a vibração necessária para que os grãos encontrem a melhor posição para passar pelas aberturas das peneiras. É utilizado em análise de areias e pedregulhos, que podem ser separadas em diferentes tamanhos. Para grãos com diâmetro menor que cerca de 0,074 mm (peneira nº 200) emprega-se o método de análise por sedimentação.

O mais simples é o desenvolvido 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, 1987). Geralmente o ensaio é realizado de acordo com a norma NBR 7.181 (ABNT, 1984a).

De acordo com Baptista (1976), a análise granulométrica é representada, graficamente, pela curva granulométrica. Esta curva é traçada por pontos em um diagrama semi-logaritmos, 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 6.502 (ABNT, 1995).

Na prática, utilizam-se faixas granulométricas entre as quais deverá se situar a curva do material a utilizar. Quando o material estudado não se enquadrar dentro da faixa granulométrica especificada, deve-se misturá-lo com outro material, de maneira a obter uma mistura com granulometria dentro das especificações do DNER (RIBEIRO; SERRA, 2001). Quanto à granulometria, o material deve estar enquadrado em uma das faixas especificadas pelo DNER, de acordo com a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Faixas granulométricas especificadas pela ES 303 (DNER, 1997)

TIPOS	Para N > 5 x 10 ⁶			Para N < 5 x 10 ⁶		
PENEIRAS	A	B	C	D	E	F
	% em peso passando					
2"	100	100	-	-	-	-
1"	-	75--90	100	100	100	100
3/8	30--65	40--75	50--85	60--100	-	-
Nº 4	25--55	30--60	35--65	50--85	55--100	70--100
Nº 10	15--40	20--45	25--50	40--70	40--100	55--100
Nº 40	8--20	15--30	15--30	25--45	20--50	30--70
Nº 200	2--8	5--15	5--15	10--25	6--20	8--25

Obs: N: número de veículos de eixo padrão

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, conseqüência do preenchimento da maior parte dos vazios intergranulares pelas partículas menores do próprio agregado (DIAS, 2004).

3.1.2.3 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 é feita utilizando-se a secagem em estufa, mantendo-se a temperatura entre 100°C e 110°C (BAPTISTA, 1976).

3.1.2.4 Massa Específica

Segundo Senço (1997) a massa específica é a massa por unidade de volume apenas da parte sólida, excluindo-se todos os vazios, inclusive os ocupados pelo ar e os vazios nos poros das partículas. 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 6.508 (ABNT, 1984b) e de grãos de pedregulho retidos na peneira de malha 4,8mm NBR 6.458 (ABNT, 1984c).

3.1.2.5 Limites de Consistência

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.

De acordo com Caputo (1973), quando a umidade de um solo é muito grande, ele se apresenta como um fluido denso e se diz no estado líquido. A medida que evapora a água, ele endurece, passando do estado líquido para o estado plástico. A umidade correspondente ao limite entre os estados líquido e plástico denominada limite de liquidez (w_L). Ao continuar a perda de umidade, o estado plástico desaparece, passando o solo para o estado semi-sólido. A umidade correspondente ao limite entre os estados plástico e semi-sólido é denominada limite de plasticidade (w_p). Continuando a secagem, ocorre a passagem para o estado sólido. O limite entre esses dois últimos estados é denominado limite de contração (w_c).

O limite de liquidez é determinado de acordo com NBR 6.459 (ABNT, 1984d), através do aparelho de Casagrande, que consiste de um prato de latão em forma de concha sobre um suporte de ebonite. Através de um excêntrico imprime-se ao prato repetidas quedas de uma altura padrão de 1 cm. De posse do conjunto de valores de número de golpes e correspondente teor de umidade do solo, traça-se a linha de escoamento, assumida como linear. Nesse gráfico tem-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 7.180 (ABNT, 1984e), 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.

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

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 à 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 9.895 (ABNT, 1987a).

Depois de medir a expansão da amostra, isto é, depois de saturada quatro dias, tira-se o cilindro do tanque de água. Leva-o para à prensa colocando-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 prancha 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, nas abscissas, as penetrações e, nas ordenadas, as tensões em kgf/cm^2 . A curva não deve apresentar ponto de inflexão, caso apresente deve-se corrigir-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.

3.1.2.7 Abrasão *Los Angeles*

Consiste em submeter certa quantidade de agregado, obedecendo faixas granulométricas especificadas, a um misto de impactos e desgaste, quando colocada em um tambor giratório de 80 cm de diâmetro, com velocidade de giro controlada. É considerado o ensaio mais aceito para determinar a resistência de agregados, quando trabalhados em camadas ou quando fazendo parte de misturas, aos esforços oriundos das cargas do tráfego (SENÇO, 1997). O ensaio é realizado de acordo com a norma DNER-ME 035 (DNER, 1998).

3.1.3 ENSAIOS DE CAMPO

Os ensaios de campo atualmente utilizados para avaliar a estrutura de pavimentos flexíveis são o Penetrômetro Dinâmico de Cone, a Viga Benkelman e a Prova de Carga Sobre Placa, ensaios estes realizados para este trabalho e que serão comentados a seguir.

3.1.3.1 Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP)

O Penetrômetro Dinâmico de Cone, conhecido como *Dynamic Cone Penetration* (DCP), foi desenvolvido em 1956 na África do Sul, com o objetivo de obter um equipamento simples e versátil para avaliar *in situ* a resistência das camadas do pavimento. Segundo Silva Júnior et al. (2004), o equipamento foi usado extensivamente na África do Sul, no Reino

Unido, nos Estados Unidos, na Austrália, e em muitos outros países em todo mundo. No entanto, no Brasil, seu uso ainda é muito restrito, devido a pouca divulgação de sua viabilidade entre as instituições.

De acordo com Andrade e Sales (2005), o equipamento constitui-se de duas lanças de aproximadamente 20 mm de diâmetro; um ponta cônica de 60° na lança inferior, responsável pela penetração do equipamento ao pavimento; um martelo com peso de 8 kg, caindo livremente de uma altura de 575 mm; um batedor, para receber os impactos do martelo, transferindo a energia cinética de queda do peso ao cone, provocando a penetração; uma régua graduada, para medida da profundidade de penetração e um colar superior da lança, para que o operador possa segurar o equipamento na vertical durante a realização do ensaio, como pode se observado na Figura 3.2.

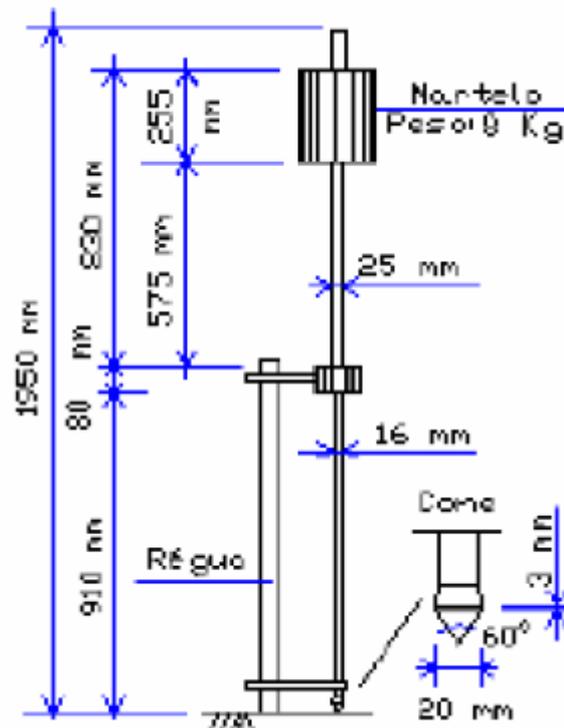


Figura 3.2 Esquema do Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP) (ANDRADE; SALES, 2005)

O ensaio com DCP procede da seguinte maneira: posicionamento do aparelho sempre na vertical; nivelamento da régua graduada com a superfície do solo, para efetivação das medidas exatas de penetração; registro da penetração inicial, obtida com o assentamento do peso próprio do equipamento; elevação do peso (martelo) até altura máxima de queda; liberação do martelo em queda livre; registro das penetrações, em milímetro, correspondentes

a cada golpe do martelo ou somente a penetração final correspondente ao último golpe (SILVA JUNIOR et al., 2004).

A penetração total é obtida subtraindo da penetração final, correspondente ao último golpe aplicado, a penetração obtida com o assentamento do próprio peso do equipamento (inicial). As penetrações são registradas em milímetros, para o cálculo do Índice de Penetração, o qual é obtido através da razão entre a profundidade e o número de golpes necessários para penetrar até a respectiva profundidade (DN, em mm/golpe) (TRICHÊS et al., 2006).

O resultado é uma curva que consiste em uma representação do número de golpes acumulado para a penetração do equipamento com a profundidade. Na curva DCP as ordenadas indicam as profundidades e, nas abscissas, o número acumulado de golpes para alcançar estas profundidades. E a inclinação das retas representa o índice de penetração (ANDRADE; SALES, 2005).

A vantagem da utilização deste ensaio é a possibilidade de investigar o subleito de forma econômica, pois não requer grandes escavações ou perfurações, e em consequência não interfere no tráfego dos veículos. Pode ser caracterizado como um ensaio semi não-destrutivo.

3.1.3.2 Viga Benkelman

No Brasil, o emprego da viga Benkelman na avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis é uma prática bem estabelecida desde a década de 60. O ensaio tem o objetivo de apontar as principais causas de deficiências e fornecer elementos que permitam o cálculo da vida útil restante da estrutura ou do reforço necessário para que o pavimento suporte um novo número de solicitações durante o novo período considerado, através do critério da deformabilidade dos pavimentos flexíveis (MARTINHO et al., 2005).

O ensaio é normalizado no método ME 24 (DNER, 1994), onde deve-se utilizar uma viga com relação de distâncias (distância entre a articulação e a ponta de prova/ distância entre o extensômetro e a articulação) igual a 2:1, 3:1 ou 4:1, um caminhão com 8,2 t de carga no eixo traseiro e pneus calibrados com 560 kPa (80lbs/pol²).

De acordo com Rezende (2003), o ensaio procede da seguinte maneira: são feitas leituras no ponto inicial e em distâncias intermediárias, com esses valores determina-se os

deslocamentos, geralmente chamados deflexão, expressos em centésimos de milímetros para cada distância (Figura 3.3), traça-se a bacia de deflexão e calcula-se o valor do raio de curvatura da bacia conforme a Equação 3.1.

$$R = \frac{6250}{2(D_0 + D_{25})} \quad (3.1)$$

Onde:

R = raio de curvatura (em m);

D_0 = deflexão real do pavimento no ponto de prova, ou seja, deflexão máxima (em 0,01 mm);

D_{25} = deflexão real do pavimento a 25 cm do ponto de prova (em 0,01 mm)



Figura 3.3 Equipamento utilizado para o ensaio de viga Benkelman

Segundo a mesma autora, com os dados obtidos, torna-se possível avaliar o comportamento estrutural do pavimento. Geralmente, para valores de raio de curvatura inferior a 100m ou para locais onde o produto entre R e D_0 for menor que 5.500 m.mm, pode-se observar problemas estruturais.

3.1.3.3 Prova de Carga Sobre Placa

O ensaio de prova de carga é utilizado com a finalidade de simular as condições de carregamento e solicitações que ocorrem no pavimento, é normalizado no método ME 055 (DNIT, 2004).

O resultado é uma curva tensão versus deslocamento, através da aplicação de um determinado carregamento. Geralmente, esta carga é aplicada em campo pela reação de um caminhão carregado com 8,2 t no eixo traseiro. Sobre a superfície do pavimento, coloca-se uma placa com diâmetro conhecido que irá distribuir o carregamento. Entre a placa e o sistema de carregamento coloca-se um macaco hidráulico que tem a função de controlar a aplicação das tensões, geralmente realizado por um manômetro calibrado ou por meio de uma célula de carga.

As deformações são medidas através da colocação de, no mínimo, três defletômetro sobre a placa (Figura 3.4). Pode-se, ainda, determinar o módulo de reação em função da relação tensão (transmitida pela placa) x deslocamento (média dos resultados dos três defletômetros) (REZENDE, 2003).



Figura 3.4 Equipamento utilizado para o ensaio de Prova de Carga

3.1.4 ESPECIFICAÇÕES PARA EXECUÇÃO DE CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO UTILIZANDO AGREGADOS RECICLADOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Várias são as terminologias utilizadas no meio técnico para designar os materiais empregados nas camadas de base e sub-base, apresentam-se, a seguir, algumas definições de emprego corrente no meio rodoviário (DIAS, 2004):

- Solo: material existente na crosta terrestre proveniente da decomposição ou desagregação *in situ* das rochas pela ação do intemperismo, constituídos de 3 fases: sólida, líquida e gasosa, de origem orgânica ou inorgânica;
- Solos finos de comportamentos laterítico: solos fino passíveis de uso em sub-bases e bases de pavimento (exceto tráfego pesado), de acordo com especificações apropriadas;
- Solo-agregado: misturas naturais ou preparadas, constituídas predominantemente de pedra britada, de pedregulho ou areia, natural ou artificial, e contendo finos de solo, partículas menores do que 0,075 mm.

Segundo a NBR 15.116 (ABNT, 2004h), o agregado reciclado pode ser utilizado em camada de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos desde que atendem os requisitos das legislações específicas. A Tabela 3.2 mostra quais são os requisitos gerais e a Tabela 3.3 os requisitos específicos.

Tabela 3.2 Requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação

Propriedades		Agregado reciclado classe A	
		Graúdo	Miúdo
Composição granulométrica		Não uniforme e bem graduado com coeficiente de uniformidade $C_u > 10$	
Dimensão máxima característica		≤ 63 mm	
Índice de forma		≤ 3	-
Teor de material passante na peneira de 0,42mm		Entre 10% e 40%	
Contaminantes-teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Materiais não minerais de mesmas característica ¹	2	
	Materiais não minerais de características distintas ¹	3	
	Sulfatos	2	

¹ Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

A execução das camadas de pavimentos compreende as operações de mistura e pulverização, umedecimento, compactação e acabamento na pista devidamente preparada na largura desejada, nas quantidades que permitam, após a compactação, atingir a espessura projetada. Se a camada de pavimento exigir uma espessura final superior a 20 cm, ela deve ser subdividida em camadas parciais. A espessura mínima de qualquer camada de base, sub-base ou reforço de subleito deve ser de 10 cm, após compactação (DIAS, 2004).

Tabela 3.3 Requisitos específicos para agregado reciclado destinado a pavimentação

Aplicação	ISC (CBR) %	Expansibilidade	Energia de compactação
Material para execução de reforço de subleito	≥ 12	$\leq 1,0$	Normal
Material para execução de revestimento primário e sub-base	≥ 20	$\leq 1,0$	Intermediária
Material para execução de base de pavimento ¹	≥ 60	$\leq 0,5$	Intermediária ou Modificada

¹ Permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo padrão de 8,2tf (80kN) no período de projeto.

3.2 ALGUMAS PESQUISAS REALIZADAS COM RCC APLICADOS NA PAVIMENTAÇÃO

A forma mais simples de utilização do resíduo da construção civil reciclado é na pavimentação como base, sub-base ou pavimento primário na forma de brita corrida, ou ainda em misturas de resíduos com solo. Segundo Carneiro et al. (2001), o aproveitamento do agregado reciclado na pavimentação apresenta diversas vantagens:

- Forma de reciclagem que exige menor tecnologia, barateando o custo do processo;
- Permite a utilização de todos os componentes minerais do entulho (tijolos, argamassas, materiais cerâmicos, areia, pedras, etc.) não exigindo a separação de nenhum deles;
- Economia de energia no processo de moagem do entulho, uma vez que, usando-o no concreto, parte do material permanece em granulometrias graúdas;
- Possibilidade de uso em maior escala de entulho, inclusive aquele proveniente de demolições e pequenas obras que não suportam o investimento em equipamentos de moagem/trituração;
- Maior eficiência do resíduo quando adicionado aos solos saprolíticos em relação a adição com britas (a adição de apenas 20% de entulho reciclado ao solo saprolítico dobra o suporte deste solo ao passo que para aumentar o CBR do mesmo solo com britas são necessários dosagens a partir de 40%);
- Aparentemente não há limitações para esse tipo de utilização. O agregado reciclado pode ser usado sozinho ou misturado ao solo e deve ser processado por britador até a obtenção da granulometria desejada e pode apresentar até 50% de contaminação prévia do solo.

Em várias cidades do Brasil (São Paulo, Belo Horizonte, Ribeirão Preto, entre outras) e no exterior, a eficiência desta prática já é comprovada cientificamente e seus resultados satisfatórios vêm demonstrando a boa adequação desse material.

Na Europa, a maior parte do resíduo da construção civil é aplicada na construção de estradas. De qualquer forma se faz necessário alguns critérios de seleção e classificação como os observados na Tabela 3.1 (VAZQUES, 2001).

Tabela 3.4 Produtos obtidos a partir do RCC e utilização na pavimentação (VAZQUES, 2001)

Material Obtido	Principal Componente	Componente Secundário	Aplicação
Concreto triturado	$\geq 80\%$ concreto com densidade seca maior que $2,1\text{t/m}^3$	$\leq 10\%$ pedra, cerâmica $\leq 5\%$ aglomerado asfáltico	Sub-bases em qualquer tipo de estrada
Cerâmica triturada	$\geq 85\%$ do material mineral deve ter densidade seca menor que $1,6\text{ t/m}^3$	$\leq 15\%$ de outros materiais minerais $\leq 10\%$ aglomerado asfáltico	Sub-bases para tráficos não pesados
Material residual misto triturado	$\geq 50\%$ concreto com densidade seca maior que $2,1\text{ t/m}^3$ $\leq 50\%$ material mineral com densidade seca menor que $1,6\text{ t/m}^3$	$\leq 10\%$ de outros materiais minerais $\leq 5\%$ de mistura asfáltica	Sub-bases para qualquer tipo de estradas

O agregado reciclado apresenta propriedades interessantes para utilização na construção de pavimentos. Do ponto de vista geotécnico, é considerado um material não plástico, o que permite sua utilização em locais com presença de água, por gerar pouca ou nenhuma lama. Pode, ainda, ser utilizado como redutor de plasticidade, contribuindo, assim, na estabilização de solos. Apresenta, também, expansibilidade baixa ou nula, ou seja, mesmo sob saturação, não ocorre a expansão das camadas compactadas (KRYCKYJ; TRICHÊS; 2000).

No que se refere às pesquisas relacionadas à aplicação de agregados reciclados em pavimentação, foi possível notar ao longo deste estudo que muitas delas vêm sendo realizadas em todo o mundo já há muitos anos. Tem-se como um interessante exemplo a união de alguns países europeus para a formação de um grupo chamado ALT-MAT (*Alternative Materials in Road Construction*) para analisar, em laboratório e em campo, materiais alternativos destinados a pavimentos. A pesquisa, que teve duração de aproximadamente dois anos,

concluiu, entre outras coisas, que os valores limites dos testes aplicados devem ser baseados em características locais como clima e experiência adquirida, e que o desempenho em campo foi, em alguns casos, melhor do que a previsão feita em laboratório (MOTTA, 2005).

Segundo Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), citada por Oliveira (2007), no mundo, o país com melhor índice de reaproveitamento de material é a Holanda, com índice próximo a 80%. Esse exemplo serve mais como modelo de filosofia, não como referência prática, pois a falta de recursos naturais nesse país é tão grande que eles importam areia da Sibéria e entulho da Inglaterra. Segundo especialistas, uma das normas aplicadas na Holanda prevê que concretos com até 20% de agregados reciclados são considerados normais. Além disso, Medeiros (2002 apud OLIVEIRA, 2007) cita que 95% de toda a base de pavimentação das ruas na Holanda é feita com resíduos da construção civil.

Nos Estados Unidos, Japão, França, Itália, Inglaterra, Alemanha e outros países a reciclagem de entulho já se consolidou, com centenas de unidades recicladoras instaladas. Os governos locais dispõem de leis exigindo o uso de materiais reciclados na construção e em serviços públicos (OLIVEIRA, 2007). Na cidade de Londres, há estatísticas que demonstram que o país está conseguindo aproveitar 50% do que demolem em peso e estão com o objetivo de dobrar o uso destes materiais até o ano de 2006 (SCHENINI et al., 2004).

No Brasil, existem várias pesquisas realizadas no que se refere ao uso de agregado reciclado para diversas aplicações, mas poucos relacionados ao emprego do material em pavimentação. Algumas dessas pesquisas são mencionadas a seguir.

Segundo Bodi et al. (1995), as investigações sobre o uso de resíduos da construção civil em obras de pavimentação no Brasil foi iniciada por técnicos da Prefeitura Municipal de São Paulo, no ano de 1989. Neste ano, foi pavimentada a primeira via de São Paulo empregando agregados reciclados da construção com acompanhamento tecnológico, por meio de parceria entre a Prefeitura da referida capital e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) na execução e no acompanhamento da obra, respectivamente. Este logradouro, de nome Gervásio da Costa, localiza-se na zona oeste da cidade e é caracterizado por uma via de baixo volume de tráfego.

Os mesmos autores analisaram três tipos de agregados reciclados de São Paulo: branco, vermelho e misto. Foram realizados análises da mistura de agregado reciclado misto

com solo siltoso (saprolítico) e argiloso (com comportamento laterítico), e ainda ensaios de compactação, expansão e índice de suporte califórnia (ISC). Os resultados demonstraram a possibilidade de obter resultados semelhantes aos agregados convencionais.

Segundo Fernandes (2004), os agregados reciclados vêm sendo utilizados desde 1996 na execução de revestimento primário, reforço de subleito, sub-base e base de pavimentos (Figura 3.5) com projetos baseados em dimensionamentos empíricos, a partir de cálculos que levaram em conta o Índice de Suporte Califórnia (ISC) e a experiência dos engenheiros de Belo Horizonte. Em meados da década de 90 apresentaram-se em condições de tráfego semelhantes àqueles trechos confeccionados com agregado convencional.



Figura 3.5 Utilização de agregados reciclados em pavimentação na cidade de Belo Horizonte: (a) Na execução; (b) Com revestimento (PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, 2006)

O mesmo pesquisador estudou, ainda, as características do agregado reciclado *in natura* de recicladoras do Rio de Janeiro e Belo Horizonte. A primeira usina de reciclagem forneceu material selecionado nas frações de britas 0 e 1m pedrisco e pó-de-pedra, sendo todas do tipo misto. Já a segunda cedeu agregados reciclados em forma de brita corrida dos tipos misto e concreto. Foi feito ensaio de caracterização física como granulometria, abrasão *Los Angeles* e índice de forma, e ainda analisou-se o comportamento mecânico dos materiais citados perante ensaios de Módulo de Resiliência. Com os resultados obtidos, o pesquisador conclui que o uso de agregados reciclados em pavimentação é viável tecnicamente, economicamente motivador e ambientalmente benéfico, sendo uma resposta à necessidade de crescimento sustentável.

Segundo Carneiro et al. (2001), na cidade de Ribeirão Preto, no ano de 1996 entrou em operação a usina de reciclagem de entulho com capacidade de reciclar 200t/dia de material. No ano de 1999 foram executados 218 mil metros quadrados de pavimentação, ou seja, aproximadamente 31 quilômetros de vias (PINTO, 1999). A Figura 3.6 demonstra a primeira pista sendo construída com agregado reciclado na cidade, em 1996.



Figura 3.6 Pavimentação com agregado reciclado em Ribeirão Preto (PINTO, 1999)

Na cidade de Salvador (BA), Carneiro et al. (2001) desenvolveram uma pesquisa com agregados reciclados nas frações graúda e miúda e também com misturas de solo laterítico e saprolítico em diferentes proporções. Foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica que demonstraram que o agregado reciclado de Salvador, em ambas as frações, se apresentou como material adequado à aplicação em base e sub-base de pavimentos.

Ribeiro e Serra (2001) desenvolveram um trabalho no sentido de avaliar o comportamento mecânico dos resíduos reciclados, provenientes da indústria da construção civil, para aplicação em base e sub-bases de pavimentos flexíveis. Para este estudo foram definidos cinco tipos de amostras para serem analisadas, como demonstra a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Proporções das amostras ensaiadas (RIBEIRO; SERRA, 2001)

AMOSTRA	SOLO	ENTULHO BRANCO	ENTULHO VERMELHO
1	-	100%	-
2	-	-	100%
3	-	50%	50%
4	20%	80%	-
5	20%	-	80%

Obs: Entulho branco: são materiais compostos basicamente de cimento, areia, cal e brita;
Entulho vermelho: são materiais cerâmicos

Foram realizados ensaios de granulometria, compactação, expansão e índice de suporte califórnia. E com os dados obtidos, foi realizada uma análise comparativa dos parâmetros determinados para os materiais estudados. A Figura 3.7a mostra as umidades ótimas obtidas para as amostras. Pode-se observar que quando o entulho vermelho é utilizado, a umidade ótima aumenta consideravelmente. Sendo assim, sempre que o agregado reciclado utilizado na obra de pavimentação apresentar materiais do tipo cerâmico (telhas, tijolos e etc.), deve-se lembrar que a quantidade de água necessária para atingir a condição ótima geralmente será maior do que a quantidade usada nos materiais tradicionalmente utilizados.

Quando comparou os pesos específicos aparente seco máximos (Figura 3.7b) foi observada uma maior diferença entre os valores obtidos para o entulho branco (Amostra 1) e entulho vermelho (Amostra 2). Quando o solo é misturado com o entulho branco (Amostra 4), o peso específico não varia. Já quando o solo é misturado com o entulho vermelho (Amostra 5), o peso específico reduz.

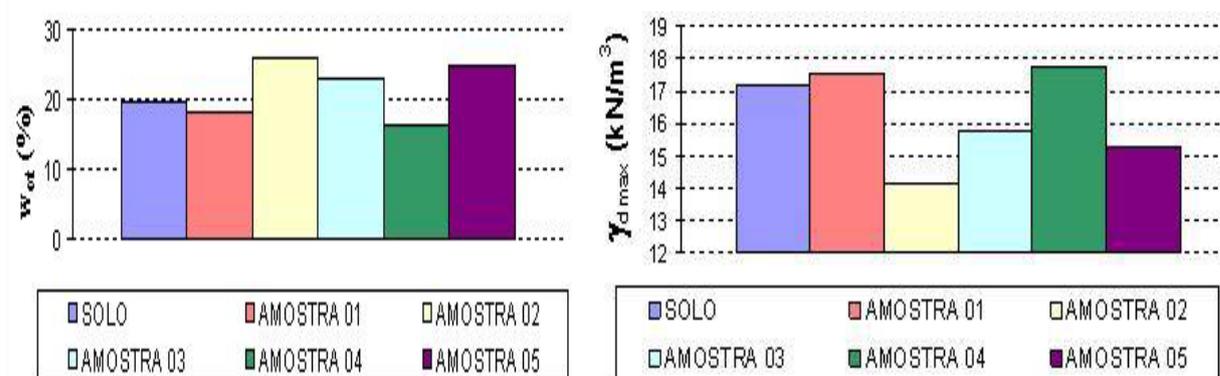


Figura 3.7 Análise comparativa: (a) Umidade ótima (w_{ot}); (b) Peso específico aparente seco máximo (RIBEIRO; SERRA, 2001)

Quando o ensaio de *California Bearing Ratio* (CBR) pode-se concluir que esses novos materiais apresentam potencial de uso como camadas que compõem a estrutura do pavimento (base ou sub-base). De acordo com a Figura 3.8a pode-se observar que o entulho branco (Amostra 1) apresentou maior valor de CBR 62%.

E na análise da expansão (Figura 3.8b), observou-se melhoria desse parâmetro para o solo (expansão de 3,7%) quando este é misturado com o entulho (Amostras 4 e 5). Dessa forma, pode concluir que o agregado reciclado quando incorporado ao solo pode reduzir a sua expansão, viabilizando o seu uso em obras de pavimentação.

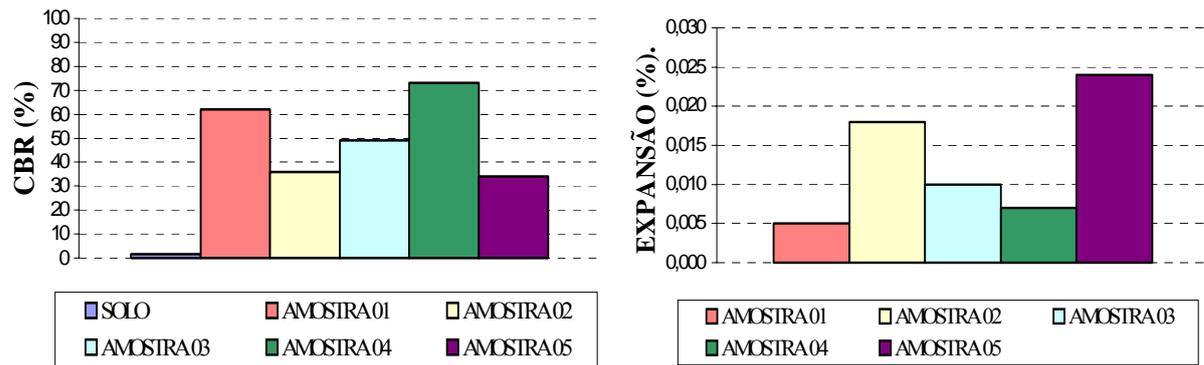


Figura 3.8 Análise comparativa: (a) CBR; (b) Expansão (RIBEIRO; SERRA, 2001)

Os materiais que podem ser empregados nas camadas do pavimento estão relacionados a seguir em ordem crescente de desempenho.

⇒ **BASE (CBR > 60% para $N \leq 10^6$ “tráfego leve”):**

- AMOSTRA 04 (Entulho Branco/Solo) – CBR = 73%
- AMOSTRA 01 (Entulho Branco) – CBR = 62%

⇒ **SUB-BASE (CBR > 20%):**

- AMOSTRA 03 (Entulho Branco/Entulho Vermelho) – CBR = 52%
- AMOSTRA 02 (Entulho Vermelho) – CBR = 44%
- AMOSTRA 05 (Entulho Vermelho/Solo) – CBR = 32%

Leite et al. (2005), fizeram uma comparação de valores de Índice de Suporte Califórnia (ISC) de agregados reciclados (Amostras 1, 2, 3 e 4) de diferentes origens e de uma brita graduada simples (Amostra 5). O estudo compreendeu uma análise de valores de CBR para quatro amostras de agregados reciclados, sendo duas provenientes de Santo André e duas provenientes da usina recicladora de Itaquera. Além disso, com objetivo de comparação, é apresentado um resultado de CBR para uma brita graduada simples.

De acordo com as curvas granulométricas obtidas, foi possível concluir que as amostras de agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil provenientes de usinas recicladoras não tão distantes entre si, no caso Santo André e Itaquera, apresentaram grande variabilidade granulométrica. Este fato está possivelmente relacionado à variabilidade de natureza dos componentes. Assim, reforça-se a comprovação da heterogeneidade de agregados reciclados produzidos a partir de resíduos sólidos de construção civil.

Para a caracterização do material foi executado ensaio de granulometria. A Figura 3.9 apresenta as curvas granulométricas dos três materiais aqui estudados.

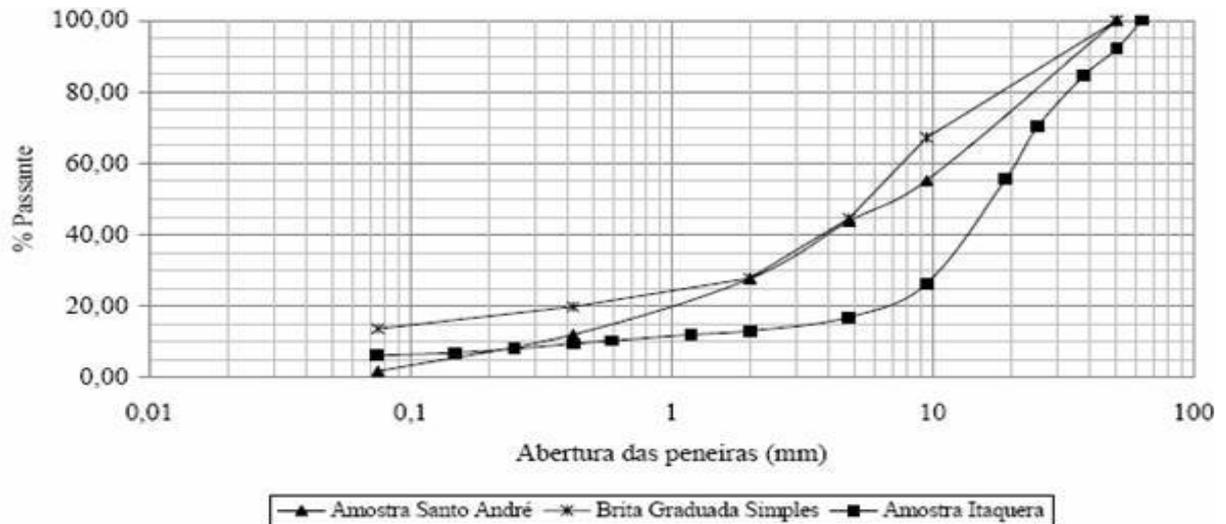


Figura 3.9 Distribuição granulométrica dos materiais estudados (LEITE et al., 2005)

O ensaio de ISC foi realizado para o agregado reciclado de Itaquera. De maneira geral, o mesmo consiste na aplicação de um carregamento estático em um corpo-de-prova sob condição saturada. Na Tabela 3.6 é possível observar as condições de compactação dos diferentes materiais analisados.

Tabela 3.6 Condições de compactação (LEITE et al., 2005)

Material	Procedência	Teor de umidade de compactação	Energia de compactação empregada	Peso específico aparente seco (kN/m ³)
Amostra 1	Santo André	16,2	normal	16,1
Amostra 2	Santo André	14,2	intermediária	17,2
Amostra 3	Itaquera	11,0	intermediária	18,3
Amostra 4 ⁽¹⁾	Itaquera	11,0	intermediária	18,3
Amostra 5	Usina Firpavi	5,7	intermediária	22,8

⁽¹⁾ Material submetido a ensaio de ISC após 28 dias de cura

Em relação aos ensaios CBR, verificou-se que a energia de compactação influenciou diretamente e significativamente na umidade ótima e peso específico seco máximo obtidos para um mesmo material. A resistência do material obtida pelo ensaio CBR mostra alteração significativa com a energia de compactação, ressaltando a importância de uso da maior energia de compactação possível em campo de forma a promover uma maior quebra durante a obra, evitando quebras significativas pelo tráfego usuário e o aparecimento

de deformação permanente indesejável em trilhas de roda. Os valores de CBR encontrados para cada amostra analisada são apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 Valores de *California Bearing Ratio* (CBR) (LEITE et al., 2005)

Material	CBR (%)
Amostra 1- agregado reciclado	45,5
Amostra 2- agregado reciclado	96,0
Amostra 3- agregado reciclado	74,0
Amostra 4- agregado reciclado	101,0
Amostra 5- brita graduada simples	90,0

Para o agregado reciclado de Itaquera, após 28 dias de cura, observou-se aumento considerável de sua capacidade de suporte possivelmente ocasionado por reação pozolânica de partículas não inertes presentes no mesmo. Supõe-se que com o tempo haja uma grande tendência de ganho na resistência do material melhorando o seu desempenho.

O trabalho de Leite et al. (2006) trata do monitoramento de um trecho experimental executado no novo campus da Universidade de São Paulo, USP Leste, localizado na Zona Leste do município de São Paulo-SP. A estrutura do pavimento projetada e executada apresenta-se com asfalto-borracha na camada de revestimento e agregado de resíduo da construção civil nas camadas de base e sub-base. O trecho estudado apresenta cerca de 270 metros e foi construído em fevereiro de 2005. Para efeito comparativo foi utilizado em um segmento do trecho brita graduada simples na camada de base, que seria o material convencional adotado.

O controle tecnológico do agregado reciclado baseou-se em ensaios de laboratório para caracterização e determinação das propriedades mecânicas. Além disso, foram medidas em campo deflexões com o equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD).

O agregado reciclado utilizado neste seguimento em análise do trecho experimental é proveniente de uma usina recicladora localizada em Santo André-SP. Na Tabela 3.8 são apresentadas às porcentagens passantes antes e depois da compactação em cada uma das peneiras utilizadas para amostra.

Percebe-se através da Tabela 3.8 uma grande mudança granulométrica após a compactação, mas os materiais atendem a NBR 15.115 (ABNT, 2004g) referente a porcentagem passante na peneira de 0,42 mm. A norma recomenda que o número esteja entre

10 e 40%. Já a relação Coeficiente de uniformidade (C_u) a norma recomenda que o valor seja acima de 10, o que foi notado em todas as amostras.

Tabela 3.8 Porcentagens passantes antes e depois da compactação (LEITE et al., 2006)

Diâmetro (mm)	% Passante	
	Antes da compactação	Depois da compactação
50,8	100,0	100,0
9,52	47,0	71,0
4,76	40,0	57,5
2	26,1	44,5
0,42	10,3	25,3
0,074	1,0	11,7

Através do ensaio de compactação realizado em laboratório previamente com amostras do agregado reciclado de resíduo da construção civil de Santo André, determinou-se que a umidade de compactação em campo deveria ser 13,4% e o peso específico aparente seco máximo 17,8 kN/m³. A Tabela 3.9 apresenta valores de umidade (w), peso específico aparente seco (γ_d) e grau de compactação (GC) obtidos em campo.

Tabela 3.9 Resultado do controle de compactação (LEITE et al., 2006)

Local	w (%)	γ_d (kN/m ³)	GC (%)
Estaca 42+0,00	15,2	18,0	101,5
Estaca 43+3,00	14,9	18,1	101,9
Estaca 44+0,00	15,9	17,9	100,8

De acordo com a NBR 15.115 (ABNT, 2004g), o teor de umidade da mistura em campo deve estar situada no intervalo entre $\pm 1,5\%$ em relação a umidade obtida com o ensaio de laboratório. Neste trecho alguns pontos se situaram fora destes limites, estando mais úmido.

O processo de compactação energética deste material é recomendável para que se reduzam as quebras de agregados durante a vida útil do pavimento, de modo que seja também minimizada a potencialidade de desenvolvimento de afundamentos em trilhas de roda devido a esta quebra. Segundo a NBR 15.115 (ABNT, 2004g) o GC deve-se ser superior a 100%, o que foi constatado nas estacas analisadas.

Quanto ao controle tecnológico feito com equipamento FWD para levantamento deflectométrico, verificou-se que a bacia de deflexão obtida para o trecho de agregado reciclado na camada de base ficou semelhante a bacia obtida para o seguimento com brita

graduada simples. Além disso, os raios de curvatura encontrados para os dois trechos reforçam que o desempenho do agregado reciclado ficou similar ao material convencional, no caso, a brita graduada simples.

Motta (2005) em sua pesquisa teve o objetivo de analisar alguns aspectos físicos e de comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil proveniente da usina de reciclagem da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP), para uso em camadas de base, sub-base ou reforço de subleito, com enfoque em vias de baixo volume de tráfego. Foram realizados ensaios de laboratório comumente empregados nas pesquisas relacionadas aos materiais convencionais de pavimentação, bem como outros testes complementares para melhor caracterização do agregado reciclado, como exemplo a determinação da atividade pozolânica, a qual segundo Lea (1938 apud MOTTA, 2005), a pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que, finamente moído e na presença de água, reage com hidróxido de cálcio e forma compostos com propriedades cimentíceas. A esta reação é dado o nome de reação pozolânica.

Foram coletadas na usina da PMSP cerca de 2,7 toneladas de agregado reciclado para realização das etapas em laboratório. Durante o processo de secagem, todo material foi cuidadosamente removido até que, visualmente, fosse alcançada uma aparência homogênea em relação à granulometria.

Na fase de caracterização física, foram analisados os seguintes aspectos do agregado reciclado: Natureza dos materiais; Distribuição granulométrica; Absorção de água; Atividade pozolânica; Resistência ao desgaste; Forma dos grãos e; Teor de materiais indesejáveis.

Os ensaios realizados nesta pesquisa mostraram que grande parte do agregado reciclado estudado é composta de materiais cimentícios (concreto e argamassa) e naturais britados. Encontrou-se também certa quantidade de componentes contaminantes no material coletado que, no entanto, era inferior aos limites máximos de aceitação estabelecidos pela NBR 15.115 (ABNT, 2004g).

Os grupos formados no processo de separação dos grãos foram: cimentícios (41,87%), materiais britados (23,75%), cerâmicos vermelhos (4,34%), piso/azulejo (3,42%), telha de amianto (0,32%) e material fino (26,31%).

A análise granulométrica foi realizada por meio de peneiramento a seco. O material apresentou uma distribuição contínua, de forma que os grãos menores promoveram um melhor embricamento com os grãos maiores. O material pesquisado apresentou Cu igual a 42 e este resultado demonstrou que o agregado reciclado é bem graduado e não uniforme.

Verificou-se que o agregado reciclado em geral absorve muita água (cerca de 8%) em relação aos materiais pétreos convencionais (em torno de 2%), e isto implica em necessidade de maior quantidade de água durante a compactação.

Segundo Motta (2005), o potencial pozolânico foi avaliado pelo método de Chapelle, que consiste em colocar 1g da parte fina da amostra a ser analisada juntamente com 1g de óxido de cálcio (CaO) em uma solução aquosa, que permanece em banho-maria a 97°C e sob agitação por um período de 16 horas. O resultado desta experiência é expresso em mg de CaO/g consumido, sendo que para ser considerado uma pozolana o material deve apresentar um índice de consumo de óxido de cálcio de pelo menos 330mg.

Na pesquisa de Motta (2005) o objetivo deste ensaio foi a fim de verificar se o agregado reciclado estudado poderia sofrer reações pozolânicas que implicariam em possíveis ganhos de resistência nos ensaios mecânicos.

Foram analisadas cinco amostras de finos provenientes de agregado reciclado. A Tabela 3.10 apresenta os resultados referentes à atividade pozolânica dos finos dos agregados reciclados, obtidos pelo Método de Chapelle Modificado.

Percebe-se de acordo com a Tabela 3.10 que comparando as amostras vermelhas e mistas com a cinza, tem-se que esta última apresentou valor bem abaixo das demais (72mg contra 108mg, 139mg, 134mg e 130mg de CaO/g de amostra). Uma possível explicação para as diferenças apresentadas entre os materiais cinza e vermelho ou cinza e misto, pode residir no fato de como são produzidas as cerâmicas contidas nas amostras vermelhas e mistas. A calcinação das matérias-primas utilizadas na fabricação de cerâmicas visa desenvolver as propriedades pozolânicas do material, devendo ser realizada em determinadas temperaturas para atingir tal objetivo. As temperaturas ótimas de queima estão entre 700°C e 900°C; temperaturas abaixo produzem pozolanas pouco eficientes, e acima geram um material praticamente inativo (SANTOS, 1975 apud MOTTA, 2005). Assim, é possível que o agregado reciclado do experimento contivesse material cerâmico com potencial para

desenvolver reações pozolânicas em decorrência de calcinação inadequada durante seu processo de produção.

Tabela 3.10 Resultados de atividade pozolânica do agregado reciclado obtidos pelo Método de Chapelle Modificado

Recicladora e tipo de agregado reciclado	Dimensão característica máxima das partículas (mm)	Atividade pozolânica - Consumo de CaO/g de amostra (mg)
PMSP cinza	0,15	72
PMSP vermelho	0,15	108
Vinhedo vermelho	0,15	139
PMSP misto *	0,15	134
PMSP misto *	0,074	130

* Material estudado por Motta (2005)

Obs: PMSP: Prefeitura Municipal de São Paulo

Apesar de todos os valores encontrados serem inferiores a 330mg especificados, não se pode descartar que a reatividade pozolânica do agregado reciclado não possa influenciar positivamente na resistência mecânica do pavimento. Isto porque os 330mg de consumo de CaO foram especificados para o concreto, cujos valores de resistência são extremamente elevados. Desta forma, um ganho de resistência que pode ser considerado baixo para o concreto pode não o ser para um pavimento.

Em relação ao ensaio de abrasão *Los Angeles*, ainda que o agregado reciclado tenha apresentado valor de abrasão *Los Angeles* de 50% considerado relativamente elevado face os limites máximos estabelecidos em algumas normas para materiais naturais, não se pode fazer desta característica um fator decisivo para sua aplicação em pavimentação. Porém, a título de comparação, sub-bases e bases estabilizadas granulometricamente devem apresentar abrasão *Los Angeles* de até 55%. A forma do agregado reciclado é cúbica e isto pode ser considerado um bom resultado para a sua aplicação em base de pavimento.

No montante de material coletado foi observada a presença de vários tipos de materiais contaminantes, mas os principais foram, em ordem quantitativa decrescente: gesso (0,2%), madeira (0,1%) e plástico (< 0,1%); e em quantidades menores, verificou-se também a ocorrência de ferro, isopor, vidro, tecido e papel. Como a quantidade de materiais indesejáveis de grupos distintos e de mesmo grupo deve ser, segundo a NBR 15.115 (ABNT,

2004g) de até 3% e 2%, em massa, respectivamente, o material estudado não apresentou problemas com relação a esta especificação.

Notou-se, durante o experimento, que o *California Bearing Ratio* (CBR) do agregado reciclado aumentou significativamente com o tempo (Tabela 3.11). Assim, segundo Motta (2005), o potencial pozolânico do agregado reciclado *in natura* possivelmente foi ativado pela compactação, que aumenta de forma significativa a quantidade de finos, aliada a adição de água, provocando reação pozolânica com o tempo.

Tabela 3.11 Resultados dos ensaios de CBR (MOTTA, 2005)

Tempo de cura (dias)	CBR (%)
0	76
0	74
28	87
28	101
90	126
90	107
180	121
180	128

Motta (2005) realizou, também, ensaios de CBR com brita graduada de graduação semelhante à do agregado reciclado, compactada na energia Proctor Modificada. A brita alcançou valor de suporte de 96%, mostrando-se inferior ao dos agregados reciclados que após cura de 90 e 180 dias, compactados na energia Proctor Intermediária, cujos valores médios encontrados foram 117% e 125%, respectivamente.

Por fim, Motta (2005) concluiu em seu estudo que o agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil é de uso promissor como insumo na construção de bases, sub-bases e reforços do subleito de vias de baixo volume de tráfego, em substituição aos materiais convencionais.

Dias et al. (2005) estudaram a possibilidade de utilização de telhas cerâmicas britadas como agregado em base ou sub-base de pavimentos. Os pesquisadores utilizaram resíduos da fabricação de telhas de cerâmica vermelha britados produzindo-se agregados reciclados em três distribuições granulométricas distintas, proporcionando três porosidades diferentes para o esqueleto granular, os quais foram analisados do ponto de vista de

características de compactação e Índice de Suporte Califórnia. Devido à quebra dos grãos verificada nos ensaios de compactação, foram estudadas misturas com solo laterítico.

Os materiais ensaiados foram os agregados reciclados de telhas cerâmicas e misturas desses agregados com dois tipos de solos lateríticos disponíveis. Na Tabela 3.12 são descritas as características dos agregados estudados, sendo ART a abreviação de agregado reciclado de telha.

Tabela 3.12 Tipo de agregado reciclado de telha obtido da britagem (DIAS, 2005)

Agregado	Descrição do agregado reciclado de telha
ART-1	Agregado constituído de grãos passantes na peneira de malha 12,5mm até pó originado da primeira britagem.
ART-2i	Agregado constituído de grãos passantes na peneira de malha 12,5mm até pó originado da segunda britagem.
ART-2c	Agregado preparado no laboratório, a partir do ART-2i, eliminando a fração que passa na peneira de malha 0,60mm, ou seja, constituído pela fração que fica entre as malhas 12,5mm e 0,60mm.

Na Tabela 3.13 estão apresentadas as características e a classificação TRB dos solos empregados nas misturas.

Tabela 3.13 Características dos solos utilizados (Modificada de DIAS, 2005)

Ensaio / Classificação		Solo Argiloso	Solo Arenoso
Limite de Liquidez		42,2	19,6
Limite de Plasticidade		29,5	15,3
Índice de Plasticidade		12,7	4,3
Peso específico dos grãos (kN/m ³)		27,55	27,40
Granulometria		% que passa (massa)	% que passa (massa)
nº peneira	(mm)		
4	4,76	100	100
10	2,00	99,86	98,9
16	1,19	99,71	97,96
30	0,59	98,39	96,03
40	0,42	93,37	91,33
60	0,25	81,91	77,41
100	0,149	71,19	48,48
200	0,074	67,35	26,75
Classificação TRB		A 7-6	A-2-4

Os ensaios de compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) e expansão tanto do agregado como das misturas foram executados no cilindro grande de Proctor. Foi também determinado o CBR na umidade ótima sem imersão ($CBR_{w_{ot}}$).

Para o ART-1 foram utilizadas as energias: Normal, Intermediária e Modificada. Já para os demais foi usada apenas a energia intermediária. A avaliação do CBR foi feita para diferentes proporções de misturas de solo arenoso e argiloso com ART-2i, ART-2c e um outro agregado obtido a partir do ART-2i com a eliminação da fração passante na malha de 2mm, ficando denominados ART-2c#0,6 e ART-2c#2,0 respectivamente (DIAS, 2005).

A variação do CBR com o teor de umidade foi feita apenas para a mistura do ART-2c/#0,6 com o solo argiloso e o arenoso. Nas misturas foi utilizada a proporção que otimiza o volume compactado, ou seja, aquela em que a porcentagem de solo no volume compactado é igual a porosidade do agregado e o complemento até 100% é porcentagem de agregado. No caso do ART-2c/#0,6, é aquela que conta com 63% de ART-2c#0,6 e 37% de solo (arenoso ou argiloso).

Conforme Dias (2005), os valores de CBR do ART foram considerados altos e atendem às especificações rodoviárias para uso em sub-base (compactado na energia normal), para uso em base em rodovia de baixo volume de tráfego (compactado na energia intermediária). Na umidade ótima, o CBR máximo obtido utilizando a energia normal de compactação foi de 21% , na intermediária 62% e na energia modificada o maior valor foi de 104%. Os valores da expansão após imersão foram baixos e também atendem às especificações da NBR 15.116 (ABNT, 2004h) que para este fim que ditam valor máximo de 1%.

Depois de constatada, a quebra se constituiu em uma preocupação para o emprego do ART em pavimentos, pois no campo o material será compactado e posteriormente sofrerá as ações do tráfego com carregamentos dinâmicos, e esta condição de solicitação pode levar o material a apresentar redução de sua vida de serviço.

A opção adotada para melhorar o desempenho do ART foi sua mistura com solo em proporção baseada no conceito de porosidade do agregado conforme proposto por Dias (2005). A mistura de solo ao agregado, como era de se esperar, provocou uma queda nos valores do CBR (por exemplo, para a mistura de ART-2i com solo, compactada na energia

intermediária e ensaio imerso, o CBR foi de 30%, ou seja, 27% mais baixo do que do ART-2i) (DIAS, 2005).

Mas ainda assim, segundo Dias (2005) os valores obtidos são compatíveis com o emprego em camadas de pavimentos de baixo volume de tráfego, mas o grande benefício no caso das misturas com solo foi a melhor reprodutibilidade dos resultados, o que deve ter ocorrido em função do ART não mais se quebrar, a ponto de interferir na compactação, o que foi constatado também pelos ensaios de determinação da distribuição granulométrica antes e após a compactação.

Gusmão et al. (2006) analisou a viabilidade técnica do reaproveitamento de resíduos sólidos da construção civil em obras de pavimentação, realizando a caracterização geotécnica destes resíduos gerados na cidade do Recife. Foram analisadas amostras de duas obras, onde a primeira (obra 1) encontrava-se na fase de demolição e a segunda (obra 2) na fase de alvenaria estrutural. Primeiramente foi feita a caracterização dos RCC (composição, massa unitária e composição granulométrica) e em seguida foram realizados os ensaios de granulometria por sedimentação, CBR e cisalhamento direto.

Para a determinação da composição de cada amostra, foi feita inicialmente uma separação visual de acordo com o tipo de material presente (argamassa, tijolos cerâmicos, areia, etc.), e uma posterior pesagem dos mesmos. Foi observado que na obra 1 houve grande incidência de argamassa e na obra 2 maior quantidade de tijolos cerâmicos em sua composição. Através dos ensaios de peneiramento, obteve-se a composição granulométrica das amostras, as quais mais de 50% do material foi classificado como pedregulho. Com relação ao Cu a obra 1 obteve-se um Cu de 23% e a obra 2 de 20% aproximadamente, atendendo portanto a norma NBR 15.115 (ABNT, 2004g).

O CBR encontrado para a amostra da obra 1 foi de 33,7, enquanto que para a obra 2 o CBR foi de 24,2%, em ambos os casos de acordo com a NBR 15.115 (ABNT, 2004g) e NBR 15.116 (ABNT, 2004h) estes resíduos podem ser utilizados em obras de pavimentação.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se afirmar que as amostras estudadas apresentaram composição bastante satisfatórias, no que se refere ao seu potencial para o reaproveitamento (reutilização ou reciclagem). No que diz respeito à utilização do RCC em obras de pavimentação, com base nos resultados encontrados verificou-se, do ponto de vista técnico, é viável fazer uso de agregados reciclados de RCC em obras de pavimentação, seja na

execução de reforço de subleito ou na sub-base, uma vez que foram atendidos todos os requisitos estabelecidos pela normas técnicas vigentes.

3.3 EXECUÇÃO DE TRECHOS EXPERIMENTAIS NA CIDADE DE GOIÂNIA

Silva (2004) estudou as propriedades e características dos resíduos sólidos de construção da cidade de Goiânia-GO, bem como executou mini-pistas experimentais e avaliou seu comportamento perante ensaios de laboratório e de campo. Neste trabalho, o RCC foi britado e separado em granulometrias diferentes, determinando então, quatro proporções a serem estudadas nas mini-pistas, conforme apresentado na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 Origem do material e proporções aplicadas nas pistas (SILVA, 2004)

Areia	Material britado passado na peneira de malha 4,8 mm
Brita 19mm	Material britado passado na peneira de malha 19 mm
Brita 38mm	Material britado passado na peneira de malha 38 mm
Pista 01	36% de brita 38mm, 30% de brita 19mm, 22% de areia e 12% de argila
Pista 02	25% de brita 38mm, 35% de brita 19mm e 40% de areia
Pista 03	36% de brita 38mm, 30% de brita 19mm, 22% de areia e 12% de argila
Pista 04	68% de brita 38mm, 20% de areia e 12% de argila

Os ensaios de CBR foram realizados em cinco corpos-de-prova por material selecionado (Pista 02, Pista 03 e Pista 04). O resumo do índice de suporte e expansão obtidos para os corpos-de-prova moldados na umidade ótima e energia normal encontra-se apresentado na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 Resultados dos ensaios de CBR e Expansão (SILVA, 2004)

Nomeclatura	Ensaio	1º Ponto	2º Ponto	3º Ponto	4º Ponto	5º Ponto
Pista 01	CBR (%)	-	-	58,20	-	-
Pista 02	CBR (%)	18,00	40,00	53,70	22,30	10,50
	Expansão (%)	0,04	0,01	0,00	-0,02	-0,02
Pista 03	CBR (%)	36,30	50,40	73,60	18,80	7,20
	Expansão (%)	0,09	0,02	0,00	0,01	-0,02
Pista 04	CBR (%)	36,8	50,4	57,00	31,7	-
	Expansão (%)	0,03	0,04	0,04	0,02	-

De acordo com a NBR 15.116 (ABNT, 2004h) a utilização do RCC como material de base só é permitido para vias de tráfego com $N = 10^6$ repetições do eixo padrão de 8,2tf (80kN) no período de projeto deve ter CBR superior a 60% e para revestimento primário (cascalhamento) ou sub-base deve ser superior a 20 %. Assim, pode ser observado no resumo que para $N = 10^6$ o traço aplicado para Pista 02 atende os requisitos para aplicação em base e os demais traços atendem os requisitos para utilização em revestimento primário e sub-base.

Já com relação à expansão, em todos os traços este parâmetro foi inferior a 0,5%. É importante salientar que a NBR 15.116 (ABNT, 2004h) recomenda que para aplicação em base e sub-base o material seja compactado na energia intermediária.

Com a análise dos ensaios de laboratório, verificou-se que a incorporação de argila é essencial para uma boa trabalhabilidade e controle de campo, mas não se faz obrigatório, com base nos resultados da Pista 02, na qual não se fez uso de argila. Os resultados de CBR mostraram que a incorporação de argila provoca um aumento na resistência, conforme apresentado na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 Resumo dos ensaios de CBR e Expansão na energia normal (SILVA, 2004)

Nomeclatura	CBR (%)	Expansão (%)
Pista 01	58,2	-
Pista 02	49,5	0,00
Pista 03	70,0	0,00
Pista 04	43,0	0,03

No estudo de Silva (2004) foi constatado que a adição de maior quantidade de argila na base (25%) em relação à sub-base (17%) melhorou a trabalhabilidade e diminuiu o desvio e a variação das umidades durante o controle. Essa adição de argila promove alteração para características mais próximas daqueles convencionalmente utilizados para pavimentação.

Com base nessas considerações, foi executado em Goiânia um trecho experimental com RCC que dá acesso aos compradores no CEASA seguindo as seguintes proporções:

- Sub-base → 33% de brita 19mm, 33% de brita de 9,5mm, 17% de areia e 17% de argila de adição;
- Base → 25% de brita 19mm, 25% de brita 9,5mm, 25% de areia e 25% de argila de adição.

A Figura 3.10 mostra o detalhe do entulho britado aplicado na base e sub-base do trecho experimental (SILVA, 2004).

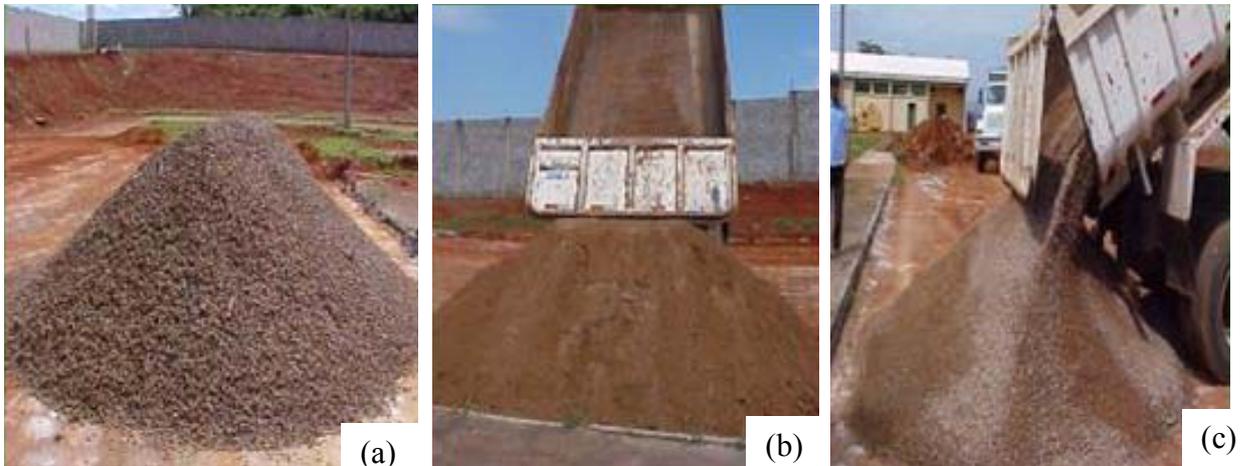


Figura 3.10 Detalhe dos agregados obtidos: (a) Areia artificial; (b) Brita 9,5 mm; (c) Brita 19,0 mm (SILVA, 2004)

Para viabilizar uma boa homogeneização da mistura no campo foram testados três processos de mistura das amostras (Figura 3.11) durante a construção da sub-base (SILVA, 2004):



Figura 3.11 Homogeneização da mistura no campo: (a) 1º Processo; (b) 2º Processo; (c) 3º Processo (SILVA et al., 2006)

- 1º Processo: os materiais foram lançados na pista alternadamente entre os bordos direito e esquerdo de acordo com a dosagem especificada para sub-base. Para a mistura das amostras foi utilizada uma motoniveladora (Figura 3.11a);
- 2º Processo: os materiais foram lançados em camadas na pista individualmente na seguinte ordem: brita 19,0 mm, brita 9,5 mm, areia artificial e argila. Em seguida os mesmos foram misturados utilizando motoniveladora (Figura 3.11b);
- 3º Processo: os materiais foram misturados no depósito antes do transporte para pista. Os materiais foram dosados e misturados utilizando a pá de uma carregadeira gerando-se uma

pilha de material homogeneizado (Figura 3.11c), sendo logo a seguir transportado para a pista.

Silva (2004) realizou ensaios de granulometria para verificar a eficiência dos três processos e concluiu que os melhores resultados foram obtidos respectivamente pelos processos 3 e 1, ou seja, caso não se disponha de espaço para adotar o 3º processo, deve ser adotado o 1º processo. O 3º processo, material misturado no depósito utilizando a pá carregadeira, apresentou menor dispersão de mistura em relação à curva teórica. Entretanto, o tempo gasto neste processo foi cerca de 30% superior ao 1º processo.

Na execução da sub-base foi adotado o 3º processo. Os resultados de granulometria do material após a mistura comprovaram a eficiência do processo adotado. Apesar da dosagem realizada no laboratório da composição da sub-base terem apresentado boa trabalhabilidade, verificou-se no campo, após a compactação da sub-base, que a mesma apresentou uma quantidade excessiva de material solto na pista.

Verificou-se que o excesso de material solto era devido à baixa coesão do material. Assim, optou-se por aumentar a quantidade de argila nas composições das camadas de base (de 17% para 25%). A base foi compactada utilizando rolo pé-de-carneiro na energia intermediária e ficou, depois de compactada, com uma espessura de cerca de 15 cm. Podem ser observadas na Figura 3.12 as etapas de evolução na execução desse trecho.



Figura 3.12 Evolução na execução do pavimento em Goiânia: (a) subleito preparado; (b) base preparada; (c) via pavimentada (SILVA, 2004)

A adição de maior quantidade de solo argiloso para execução da base (25%) em relação a sub-base (17%) diminuiu o desvio e a variação das umidades durante o controle. A adição material argiloso aos agregados reciclados de resíduo da construção civil proporcionaram propriedades à misturas que aproximaram suas características dos materiais

normalmente utilizados em camadas de pavimentos em Goiânia (cascalho laterítico), melhorando a trabalhabilidade do mesmo (SILVA, 2004).

Oliveira (2007), realizou estudos a fim de avaliar as potencialidades de utilização de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis. As amostras de resíduos sólidos da construção civil foram obtidas da seguinte forma: as de resíduos de concreto foram oriundas dos Laboratórios de FURNAS S.A. (Aparecida de Goiânia-GO), provenientes da demolição de um piso de concreto (cerca de 70%) e de corpos-de-prova de concreto já rompidos (cerca de 30%); a parte de resíduos cerâmicos foi obtida na sua maior parte junto ao depósito do Departamento de Estradas de Rodagem Municipal - Companhia Municipal de Pavimentação de Goiânia (DERMU-COMPAV), sendo proveniente da demolição de alvenarias de tijolos cerâmicos furados e maciços e de telhas cerâmicas quebradas doadas por um ferro velho da cidade (Figuras 3.13 e 3.14). Também foi coletada uma amostra de argamassa proveniente do depósito do DERMU-COMPAV, amostra esta passada na peneira nº 4 (4,8 mm).

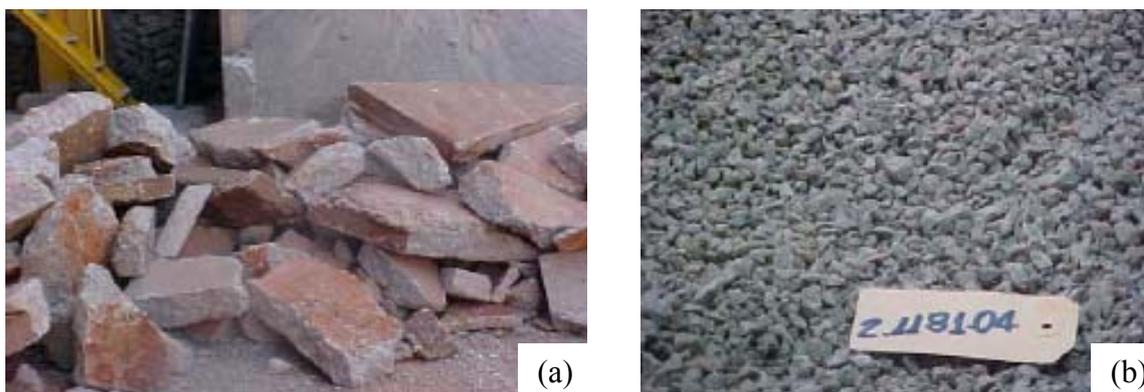


Figura 3.13 Material de concreto empregado no estudo: (a) Resíduos de concreto; (b) Agregado reciclado (OLIVEIRA, 2007)

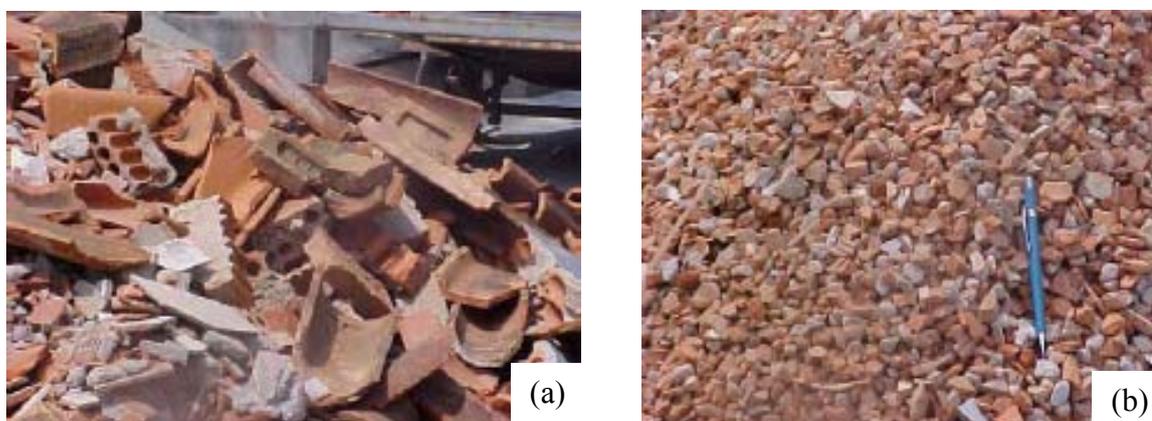


Figura 3.14 Material cerâmico empregado no estudo: (a) Resíduos cerâmico; (b) Agregado reciclado (OLIVEIRA, 2007)

De acordo com Oliveira (2007), os materiais foram levados para um britador de mandíbulas em duas etapas: os resíduos de concreto em uma etapa e os resíduos cerâmicos em outra. Após a britagem as amostras foram separadas em quatro frações: uma retida na peneira 19,1 mm (3/4”), uma passante na peneira 19,1 mm e retida na peneira 9,5 mm (3/8”), doravante denominada de AR 9,5 - uma passante na peneira 9,5 mm e retida na peneira 4,8 mm (nº 4), doravante denominada de AR 4,8 e a última passante na peneira 4,8 mm (nº 4), doravante denominada de AR Areia.

Com o intuito de verificar a variação dos parâmetros de compactação e CBR em função do percentual de grãos cerâmicos, de concreto e argamassa constituintes dos mesmos e também em função da adição de um determinado percentual de solo argiloso, foram realizados vários ensaios variando esses percentuais.

Na composição das dosagens procurou-se enquadrar as amostras o mais próximo possível da média granulométrica da Faixa C. Os teores de solo argiloso adicionados foram de 10, 20, 30 e 40%. As dosagens com 30 e 40% de solo argiloso não ficaram completamente enquadradas na Faixa C em função do elevado percentual de finos (OLIVEIRA, 2007).

No total, foram realizados quinze ensaios de compactação e CBR, sem reuso das amostras, sendo dois com o solo argiloso e treze com os agregados reciclados puros ou com a adição de solo. Em todos os ensaios, com exceção de um, na amostra de solo argiloso, que foi também compactada na energia do Proctor normal, foi utilizada a energia de compactação do Proctor intermediário, visando verificar se os resultados são satisfatórios para emprego das dosagens em camadas de base e sub-base.

O solo foi classificado como CL - Argila Magra Arenosa, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e como A-7-6 (IG = 11) - Solos Argilosos, na Classificação *Transportation Research Board* (TRB). Foi constatado ainda nas curvas granulométricas, com e sem defloculante, que ocorreu um elevado teor de floculação do solo, característico de solos lateríticos.

A Tabela 3.17 apresenta os parâmetros de compactação e CBR do solo argiloso para as energias do Proctor normal e intermediário. Verificou-se um aumento no valor do CBR com o aumento da energia de compactação e expansão nula para ambos os casos.

Tabela 3.17 Parâmetros de compactação e CBR do solo argiloso (OLIVEIRA, 2007)

Energia	w_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m³)	Expansão (%)	CBR (%)
Proctor Normal	21,0	16,4	0	7
Proctor Intermediário	18,6	17,2	0	16

Em todos os ensaios de compactação e CBR realizados com os agregados reciclados, a expansão medida foi nula. De todas as dosagens realizadas com uso de agregados reciclados, quatro apresentaram valores de CBR superiores a 80%, portanto satisfatórias para emprego em camadas de base de pavimentos com alto volume de tráfego ($N > 5 \times 10^6$); quatro apresentaram valores de CBR entre 60 e 80%, portanto satisfatórios para emprego em camadas de base de pavimentos com médio e baixo volume de tráfego ($N < 5 \times 10^6$) e os outros cinco valores superiores a 30%, portanto satisfatórios para uso em sub-bases de pavimentos.

Segundo Oliveira (2007) os parâmetros de compactação, expansão e CBR dos agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil apresentaram valores bastante satisfatórios para emprego em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis. No entanto, convém ressaltar que a energia de compactação empregada foi a do Proctor intermediário e que a norma do DNIT para bases estabilizadas granulometricamente recomenda utilizar a energia do Proctor modificado para as rodovias com o número $N > 5 \times 10^6$. É possível que os valores de CBR sejam melhorados caso seja aumentado o valor da energia. Os agregados reciclados sem adição de solo local apresentaram maiores valores de CBR, porém, foi verificado que para algumas dosagens é possível utilizar o solo local afim de reduzir custos, melhorar a trabalhabilidade da mistura e, mesmo assim, obter valores satisfatórios de CBR.

Oliveira (2007), realizou também ensaios de campo (viga Benkelman, prova de carga sobre placa, penetrômetro dinâmico de cone e pressiômetro Pencil) no trecho experimental do CEASA (Goiânia-GO) para avaliar o comportamento da pista em termos de resistência e deformabilidade. Os ensaios foram realizados durante construção do subleito e nas camadas de sub-base, base e revestimento.

Verificou-se que, quanto aos valores de Do (deflexão real ou verdadeira média no ponto de prova) antes da execução do revestimento, obtiveram-se valores médios variando entre 70 e 90×10^{-2} mm. Após a construção da camada de revestimento, o valor médio de Do

reduziu para 48×10^{-2} mm. Os resultados dos ensaios de Viga Benkelman nas camadas do pavimento indicaram que o mesmo apresentou uma boa qualidade estrutural após a construção.

Segundo Oliveira (2007), foram realizados ensaios de prova de carga nos bordos e no eixo do pavimento, sendo 3 no subleito, 3 na camada de sub-base de agregado reciclado, 3 na camada de base de agregado reciclado e 3 sobre o revestimento asfáltico. A Tabela 3.18 mostra o deslocamento médio das provas de carga realizadas em cada camada, tanto para a carga de 2,8 t, que corresponde à pressão aplicada pela roda do eixo padrão (560 kPa) como para a carga de 4 t, que corresponde à carga máxima aplicada no ensaio.

Tabela 3.18 Resumo dos Ensaios de Prova de Carga (OLIVEIRA, 2007)

Camada	Deslocamento (mm) Carga = 2,8 ton.	Deslocamento (mm) Carga = 4 ton.	Teor de umidade (%)
Subleito	1,17	1,66	8,8
Base	1,31	1,90	6,6
Sub-base	1,37	1,80	9,6
Revestimento	1,25	1,75	-

A Tabela 3.18, também apresenta as umidades médias dos locais ensaiados. Os deslocamentos nas camadas foram bastante próximos, embora, ao contrário do que se poderia esperar, o subleito apresentasse deslocamentos ligeiramente menores que as demais camadas. Os valores dos deslocamentos medidos nas provas de carga foram relativamente pequenos, sendo que são bastante próximos os valores medidos em todas as camadas (subleito, sub-base, base e revestimento).

Foram executados seis ensaios com o penetrômetro dinâmico de cone (DCP), alternados nos bordos e no eixo, sendo 3 no subleito e 3 na camada de base de agregado reciclado. A Tabela 3.19 apresenta os resultados das correlações e a Tabela 3.20 apresenta os valores de DN e os valores de CBR obtidos pelas correlações, onde CBR = capacidade de suporte (%) e DN = índice de penetração obtido no ensaio com DPC (mm/golpes).

Os valores dos CBR de laboratório do subleito, base e sub-base foram respectivamente iguais a 13%, 88% e 100%. As correlações com o DCP que mais se aproximaram desses valores foram as seguintes: para o subleito CBR 3 (12%), CBR 5 (13%)

e CBR 6 (12%); para a base CBR 1 (96%) e CBR 5 (93%); para a sub-base CBR 1 (119%) e CBR 5 (113%) (OLIVEIRA et al., 2005). Além disso, o ensaio de DCP mostrou-se bastante eficiente na determinação da espessura das camadas penetradas, o que é observado a partir da curva DCP (nº de golpes acumulados x profundidade).

Tabela 3.19 Correlações utilizadas por Oliveira (2007)

CBR 1 – kleyn (1982) – África do Sul	$\log CBR = 2,60 - 1,26 \times (\log DN)$
CBR 2 – Angelone et. al. (1991) – Argentina	$CBR = 450 \times (DN)^{-1,05}$
CBR 3 – Harison (1987) – Indonésia	$\log CBR = 2,81 - 1,32 \times (\log DN)$
CBR 4 – Heyn (1986) – Brasil/Paraná	$CBR = 443,45 \times (DN)^{-1,30}$
CBR 5 – Oliveira & Vertamatti (1997) – Brasil/São Paulo– ITA	$\log CBR = 2,490 - 1,057 \times (\log DN)$
CBR 6 – Cardoso & Trichês (1998) – Brasil/Santa Catarina (CBR sem imersão)	$CBR = 512,64 \times (DN)^{-1,25}$
CBR 6 – Cardoso & Trichês (1998) – Brasil/Santa Catarina (CBR com imersão)	$CBR = 151,58 \times (DN)^{-1,03}$

Tabela 3.20 Ensaio de Cone (DCP) – Correlações com o CBR (OLIVEIRA, 2007)

Camada	DN mm/golpe	CBR 1 (%)	CBR 2 (%)	CBR 3 (%)	CBR 4 (%)	CBR 5 (%)	CBR 6 (%)	CBR 7 (%)
Subleito	2,1	153	203	237	166	139	199	69
	20,1	9	19	12	9	13	12	7
Base e Sub-base	3,1	96	137	145	102	93	125	47
	2,6	119	165	183	128	113	155	57
	12,8	16	31	22	16	21	21	11

De acordo com Oliveira (2007), os resultados mostraram um bom desempenho das camadas de base e sub-base utilizando agregados reciclados.

Ribeiro (2006), avaliou o comportamento estrutural de uma via urbana onde na sua base foi utilizado agregado reciclado, tendo como objetivo a investigação das características da via executada e a determinação de parâmetros que comprovem ou não a viabilidade técnica de aplicação do resíduo estudado.

Para tanto, foram realizados ensaios de campo para determinar parâmetros estruturais (prova de carga sobre a placa, viga de Benkelman, penetrômetro dinâmico de cone e pressiômetro Pencil) em dois períodos diferentes (Abril/2005 e Janeiro/2006); determinou-se os módulos dos materiais na pista por meio da realização de retroanálises numéricas dos ensaios de viga Benkelman e prova de carga sobre placa, utilizando o programa de elementos

finitos Sigma/W (GEOSLOPE, 1995) e identificou as características dos materiais constituintes do solo local, bem como da camada de base (mistura agregado reciclado e solo local) por meio de retirada de amostras e sua caracterização em laboratório.

Em relação aos ensaios de campo, Ribeiro (2006), observou-se no ensaio de prova de carga (DCP) que houve redução dos deslocamentos medidos no ensaio de um período para outro, sendo que essa variação foi mais significativa para as estacas localizadas nos bordos do pavimento e para o ensaio realizado no eixo, o comportamento foi melhor. Já na determinação das deflexões utilizando a viga Benkelman, comparando as curvas médias obtidas para os dois períodos, tem-se que, em 2006, o pavimento apresentou, no geral, melhor desempenho. E no ensaio com o pressiômetro, comparando os resultados obtidos nos dois períodos, observa-se que em janeiro/2006 os módulos permaneceram semelhantes ou diminuíram em relação ao mês de abril/2005. Isto mostra a variação do comportamento do pavimento ao longo do tempo em função das ações climáticas e do tráfego.

Com os resultados de campo, Ribeiro (2006) concluiu que os ensaios realizados na pista experimental mostraram resultados satisfatórios com relação ao desempenho da pista, comprovando a viabilidade técnica da utilização de RCC reciclado em base de pavimentos.

Nos ensaios laboratoriais, pode-se verificar que a granulometria da mistura agregado reciclado e solo estava coerente com o que foi definido no projeto da via pelo DERMU. O valor de CBR na umidade ótima para a mistura agregado reciclado e solo foi de 37,0%. Inicialmente, este valor não é considerado elevado, no entanto, em vias urbanas com baixo volume de tráfego esta mistura pode ser usada como base (CBR ~ 40%). Como sub-base (CBR \geq 20%) este material pode ser utilizado em qualquer tipo de via urbana ou rodoviária.

Com os dados obtidos através dos ensaios de campo e análises laboratoriais Ribeiro (2006) observou-se maior resistência no eixo da pista quando comparado com os bordos. Isto pode estar relacionado com a compactação inadequada no processo construtivo ou na falta de sistema de drenagem na pista que em abril de 2005 ainda era inexistente.

Os resultados de Ribeiro (2006) e de Oliveira (2007) serão comparados com os resultados obtidos nesta pesquisa, pelo fato de avaliar o comportamento estrutural dos mesmos trechos experimentais em períodos diferentes.

Capítulo 4

METODOLOGIA

4.1 INTRODUÇÃO

Para o desenvolvimento da pesquisa visando a avaliação da aplicação ambiental e mecânica do agregado reciclado na estrutura de pavimentos flexíveis, foram adotados as seguinte etapas:

- Vistoria em bairros da cidade de Goiânia com o objetivo de verificar a existência ou não de pontos de descarte irregular do resíduo da construção civil (RCC);
- Execução de ensaios laboratoriais para analisar fatores como contaminação ambiental do resíduo, pois não se pode afirmar que ele é inerte; durabilidade das amostras e ganho de resistência ao longo do tempo.
- Realização de ensaios de campo e análises numéricas em duas pistas experimentais construídas com agregado reciclado para avaliar os seus comportamentos mecânicos;

A seguir estão detalhados os procedimentos definidos para cada etapa da pesquisa.

4.2 DEPOSIÇÃO INADEQUADA DE RCC

Foram realizadas vistorias em alguns bairros na cidade de Goiânia, nos meses de abril, maio, dezembro de 2006 e abril de 2007, com o objetivo de demonstrar a situação da disposição final dos resíduos sólidos da construção civil nesta cidade. Os pontos foram escolhidos aleatoriamente, totalizando oito locais, sendo:

- Proximidades do Condomínio Alphavile;
- Proximidades e margem do Córrego Água Branca – Residencial Vale do Araguaia;
- Proximidades do Rio Meia Ponte – Jardim Novo Mundo;
- Proximidades do Córrego São José – Parque Atheneu;
- Margem e leito do Córrego Macambira – Setor Celina Parque;
- Proximidades da Avenida Perimetral – Goiânia 2;

- Lote vago – Setor Criméia Leste;
- Proximidades da BR- 153 – Setor Alto da Glória.

4.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

4.3.1 COLETA DE MATERIAIS

Para os estudos laboratoriais foram coletados aproximadamente 50 kg de solo nas proximidades do CEASA no mês de maio de 2006 (Figura 4.1).



Figura 4.1 Realização da coleta do solo no mês de maio de 2006

O resíduo da construção civil utilizado na pesquisa foi cedido por FURNAS, sendo que este material foi coletado no estudo de Silva (2004), mas ainda não havia sido utilizado. Este agregado foi coletado por diversas empresas do ramo de construção, britado e armazenado pelo Departamento de Estrada de Rodagem do Município (DERMU), por fim encaminhadas para as instalações do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas, no município de Aparecida de Goiânia (GO). A Figura 4.2 mostra o material sendo depositado em FURNAS.



Figura 4.2 Chegada dos resíduos: (a) Chegada dos resíduos em FURNAS; (b) Deposição do material (SILVA, 2004)

4.3.2 PREPARAÇÃO E SELEÇÃO DAS AMOSTRAS

Os ensaios laboratoriais com o solo e agregado reciclado foram realizados no Laboratório de Solos da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (EEC – UFG), exceto os ensaios de solubilização e lixiviação que foram executados por um laboratório particular certificado pela ISO 9001/2000 e SGC/INMETRO.

Com a amostra do solo alguns procedimentos foram realizados para determinação da característica física (análise granulométrica, limites de consistência, peso específico, compactação e umidade higroscópica), de acordo com a NBR 6.457 (ABNT, 1986a). O solo foi colocado para secar em temperatura ambiente, em seguida foi destorroado e com ajuda do repartidor de amostra foi feito o quarteamento do solo, obtendo assim, uma amostra representativa em quantidades suficientes para realização dos ensaios (Figura 4.3).



Figura 4.3 Preparação do solo: (a) Secagem; (b) Desmanche dos torrões; (c) Quarteamento

Com os resíduos sólidos da construção civil, de acordo com os estudos de Silva (2004), eles foram britados em agregados para uso em pavimentação, utilizando-se um britador de mandíbulas, ilustrado na Figura 4.4.

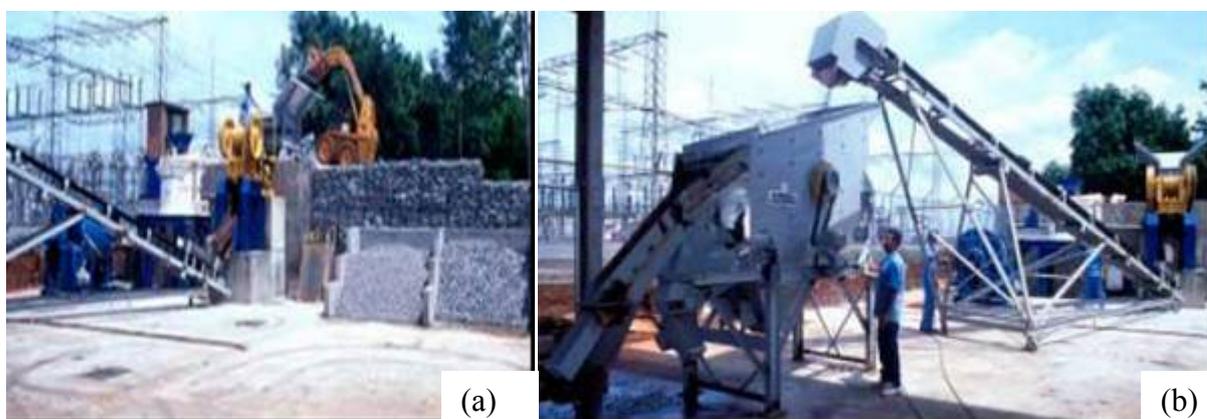


Figura 4.4 Britador de Mandíbula: (a) Lançamento do resíduo no britador; (b) Britagem e separação granulométrica do material (SILVA, 2004)

O material foi britado e separado com as seguintes denominações e registros: material com diâmetro máximo de 38mm, material com diâmetro máximo igual a 19mm e material com diâmetro máximo igual a 4,8mm (Figura 4.5).



Figura 4.5 Separação do material: (a) Brita 38mm; (b) Brita 19mm (à esquerda) e brita 4,8mm (à direita) (SILVA, 2004)

Foram preparadas, em laboratório, amostras de algumas frações granulométricas da mistura do agregado reciclado (brita 38mm; brita 19mm e brita 4,8mm – Figura 4.6) com solo do CEASA para a realização de ensaios laboratoriais, visando avaliar o ganho de resistência ao longo do tempo e a durabilidade dos materiais em função da textura. Para tanto, foram definidas as seguintes amostras, de acordo com as faixas do DNER (2007):

- Amostra L1: material enquadrado na faixa B (textura grossa);
- Amostra L2: material enquadrado na faixa D (textura média);
- Amostra L3: material enquadrado na faixa F (textura fina).



Figura 4.6 Detalhe do material estudado: (a) brita de 4,8mm; (b) brita de 19mm; (c) brita de 9,5mm

Com amostras deformadas retiradas das camadas de base dos trechos experimentais foram realizados ensaios de granulometria para avaliar se houve ou não desagregação do material com ação do tráfego, bem como ensaios de lixiviação e solubilização.

4.3.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Com o solo do CEASA foi realizado ensaio de granulometria com sedimentação (com e sem defloculante) de acordo com a norma ABNT 7.181 “Solo- Análise granulométrica” (ABNT, 1984a), como ilustrado na Figura 4.7.

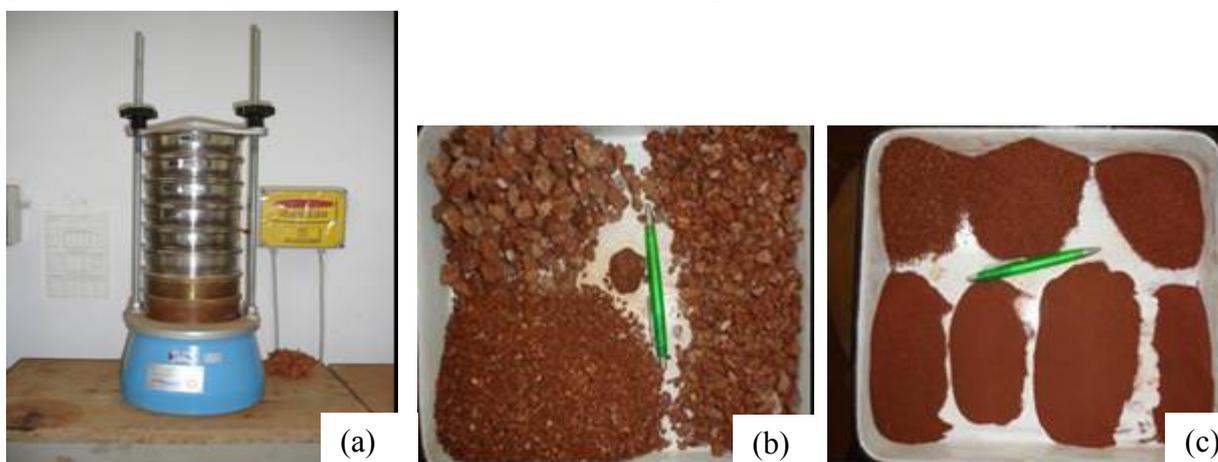


Figura 4.7 Ensaio de granulometria: (a) Peneiramento; (b) Ensaio com o agregado reciclado; (c) Ensaio com o solo do CEASA

Para caracterização e enquadramento nas faixas, optou-se em realizar o ensaio de granulometria por peneiramento sem lavagem do agregado reciclado. Pesquisas demonstram que há pouca diferença entre os resultados obtidos com e sem lavagem. Além disso, a situação sem lavagem retrata melhor a realidade no campo.

4.3.4 ENSAIO DE LIMITES DE CONSISTÊNCIA

4.3.4.1 Limite de plasticidade

O limite de plasticidade do solo e das amostras foram determinados de acordo com a norma técnica NBR 7.180 “Solo- Determinação do limite de plasticidade” (ABNT, 1984e) (Figura 4.8).

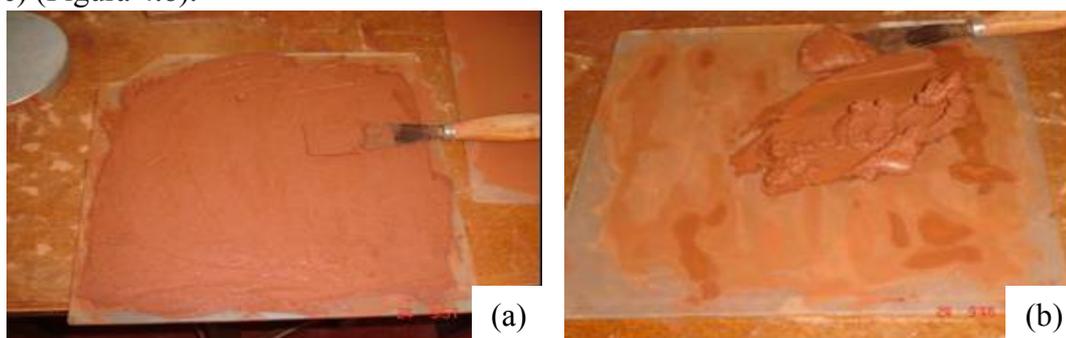


Figura 4.8 Ensaio de limite de plasticidade: (a) Execução do ensaio; (b) Vista frontal do solo

4.3.4.2 Limite de liquidez

O limite de liquidez do solo do CEASA e das amostras L1, L2 e L3, foram realizados de acordo com a norma técnica NBR 6.459 “Solo- Determinação do limite de liquidez” (ABNT, 1984d). A determinação do limite de liquidez foi realizada pelo aparelho de Casagrande (Figura 4.9), que consiste em um prato de latão, em forma de concha, sobre um suporte de ebonite, por meio de um excêntrico imprime-se ao prato, repetidamente, quedas de altura de 1 cm e intensidade constante.



Figura 4.9 Determinação do limite de liquidez: (a) Aparelho de Casagrande; (b) Realização do ensaio

4.3.5 MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

Com o solo do CEASA foi realizado de acordo com a norma técnica 6.508 “Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm- Determinação da massa específica” (ABNT, 1984b). Já com as amostras L1, L2 e L3 foram feitos conforme a norma técnica 6.458 “Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8mm- Determinação da massa específica” (ABNT, 1984c). A Figura 4.10 ilustra os dois tipos de ensaios.

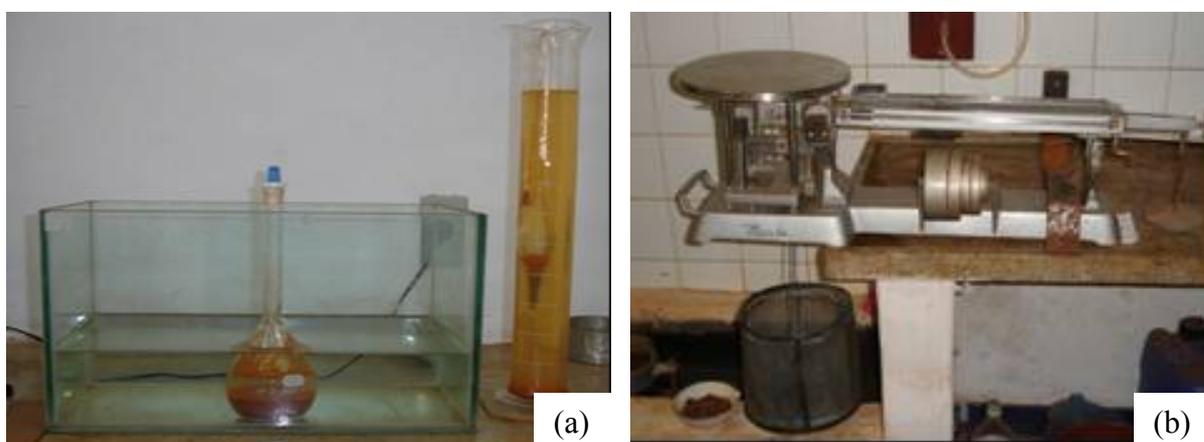


Figura 4.10 Ensaio de massa específica: (a) Com o solo local; (b) Com as amostras L1, L2 e L3

4.3.6 COMPACTAÇÃO

Com a finalidade de se obter a curva de compactação, bem como a umidade ótima e o seu respectivo peso específico aparente seco máximo, foi realizado o ensaio intermediário de compactação (Proctor-Intermediário), utilizando-se cilindros e soquetes grandes de acordo com a norma técnica NBR 7.182 “Solo- Ensaio de Compactação” (ABNT, 1986b) com as amostras L1, L2, L3 e solo do CEASA (Figura 4.11).



Figura 4.11 Realização do ensaio de Compactação: (a) Ensaio de compactação com as amostras; (b) Ensaio de compactação com o solo do CEASA

4.3.7 ENSAIO DE *CALIFORNIA BEARING RATIO* (CBR) E EXPANSÃO

Após o término da compactação, partiu-se para análise de expansão e CBR, das amostras de solo do CEASA, L1, L2 e L3, pegando-se o cilindro com a amostra compactada, introduzindo nele um peso anelar (simula o tráfego na via) e um extensômetro. Com os cilindros preparados, os mesmos ficaram imersos em água por quatro dias consecutivos (Figura 4.12 b), sendo efetuada diariamente leitura no extensômetro.

O ensaio de CBR foi realizado de acordo com a norma técnica NBR 9.895 “Solo-Índice de Suporte Califórnia” (ABNT, 1987a). O ensaio de CBR consiste na aplicação de um carregamento estático em um corpo-de-prova sob condições saturada (quatro dias). Este carregamento se dá por meio da penetração de um pistão de diâmetro padronizado, em velocidade constante, acompanhado de registros de cargas de reação por meio de um anel dinamométrico acoplado à prensa (Figura 4.12a).



Figura 4.12 Realização dos ensaios de CBR e expansão: (a) Ensaio de *California Bearing Ratio* (CBR); (b) Ensaio de expansão

4.3.8 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Para avaliar o ganho de resistência ao longo do tempo, foram moldados três corpos-de-prova de cada amostra (L1, L2 e L3) na umidade ótima e no peso específico aparente seco máximo, obtidos na energia Proctor Intermediário (Figura 4.13).

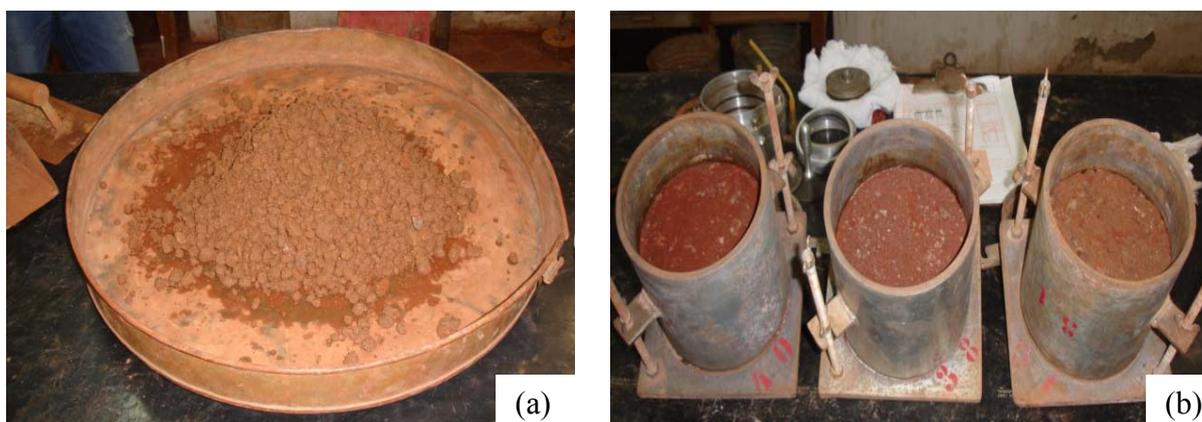


Figura 4.13 Moldagem dos corpos-de-prova: (a) Preparação na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo; (b) Após serem compactados

Os três corpos-de-prova foram levados para uma câmara úmida (Figura 4.14) para serem curados nos seguintes tempos: quinze, trinta e quarenta e cinco dias, e após este período foram realizados os ensaios de Expansão e posteriormente os ensaios de CBR com as amostras L1, L2 e L3, totalizando 9 (nove) corpos-de-prova (Figura 4.15).



Figura 4.14 Cura dos corpos-de-prova: (a) Os corpos-de-prova na câmara úmida; (b) Vista geral da câmara úmida



Figura 4.15 Amostras depois da realização do ensaio de CBR: (a) Amostra L1; (b) Amostra L2; (c) Amostra L3

Para analisar a resistência ao desgaste destes materiais foram realizadas análises granulométricas e o ensaio de Abrasão *Los Angeles*, segundo a norma do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem DNER-ME 035 (DNER, 1998).

Segundo o DNER (1998), a perda à Abrasão *Los Angeles* consiste em submeter ao cilindro de uma máquina de mesmo nome (Figura 5.16) uma determinada quantidade de agregado a uma certa seqüência de revoluções. Um grupo de esferas de aço padronizadas é misturado ao material e induz impactos violentos nos grãos por ocasião do movimento de rotação do cilindro. Para o ensaio são utilizados 12 esferas de aço de aproximadamente 47,6mm de diâmetro, cada uma pesando entre 390 e 445g, e tendo o peso total de $\pm 5000g$.

Para realização deste ensaio, como se tinha pouco material, uma variação, de peso total de 200 a 300g, o número de esfera, massa de carga (g), número de rotação e tempo de

rotação foram recalculados de acordo com o peso total da amostra disponível. Assim, foi realizado um ensaio adaptado.



Figura 4.16 Execução do Ensaio de Abrasão *Los Angeles*: (a) Vista frontal do Equipamento; (b) Vista interna.

A Abrasão *Los Angeles* foi calculada pela Equação 4.1:

$$A_n = \frac{m_n \times m'_n \times 100}{m_n} \quad (4.1)$$

onde:

A_n = abrasão *Los Angeles* da graduação n, com aproximação de 1%;

n = graduação (A, B, C, D, E, F ou G) escolhida para o ensaio;

m_n = massa total da amostra seca, colocada na máquina;

m'_n = massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de 1,7).

4.3.9 LIXIVIAÇÃO

Realizado de acordo com a norma técnica NBR 10.005 “Ensaio de Lixiviação” (ABNT, 2004i), com as amostras L1, L2, L3 e com as amostras retiradas da camada de base dos trechos experimentais estudados. Este ensaio visa identificar a concentração de substâncias que se separam do material por meio de lavagem e percolação.

4.3.10 SOLUBILIZAÇÃO

Realizado de acordo com a norma técnica NBR 10.006 “Ensaio de Solubilização” (ABNT, 2004c). Com as amostras L1, L2, L3 e com as amostras retiradas da camada de base

dos trechos experimentais estudados. Este ensaio busca identificar a concentração de substâncias solúveis em água presente no material.

4.4 PISTAS EXPERIMENTAIS ESTUDADAS

Na cidade de Goiânia existem duas pistas experimentais executadas com agregado reciclado em suas camadas. A primeira pista experimental foi executada durante a pesquisa de Silva (2004) e a tese de doutorado de Oliveira (2007), em andamento, que estudou as propriedades e características dos resíduos sólidos de construção civil da cidade de Goiânia e mostrou a viabilidade de sua aplicação em bases e sub-bases de pavimentos.

A segunda pista experimental foi executada no ano de 2004, pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Município de Goiânia (DERMU) e no ano de 2006 foi objeto de estudo de Ribeiro (2006) que avaliou o comportamento estrutural da pista.

Nesta pesquisa, foram realizados ensaios de campo nas duas referidas pistas e os resultados foram comparados com ensaios realizados nas pesquisas descritas anteriormente realizadas.

4.4.1 PISTA DO CEASA

O trecho estudado (Figura 4.17) se localiza na Rua dos Ciprestes, setor de Mansões Bernado Sayão, Goiânia, Goiás, para acesso de caminhões à Central de Abastecimento de Hortifrutigranjeiros S.A. (CEASA).

O trecho executado por Silva (2004) possui uma extensão total de 106,00 metros, composto por uma camada de base e sub-base, sendo 50,00 metros de argila aditivada e 56,00 metros com sub-base e base de agregados reciclados. A largura da pista de rolamento é de 8,00 metros, com 9 metros de plataforma, inclinação transversal de 3% e seção transversal mista (corte no bordo esquerdo de 0,40 metros e aterro no bordo direito de 1,40 metros). O pavimento é composto por uma camada de base e sub-base de 15 cm cada e com mistura de agregado reciclado e argila, como revestimento foi usado o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) com espessura de 5 cm, conforme a Figura 4.18.



Figura 4.17 Vista aérea do trecho do CEASA (OLIVEIRA, 2007)

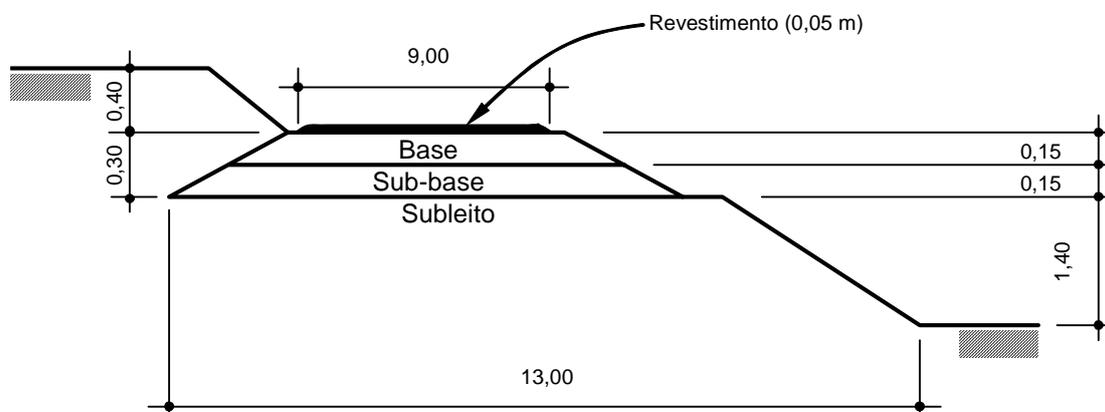


Figura 4.18 Estrutura do trecho experimental do CEASA (OLIVEIRA, 2007)

Para a confecção da base e sub-base, foram utilizados 226,8 m³ de resíduos sólidos da indústria da construção civil, fornecidos pelas empresas de construção de Goiânia. As amostras foram armazenadas e gerenciadas pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Município de Goiânia (DERMU). Para a triagem dos materiais foi realizada uma caracterização visual, onde foram separadas sete categorias com quatro tipos de resíduos (concreto convencional, concreto celular, cerâmica e alvenaria). Após a britagem, obtiveram-se as porcentagens de cada resíduo que compõe a amostra. A estes resíduos foram adicionados

argila para se garantir uma boa trabalhabilidade. As amostras de RCC foram levadas ao Laboratório de FURNAS para a realização dos ensaios e foram britadas em três diferentes granulometrias: brita de 19 mm, brita de 9,5 mm e brita 4,8 mm (Figura.4.19). Os materiais foram estudados de forma separada e misturados em diferentes proporções. Para as misturas estudadas em laboratório, adotou-se os limites da Faixa B definida pelo DNER. As granulometrias foram misturadas em diferentes proporções entre si e também com argila local encontrada na região onde a pista experimental foi executada. A partir desse estudo é que, em função de resultados de ensaio de caracterização, compactação, expansão e CBR, foram definidas as proporções de misturas utilizadas na pista.



Figura 4.19 Granulometrias estudadas para o RCC: (a) brita de 19 mm; (b) brita de 9,5 mm; (c) areia artificial (SILVA, 2004)

A Figura 4.20 mostra a execução do trecho experimental que aconteceu no final de 2003.



Figura 4.20 Execução da pista do CEASA: (a) deposição do material misturado na pista; (b) espalhamento; (c) compactação; (d) execução do revestimento (ASSIS et al., 2005)

Por meio de ensaios realizados em laboratório, definiu-se as misturas ideais entre o entulho e o solo local (argila) para serem utilizadas nas camadas de sub-base e base do trecho experimental: Na sub-base adotou-se 33 % de brita 19mm, 33 % de brita 9,5mm, 17% de areia artificial, 17 % de argila; energia de compactação: Proctor intermediária; $\gamma_{d_{max}} = 18,31 \text{ kN/m}^3$; $w_{ot} = 12,3\%$; CBR = 90%. Para base utilizou-se 25 % de brita 19mm, 25 % de brita 9,5mm, 25% de areia artificial, 25% de argila; energia de compactação: Proctor intermediária; $\gamma_{d_{max}} = 17,7 \text{ kN/m}^3$; $w_{ot} = 14,5\%$; CBR = 83% (Figura 4.21).

A Tabela 4.1 e a Figura 4.21 demonstram as estacas selecionadas para a realização dos ensaios de campo desta pesquisa no trecho do CEASA no mês de novembro de 2006.

Tabela 4.1 Estacas onde foram realizados os ensaios de Prova de Carga, DCP e Viga Benkelman no trecho de acesso ao CEASA

ESTACAS	PROVA DE CARGA	DCP	VIGA
<i>Bordo Direito</i>			
3			X
3+10			X
4	X	X	X
<i>Eixo E3</i>	X	X	X
<i>Bordo Esquerdo</i>			
2+15			X
3+5			X
3+15			X
4+5			X
4+15	X	X	X

As estacas foram marcadas na distância de 10 em 10m num sentido e no outro da pista, de forma intercalada, alternando-se os bordos da pista como mostrado no desenho esquemático da Figura 4.21.

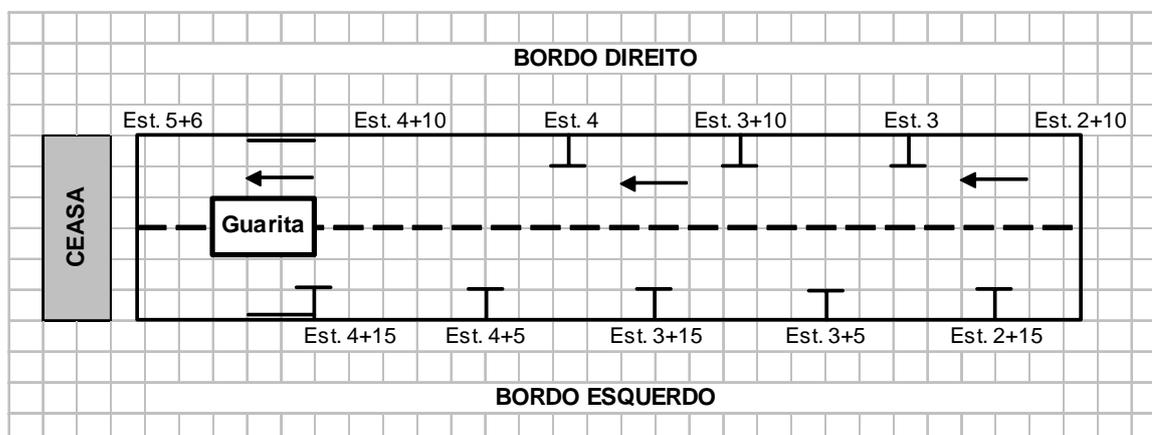


Figura 4.21 Desenho esquemático dos locais de ensaios na pista de acesso ao CEASA (OLIVEIRA, 2007)

4.4.2 PISTA DO RECANTO DAS MINAS GERAIS

O segundo trecho estudado (Figura 4.22) se localiza na Rua SR-68, setor Recanto das Minas Gerais, em frente à quadra 93 (RIBEIRO, 2006).



Figura 4.22 Vista aérea da Rua SR-68 no setor Recanto das Minas Gerais (RIBEIRO, 2006)

De acordo com Ribeiro (2006), a segunda pista experimental (Figura 4.23) é composta por uma camada de base que tem 8m de largura e 140m de extensão e foi executada com resíduo da construção civil britado e classificado em granulometrias diferentes, sendo dosados nas seguintes dimensões: menor que 19mm (brita nº 2), menor que 9,5mm (brita nº 1), menor que 4,8mm (brita nº 0) e solo local, na proporção de 25% em volume de cada material. O detalhe é que não ocorreu acompanhamento tecnológico rigoroso durante a execução da pista.

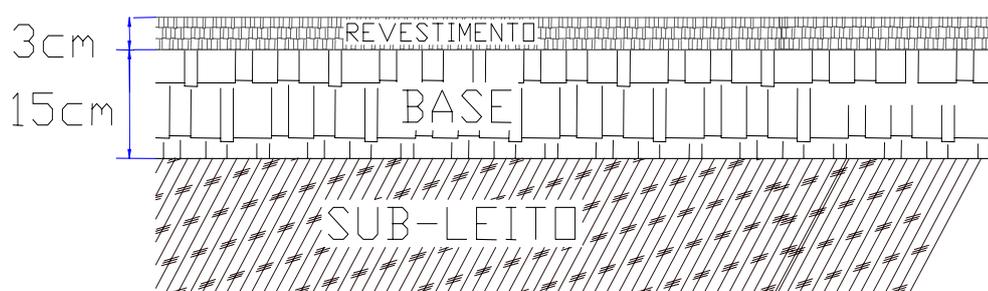


Figura 4.23 Seção do pavimento da pista do Setor Recanto das Minas Gerais (RIBEIRO, 2006)

O trecho em questão foi concluído no final de outubro de 2004. Foi dimensionado para apresentar-se com espessura de 3 cm de revestimento e 15 cm de base (Figura 4.23).

Foram marcadas estacas a cada 20m ao longo da pista (Figura 4.24) partindo de uma referência zero. O ensaio de Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP) foi realizado em nove pontos, indicados com X, sendo um no centro da via e os outros dois a 0,5m dos bordos da via de cada estaca (Figura 4.25). O ensaio de Prova de Carga foi realizado em três pontos, indicados com círculo na Figura 4.25. Já o ensaio com a viga Benkelman foi realizado em todas as estacas demarcadas.

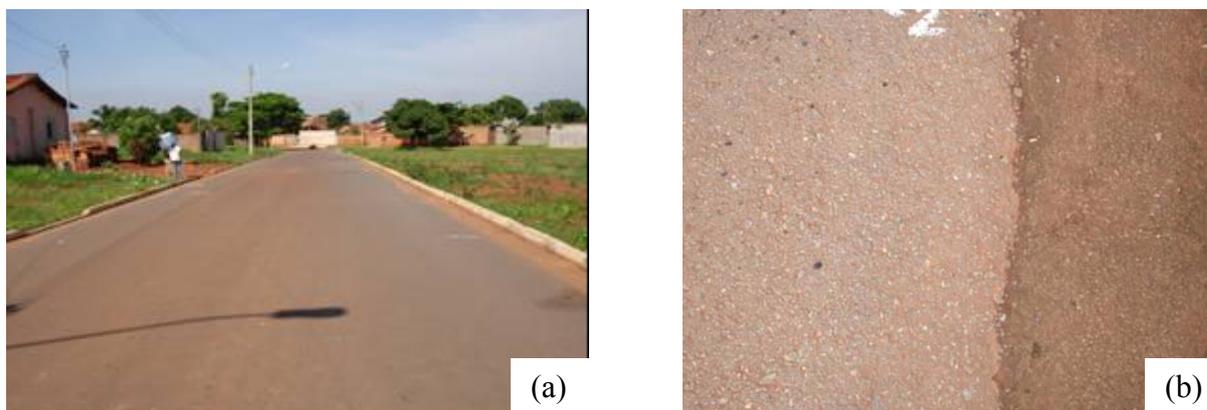


Figura 4.24 Pista executada com resíduo da construção civil: (a) Vista geral; (b) Detalhe da pista (novembro/2006)

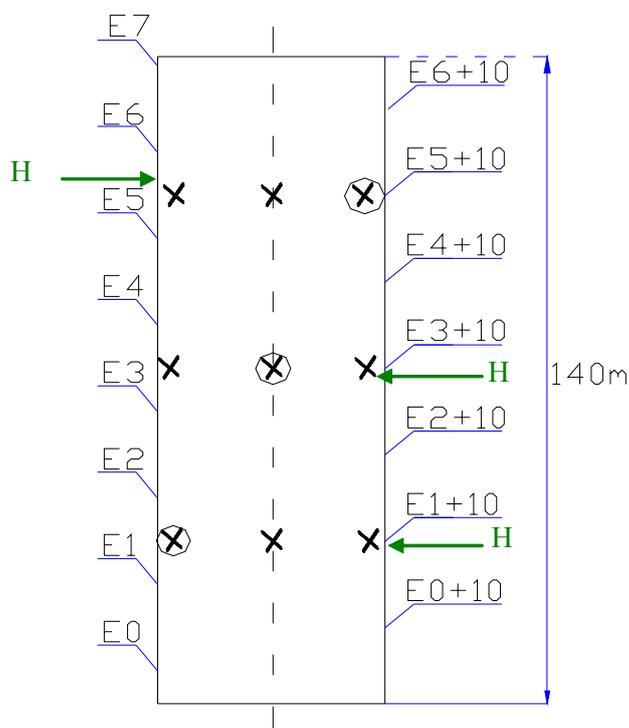


Figura 4.25 Desenho esquemático dos locais de ensaios na pista do Setor Recanto das Minas Gerais (RIBEIRO, 2006)

4.5 ENSAIOS DE CAMPO

Com o objetivo de avaliar o desempenho das duas pistas experimentais ao longo do tempo, foi realizada uma etapa de ensaios de campo no mês de novembro de 2006. Os resultados obtidos foram analisados e comparados com dados obtidos anteriormente em pesquisas realizadas nos mesmos trechos.

Para a realização dos ensaios de viga Benkelman e prova de carga sobre placa foi preparado um caminhão fornecido pelo DERMU, de eixo traseiro simples, rodas duplas, pressão de instalação nos pneus de 560 kPa e carregado com 8,2 t no eixo traseiro. A Figura 4.26 demonstra a preparação do caminhão realizado no Aterro Sanitário de Goiânia para a realização dos ensaios de campo.



Figura 4.26 Preparação do caminhão para os ensaios: (a) Carregamento do solo; (b) Verificação do peso na roda traseira; (c) Aferição dos pneus

Os equipamentos (Viga Benkelman, Prova de Carga e DCP) foram cedidos pelo Laboratório de Mecânica dos Solos da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (EEC-UFG) para realização dos ensaios.

4.5.1 VIGA BENKELMAN

O ensaio de viga Benkelman foi realizado conforme a norma ME 024 (DNER, 1994), sendo executado sobre a camada de revestimento das duas pistas experimentais, nos bordos direito, esquerdo e eixos, em todas as estacas demarcadas (10 em 10 m na pista da CEASA e de 20 em 20m na pista do Recanto). A viga utilizada apresentava uma relação a/b de 2/1, sendo $a = 2,44$ m e $b = 1,22$ m (Figura 4.27).

A viga e o caminhão foram posicionados na marcação da estaca, o extensômetro foi acionado e após três minutos da ligação do vibrador, fez-se a leitura inicial logo após o funcionamento do caminhão. Em seguida o caminhão foi deslocado de 25 em 25cm, sendo realizadas 9 leituras de deslocamento em cada distância até a extensão de 2m.



Figura 4.27 Ensaio de viga Benkelman: (a) Detalhe da viga; (b) Detalhe do extensômetro

4.5.2 CARGA SOBRE PLACA

O ensaio de prova de carga foi realizado de acordo com a norma ME 055 (DNIT, 2004) e consiste em simular as condições de carregamento do pavimento. É caracterizado por identificar pequenos recalques, representados pela curva de tensão x deslocamento.

Os ensaios foram realizados utilizando placa circular de 30 cm de diâmetro, um macaco hidráulico capacidade máxima de 500 kN, quatro extensômetro e demais acessórios. A carga máxima adotada para os ensaios foi de 4 t, sendo aplicada em incrementos de 200 kg, por meio do caminhão. Com quatro extensômetro (fixados numa haste através de quatro bases magnéticas), foram realizadas leituras de deslocamento imediatamente e 5 minutos após a aplicação de cada incremento de carga (Figura 4.28).

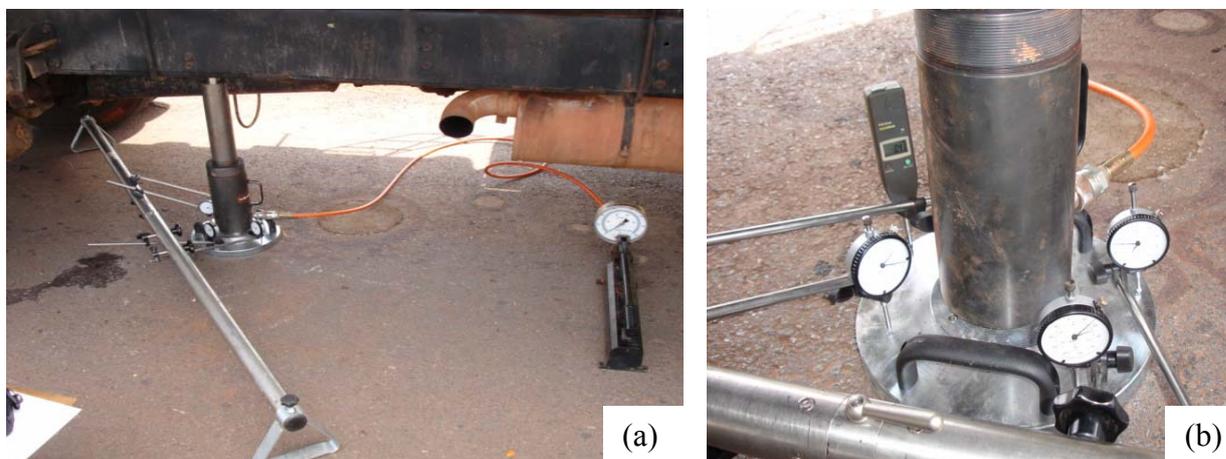


Figura 4.28 Ensaio de prova de carga: (a) Detalhe do equipamento; (b) Detalhe da placa e dos extensômetros

4.5.3 PENETRÔMETRO DINÂMICO DE CONE (DCP)

Durante o ensaio (Figura 4.29), mede-se em uma régua, o comprimento em milímetro, que a lança penetra no solo para um determinado número de golpes selecionados arbitrariamente de acordo com a resistência das camadas a serem atravessadas. Os resultados foram anotados em uma planilha onde se indica para cada série de golpes aplicados, a profundidade alcançada pelo cone de penetração.



Figura 4.29 Realização do ensaio de DCP no trecho do CEASA

4.6 ANÁLISES NUMÉRICAS

O SIGMA/W (GEOSLOPE, 1995) é um software que pode ser usado para analisar bi-dimensional a tensão e a deformação de estruturas de terra. Sua formulação detalhada torna possível analisar problemas simples ou altamente complexos, como por exemplo, uma análise linear simples da deformação elástica ou uma análise não-linear da deformação no estado elástico-plástico. Os diferentes materiais constituintes do solo permitem que sejam representadas várias camadas do solo ou de materiais estruturais. Estas características permitem analisar quase todos os projetos de engenharia civil e de mineração.

Por se tratar de uma retroanálise, os módulos de elasticidade das camadas constituintes do pavimento foram determinados de modo interativo, ou seja, estimou-se

valores para o módulo de elasticidade da camada analisada e, através do programa computacional, calculou-se a deflexão real para o módulo estimado. Feito isto, comparou-se os deslocamentos calculados com as medidas em campo e, para o deslocamento calculado que mais se aproximou da medida adotou-se o módulo de elasticidade correspondente como sendo o módulo da camada analisada. Neste caso, considerou-se análise elástico-linear e a situação axissimétrica.

Com base nos dados de ensaios realizados no trecho experimental com o Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP), no trecho do CEASA verificou-se a existência da camada de base, sub-base e subleito. Já para o trecho do Recanto identificou-se que o subleito tem duas camadas de resistência diferentes. Essa constatação foi considerada nas retroanálises. Assim, foram consideradas a camada denominada Subleito 1 para a mais superficial e mais resistente e a camada Subleito 2 para a mais profunda e menos resistente. Nas análises, optou-se ainda por fixar o valor do módulo do revestimento em 2.000 MPa, para os dois trechos estudados.

Na análise do ensaio de prova de carga, a placa de aço também foi discretizada, considerando-se seu módulo de elasticidade igual a 2.000.000 MPa e o coeficiente de Poisson igual a 0,27. Sobre ela foi aplicada a tensão de 560 kPa uniformemente distribuída (Figura 4.30a). Na análise do ensaio de viga Benkelman, a tensão de 560 kPa foi aplicada diretamente sobre o revestimento na zona de contato pneu – pavimento (Figura 4.30b). Os coeficientes de Poisson considerados para o subleito (solo fino) foi de 0,40, para a base de agregado reciclado 0,35 e para o revestimento em CBUQ 0,33.

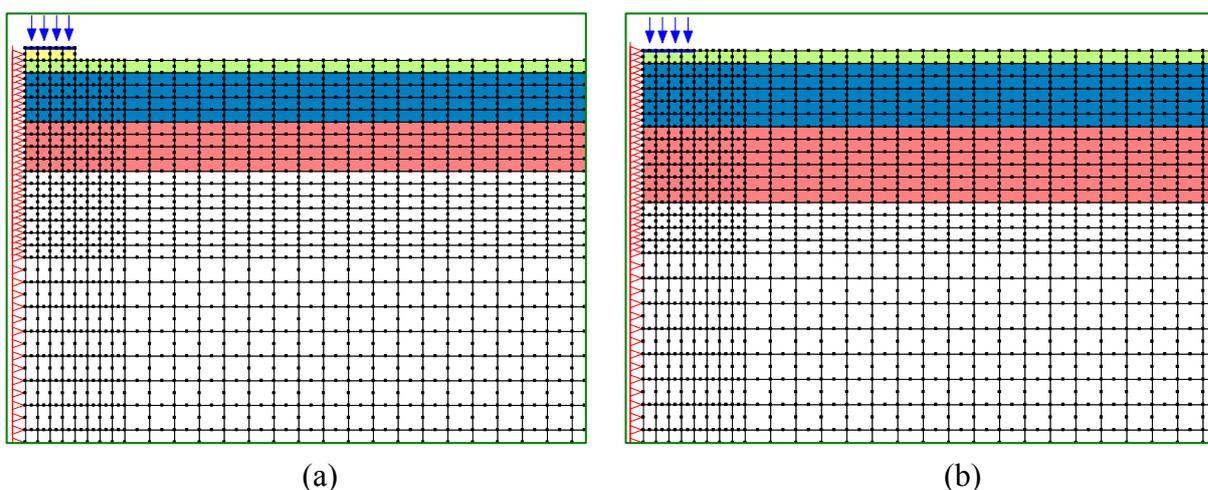


Figura 4.30 Modelo das Malhas de elementos finitos utilizadas: (a) Prova de carga; (b) Viga Benkelman

Capítulo 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo estão apresentados os resultados e as análises dos dados e imagens obtidos a partir da verificação da disposição inadequada de resíduos sólidos da construção civil (RCC), de ensaios de laboratório, ensaios de campo nas duas pistas experimentais existentes no município de Goiânia-GO e análises numéricas, visando avaliar o comportamento estrutural das duas pistas e a viabilidade ambiental e técnica da utilização do agregado reciclado na estrutura de pavimentos flexíveis.

5.2 DEPOSIÇÃO INADEQUADA DE RCC

Foram realizadas vistorias em alguns bairros na cidade de Goiânia e verificou-se que a disposição inadequada de resíduos sólidos da construção civil é uma realidade nesta cidade. Os RCC estão realmente depositados nas margens de córregos e lotes vagos em grandes quantidades.

As Figuras 5.1 a 5.9 comprovam o não cumprimento da Instrução Normativa nº 18 promulgada em 26 de dezembro de 2005 (PREFEITURA DE GOIÂNIA, 2005) e da Resolução nº 307 (CONAMA, 2002). Além disso, constata-se a falta de gerenciamento do poder público em buscar alternativas para a minimização dos impactos ambientais com a disposição inadequada dos resíduos sólidos da construção civil. Os registros fotográficos foram realizados no período de 2006 a 2007, sendo possível verificar que em um ano não foram observadas mudanças nos fatos constatados.

Essa realidade demonstra a necessidade da realização de pesquisas que estudem alternativas para que os impactos ambientais provocados sejam minimizados, buscando sempre encontrar a sustentabilidade, através do desenvolvimento e implantação de tecnologias adequadas, que visem a redução, reutilização e reciclagem desses resíduos.

A Figura 5.1 apresenta parte do mapa com a localização da cidade de Goiânia, de cidades vizinhas e dos oito pontos onde foram realizadas as vistorias. A figura foi retirada do programa Google (2007).

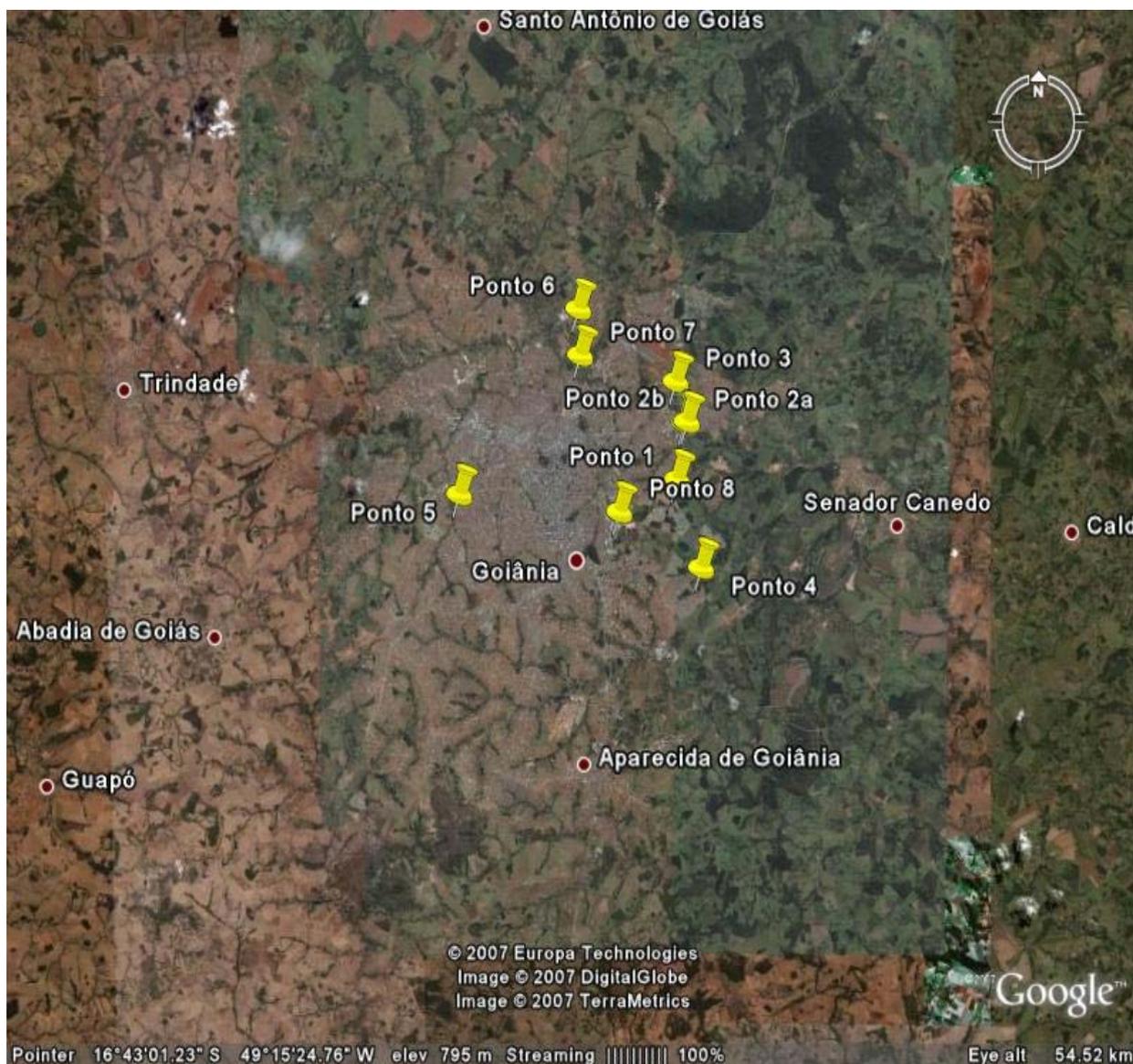


Figura 5.1 Vista geral do município de Goiânia com localização dos pontos vistoriados – Coordenadas 16°46'26,34" S e 49°15'34,14" O (GOOGLE, 2007)

Na Figura 5.2 tem-se o registro fotográfico realizado no Ponto 1. Este se localiza em uma das vias de acesso ao Condomínio Alphavile, que é classificado como um condomínio horizontal para a população de alto poder aquisitivo. Neste local, é possível constatar a deposição irregular de grande quantidade de RCC composto por terra, cerâmica, madeira, papel (saco de cimento) e plástico. Provavelmente, estes resíduos são oriundos de construções realizadas no próprio condomínio.



Figura 5.2 Ponto 1: Resíduos da Construção Civil depositados nas proximidades do Condomínio Alphavile (05/12/2006)

Na Figura 5.3 tem-se o registro fotográfico realizado no Ponto 2. Este se localiza no Residencial Vale do Araguaia, região leste de Goiânia. Neste local foram identificados dois pontos de depósito irregular: o primeiro nas proximidades do córrego Água Branca (Ponto 2a) e o segundo nas margens do mesmo córrego (Ponto 2b). Neste local, os resíduos são compostos de solo, concreto, cerâmica, plástico e madeira. No Ponto 2b é possível

verificar ainda o assoreamento do córrego Água Branca. Após cerca de um ano da realização desta vistoria, os resíduos continuam sendo depositados no mesmo local, sendo que no Ponto 2a a quantidade de RCC tem aumentado consideravelmente.

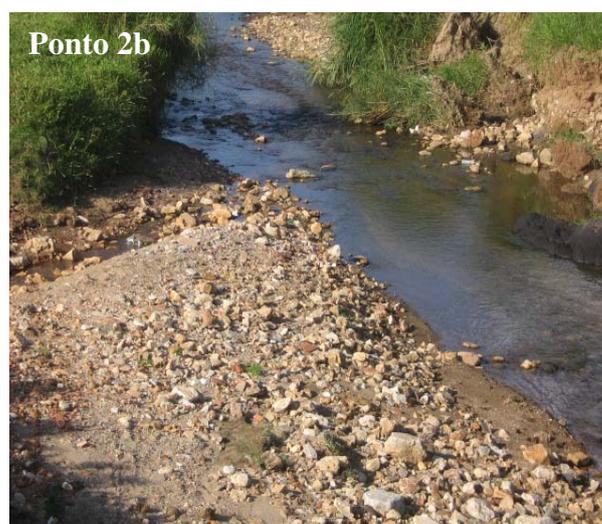


Figura 5.3 Ponto 2: Resíduos da Construção Civil depositados nas proximidades (Ponto 2a) e nas margens (Ponto 2b) do Córrego Água Branca (02/05/2006)

Na Figura 5.4 tem-se o registro fotográfico realizado no Ponto 3. Este se localiza no Setor Jardim Novo Mundo, próximo do Rio Meia Ponte. Com as fotografias apresentadas constata-se a existência de grande quantidade de RCC composto de concreto, cerâmica, solo, gesso, plástico e madeira.



Figura 5.4 Ponto 3: Resíduos da Construção Civil depositados nas proximidades do Rio Meia Ponte (06/05/2006)

Na Figura 5.5 tem-se o registro fotográfico realizado no Ponto 4. Este se localiza na divisa do Setor Parque Atheneu e Setor Marilisa, nas proximidades e nas margens do córrego São José. Mais uma vez, percebe-se que a disposição do RCC vem ocorrendo irregularmente nas proximidades e margens de córregos e rios da cidade de Goiânia. A composição do RCC encontrado neste ponto é semelhante à composição dos demais.

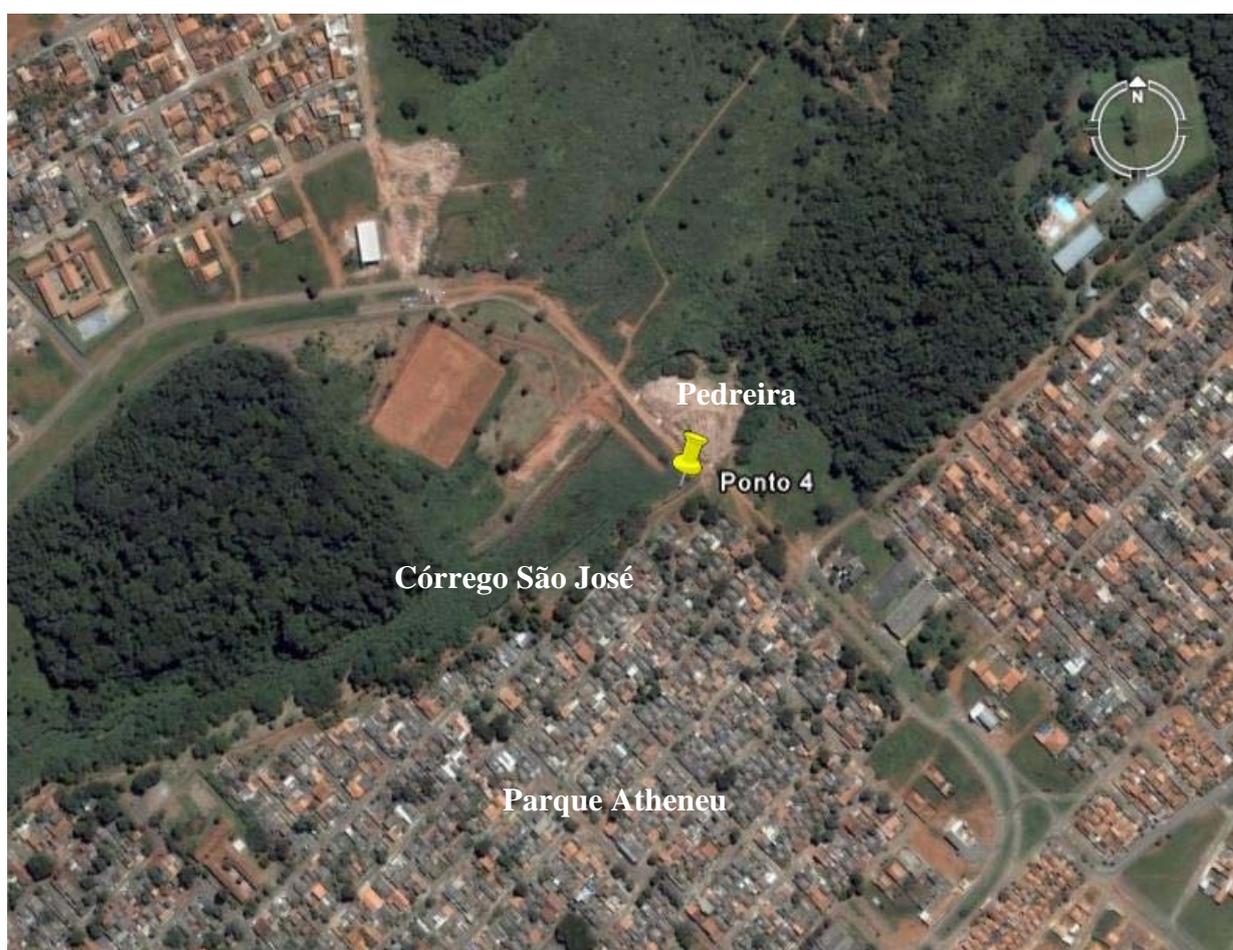


Figura 5.5 Ponto 4: Resíduos da Construção Civil depositados nas proximidades do Córrego São José (23/04/2006)

Na Figura 5.6 tem-se o registro fotográfico realizado no Ponto 5. Este se localiza no Setor Celina Parque, nas margens e no leito do córrego Macambira, demonstrando o descaso do poder público em defender os direitos da população.



Figura 5.6 Ponto 5: Resíduos da Construção Civil depositados na margem e no leito do Córrego Macambira (02/04/2007)

Na Figura 5.7 tem-se o registro fotográfico realizado no Ponto 6. Este se localiza no Setor Goiânia 2, nas margens da Avenida Perimetral Norte e ao lado da Estação de Tratamento de Esgoto da cidade. Esta é uma região de fundo de vale e nem o fato desta área estar situada ao lado de uma via de tráfego intenso da cidade tem intimido a prática da deposição irregular de RCC.



Figura 5.7 Ponto 6: Resíduos da Construção Civil depositados nas proximidades da Avenida Perimetral (02/04/2007)

Na Figura 5.8 tem-se o registro fotográfico realizado no Ponto 7. Este se localiza no Setor Criméia Leste e mostra outra prática comum dos geradores e transportadores de RCC: depositar os resíduos irregularmente em lotes vagos situados em bairros periféricos da cidade.



Figura 5.8 Ponto 7: Resíduos da Construção Civil depositados em lotes vagos no Bairro Criméia Leste (02/04/2007)

Na Figura 5.9 tem-se o registro fotográfico realizado no Ponto 8. Este se localiza no Setor Alto da Glória, num lote vago situado ao lado da BR-153. De todos os pontos vistoriados, este é o local que apresenta a maior quantidade de RCC. Além dos componentes encontrados, verifica-se a existência de pedaços de revestimento asfáltico provavelmente oriundos de obras de restauração da BR-153. Assim, tem-se que tanto o setor privado como o setor público não tem respeitado a legislação vigente relacionada aos resíduos sólidos da construção civil.



Figura 5.9 Ponto 8: Resíduos da Construção Civil depositados nas proximidades da BR-153 (05/12/2006)

Com base na vistoria realizada em alguns pontos da cidade, verifica-se que lotes vagos em regiões periféricas e margens de córregos e rios estão se transformando em áreas de descarte de RCC. Mesmo com os avanços realizados na legislação, nas discussões entre os envolvidos e nas pesquisas publicadas, na prática nenhuma medida eficaz foi implantada.

5.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

5.3.1 PREPARAÇÃO E SELEÇÃO DAS AMOSTRAS

5.3.1.1 Análise Granulométrica

A Figura 5.10 apresenta os resultados da análise granulométrica dos agregados reciclados sólidos da construção civil (brita 38 mm; brita 19 mm e brita 4,8 mm) sem lavagem para a realização das dosagens.

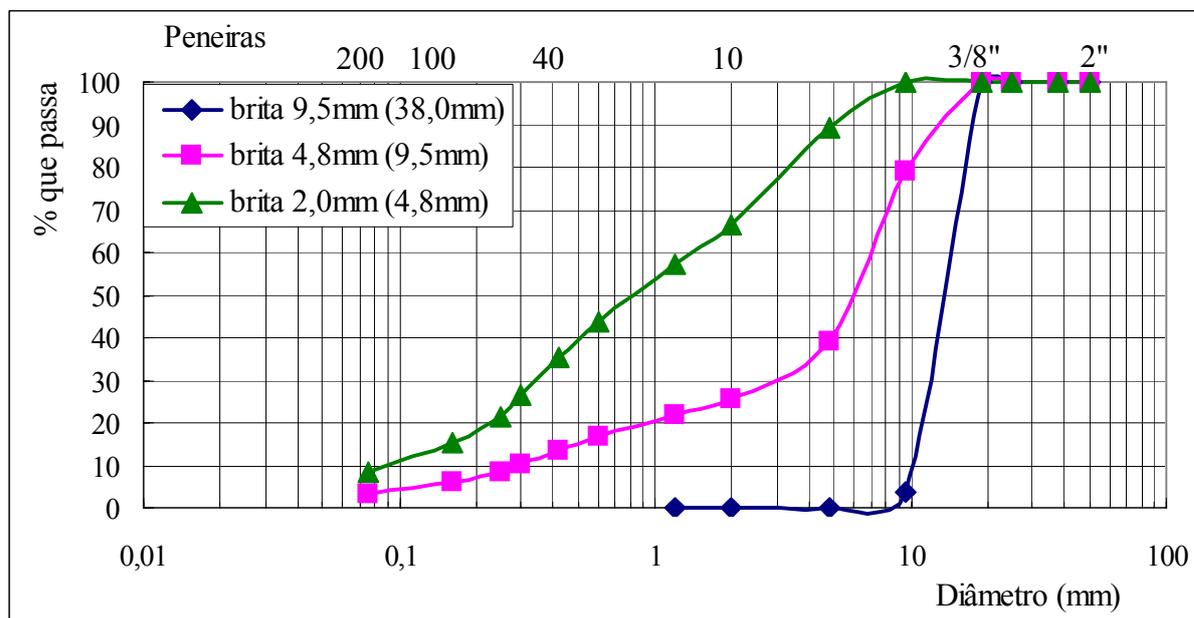


Figura 5.10 Curvas granulométricas dos agregados reciclados estudados

Percebe-se, através das curvas granulométricas apresentadas na Figura 5.10, que o material cedido por FURNAS para este estudo não coincide com a granulometria relatada no estudo de Silva (2004), onde foram definidas as seguintes denominações e registros: material com diâmetro máximo de 38mm, material com diâmetro máximo igual a 19mm e material com diâmetro máximo igual a 4,8mm. Neste caso, tem-se materiais com o diâmetro máximo

de 9,5mm; 4,8mm e 2,0mm, ou seja, inferior ao considerado inicialmente. Assim, para as análises realizadas nesta pesquisa adotou-se a seguinte terminologia: brita 9,5mm (38,0mm), brita 4,8mm (9,5mm) e brita 2,0 (4,8 mm).

A NBR 15.115 (ABNT, 2004g) especifica que o Coeficiente de Uniformidade (C_u), que é a relação entre os diâmetros que correspondem a 60% e 10% passantes na curva granulométrica, deve ser maior que 10. A Figura 5.10 mostra que a brita 9,5mm (38,0mm) apresentou granulometria descontínua, ou seja, mal graduada, tendo o C_u igual a 1,5, e, portanto, não atende a especificação. Já as britas 4,8mm (9,5mm) e 2,0mm (4,8mm) apresentaram granulometria contínua, ou seja, bem graduada e um C_u de 23 e 17, respectivamente, atendendo a especificação brasileira.

A Figura 5.11 apresenta o resultado do ensaio de granulometria realizado com o solo do CEASA por peneiramento e sedimentação, com e sem o defloculante hexametáfosfato de sódio. Observa-se que não há coincidência das curvas granulométricas obtidas (Figura 5.11), sendo que a curva sem defloculante fica localizada abaixo da curva com defloculante. Este fato indica que ao usar o defloculante hexametáfosfato de sódio em amostras compostas de solos tropicais, ocorre mudança na estrutura do material devido à quebra de agregações e isto gera materiais com textura mais fina.

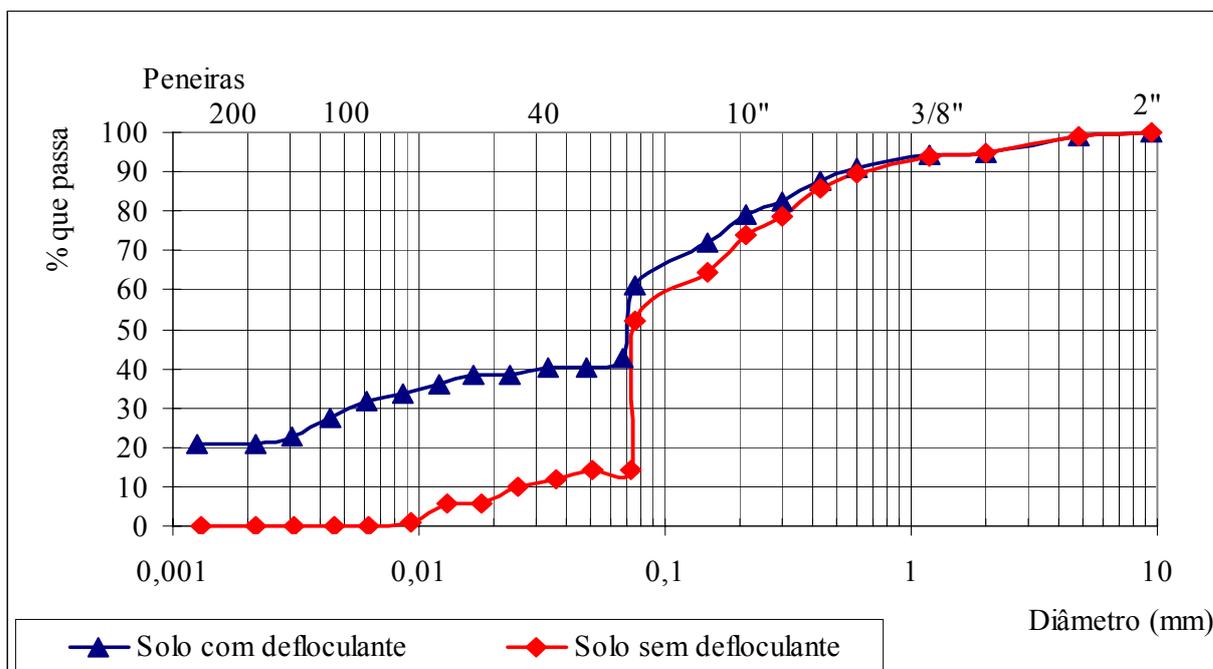


Figura 5.11 Curva granulométrica do solo com e sem defloculante

Com as dimensões das partículas e as porcentagens obtidas nas curvas granulométricas pode-se determinar a quantidade de pedregulho (maior que 5mm), areia (entre 5 e 0,05mm), silte (entre 0,05 e 0,005mm) e argila (menores que 0,005mm) presente nos materiais. A Tabela 5.1 mostra os resultados obtidos para as amostras estudadas.

Tabela 5.1 Percentuais de frações granulométricas dos materiais estudados

Material (%)	Solo CEASA com defloculante	Solo CEASA sem defloculante	Brita 9,5 mm (38,0mm)	Brita 4,8 mm (9,5mm)	Brita 2,0 mm (4,8mm)
Pedregulho	0,0	0,0	99,8	60,0	10,6
Areia	60,0	85,8	0,2	40,0	84,4
Silte	10,3	14,2	--	--	5,0
Argila	29,7	--			

A partir desses resultados (Figura 5.10) e com a curva granulométrica do solo selecionado (Figura 5.11), foram realizadas as misturas L1, L2 e L3 (Tabela 5.2), visando enquadrar as amostras de acordo com uma das faixas especificadas pelo DNER (1997). Assim, tem-se os percentuais de cada fração do agregado reciclado e solo do CEASA utilizados nas dosagens para a realização dos ensaios de limites de consistência; massa específica dos grãos; compactação, expansão e CBR; solubilização, lixiviação e moldagem e cura dos corpos-de-prova. Ressalta-se, ainda, que pelo fato da norma recomendar os ensaios com defloculante, para os cálculos das dosagens, foi considerada a granulometria obtida com o uso do defloculante.

Tabela 5.2 Composição das dosagens de agregado reciclado e solo do CEASA

Amostras	Brita 9,5 mm (38,0mm)	Brita 4,8 mm (9,5mm)	Brita 2,0 mm (4,8mm)	Solo do CEASA
L1	15 %	85 %	0 %	0 %
L2	2 %	40 %	33 %	25 %
L3	2 %	15 %	58 %	25%

As Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 mostram o enquadramento das misturas de agregado reciclado e solo, de acordo com as faixas B, D e F especificadas pelo DNER (1997). Percebe-se na Figura 5.12, que não foi possível enquadrar a amostra L1 totalmente nos limites da faixa

B do DNER (1997), pois a mistura apresenta excesso de fino, mesmo zerando a porcentagem de brita 2,0mm(4,8mm) e do solo (Tabela 5.2).

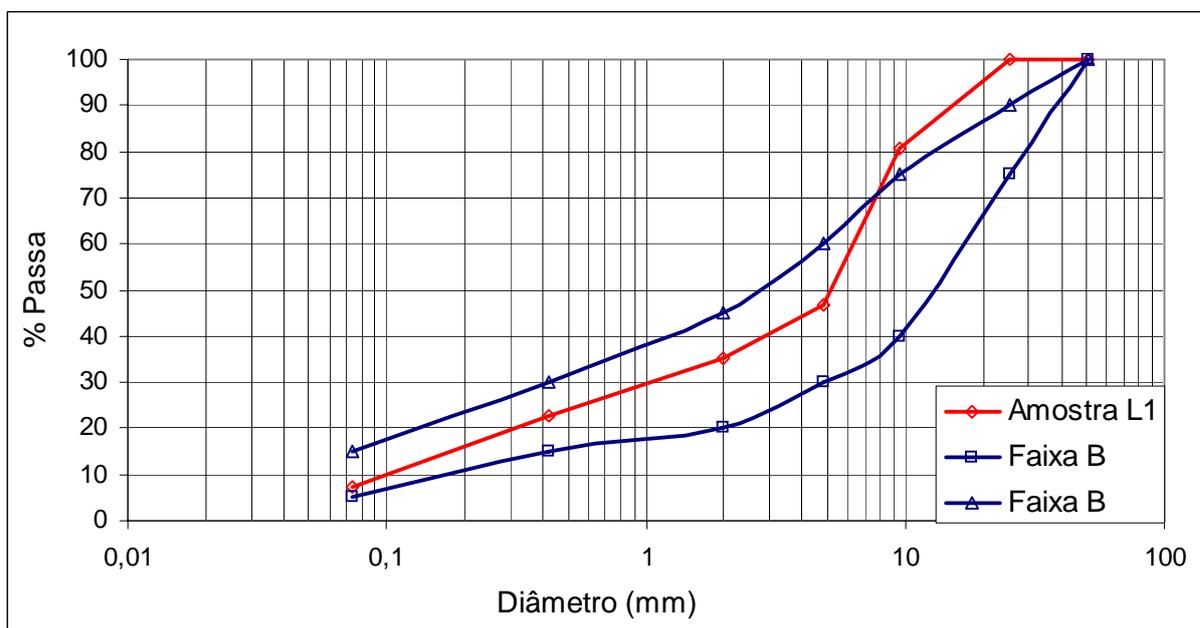


Figura 5.12 Obtenção da amostra L1 enquadrada na faixa B do DNER (1997)

O melhor enquadramento obtido das misturas foi na faixa D do DNER, como pode ser observado na Figura 5.13. Portanto, a amostra L2 apresentou a melhor mistura (Tabela 5.2).

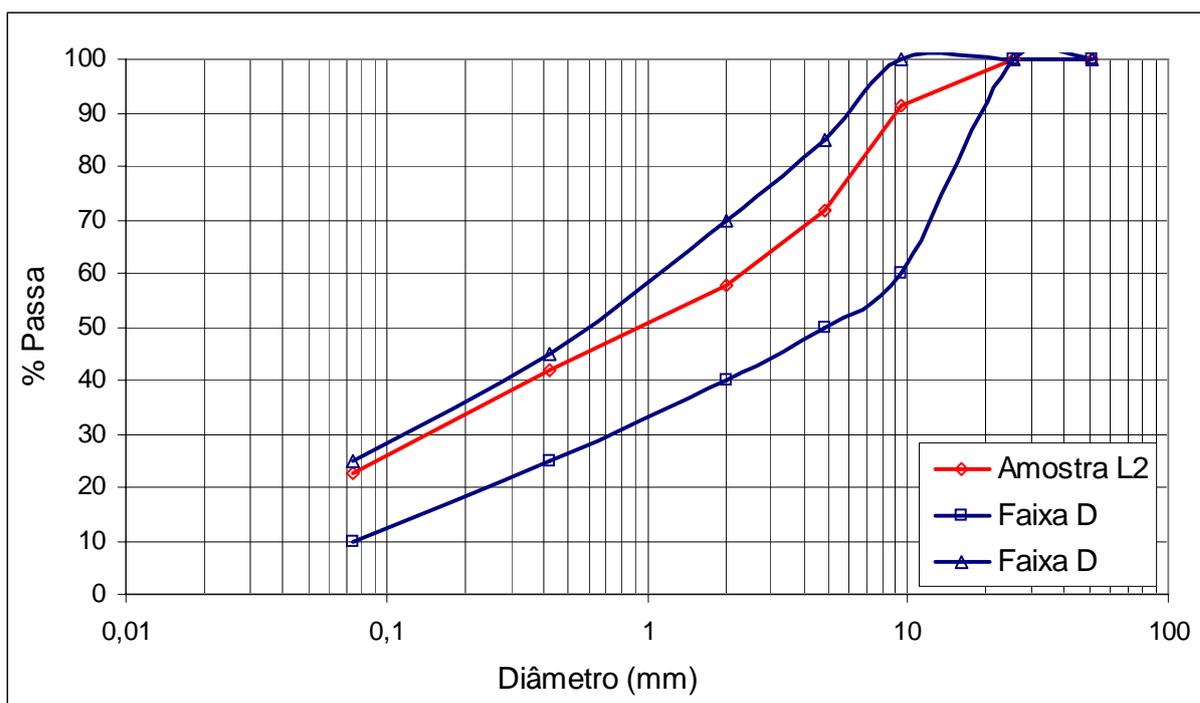


Figura 5.13 Obtenção da amostra L2 enquadrada na faixa D do DNER (1997)

A Figura 5.14 demonstra que não foi possível enquadrar totalmente a amostra L3 nos limites da faixa F do DNER, pois tem-se excesso de material grosso, mesmo tendo apenas 2% da brita 9,5mm (38,0mm) como pode ser observado na Tabela 5.2.

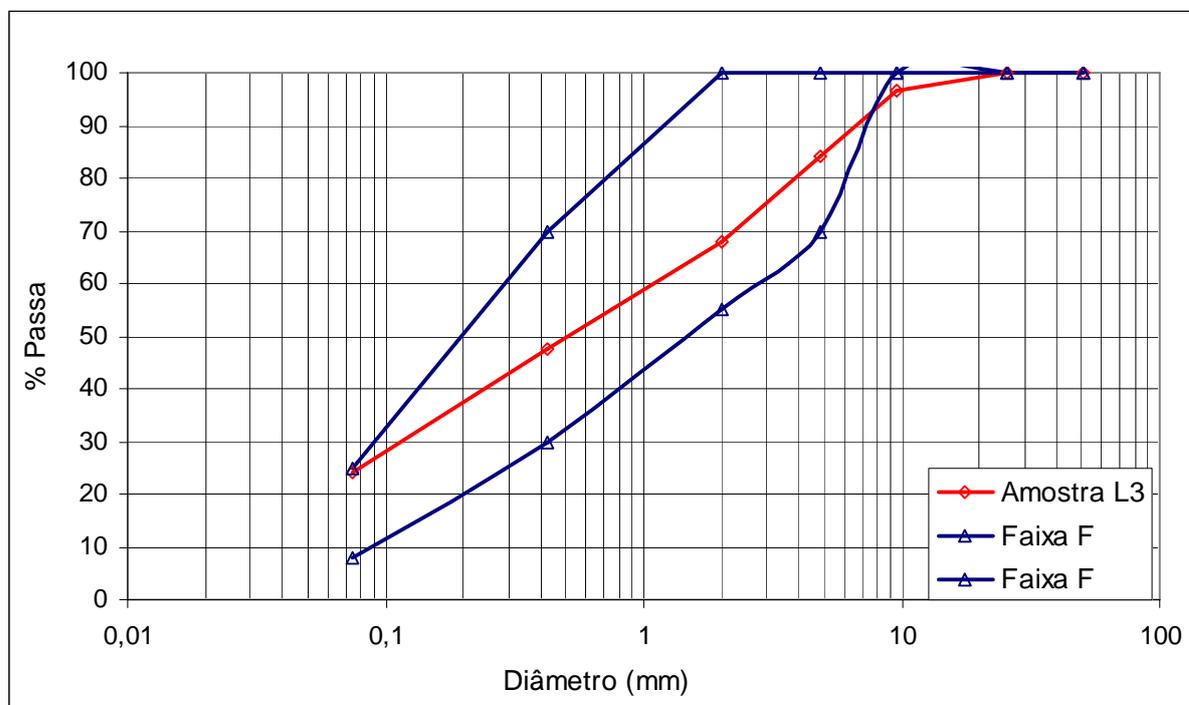


Figura 5.14 Obtenção da amostra L3 enquadrada na faixa F do DNER (1997)

Na Tabela 5.3 tem-se os percentuais obtidos para as frações granulométricas de cada amostra estudada.

Tabela 5.3 Percentuais de frações granulométricas das misturas estudadas

Material (%)	L1	L2	L3
Pedregulho	50,0	28,0	15,0
Areia	42,7	49,0	60,0
Silte + Argila	7,3	23,0	45,0

A Tabela 5.4 faz uma comparação entre os valores obtidos nos ensaios de caracterização das amostras estudadas e a especificação brasileira NBR 15.115 (ABNT, 2004g).

Em relação à composição granulométrica, as amostras apresentaram-se como um material bem graduado, onde o coeficiente de uniformidade (C_U) atendeu a legislação vigente.

De acordo com Silveira (2005), um solo granular é considerado bem graduado quando as partículas menores ocupam vazios correspondentes às maiores, criando um entrosamento que acaba resultando em maior resistência e menor compressibilidade, conferindo melhor comportamento sob o ponto de vista da engenharia.

Tabela 5.4 Valores obtidos nos ensaios de caracterização das amostras estudadas

Propriedades		Agregado reciclado classe A			
		L1	L2	L3	Limites*
Composição granulométrica		Não uniforme e bem graduado com coeficiente de uniformidade:			
		$C_u = 67$	$C_u = 115$	$C_u = 45$	$C_u > 10$
Dimensão máxima característica		25mm	25mm	25mm	$\leq 63\text{mm}$
Teor de material passante na peneira de 0,42mm		23%	42%	47%	Entre 10% e 40%
Contaminantes- teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Materiais não minerais de mesmas característica	0	0	0	2
	Materiais não minerais de características distintas	0	0	0	3
	Sulfatos	100mg/l	170mg/l	170mg/l	250mg/l**

* NBR 15.115 (ABNT, 2004g)

** NBR 10.006 (ABNT, 2004c)

Outro aspecto verificado na Tabela 5.4 foi que o teor de material passante na peneira de 0,42mm não atendeu a NBR 15.115 (ABNT, 2004g): as misturas L2 (42%) e L3 (47%) apresentaram quantidades maiores de material fino. No entanto, os demais ensaios foram realizados com estas amostras visando verificar se este excesso de finos pode gerar algum tipo de prejuízo no comportamento de misturas de agregado reciclado e solos finos.

No item de contaminantes, a especificação determina que a quantidade de materiais indesejáveis de grupos distintos e de mesmo grupo deve ser de até 3% e 2%, em massa, respectivamente. Como o material já tinha sido selecionado para a pesquisa de Silva (2004) não encontrou-se nenhuma fração de materiais indesejáveis no agregado reciclado estudado, atendendo a legislação brasileira, ressalta-se que na prática isso não é comum.

É importante salientar que no ensaio de solubilização (item 5.3.7) o limite máximo do parâmetro sulfato de acordo com a norma NBR 10.006 (ABNT, 2004c) é de 250mg/L, comparando com a norma NBR 15.115 (ABNT, 2004g), a qual não especifica a forma de obter o limite máximo deste parâmetro, citando apenas, que é igual a 2%, optou-se

por adotar o limite especificado no ensaio de solubilização (250mg/L), como pode ser observado na Tabela 5.4.

5.3.2 LIMITES DE CONSISTÊNCIA

A Figura 5.15 mostra a relação entre o número de golpes e o teor de umidade. Com a linha de tendência traçada, tornou-se possível obter o teor de umidade correspondente a 25 golpes. Os valores do limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade estão apresentados na Tabela 5.5.

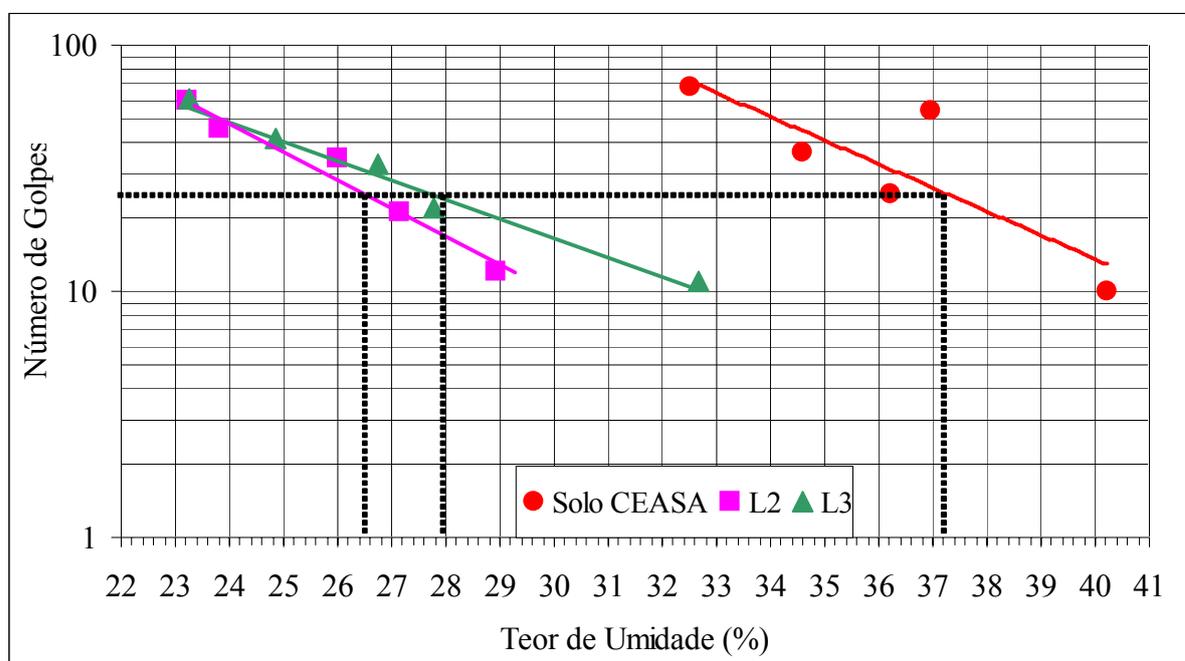


Figura 5.15 Resultado do ensaio de limite de liquidez do solo e das amostras L2 e L3

Verifica-se que a amostra L1, a qual possui maior quantidade de pedregulho, é um material não plástico. Percebe-se que as amostras que possuem maior quantidade de solo em sua mistura (L2 e L3), apresentaram valores maiores de limite de plasticidade.

Observa-se nos resultados de índice de plasticidade e limite de liquidez que a incorporação de RCC ao solo gera redução no valor do w_L . De acordo com a especificação 303 (DNER, 1997), que limita valores máximos de 25% para o w_L e 6% para IP, as amostras estudadas apresentaram valores acima do especificado. A explicação possível para estes resultados é que o ensaio é realizado com material passado na peneira nº 40, que corresponde em grande parte, nas amostras estudadas, à parcela do solo.

Tabela 5.5 Valores obtidos nos ensaios de limite de plasticidade e liquidez das amostras

Amostra	w_P (%)	w_L (%)	IP (%)
Solo do CEASA	27	37	10
L1	NP	--	NP
L2	19	27	8
L3	21	28	7

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

5.3.3 MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

Foram obtidos resultados da massa específica dos grãos do solo e das misturas. Conforme a Tabela 5.6, nas mistura de agregado reciclado e solo (L1, L2 e L3) verificou-se a redução desse valor devido, possivelmente, aos materiais presentes no RCC.

Tabela 5.6 Valores obtidos no ensaio de massa específica dos grãos

Amostra	ρ (g/cm³)
Solo do CEASA	2,87
L1	2,76
L2	2,71
L3	2,77

Obs: ρ = massa específica dos grãos

5.3.4 CLASSIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

Com os resultados da composição granulométrica e dos limites de consistência, as amostras foram classificadas de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e a *Transportation Research Board* (TRB).

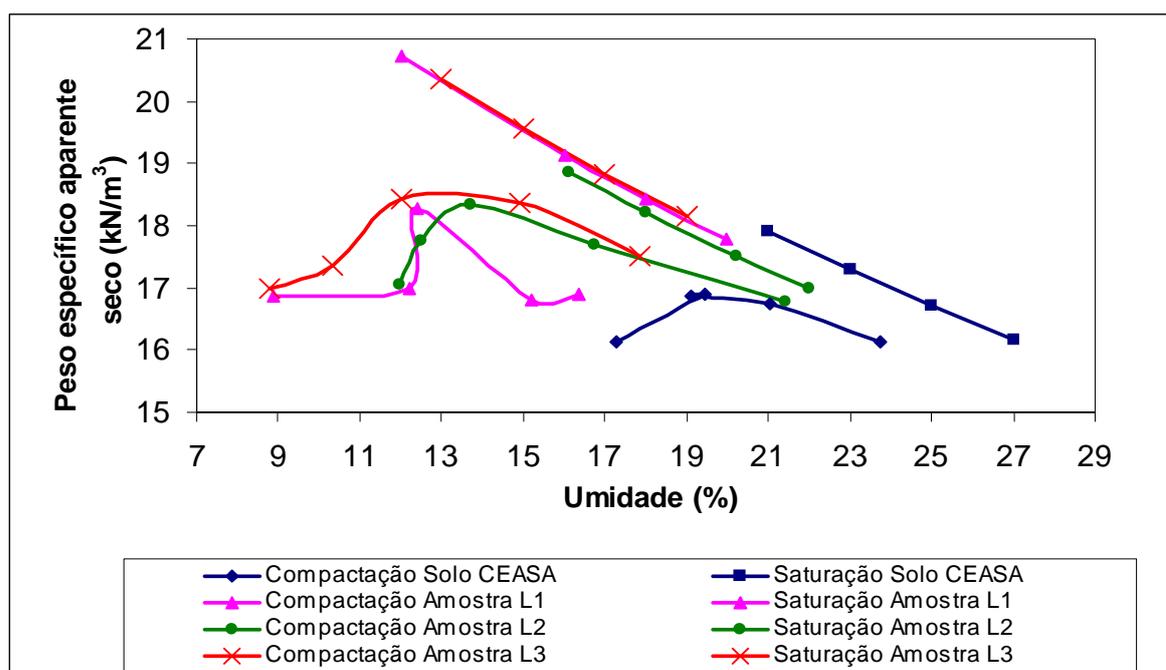
A Tabela 5.7 demonstra a classificação encontrada para os materiais estudados. O solo foi classificado segundo SUCS como solo fino, argiloso, tipo CL e quanto ao sistema TRB enquadrou-se no grupo A-7-6 sendo classificado como do tipo solos argilosos. A amostra L1, de acordo com os resultados obtidos no limite de consistência, é um material não plástico e foi classificado pela TRB como areia fina, por apresentar em sua mistura somente brita 9,5mm(38,0mm) e 4,8mm(9,5mm). Já as amostras L2 e L3 foram classificadas como pedregulhos e areias siltosas ou argilosas.

Tabela 5.7 Classificação segundo SUCS e TRB do solo e das amostras estudadas

Amostra	SUCS			TRB	
	Classificação	Tipos principais	Símbolos	Tipo de Material	Grupo
Solo CEASA	Solos finos	Siltosos ou argilosos	CL	Solos argilosos	A-7-6
L1	Solos grossos	Pedregulhos ou solos pedregulhosos	GW	Areia fina	A-3
L2	Solos grossos	Areias ou solos arenosos	SW	Pedregulhos e areias siltosas ou argilas	A-2-4
L3	Solos grossos	Areias ou solos arenosos	SW	Solos granulares	A-2-4

5.3.5 COMPACTAÇÃO

Apresentam-se neste item os resultados dos ensaios de compactação executados com a energia Proctor intermediária, para a definição da umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, sendo que tais parâmetros foram utilizados no estudo do *California Bearing Ratio* (CBR), expansão e na moldagem e cura dos corpos-de-prova. A Figura 5.16 apresenta as curvas de compactação e de saturação ($S_r = 100\%$) obtidas para o solo do CEASA e para as misturas preparadas em laboratório.

**Figura 5.16** Curvas de compactação das amostras estudadas

A compactação da amostra L1 foi realizada com certa dificuldade, principalmente no controle da umidade, onde se verificou uma perda considerável de água e dificuldade na determinação do peso específico aparente seco máximo. Com isso, percebe-se na Figura 5.16, que a amostra L1 apresentou uma curva sem acompanhar a tendência das demais e mais afastada da curva de saturação. Na Tabela 5.8 tem-se os valores da umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo obtidos a partir das curvas de compactação apresentadas na Figura 5.16.

Tabela 5.8 Resultados encontrados no ensaio de compactação

Amostra	w_{ot} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)
Solo Ceasa	20,0	16,9
L1	12,4	18,6
L2	13,7	18,3
L3	13,0	18,7

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

Observa-se que quanto maior a quantidade de finos (solo do CEASA e amostras L2 e L3), maior é o valor da umidade ótima. Já para o peso específico aparente seco máximo tem-se menor valor para o solo e para as amostras L1, L2 e L3 não observa-se variações significativas.

5.3.6 CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) E EXPANSÃO

A Figura 5.17 mostra as curvas de CBR x umidade do solo do CEASA e das amostras L1, L2 e L3.

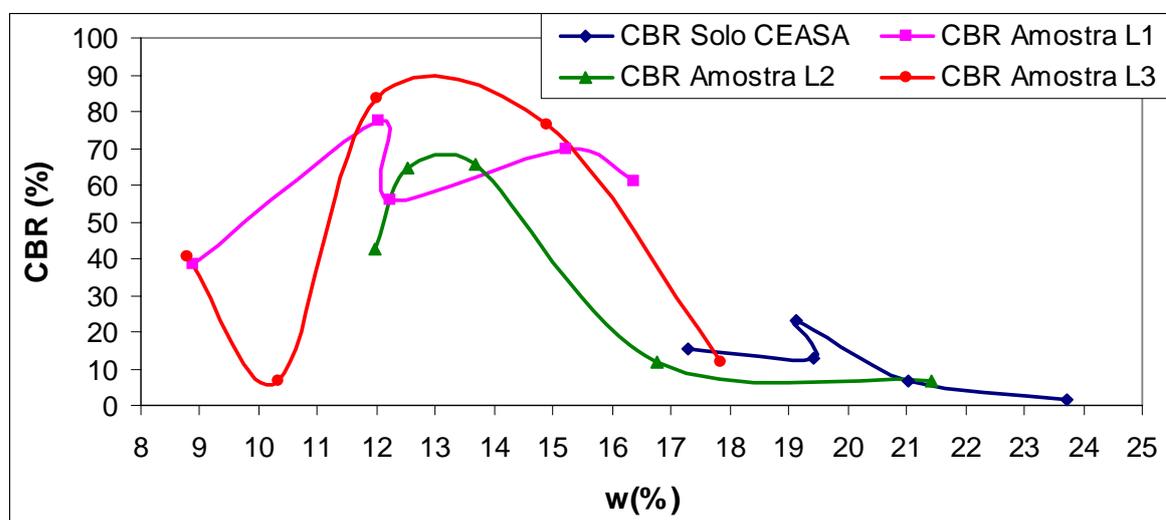


Figura 5.17 Curvas de CBR das amostras estudadas

De acordo com a Figura 5.17 e a Tabela 5.9, verifica-se que as amostras L1, L2 e L3 apresentaram maiores valores de CBR. A amostra L1, a qual possui grande quantidade de pedregulho e 0% de finos, apresentou o menor valor de CBR em relação às três misturas. Já a mistura L3 apresentou melhor valor de CBR, o que pode ser explicado por esta apresentar uma boa estabilização granulométrica.

Tabela 5.9 Valores encontrados nos ensaios de CBR e expansão

Amostra	CBR (%)	EXPANSÃO (%)
Solo CEASA	15,0	0,02
L1	68,0	0,01
L2	69,0	0,15
L3	90,0	- 0,01

A Figura 5.18 mostra as curvas de expansão das amostras do solo do CEASA e das amostras L1, L2 e L3. Percebe-se através da Figura 5.18 e a Tabela 5.9 que a mistura L2 apresentou maior valor de expansão. Porém a mistura L3, que apresentou maior valor de CBR, no ensaio de expansão apresentou um pequeno recalque. De uma maneira geral, os índices de expansão encontrados foram baixos ($\leq 5\%$). Portanto, esses valores não comprometem a utilização do material nas camadas do pavimento.

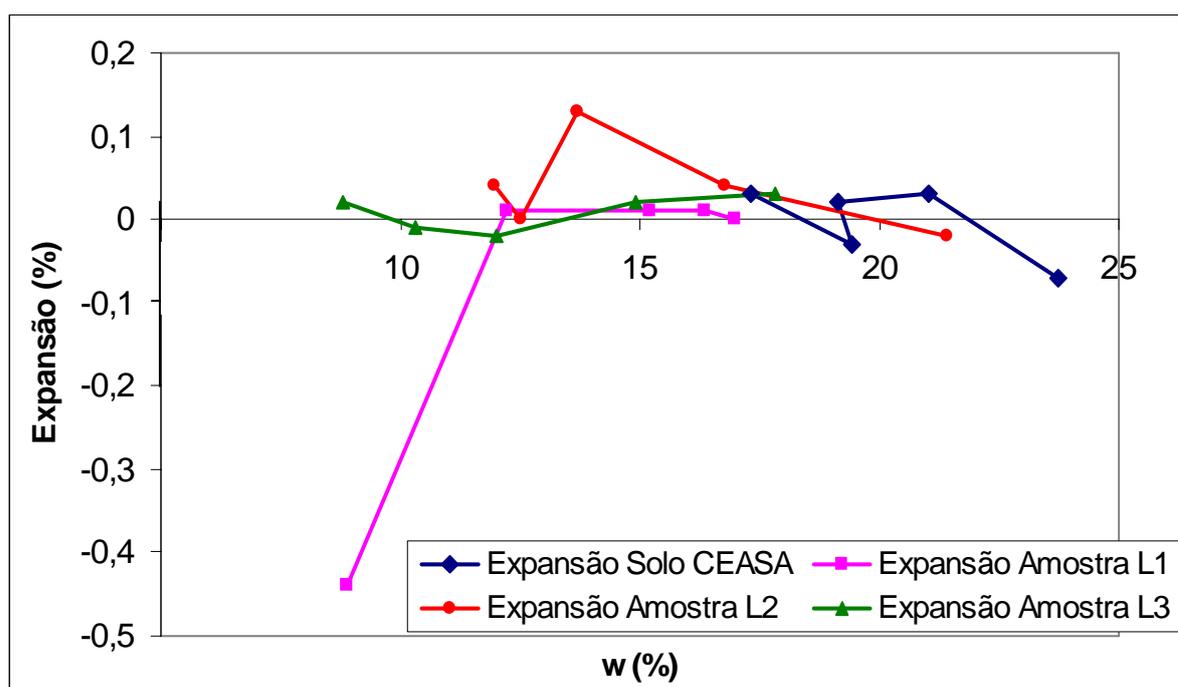


Figura 5.18 Curvas de expansão das amostras estudadas

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 5.9, verifica-se que as dosagens apresentam potencialidade técnica para serem usadas na confecção de camadas de pavimentos de acordo com as normas vigentes, pois para sub-base exige-se $\text{CBR} \geq 20\%$ e para a base tem-se que $\text{CBR} \geq 60\%$ (para vias de baixo volume de tráfego) e $\text{CBR} \geq 80\%$ (para vias de alto volume de tráfego). Na Tabela 5.10 tem-se um resumo com as possíveis utilizações dos materiais estudados.

Tabela 5.10 Possíveis utilizações das amostras estudadas

Amostra	Possibilidade de utilização
Solo CEASA	Subleito; Reforço subleito
L1	Sub-base; Base de vias de baixo volume de tráfego
L2	Sub-base; Base de vias de baixo volume de tráfego
L3	Base de vias de elevado volume de tráfego

Com base em todos os resultados dos ensaios de laboratório apresentados até este item, pode-se verificar que:

- Apesar da amostra L1 estar enquadrada na Faixa B, ela não apresentou melhor resistência. Isto pode ser explicado pela falta de finos na mistura, o que gera a inexistência de coesão no material. A Figura 5.19 ilustra exatamente esta falta de coesão no momento em que foi realizada a extração do corpo-de-prova.



Figura 5.19 Amostras L3, L2 e L1, respectivamente, após a extração do corpo-de-prova

- A amostra L2 ficou enquadrada na Faixa D. Mesmo com 25% do solo argiloso incorporado na mistura, ainda não houve ganho de resistência.
- Já na amostra L3, que se enquadra na Faixa F, mantendo-se constante a quantidade de solo argiloso (25%) e aumentando a porcentagem de material classificado como brita 2,00mm(4,8mm) (de 33% para 58%) tem-se significativo aumento do CBR.

Assim, verifica-se que nas misturas realizadas com agregado reciclado é importante que exista material argilosos e se utilize mais a fração classificada como brita 2,0mm(4,8mm).

Confrontando esses resultados com as especificações da NBR 15.115 (ABNT, 2004g) mostradas na Tabela 5.4, verifica-se que a limitação do teor de material passante na peneira de 0,42mm ficar entre 10% e 40% parece não ser apropriada para este material.

5.3.7 LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO

A NBR 10.004 (ABNT, 2004a) estabelece alguns ensaios que fornecem dados para a classificação do resíduo sólido ou solo a ser analisado. Para a realização destes ensaios foram obedecidos os critérios expostos na NBR 10.005 (ABNT, 2004i) e 10.006 (ABNT, 2004c), as quais tratam do ensaio de lixiviação e solubilização, respectivamente. O método analítico adotado foi de acordo com *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* em sua 21^a Edição.

As amostras L1, L2, L3 e solo CEASA apresentaram características de cor marrom, aspecto sólido, umidade de 13,68%, 10,95%, 9,53% e 9,20 e pH (solução a 50%) de 9,81, 9,03, 9,08 e 7,22, respectivamente. De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004a) o pH da amostra deve ser inferior a 2 e superior ou igual a 12,5 para se caracterizar como um material corrosivo. Com isso, as amostras ensaiadas não apresentaram característica de corrosividade. No teste de *Point Filter* não há líquidos livres, portanto não há percolado junto do resíduo.

A Tabela 5.11 mostra os resultados obtidos para o ensaio de massa bruta para as amostras L1, L2, L3 e solo CEASA.

Tabela 5.11 Resultados das características químicas da massa bruta das amostras estudadas

Parâmetros	Características da massa bruta (mg/Kg)				L.D (mg/Kg)*
	L1	L2	L3	Solo CEASA	
Óleos e graxas	< 1	< 1	< 1	< 1	1%
Arsênio	< 10	< 10	< 10	< 10	10
Berílio	< 3	< 3	< 3	< 3	3
Cádmio	5	< 5	< 5	5	5
Chumbo	22	26	< 10	24	10
Cianeto	< 1	< 1	< 1	< 1	1
Cobre	59	58	43	36	3
Cromo Total	33	114	85	166	5
Cromo Hexavalente	< 1	< 1	< 1	< 1	1
Fenol	< 1	< 1	< 1	< 1	1
Vanádio	< 20	< 20	< 20	< 20	20
Mercúrio	< 10	< 10	< 10	< 10	10
Zinco	84	122	107	44	5
Selênio	< 10	< 10	< 10	< 10	10
Níquel	11	22	13	< 10	10

* L.D: Limite de Detecção/ abaixo da sensibilidade analítica, resultados obtidos considerando-se massa (peso) para a análise igual a 2 (duas) gramas e a sensibilidade dos equipamentos utilizados

Os parâmetros identificados no ensaio de massa bruta em concentrações maiores do que o permitido, segundo a norma ABNT 10.004 (2004a) para as amostras estudadas foram:

- L1: Chumbo, Cobre, Cromo Total e Zinco;
- L2: Chumbo, Cobre, Cromo Total, Zinco e Níquel;
- L3: Cobre, Cromo Total, Zinco e Níquel;
- Solo CEASA: Chumbo, Cobre, Cromo total e Zinco.

Assim, observa-se que, com exceção do Níquel, o solo e os resíduos estudados apresentam os mesmos elementos na massa bruta. Certamente, a presença do Níquel no agregado reciclado está relacionada com a origem do entulho. Este elemento é característico de resíduos que são compostos de pigmentação cerâmica. Além disso, verifica-se que a amostra L3 não apresenta quantidade elevada de Chumbo como as demais.

A Tabela 5.12 mostra os resultados obtidos no ensaio de lixiviação para as amostras estudadas. Os resultados dos parâmetros inorgânicos das quatro amostras analisadas encontraram-se dentro dos limites especificados pela norma brasileira.

Tabela 5.12 Resultados das características químicas do extrato lixiviado das amostras e solo CEASA

Parâmetros	Resultados das características químicas do lixiviado (mg/L)				Limites Máximos (mg/L) *
	L1	L2	L3	Solo CEASA	
Arsênio	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	0,20
Bário	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	0,01
Cádmio	0,05	0,05	< 0,05	0,05	0,7
Chumbo	0,21	0,21	0,41	0,24	0,005
Cromo Total	0,26	0,26	< 0,20	< 0,20	0,01
Mercúrio	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,001
Prata	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,05
Selênio	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	0,01
Fluoreto	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,5

* Limite máximo no lixiviado conforme Anexo F da NBR 10.004 (ABNT, 2004)

A Tabela 5.13 mostra os resultados obtidos no ensaio de solubilização para as amostras e o solo CEASA. Pode-se observar, que a amostra L1 apresentou concentração de Alumínio do extrato solubilizado acima dos especificados pela norma. Na amostra L2 identificou-se a concentração dos parâmetros Alumínio e Surfactantes do extrato solubilizado. Já a amostra L3 apresentou a concentração do parâmetro Surfactantes acima da concentração especificada pela norma brasileira. A presença do parâmetro Surfactantes, pode ser pela presença de agentes solventes na composição da amostra. Observou-se que quanto mais granular é a amostra maior é o seu pH e mais alumínio e menos surfactantes estão presentes no material.

Apesar de alguns parâmetros químicos dos extratos solubilizados serem encontrados em quantidades superiores ao permitido pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a), há que se levar em consideração que muitas vezes estes contaminantes já fazem parte da composição das matérias-primas utilizadas na elaboração de certos materiais de construção.

Tabela 5.13 Resultados das características químicas do extrato solubilizado das amostras e solo CEASA

Parâmetros	Resultados das características químicas do solubilizado (mg/L)				Limites Máximos (mg/L) *
	L1	L2	L3	Solo CEASA	
Alumínio	0,45	0,36	< 0,20	< 0,20	0,20
Arsênio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Bário	< 0,5	0,6	0,5	0,5	0,7
Cádmio	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005
Chumbo	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Cianeto	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,07
Cloreto	60,0	5,0	7,0	2,0	250,0
Cobre	0,08	0,08	0,09	0,08	2,0
Cromo Total	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,05
Fenol	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Ferro	0,07	< 0,1	0,07	< 0,1	0,3
Fluoreto	< 1,0	< 1,0	1,4	1,7	1,5
Manganês	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1
Mercúrio	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001
Nitrato **	1,2	0,20	0,40	0,90	10,0
Prata	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,05
Selênio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Sódio	8,9	7,5	8,3	14,4	200,0
Surfactantes	0,2	0,6	0,6	<0,1	0,5
Sulfato	100,0	170,0	170,0	8,0	250,0
Zinco	0,18	0,18	< 0,05	0,15	5,0

* Limite máximo no solubilizado conforme Anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004)

** O parâmetro nitrato é expresso em N

As características químicas identificadas nos ensaios de solubilização e lixiviação das amostras L1, L2, L3 e solo CEASA foram classificadas como resíduo NÃO INERTE, NÃO PERIGOSO E CLASSE II-A. O resíduo foi classificado como não inerte, pois as amostras quando submetidas a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, geram parâmetros solubilizados em concentração superiores aos padrões de potabilidade da água.

5.3.8 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Com os valores obtidos nos ensaios laboratoriais, apresentados resumidamente na Tabela 5.14, foram moldados 3 corpos-de-prova, na umidade ótima e no peso específico aparente seco máximo e curados nos tempos de 15, 30 e 45 dias, totalizando 9 corpos-de-prova, para avaliar o ganho de resistência mecânica e a resistência ao desgaste.

Tabela 5.14 Resumo dos valores encontrados nos ensaios laboratoriais

AMOSTRA	w _{ot} (%)	γ _{dmax} (kN/m ³)	CBR (%)	EXPANSÃO (%)
Solo CEASA	20,0	16,9	15,0	0,02
L1	12,4	18,6	68,0	0,01
L2	13,7	18,3	69,0	0,15
L3	13,0	18,7	90,0	- 0,01

Motta (2005) encontrou um teor de umidade de 11%, que se mostrou suficiente para a moldagem dos corpos-de-prova dos ensaios mecânicos. Para esta umidade definiu-se que o peso específico aparente seco máximo do agregado reciclado estudado correspondia a aproximadamente 18,3kN/m³. Pode-se observar que os resultados encontrados na pesquisa de Motta (2005) são parecidos com os resultados encontrados nesta pesquisa. A Tabela 5.15 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de compactação em algumas pesquisas com diferentes tipos de agregado reciclado.

Ribeiro (2006) analisou cinco teores de umidade, sendo 9,2%, 14,4%, 16,9%, 19,9% e 22% , de acordo com a curva de compactação obtida a mistura de RCC e solo local apresentou uma melhor faixa de trabalho para a compactação sem que haja redução no valor do peso específico aparente seco uma variação de 17 e 19% da umidade. Ribeiro (2006) acrescenta, ainda, que o critério proposto na NBR 15.115 (ABNT, 2004g) onde o teor de umidade da mistura durante a compactação deve estar compreendido no intervalo de ± 1,5% em relação a umidade ótima, não está adequada para o material estudado.

Observa-se na Tabela 5.15 que há uma grande variação entre os valores obtidos de teor de umidade ótima e de peso específico aparente seco para os diferentes tipos de agregados reciclados. Estas desigualdades podem ocorrer devido a fatores como composição ou tipo de agregado reciclado, energia de compactação utilizada, graduação do material ou

ainda teor de umidade empregado (MOTTA, 2005). Mostrando exatamente a variabilidade do agregado reciclado, o que dificulta a comparação de parâmetros.

Tabela 5.15 Teor de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo obtidos em algumas pesquisas (modificado de MOTTA, 2005)

Tipo de agregado reciclado	Procedência	Energia Proctor de compactação	Umidade ótima (%)	Peso específico aparente seco (kN/m³)	Autor
C ^(k)	Suécia	Modificada	9,4	20,0	Arm (2001)
C ^(k)	Estados Unidos	Normal	7,5	19,8	Bennert et al.(2000)
C ^(k)	Coréia do Sul	Normal	12,1 ^(p)	18,8 ^(p)	Lime t al. (2001)
V ^(l)	Florianópolis (Brasil)	Normal	12,0 ^(q)	16,6 ^(q)	Trichês e Kryckj (1999)
B ^(m)		Normal	13,0 ^(q)	17,5 ^(q)	
V ^(l)	São Paulo (Brasil)	n.e. ^(o)	18,3	16,9	Bodi et al. (1995)
Mi ⁽ⁿ⁾		n.e. ^(o)	14,8	17,9	
B ^(m)		n.e. ^(o)	14,4	19,2	
C ^(k)	Belo Horizonte (Brasil)	Intermediária	15,2	18,2	Fernandes (2004)
Mi ⁽ⁿ⁾		Intermediária	17,0	17,6	
V ^(l)	Goiás (Brasil)	Intermediária	26,0	14,2	Ribeiro et al. (2002)
50% V ^(l)		Intermediária	23,1	15,8	
50% B ^(m)		intermediária	18,2	17,6	
B ^(m)					
Mi ⁽ⁿ⁾	Goiás (Brasil)	Intermediária	18,7	17,1	Ribeiro (2006)
Mi ⁽ⁿ⁾	São Paulo (Brasil)	Intermediária	11	18,3	Motta (2005)
Mi ^(sub.base)	Goiás (Brasil)	Intermediária	11,8	18,77	Silva (2004)
Mi ^(base)			14,5 ^(p)	17,70 ^(p)	

^(k) concreto; ^(l) vermelho; ^(m) branco; ⁽ⁿ⁾ misto

^(o) não especificada; ^(p) valor médio; ^(q) valor aproximado

5.3.8.1 California Bearing Ratio (CBR)

A Tabela 5.16 mostra os resultados obtidos no ensaio de CBR após o tempo de cura de 15, 30 e 45 dias das amostras L1, L2 e L3, visando observar a existência do ganho de resistência ao longo do tempo.

Tabela 5.16 Valores obtidos no ensaio de CBR após o período de cura

Amostra	Tempo (dias)	CBR (%)
L1	0	68,0
	15	27,0
	30	95,0
	45	32,0
L2	0	69,0
	15	122,0
	30	43,0
	45	135,0
L3	0	90,0
	15	145,0
	30	160,0
	45	154,0

É interessante comentar que os valores encontrados para a amostra L1 com tempo de cura de 15 e 45 dias foram desconsiderados, assim como, para a amostra L2 com tempo de 30 dias, pela possibilidade de ter ocorrido erro durante a execução do ensaio. O esperado seria que o CBR aumentasse ao longo do tempo por causa das reações pozolânicas, conforme constatado no estudo de Motta (2005), mencionado no Capítulo 3 desta pesquisa. Desconsiderando estes pontos, percebe-se através da Tabela 5.17 que houve um aumento significativo do valor de suporte do material com o decorrer do tempo de cura.

Como este estudo avalia o agregado reciclado sem a adição de material com potencial aglomerante (cal ou cimento Portland), então há indícios de que houve reação pozolânica por parte de partículas que ainda possuíam potencial reativo, provocada pela adição de água para atingir o teor de umidade e pela compactação, que aumenta a finura do material.

Pode-se observar através da Tabela 5.17 que após 15 dias as amostras L2 e L3 ultrapassaram a marca dos 100%, indicando que o agregado reciclado estudado possuía nestas condições uma capacidade de suporte maior do que a da brita-padrão, que foi a referência quando da concepção do ensaio. Percebe-se que amostra L3 continua apresentando melhores resultados nos ensaios realizados nesta pesquisa.

A Tabela 5.17 demonstra os resultados obtidos no ensaio de CBR ao longo do tempo de cura, comparando com os resultados obtidos na pesquisa de Motta (2005) na realização do mesmo ensaio utilizando agregado reciclado.

Tabela 5.17 Comparação dos resultados obtidos no ensaio de CBR ao longo do tempo com a pesquisa de Motta (2005)

Amostra	Tempo (dias)	CBR (%)
MOTTA (2005)	0	76,0
MOTTA (2005)	0	74,0
L1	0	68,0
L2	0	69,0
L3	0	90,0
L2	15	122,0
L3	15	145,0
MOTTA (2005)	28	87,0
MOTTA (2005)	28	101,0
L1	30	95,0
L3	30	160,0
MOTTA (2005)	90	126,0
MOTTA (2005)	90	107,0
L2	45	135,0
L3	45	154,0
MOTTA (2005)	180	121,0
MOTTA (2005)	180	128,0

De acordo com a Tabela 5.17, verifica-se que os valores aumentam ao longo do tempo de cura. Neste caso, tem-se que aos 45 dias a resistência já atinge o nível correspondente aos 90 dias. Assim, tem-se indícios de que nas condições de laboratório, após 45 dias de cura começa a ocorrer estabilização da resistência.

5.3.8.2 Abrasão *Los Angeles*

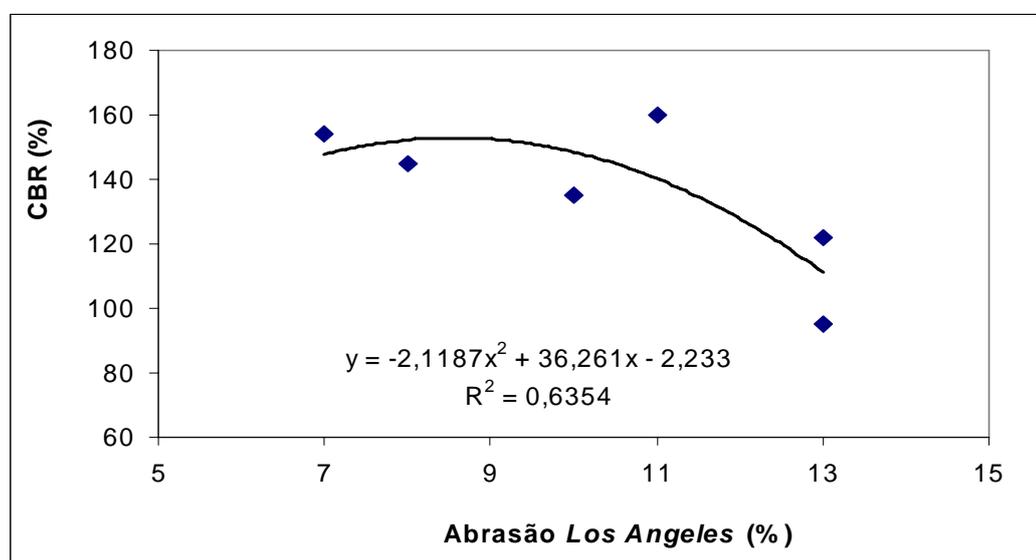
Para avaliar a resistência ao desgaste das amostras, foi realizado o ensaio de Abrasão *Los Angeles*. A Tabela 5.18 tem-se os resultados obtidos. Pelo fato do ensaio ter sido adaptado em função da pouca quantidade de material disponível no final da pesquisa, os valores encontrados para a Abrasão *Los Angeles* foram inferiores aos encontrados na literatura que variam entre 30% e 66% (MOTTA, 2005).

Tabela 5.18 Valores obtidos no ensaio de Abrasão *Los Angeles* após o período de cura

Amostra	Tempo (dias)	A ₆ (%)	Média (%)
L1	15	15	15
	30	13	
	45	18	
L2	15	13	12
	30	12	
	45	10	
L3	15	8	9
	30	11	
	45	7	

Obs: A₆ = abrasão *Los Angeles* da graduação 6, com aproximação de 1%

Na Tabela 5.18 pode-se observar que a amostra L3 apresentou o menor índice quando comparado com os demais. Assim, mais uma vez, verifica-se que a mistura que apresenta boa distribuição granulométrica tem melhor desempenho. Além disso, na Figura 5.20, pode-se observar que existe uma tendência de comportamento na relação entre o CBR e a Abrasão *Los Angeles*, sendo que quanto maior é o CBR menor é a Abrasão.

**Figura 5.20** Tendência entre o CBR e Abrasão *Los Angeles*

5.3.9 AMOSTRAS RETIRADAS DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS

Para avaliar o índice de degradação com ação dos tráfegos nos trechos experimentais estudados e a questão ambiental do material aplicado nos trechos, foram

retiradas amostras da sub-base e base do trecho do CEASA e da base do trecho do Recanto e realizados ensaios de granulometria, solubilização e lixiviação.

5.3.9.1 Análise Granulométrica

As Figuras 5.21 e 5.22 apresentam os resultados dos ensaios de granulometria realizados por peneiramento sem lavagem para os materiais de base e sub-base retirados do trecho do CEASA.

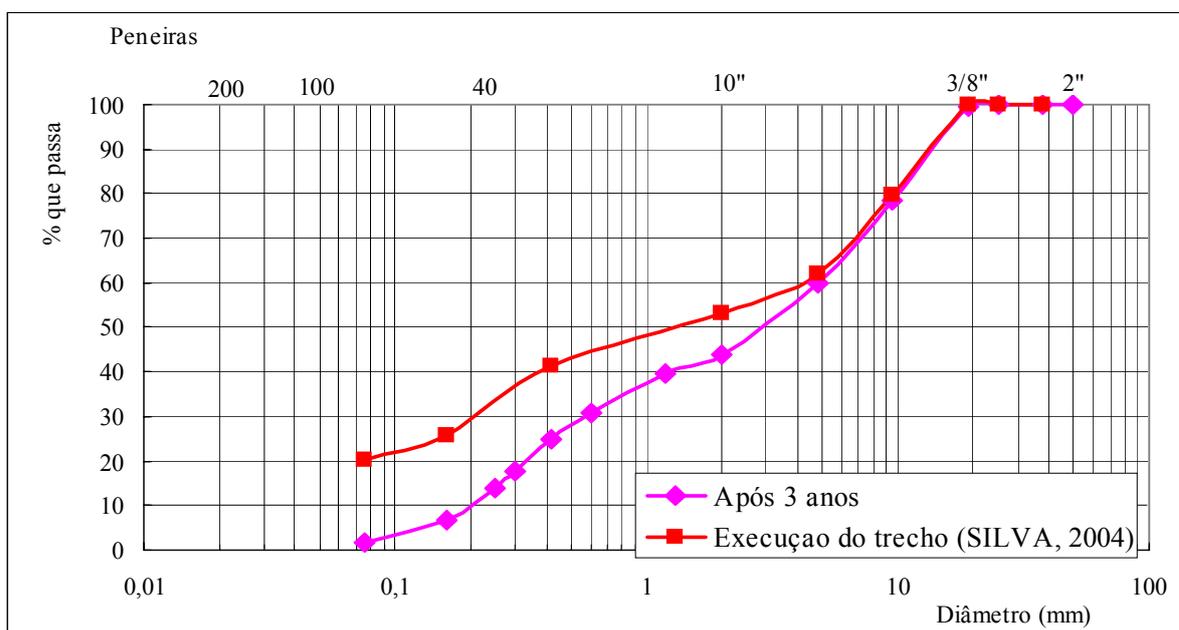


Figura 5.21 Curvas granulométricas dos materiais retirados da base do trecho do CEASA

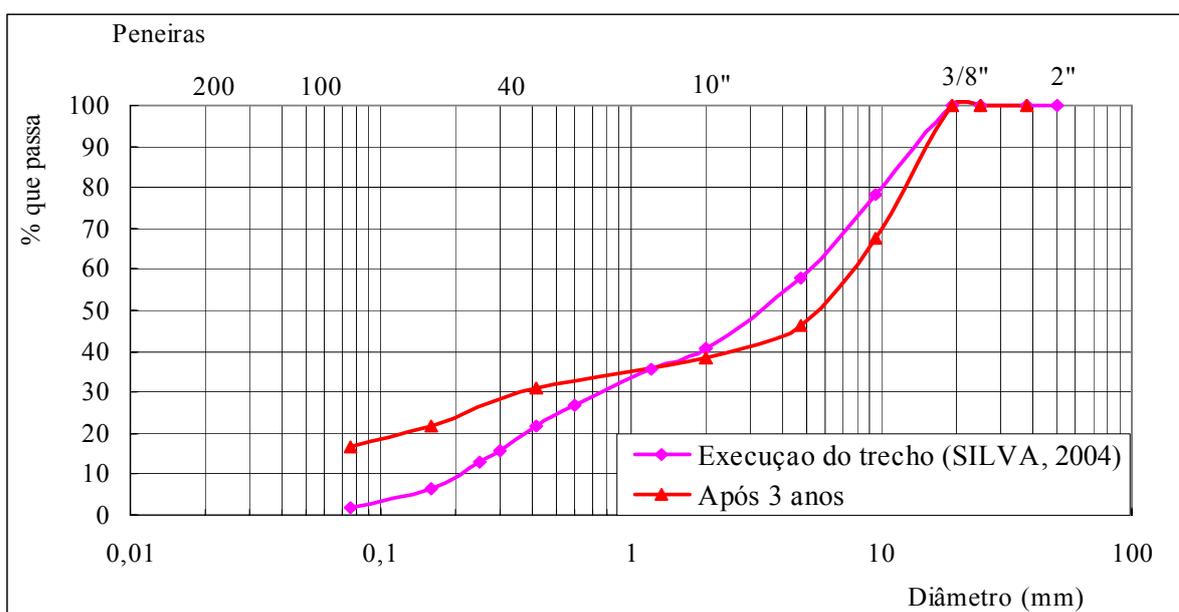


Figura 5.22 Curvas granulométricas dos materiais retirados da sub-base do trecho do CEASA

Após 3 anos de funcionamento da via, observa-se a existência de uma tendência de comportamento das curvas quando comparada com aquelas obtidas na época da construção (SILVA, 2004). No entanto, verifica-se que existe uma variação entre elas que pode ser explicada pela diferença no local de retirada das amostras.

A Figura 5.23 apresenta a comparação entre as curvas granulométricas do material retirado da base do trecho do Recanto das Minas Gerais por Ribeiro (2006) e após um ano, nesta pesquisa. Novamente, verifica-se a não coincidência das curvas, mas tem-se a existência de uma mesma tendência de comportamento.

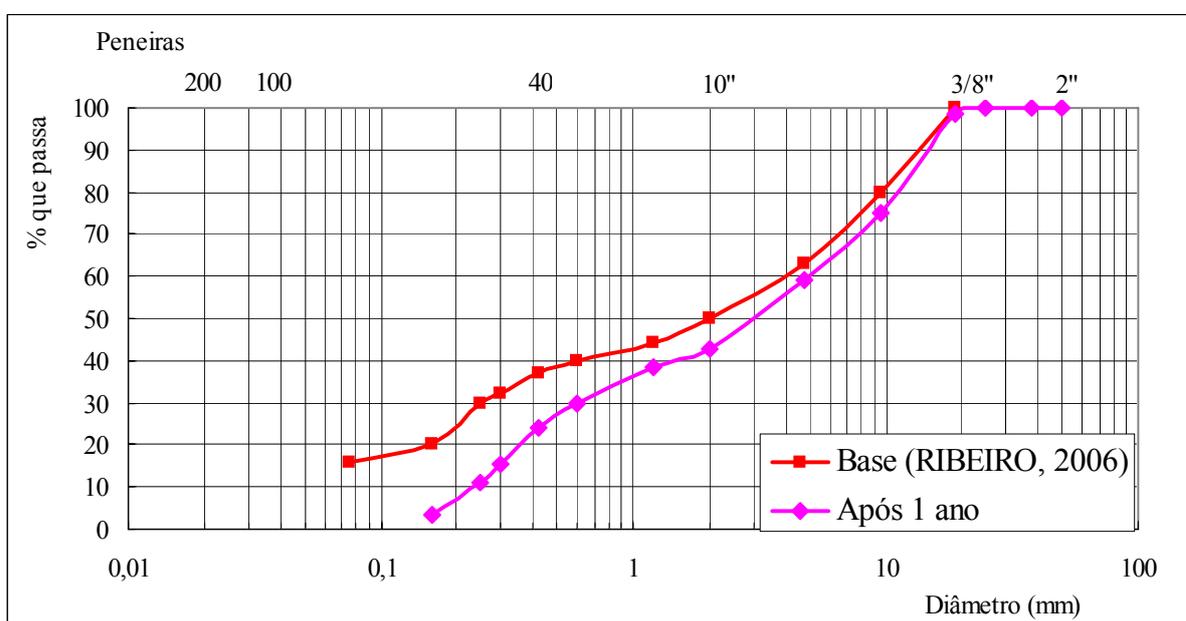


Figura 5.23 Curvas granulométricas dos materiais retirados da base do trecho do Recanto

A Tabela 5.19 mostra as frações granulométricas obtidas para a base e sub-base do trecho do CEASA e para a base do trecho do Recanto.

Tabela 5.19 Percentuais de frações granulométricas das camadas dos trechos estudados

Material (%)	Base CEASA	Sub-base CEASA	Base RECANTO
Pedregulho	40,00	40,00	40,00
Areia	58,10	58,80	58,00
Silte + Argila	1,96	1,20	2,00

A base e a sub-base do trecho do CEASA apresentaram um Cu de 25. Já a base do Recanto apresentou um Cu igual a 20. Todas as amostras tiveram a dimensão máxima

característica igual 20 mm e porcentagem de material passante na peneira de 0,42 mm entre 10 e 40%. Assim, todos os materiais atendem as especificações da NBR 15.116 (ABNT, 2004h).

5.3.9.2 Lixiviação e Solubilização

O método analítico adotado foi de acordo com *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* em sua 21ª Edição. As amostras retiradas da base dos trechos experimentais do CEASA e do Recanto apresentaram características de cor marrom, aspecto sólido, umidade de 8,91% e 9,00% e pH (solução a 50%) de 10,41 e 10,33, respectivamente. De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004a) as amostras ensaiadas não apresentaram característica de corrosividade. No teste de *Point Filter* não há líquido livres, portanto não há percolado junto do resíduo. A Tabela 5.20 mostra os resultados obtidos para as características químicas da massa bruta para o trecho do CEASA e do Recanto.

Tabela 5.20 Resultados das características químicas da massa bruta das amostras dos trechos

Parâmetros	Resultados Analíticos da massa bruta (mg/Kg)		L.D (mg/Kg) *
	CEASA	Recanto	
Óleos e graxas	11%	< 1	1%
Arsênio	< 10	< 10	10
Berílio	< 3	< 3	3
Cádmio	5	6	5
Chumbo	23	29	10
Cianeto	< 1	< 1	1
Cobre	22	40	3
Cromo Total	109	101	5
Cromo Hexavalente	< 1	< 1	1
Fenol	< 1	< 1	1
Vanádio	< 20	< 20	20
Mercurio	< 10	< 10	10
Zinco	71	55	5
Selênio	< 10	< 10	10
Níquel	12	16	10

* L.D: Limite de Detecção/ abaixo da sensibilidade analítica, resultados obtidos considerando-se massa (peso) para a análise igual a 2 (duas) gramas e a sensibilidade dos equipamentos utilizados

Nas características da massa bruta da base do trecho do CEASA, foi identificado a presença de Óleos e graxas, Chumbo, Cobre, Cromo Total, Zinco e Níquel. Já na amostra da base do trecho do Recanto foi encontrada a presença de Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo total, Zinco e Níquel. A justificativa provável para a presença destes componentes químicos é que o solo local apresenta em suas características Chumbo, Cobre, Cromo total e Zinco, relatados no item 5.3.7, o qual está presente na mistura do material utilizado para base dos pavimentos estudados.

A presença de Óleos e graxas no trecho do CEASA pode ser explicada pelo fato da amostra da base ensaiada ter sido retirada mais superficialmente e ter incorporado elementos que compõem o revestimento asfáltico do pavimento (agregados mais ligante betuminoso). No caso da amostra retirada da base do trecho do Recanto, a presença de Cádmio é justificada pela queima de óleos de combustíveis causada pelo tráfego de veículos na via.

A Tabela 5.21 demonstra os resultados das características químicas dos extratos lixiviados e solubilizados dos materiais retirados dos trechos experimentais. Os parâmetros inorgânicos das amostras da base dos trechos analisados encontraram-se dentro dos limites da especificação brasileira. Para análise do extrato solubilizado, a amostra da base do trecho do CEASA apresentou concentração de Alumínio acima dos especificados pela norma. Já a amostra da base do trecho do Recanto identificou-se a concentração dos parâmetros Alumínio e Surfactantes do extrato solubilizado acima da concentração especificada pela norma brasileira.

O interessante é que as amostras L1, L2 estudadas em laboratório, no ensaio de solubilização também apresentaram concentrações de Alumínio acima dos limites máximos e nas amostras L2 e L3 identificou-se a concentração de Surfactantes, como mostrado no item 5.3.7. Assim, percebe-se que, neste caso, a ação do tráfego (queima de combustível) na via não gera variação no quantitativo destes parâmetros químicos já que o índice não teve alteração significativa comparados com dos trechos experimentais.

As características químicas identificadas nos ensaios de solubilização e lixiviação das amostras retiradas dos trechos experimentais do CEASA e do Recanto foram classificadas como resíduo NÃO INERTE, NÃO PERIGOSO E CLASSE II-A.

Tabela 5.21 Resultados das características químicas dos extratos solubilizados e lixiviados dos materiais retirados dos trechos do CEASA e do Recanto

Parâmetros	Resultados Analíticos dos trechos (mg/L)				Limites Máximos (mg/L) *	
	Lixiviado		Solubilizado		Lixiviado	Solubilizado
	CEASA	Recanto	CEASA	Recanto		
Alumínio	--	--	0,48	0,91	--	0,20
Arsênio	< 0,20	< 0,20	< 0,01	< 0,01	1,0	0,01
Bário	< 1,0	< 1,0	< 0,5	0,5	70	0,7
Cádmio	0,05	< 0,05	<0,005	<0,005	0,5	0,005
Chumbo	< 0,20	< 0,20	< 0,01	< 0,01	1,0	0,01
Cianeto	--	--	< 0,05	< 0,05	--	0,07
Cloreto	--	--	9,0	1,0	--	250,0
Cobre	--	--	0,09	0,09	--	2,0
Cromo Total	< 0,20	< 0,20	< 0,05	< 0,05	5,0	0,05
Fenol	--	--	< 0,01	< 0,01	--	0,01
Ferro	--	--	0,1	0,08	--	0,3
Fluoreto	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	150,0	1,5
Manganês	--	--	< 0,1	< 0,1	--	0,1
Mercúrio	< 0,1	< 0,1	<0,001	<0,001	0,1	0,001
Nitrato**	--	--	5,6	1,40	--	10,0
Prata	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	5,0	0,05
Selênio	< 0,20	< 0,20	< 0,01	< 0,01	1,0	0,01
Sódio	--	--	10,4	5,5	--	200,0
Surfactantes	--	--	0,23	0,6	--	0,5
Sulfato	--	--	170,0	110,0	--	250,0
Zinco	--	--	< 0,05	< 0,05	--	5,0

* Limite máximo nos extratos lixiviados e solubilizados conforme anexo F e G da NBR 10.004 (ABNT, 2004a)

** O parâmetro nitrato é expresso em N

5.4 ENSAIOS DE CAMPO

Em novembro de 2006, foram realizados ensaios de campo nos dois trechos experimentais: no CEASA e no setor Recanto das Minas Gerais. Os resultados obtidos foram comparados com a pesquisa de Oliveira (2007), referente ao trecho do CEASA e a pesquisa

de Ribeiro (2006), referente ao trecho do setor Recanto das Minas Gerais. Os ensaios realizados foram:

- Viga Benkelman;
- Prova de Carga Sobre Placa;
- Penetrômetro Dinâmico do Cone.

Os resultados obtidos estão apresentados a seguir.

5.4.1 VIGA BENKELMAN

A Tabela 5.22 mostra a deflexão real ou verdadeira medida no ponto de prova (D_0), a deflexão medida a 25 cm do ponto de prova (D_{25}), o raio da curvatura (R) e o valor do produto $R.D_0$ do trecho do CEASA. O raio de curvatura (R) é um índice que indica o estado do pavimento em relação às deflexões.

Tabela 5.22 Parâmetros obtidos nos ensaios de viga Benkelman no trecho do CEASA

Estaca	D_0 (0,01 mm)	D_{25} (0,01 mm)	R (m)	$R.D_0$ (m.0,01mm)
E2+15 BE	72	42	104	7.500
E3+5 BE	66	40	120	7.932
E3+15 BE	70	40	104	7.291
E4+5 BE	68	46	142	9.659
E4+10 BE	72	38	92	6.617
E3 BD	64	24	78	5.000
E3+10 BD	62	26	87	5.382
E4 BD	58	22	87	5.035
MÉDIA	61	30	105	6.426

Obs: BE = bordo esquerdo; BD = bordo direito; D_0 = deflexão real medida no ponto de prova; D_{25} = deflexão medida a 25 cm do ponto de prova; R = raio da curvatura; $R.D_0$ = valor do produto

Segundo a norma PRO 011 (DNER, 1979), valores de $R < 100$ m sugerem a existência de problemas no pavimento e devem ser feitas determinações adicionais. A avaliação da condição em que se encontra o pavimento a partir do levantamento da bacia de deformação, em alguns estudos, é feita com base no produto $R.D_0$. Valores de $R.D_0 < 5500$ m x 10^{-2} mm indicam uma provável existência de problemas no pavimento.

Percebe-se que a deflexão máxima (D_0) variou entre 58 e 72 x 10^{-2} mm, o raio de curvatura de 78 a 142 m e o produto $R.D_0$ de 5.000 a 7.932 m x 10^{-2} mm. Portanto, verifica-se que no geral, a média dos valores obtidos do raio de curvatura (R) foi maior que 100 m e o do

produto R. Do maior que $5.500 \text{ m} \times 10^{-2} \text{ mm}$. Dessa forma, não observa-se a existência de problemas estruturais neste trecho. As Figuras 5.24 e 5.25 apresentam as bacias de deslocamento obtidas para o bordo esquerdo e o bordo direito, respectivamente.

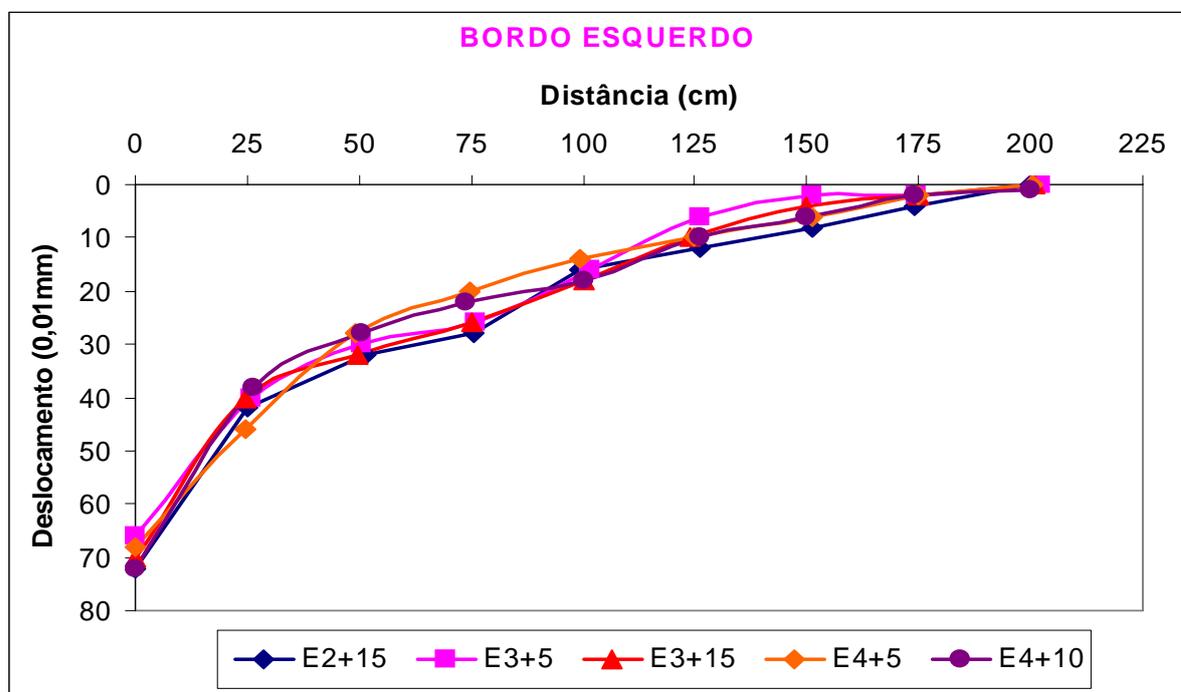


Figura 5.24 Bacias de deslocamento do bordo esquerdo do trecho do CEASA

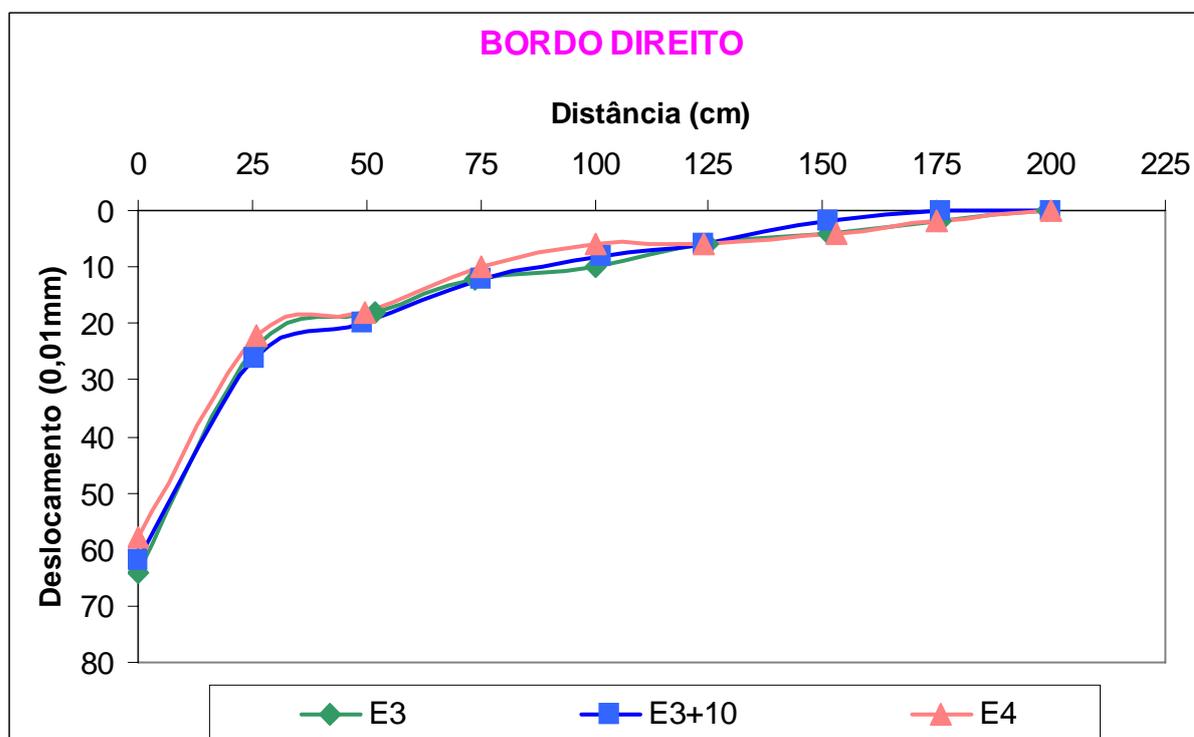


Figura 5.25 Bacias de deslocamento do bordo direito do trecho do CEASA

Percebe-se que não houve grande variação nas curvas de deslocamento entre as estacas, mostrando que o ensaio de viga Benkelman apresenta repetibilidade neste trecho e que a estrutura do pavimento analisado apresenta comportamento homogêneo. No entanto, verifica-se uma pequena tendência dos valores de D_0 serem ligeiramente menores no bordo direito.

Já na Tabela 5.23 e na Figura 5.26 tem-se a comparação dos dados obtidos neste ensaio com aqueles determinados por Oliveira (2007) para os anos de 2004 e 2005. A Figura 5.26 mostra a bacia de deslocamento média do trecho do CEASA, realizado em diferentes períodos.

Tabela 5.23 Médias obtidas nos ensaios de viga Benkelman em diferentes períodos

Período	D_0 (0,01 mm)	D_{25} (0,01 mm)	R (m)	R. D_0 (m.0,01mm)
Janeiro/04*	48	29	171	8.134
Setembro/04*	41	30	291	11.846
Maio/05*	64	33	101	6.464
Novembro/05*	62	33	109	6.728
Maio/06*	60	38	142	8.586
Novembro/06	61	30	105	6.426

*Oliveira (2007)

Obs: D_0 = deflexão real medida no ponto de prova; D_{25} = deflexão medida a 25 cm do ponto de prova; R = raio da curvatura; R. D_0 = valor do produto

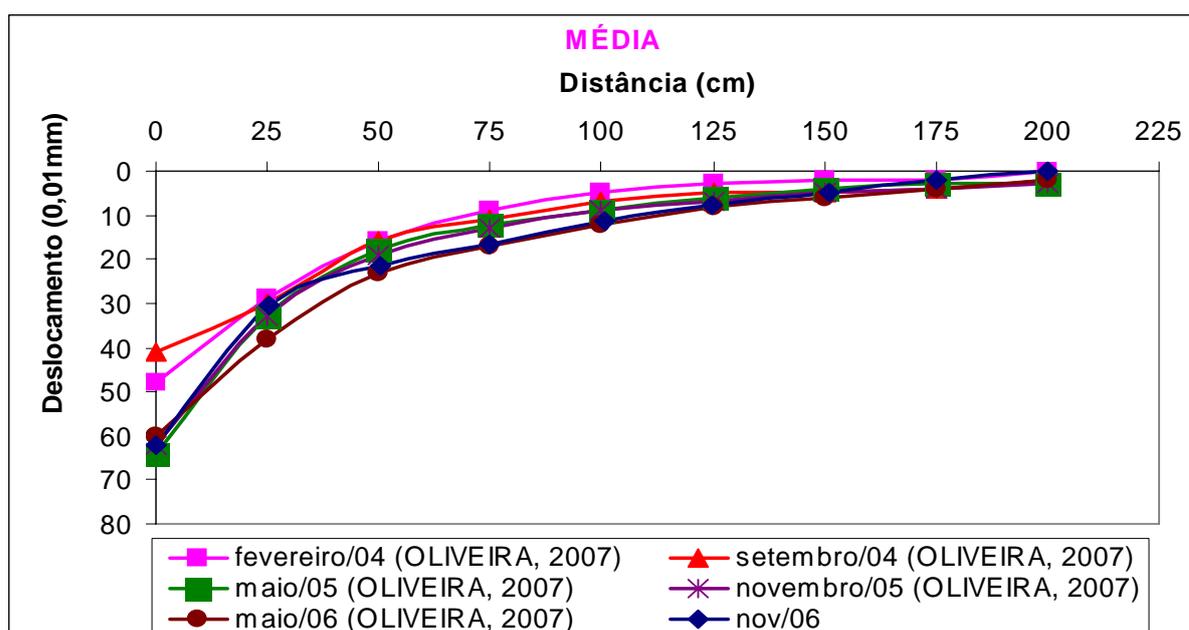


Figura 5.26 Bacia de deflexão média do trecho do CEASA

De acordo com os dados de Oliveira (2007) e observando a Tabela 5.23 e a Figura 5.26, verifica-se que a deflexão real ou verdadeira no ponto de prova (D_0) apresentou uma pequena redução no ensaio realizado nove meses após a construção (Setembro/2004). Provavelmente, isto ocorreu em função da consolidação natural das camadas ou da própria variabilidade do ensaio. Após seis meses da ação do tráfego (Maio/2005) observa-se aumento nos valores de D_0 , que mantiveram aproximadamente constante até Novembro de 2006. Assim, com os resultados do ensaio de viga Benkelman, tem-se que em dois anos de funcionamento do trecho do CEASA a estrutura do pavimento continua apresentando desempenho satisfatório.

A Tabela 5.24 mostra a deflexão real ou verdadeira medida no ponto de prova (D_0), a deflexão medida a 25 cm do ponto de prova (D_{25}), o raio da curvatura (R) e o valor do produto $R.D_0$ do trecho do setor Recanto das Minas Gerais.

Tabela 5.24 Parâmetros obtidos nos ensaios de viga Benkelman no trecho do Recanto

Estaca	D_0 (0,01 mm)	D_{25} (0,01 mm)	R (m)	$R.D_0$ (m.0,01mm)
E0 BE	86	62	130	11.198
E1 BE	80	50	104	8.333
E2 BE	106	82	130	13.802
E3 BE	76	52	130	9.896
E4 BE	94	58	86	8.160
E5 BE	98	78	156	15.312
E6 BE	98	76	142	13.920
E7 BE	70	38	98	6.836
E0+10 BD	78	54	130	10.156
E1+10 BD	88	48	78	6.875
E2+10 BD	100	66	92	9.191
E3+10 BD	72	56	195	14.062
E4+10 BD	110	100	312	34.375
E5+10 BD	120	60	52	6.250
E6+10 BD	90	54	87	7.812
MÉDIA	91	62	129	11.803

Obs: BE = bordo esquerdo; BD = bordo direito; D_0 = deflexão real medida no ponto de prova; D_{25} = deflexão medida a 25 cm do ponto de prova; R = raio da curvatura; $R.D_0$ = valor do produto

Verifica-se que a deflexão máxima (D_0) variou entre 70 e 120 x 10^{-2} mm, o raio de curvatura de 52 a 312m e o produto $R.D_0$ de 6.250 a 34.375m x 10^{-2} mm. Portanto, observa-se que no geral, a média dos valores obtidos do raio de curvatura (R) foi maior que 100m e o do produto $R.D_0$ maior que 5.500m x 10^{-2} mm. Dessa forma, o pavimento pode se considerado como sendo de boa a média qualidade estrutural.

As Figuras 5.27 e 5.28 mostram as bacias de deslocamento obtidas para o bordo esquerdo e o bordo direito, respectivamente, com os ensaios realizados no trecho do Setor Recanto das Minas Gerais.

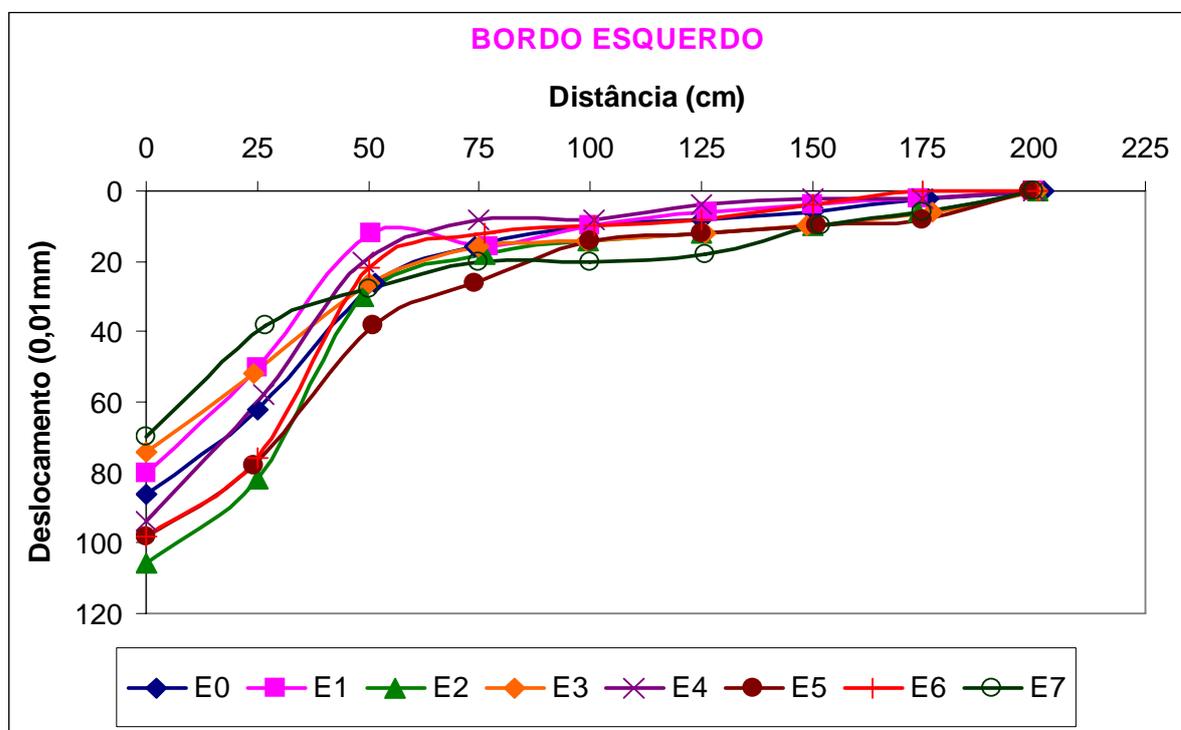


Figura 5.27 Bacias de deslocamento do bordo esquerdo do trecho do Recanto

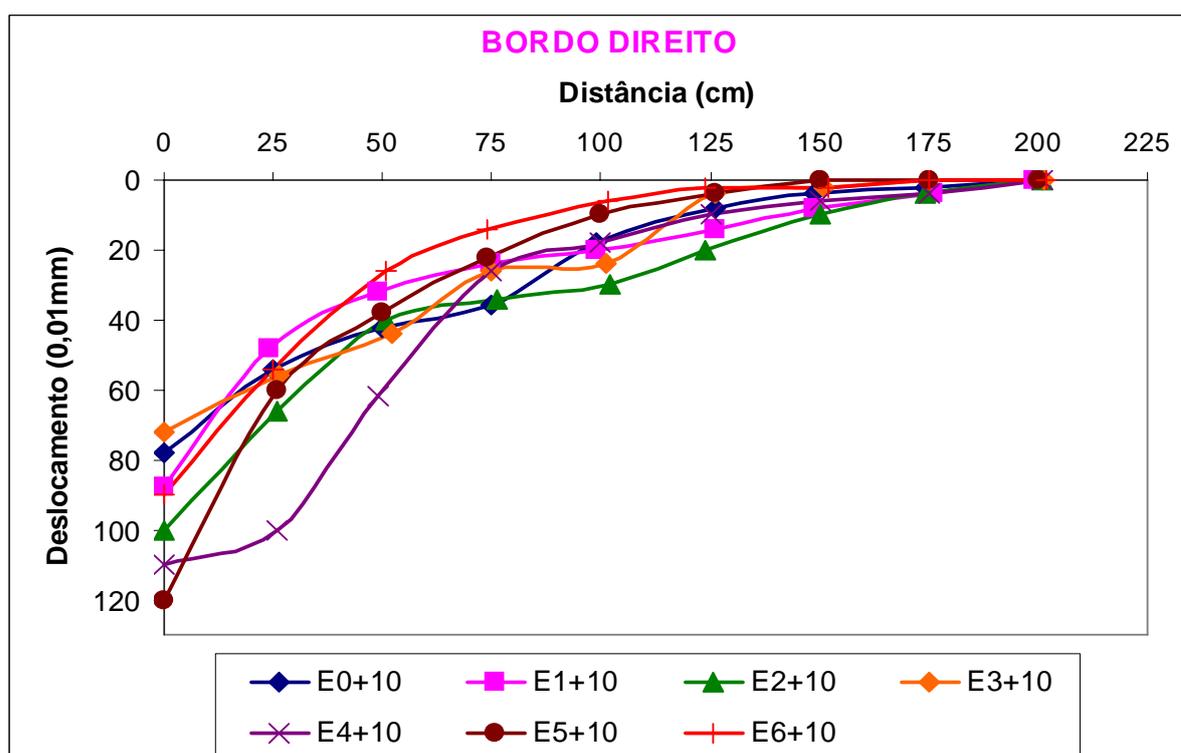


Figura 5.28 Bacias de deslocamento do bordo direito do trecho do Recanto

Ao contrário do que foi observado para o trecho do CEASA, verifica-se que houve significativa variabilidade nos valores de deslocamento e nas formas das bacias obtidas. Isto mostra que o comportamento estrutural desta via é heterogêneo, o que, provavelmente, pode ser explicado por variações que existam na estrutura do pavimento ou nas características dos materiais. Esta suspeita é melhor analisada após a apresentação dos resultados dos demais ensaios de campo.

Já na Tabela 5.25 e na Figura 5.29 tem-se a comparação dos dados obtidos neste ensaio com aqueles determinados por Ribeiro (2006) para os anos de 2005 e 2006.

Tabela 5.25 Médias obtidas nos ensaios de viga Benkelman em diferentes períodos

Período	D ₀ (0,01 mm)	D ₂₅ (0,01 mm)	R (m)	R.D ₀ (m.0,01mm)
Abril/05*	86	63	274	18.686
Janeiro/06*	62	41	186	9.900
Novembro/06	91	62	129	11.803

* Ribeiro (2006)

Obs: D₀ = deflexão real medida no ponto de prova; D₂₅ = deflexão medida a 25 cm do ponto de prova; R = raio da curvatura; R.D₀ = valor do produto

Na Figura 5.29 está apresentada a bacia média do trecho do setor Recanto das Minas Gerais realizado no mês de novembro de 2006 e as médias da pesquisa de Ribeiro (2006) realizada no mês de abril de 2005 e janeiro de 2006. Segundo Ribeiro (2006), comparando as curvas médias (Figura 5.29) e os dados obtidos nos meses de abril/2005 e janeiro/2006 (Tabela 5.25), tem-se que, em janeiro/2006, o pavimento apresentou melhor desempenho. Este comportamento, inicialmente, não seria esperado, já que geralmente, ao longo de sua vida útil, o pavimento tem seu valor reduzido devido à ação do tráfego e da variação climática. No entanto, pesquisas de laboratório realizadas com agregado reciclado têm mostrado que pode ocorrer ganho de resistência ao longo do tempo, pois continuam acontecendo reações químicas nesse tipo de resíduo após a sua compactação (MOTTA, 2005) e também variações na estrutura ou na característica dos materiais. Assim, Ribeiro (2006) conclui que talvez esse comportamento possa ser observado também no campo.

No entanto, com o ensaio realizado no mês de novembro/2006, a curva média voltou a ter um comportamento parecido com o ensaio realizado no mês de abril/2005. Percebe-se, então, que a justificativa apresentada por Ribeiro (2006) pode não representar o

comportamento real do pavimento ou que o ensaio de viga Benkelman realizado neste trecho não consegue ser representativo pelos motivos já expostos na análise das Figuras 5.27 e 5.28. Assim, somente com a realização de novos ensaios no referido trecho nos próximos anos será possível avaliar o que realmente está acontecendo nesta estrutura.

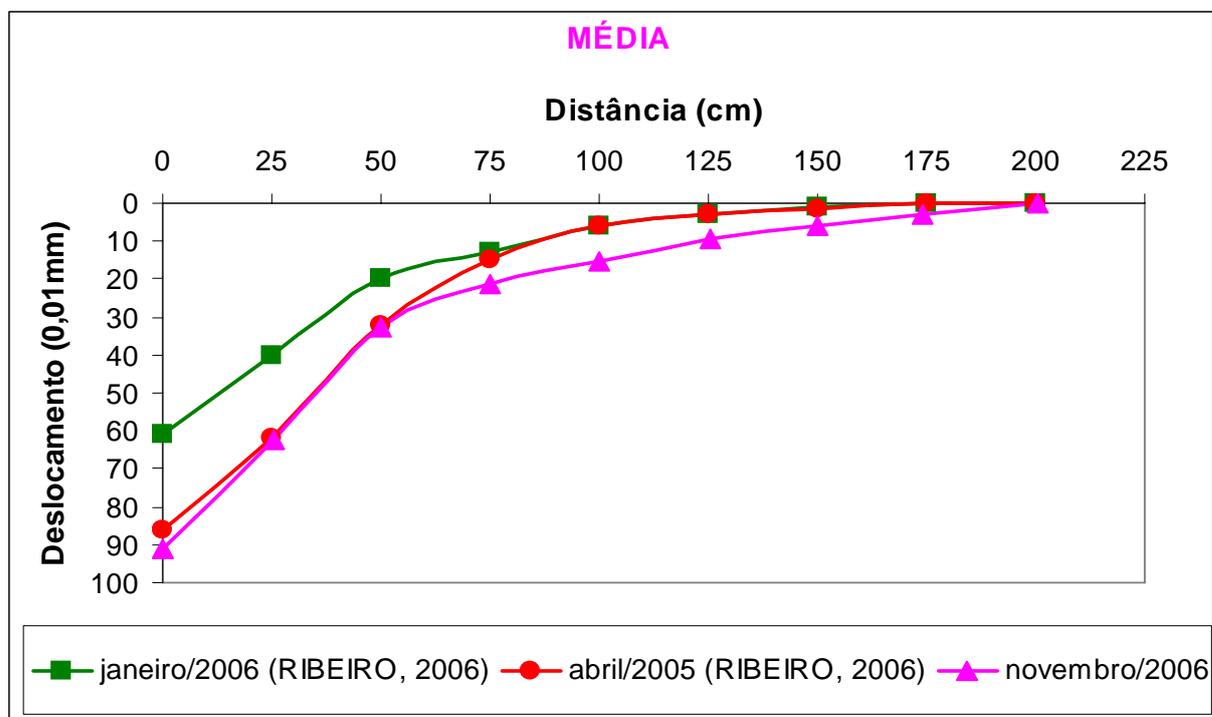


Figura 5.29 Bacia de deflexão média do trecho do Recanto

5.4.2 PROVA DE CARGA SOBRE PLACA

A Tabela 5.26 mostra os resultados obtidos no ensaio de prova de carga sobre placa, onde foram realizadas leituras 5 minutos após a aplicação de cada incremento de carga. Para a tensão de 560 kPa, que corresponde à tensão utilizada no dimensionamento de pavimentos, obteve-se o deslocamento total (d_t) e o deslocamento elástico (d_e).

Tabela 5.26 Resultados obtidos nos ensaio de prova de carga no trecho do CEASA

Estaca	T = 560 kPa	
	d_t (mm)	d_e (mm)
E4 BD	0,55	0,17
E3 Eixo	0,29	0,15
E4+15 BE	0,45	0,15
MÉDIA	0,43	0,16

Obs: BD = bordo direito; BE = bordo esquerdo; d_t = deslocamento total; d_e = deslocamento elástico

Na Figura 5.30 têm-se os resultados obtidos no ensaio de prova de carga sobre placa para cada estaca ensaiada no trecho do CEASA.

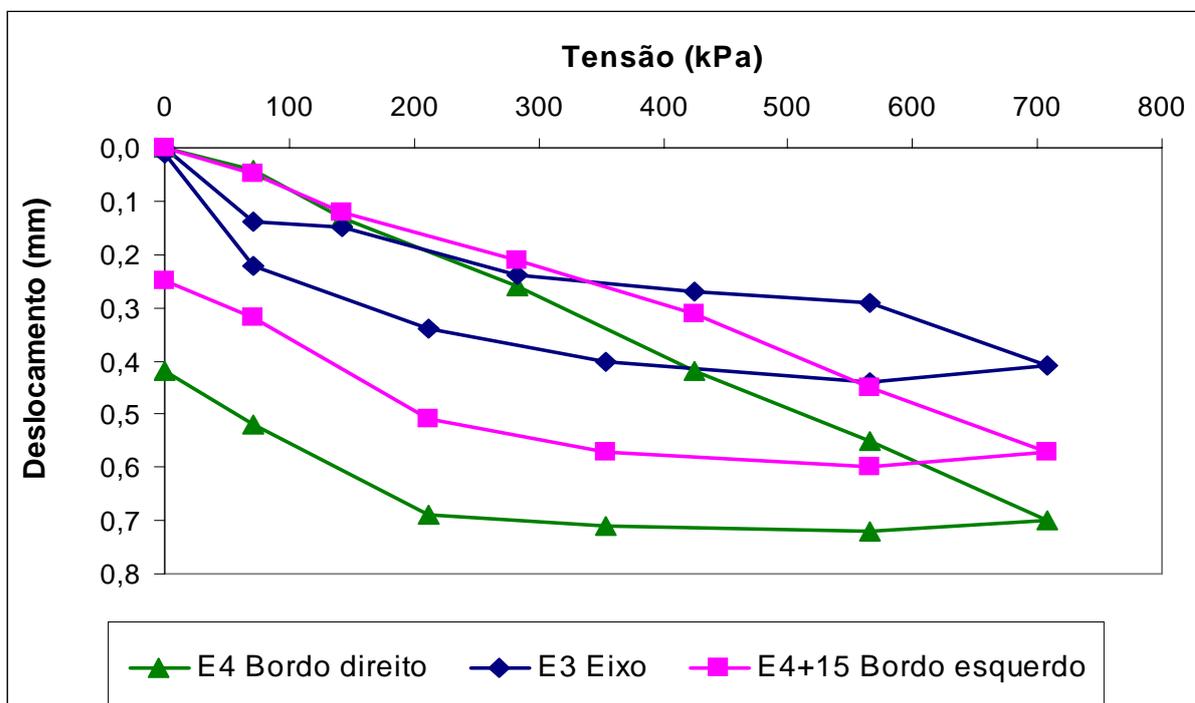


Figura 5.30 Curvas Tensão x Deslocamento no trecho do CEASA

Verifica-se que no eixo da via (Estaca 3), o valor obtido para o deslocamento total é menor do que os valores obtidos para os bordos (Estaca 4 e Estaca 4+15). Em termos de deslocamento elástico, os valores são semelhantes. Este melhor comportamento do eixo pode ser explicado pelo fato de não haver tráfego neste ponto e pela ausência de eventuais interferências da água da chuva. Mesmo assim, com esta variação, tem-se que com os valores médios obtidos para este período o trecho apresenta desempenho estrutural satisfatório.

Na Tabela 5.27 tem-se os valores médios obtidos nos ensaios realizados em períodos anteriores a novembro de 2006 (OLIVEIRA, 2007).

Tabela 5.27 Resultados médios obtidos nos ensaios de prova de carga (OLIVEIRA, 2007)

Período	T=560 kPa	
	d_t (mm) médio	d_e (mm) médio
Janeiro/04	1,25	0,49
Mai/05	0,75	0,29
Novembro/05	0,79	0,22
Mai/06	0,84	0,24

Obs: d_t = deslocamento total; d_e = deslocamento elástico

Observa-se que os valores obtidos em novembro/2006 (Tabela 5.26) são menores que os valores obtidos por Oliveira (2007) (Tabela 5.27). Até o momento, percebe-se que no trecho do CEASA existe melhora no desempenho do pavimento ao longo do tempo. Isto pode ser justificado pelas reações que continuam ocorrendo nos componentes do agregado reciclado, o que pode gerar ganho de resistência.

Na Tabela 5.28 estão apresentados os dados obtidos no ensaio de prova de carga sobre placa para os diferentes períodos. Assim como foi realizado para o ensaio do trecho do CEASA, para a tensão de 560 kPa, que corresponde à tensão utilizada no dimensionamento de pavimentos, obteve-se o deslocamento total (d_t) e o deslocamento elástico (d_e). E na Figura 5.31 têm-se os resultados obtidos no ensaio de prova de carga sobre placa para cada estaca ensaiada no trecho do setor Recanto das Minas Gerais.

Tabela 5.28 Resultados obtidos nos ensaios de prova de carga no trecho do Recanto

Período	T=560 kPa					
	E1 + 10 BE		E3 + 10 Eixo		E5 + 10 BD	
	d_t (mm)	d_e (mm)	d_t (mm)	d_e (mm)	d_t (mm)	d_e (mm)
Abril/05*	1,20	0,74	0,60	0,20	1,70	0,90
Janeiro/06*	1,16	0,70	0,60	0,42	1,20	0,78
Novembro/06	0,95	0,22	0,68	0,20	1,17	0,25
MÉDIA	1,10	0,55	0,63	0,27	1,36	0,64

* Ribeiro (2006)

Obs: BD = bordo direito; BE = bordo esquerdo; d_t = deslocamento total; d_e = deslocamento elástico

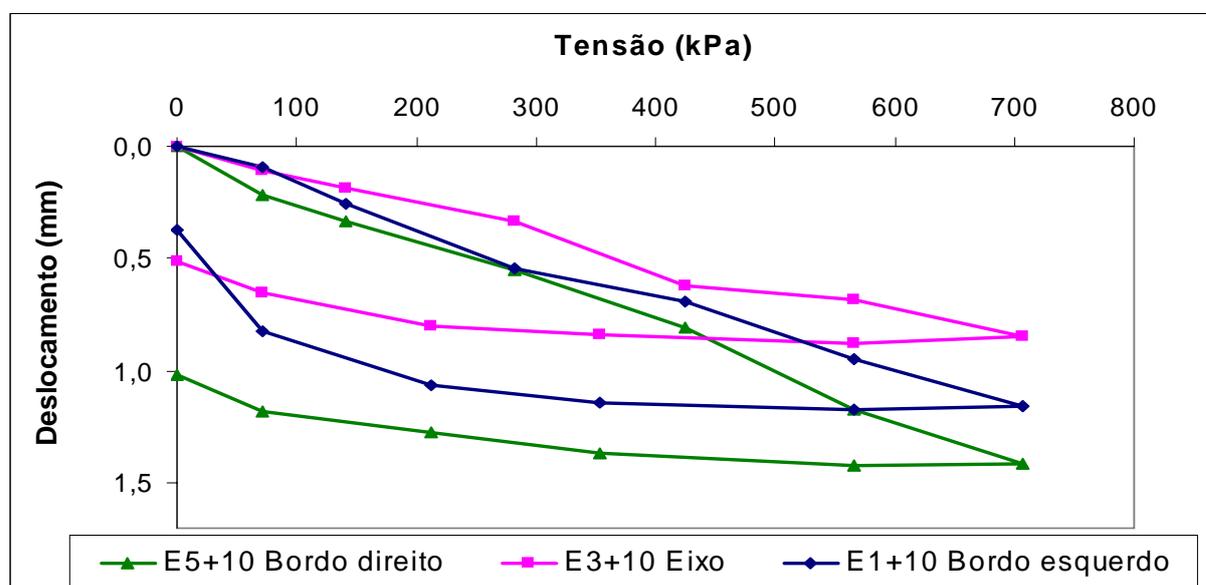


Figura 5.31 Curvas tensão x deslocamento no trecho Recanto

Observa-se na Tabela 5.28 e na Figura 5.31 que os deslocamentos medidos no ensaio de um período para outro diminuíram sendo que essa variação foi mais significativa para as estacas localizadas nos bordos do pavimento (E1+10 e E5+10) mostrando a melhora da estrutura executada com agregado reciclado ao longo do tempo. Uma possível explicação está relacionada com as reações pozolânicas do agregado reciclado que ainda pode gerar ganho de resistência ao longo do tempo. Assim, verifica-se que os dados obtidos no ensaio de prova de carga no trecho do Recanto estão divergentes daqueles obtidos no ensaio de viga Benkelman, talvez seja pela maior variabilidade no ensaio de viga.

De acordo com os resultados encontrados nos dois trechos experimentais, percebe-se que os valores de d_t e d_e do trecho do CEASA são menores do que o trecho do Recanto, o que demonstra que o trecho do CEASA apresenta melhor comportamento. Talvez isto possa ser explicado pelo fato de ter ocorrido controle tecnológico durante a execução do trecho do CEASA; ao contrário do que ocorreu no trecho do Recanto. Mesmo assim, pode-se constatar que os pavimentos estudados apresentaram bom comportamento estrutural.

5.4.3 PENETRÔMETRO DINÂMICO DE CONE

A Tabela 5.29 demonstra os resultados da profundidade, espessura e DN (Índice de Penetração) obtidos no ensaio de Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP) no trecho do CEASA.

Tabela 5.29 Resultados obtidos no ensaio de DCP no trecho do CEASA

Estaca	Camada	Profundidade (cm)	Espessura (cm)	DN (mm/golpe)
E4 BD	1	14,1	14,1	3,4
	2	24,8	10,7	2,7
	3	50	25,2	7,6
	4	82,5	32,5	27,1
E3 Eixo	1	15	15	2,8
	2	30,1	15,1	1,4
	3	84	53,9	6,7
E4+15 BE	1	18,7	18,7	2,6
	2	43,2	24,5	10,2
	3	82,5	39,3	32,8

Obs: BD = bordo direito; BE = bordo esquerdo; DN = índice de penetração obtido no ensaio com DPC

Nas figuras do Apêndice A tem-se as curvas de DCP que consistem em uma representação do número de golpes acumulado para a penetração do equipamento com a profundidade, onde as ordenadas indicam as profundidades e, as abscissas, o número acumulado de golpes para alcançar estas profundidades. As inclinações das retas representam os índices de penetração (DN) em mm/golpe, os quais são obtidos por meio da razão entre a profundidade e o número de golpes necessários para penetrar até a respectiva profundidade.

Nas Figuras A.1, A.2 e A.3 e de acordo com a Tabela 5.29, verifica-se a existência de uma primeira camada mais resistente, cuja espessura varia de 14,0 cm a 18,7 cm, correspondendo à base executada com agregado reciclado no trecho do CEASA. Em seguida, tem-se uma segunda camada, correspondente à sub-base executada com agregado reciclado, com espessura variando entre 10,7 a 24,5 cm. E a terceira camada menos resistente, refere-se às profundidades maiores do subleito variando entre 25,2 a 53,9 cm, sendo que a estaca E4 no bordo direito apresentou uma quarta camada de 32,5 cm.

A Tabela 5.30 mostra a comparação entre os dados de Oliveira (2007) com os dados obtidos nesta pesquisa.

Tabela 5.30 Resultados obtidos no ensaio de DCP em diferentes períodos no trecho CEASA

Período	DN médio(mm/golpe)		
	Base	Sub-base	Subleito
Novembro/03*	--	--	2,8
Dezembro/03*	3,2	1,8	5,6
Mai/05*	1,8	1,6	4,7
Novembro/05*	2,4	1,8	5,5
Mai/06*	2,5	1,7	6,2
Novembro/06	2,9	4,7	15,7

* Oliveira (2007);

Obs: DN = índice de penetração obtido no ensaio com DPC

Conforme a Tabela 5.30 e as Figuras 5.32 a 5.34 verifica-se que:

- Para o subleito tem-se aumento do DN ao longo do tempo, ou seja, ao longo da vida útil da via o desempenho do subleito tende a piorar. De novembro/2003 (durante a construção) à novembro/2006, o valor de DN aumentou cerca de 2,8 para 15,7 mm/golpe;
- Para a camada de sub-base executada com agregado reciclado observaram-se valores de DN constantes até maio/2006. No entanto, em novembro/2006 verificou-se certo aumento deste parâmetro (de 1,8 a 4,7 mm/golpe). Assim, pode-se observar que somente após 3 anos de construção da via a sub-base apresentou alguma alteração no seu comportamento;

- Para a camada de base executada com agregado reciclado, verificou-se um valor mais alto de DN logo após a construção do trecho. No entanto, ao longo da vida útil a base apresentou valores de DN quase estáveis e pequenos, o que demonstra o bom desempenho da camada.

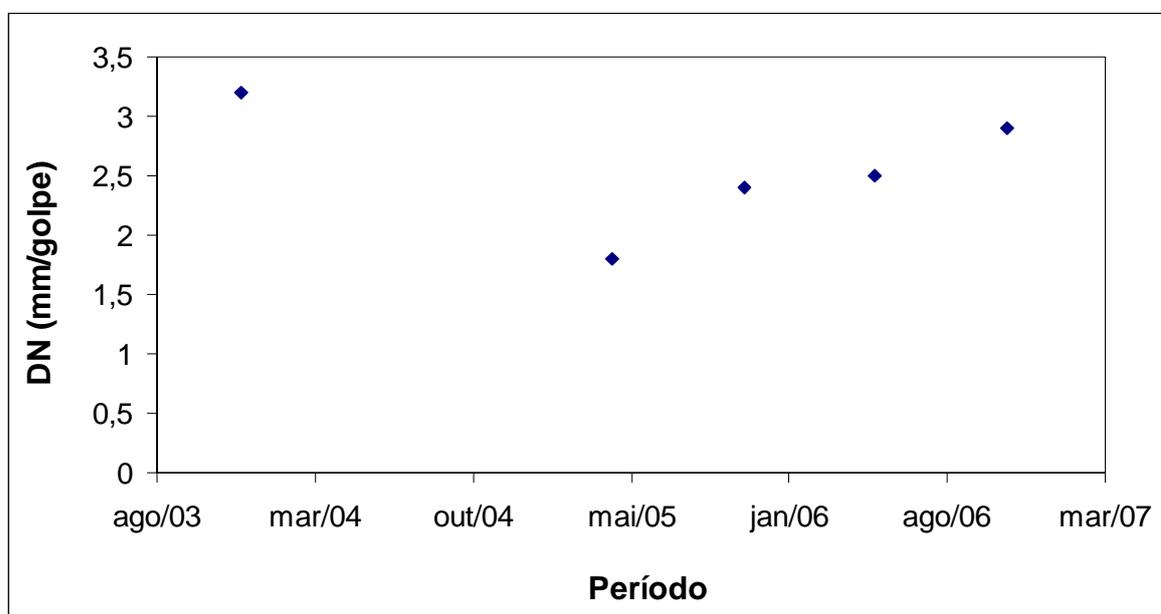


Figura 5.32 Médias de DN obtidas para a camada de base do trecho do CEASA em diferentes períodos

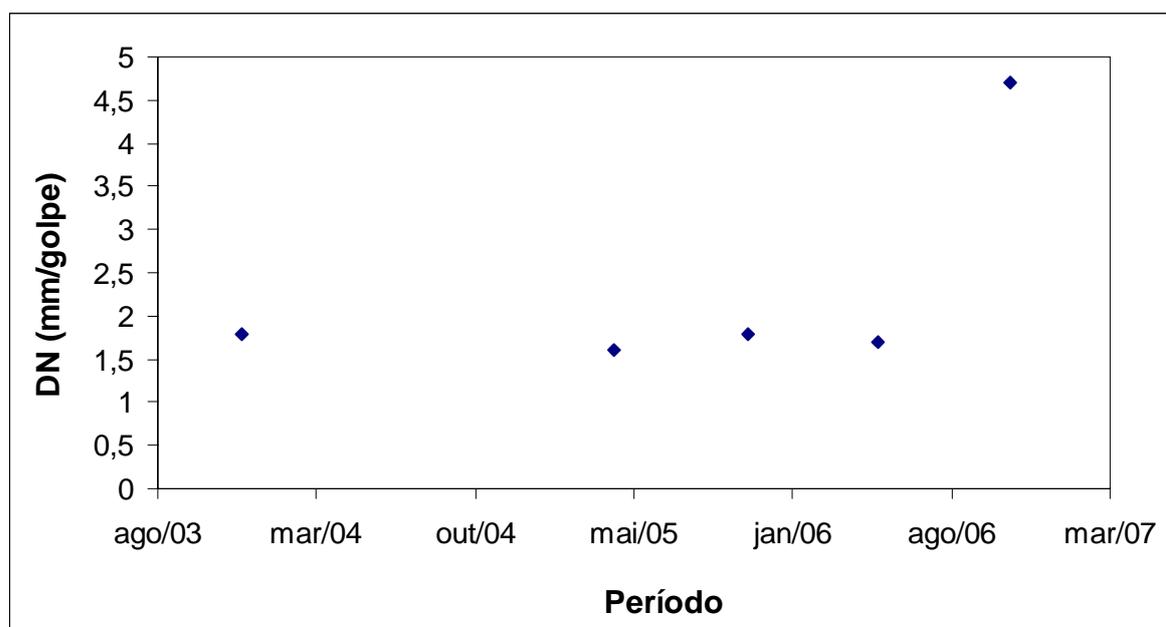


Figura 5.33 Médias de DN obtidas para a camada de sub-base do trecho do CEASA em diferentes períodos

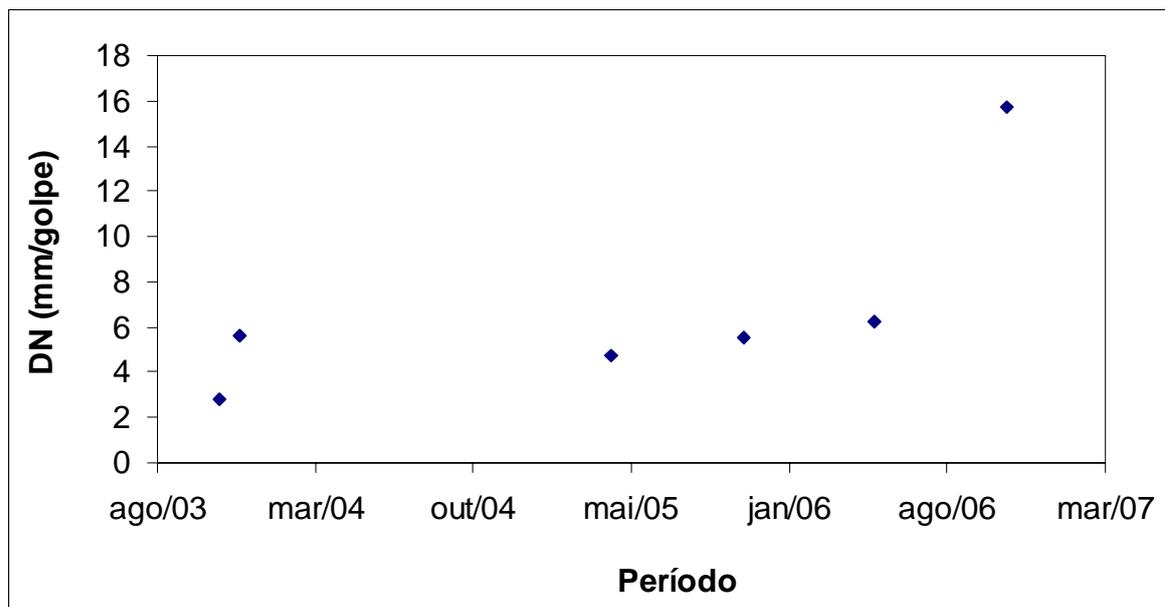


Figura 5.34 Médias de DN obtidas para o subleito do trecho do CEASA em diferentes períodos

Na literatura, existem várias correlações para calcular o valor do *CALIFORNIA BEARING RATIO* (CBR) em função do Índice de Penetração (DN). Para esta pesquisa, adotou-se as correlações realizadas em pavimentos brasileiros. A seguir são apresentados os valores obtidos tanto para o agregado reciclado utilizado nas camadas de sub-base e base como para o solo do subleito para o trecho do CEASA.

Kryckyj e Trichês (2000) realizaram estudos de laboratório com material proveniente de um local de descarte de entulho em Florianópolis – SC, em diferentes condições de saturação, a fim de obter uma correlação entre os valores de DN x CBR para esta mistura. Levando-se em conta que, geralmente, o material no campo encontra-se com umidade próxima da ótima e o ensaio de CBR é realizado em condições de saturação, foram determinadas duas curvas de correlação DN x CBR, sendo uma com amostra saturada (Equação 5.1) e outra não saturada (Equação 5.2).

$$CBR = 121,02 \times (DN)^{-0,659} \quad (5.1)$$

$$CBR = 126,35 \times (DN)^{-0,6354} \quad (5.2)$$

onde:

CBR = capacidade de suporte (%);

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

Para esta pesquisa, decidiu-se analisar separadamente as relações propostas por Kryckyj e Trichês (2000), pois as equações foram definidas baseadas em amostras de agregado reciclado. A Tabela 5.31 apresenta os valores de CBR obtidos a partir dessas correlações.

Tabela 5.31 Valores de CBR obtidos por correlação específica para agregado reciclado em base e sub-base de pavimentos, com os dados obtidos no trecho do CEASA

Estaca	Camada	Espessura (cm)	DN (mm/golpe)	CBR (%)	
				Amostra saturada	Amostra não saturada
E4	Base	14,1	3,4	54,0	58,0
BE	Sub-base	10,7	2,7	62,9	67,2
E3	Base	15,0	2,8	61,4	65,7
Eixo	Sub-base	15,1	1,4	96,9	102,0
E4+15	Base	18,7	2,6	64,5	68,9
BD	Sub-base	24,5	10,2	26,2	28,9

Obs: BE = bordo esquerdo; BD = bordo direito; DN = índice de penetração obtido no ensaio com DPC; CBR = *CALIFORNIA BEARING RATIO*

Os valores de CBR obtidos variaram de 54,0 a 64,5%, para a base e de 26,2 a 96,9% para a sub-base na condição saturada, e de 58,0 a 68,9% para a base e de 28,9 a 102,0% para sub-base na condição não saturada. Em algumas estacas (E4 e E3) tem-se que a sub-base está mais resistente que a base. No caso deste trecho, isso pode ser explicado pelo fato de ter ocorrido mudança na composição das camadas conforme relatado por Silva (2004). Com exceção da E4, verifica-se que as camadas atendem as especificações tradicionais para pavimentação: sub-base com $CBR \geq 20\%$ e base com $CBR \geq 60\%$ (para vias de baixo volume de tráfego).

Na literatura, existem várias correlações para calcular o valor do CBR de solos em função de DN. Estudos com DCP realizados por Heyn em 1986 e em rodovias no estado do Paraná, resultaram na correlação apresentada na Equação 5.3 (CARDOSO; TRICHÊS, 1998):

$$CBR = 443,5 \times (DN)^{-1,3} \quad (5.3)$$

onde:

CBR = capacidade de suporte (%);

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

No Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) em 1997, Oliveira e Vertamtti estudando solos tradicionais em rodovias no estado de São Paulo chegaram à Equação 5.4 (CARDOSO; TRICHÊS, 1998):

$$\log CBR = 2,49 - 1,057 \times (\log DN) \quad (5.4)$$

onde: CBR e DN são variáveis já definidas anteriormente.

Na Tabela 5.32 tem-se os valores de CBR do solo do subleito obtidos por meio dessas correlações. Observa-se que, com exceção da E3, os valores obtidos foram inferiores a 10%, sendo esta uma característica conhecida dos subleitos brasileiros.

Tabela 5.32 Valores de CBR obtidos por correlação de dois autores para subleito de pavimentos

Estaca	Camada	Espessura (cm)	DN (mm/golpe)	CBR (%)	
				Heyn	ITA
E4 BE	Subleito	32,5	27,1	6,1	9,4
E3 Eixo	Subleito	53,9	6,7	37,4	41,4
E4+15 BD	Subleito	39,3	32,8	4,7	7,7

Obs: BE = bordo esquerdo; BD = bordo direito; DN = índice de penetração obtido no ensaio com DPC; CBR = CALIFORNIA BEARING RATIO

Compilando os valores médios obtidos para o DN e seus respectivos CBR tem-se os dados apresentados na Tabela 5.33

Tabela 5.33 Valores médios de DN e CBR obtidos por camadas no trecho do CEASA

Camada	DN médio (mm/golpe)	CBR médio (%)
Camada 1 - BASE	2,9	60,0
Camada 2 - SUB-BASE	4,8	62,0
Camada 3 - SUBLEITO	22,2	16,0

Obs: DN = índice de penetração obtido no ensaio com DPC; CBR = CALIFORNIA BEARING RATIO

Outro dado que ainda pode ser obtido do ensaio com o DCP é o diagrama estrutural. Este é uma representação derivada da curva de DCP onde se representa o índice de penetração (DN) do DCP em função da profundidade. O diagrama indica nas ordenadas a profundidade e nas abscissas o valor de DN (Figura 5.35). Quando esse gráfico é constante, tem-se uma uniformidade das propriedades do material. Sua variação implica numa mudança de material ou de camada.

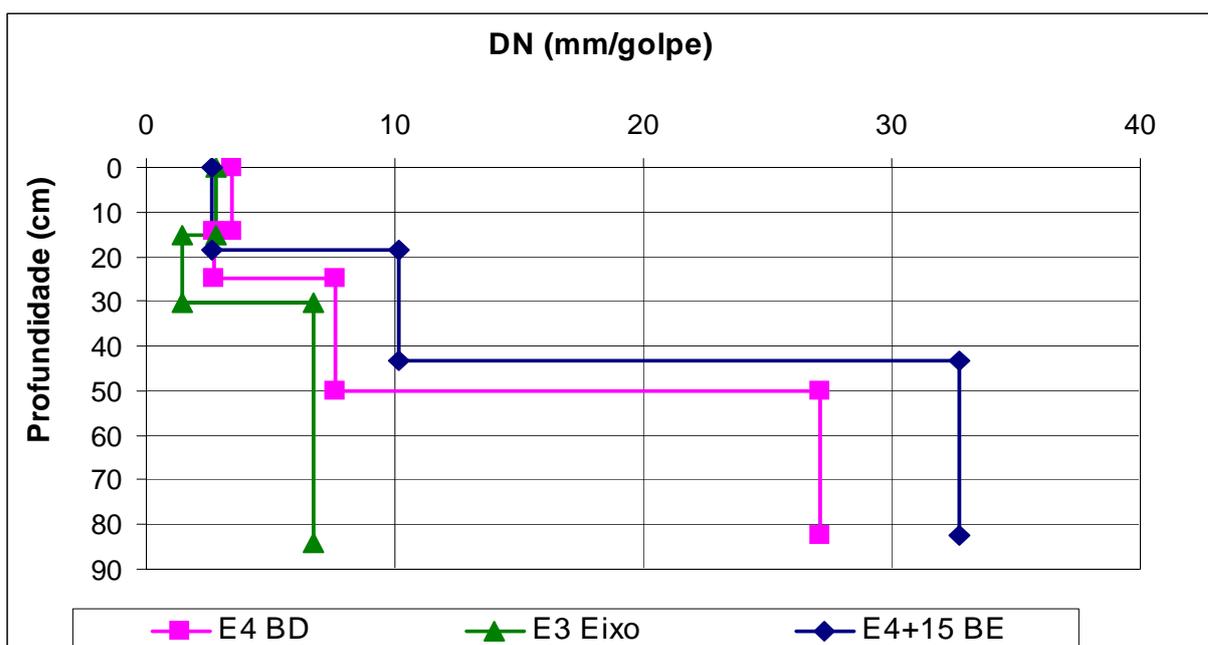


Figura 5.35 Diagrama Estrutural nos ensaios de DCP no trecho do CEASA

Com base nos diagramas estruturais foram definidos os perfis do pavimento do trecho do CEASA (Figura 5.36). Observa-se que mesmo com controle realizado durante a construção do trecho, houve variação nas espessuras das camadas. Neste caso, o perfil da E4 não atende ao projeto original do trecho, onde a sub-base e a base deveriam apresentar camadas de 15 cm de espessura cada.

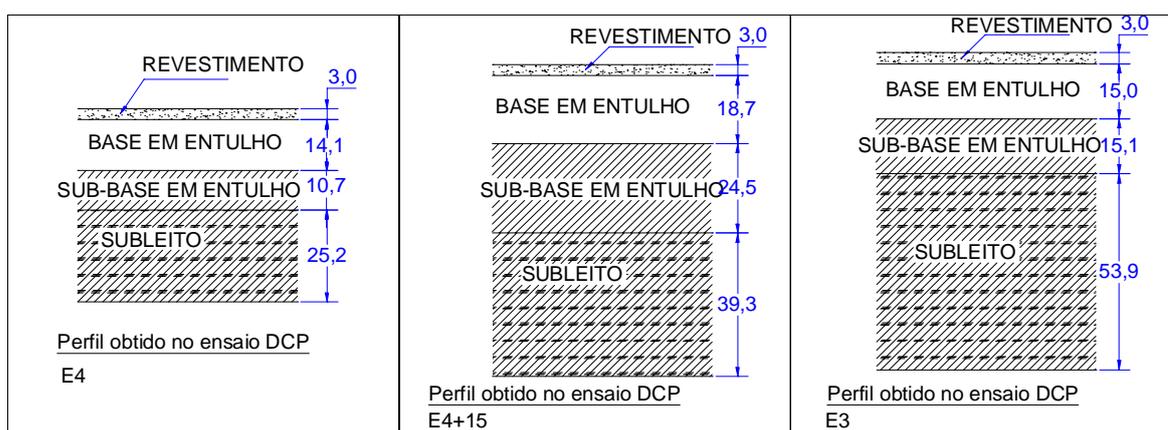


Figura 5.36 Perfis obtidos no ensaio de DCP para o trecho do CEASA

Nas Figuras A.4 a A.12 do Apêndice A e de acordo com a Tabela 5.34, que apresenta os resultados obtidos no ensaio de DCP no trecho do Recanto, pode-se observar a existência de três camadas distintas: a primeira representa a base executada com agregado reciclado, com uma espessura variando de 9,9 cm a 22,3 cm; a segunda correspondendo à parte mais superficial do subleito, com espessura variando entre 9,0 e 29,3 cm. Por fim, tem-

se a terceira camada referente a profundidades maiores do subleito. Observa-se que a parte inicial do subleito está mais compactada.

Tabela 5.34 Resultados obtidos no ensaio de DCP no trecho do Recanto

Estaca	Camada	Profundidade (cm)	Espessura (cm)	DN (mm/golpe)
E1+10 BE	1	19,5	19,5	7,2
	2	39,7	20,2	33,7
	3	83,5	43,8	73,0
E1+10 Eixo	1	22,3	22,3	4,1
	2	39,1	16,8	14,0
	3	84,0	44,9	29,9
E1+10 BD	1	21	21	8,8
	2	33,8	12,8	21,3
	3	83,7	49,9	55,4
E3+10 BE	1	13,2	13,2	4,4
	2	29,0	15,8	17,6
	3	83,0	54,0	45,0
E3+10 Eixo	1	9,9	9,9	3,3
	2	20,2	10,3	6,9
	3	83,3	63,1	30,0
E3+10 BD	1	12,0	12,0	4,4
	2	21,0	9,0	15,0
	3	83,5	62,5	52,1
E5+10 BE	1	21,2	21,2	7,1
	2	44,5	23,3	38,8
	3	85,0	40,5	67,5
E5+10 Eixo	1	13,9	13,9	3,1
	2	32,7	18,8	10,4
	3	82,2	49,5	27,5
E5+10 BD	1	16,8	16,8	5,6
	2	29,5	12,7	21,2
	3	86,2	56,7	94,5

Obs: BD = bordo direito; BE = bordo esquerdo; DN = índice de penetração obtido no ensaio com DPC

Conforme apresentado na Tabela 5.35 e nas Figuras 5.37 a 5.39, ao comparar os dados obtidos nesta pesquisa com aqueles determinados por Ribeiro (2006), verifica-se que ocorre aumento no valor de DN ao longo do tempo em todas as camadas.

Tabela 5.35 Resultado obtidos no ensaio de DCP em diferentes períodos para o trecho do Recanto

Período	DN médio(mm/golpe)		
	Base	Subleito 1	Subleito 2
Abril/05*	3,1	11,1	40,1
Janeiro/06*	3,8	15,5	43,0
Novembro/06	5,3	19,9	52,8

* Ribeiro (2006)

Obs: DN = índice de penetração obtido no ensaio com DPC

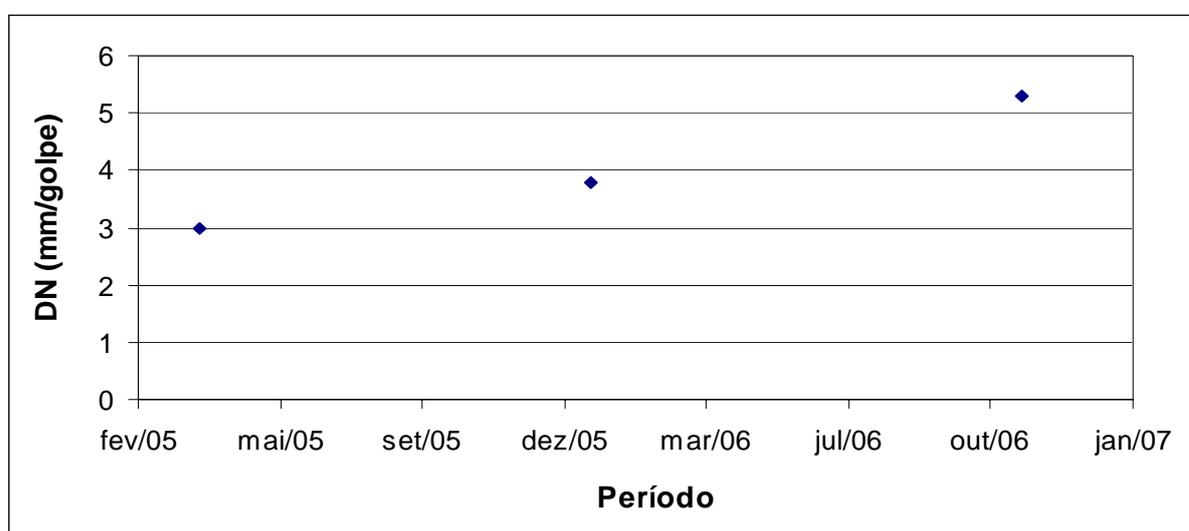


Figura 5.37 Médias de DN obtidas para a camada de base em diferentes períodos no trecho do Recanto

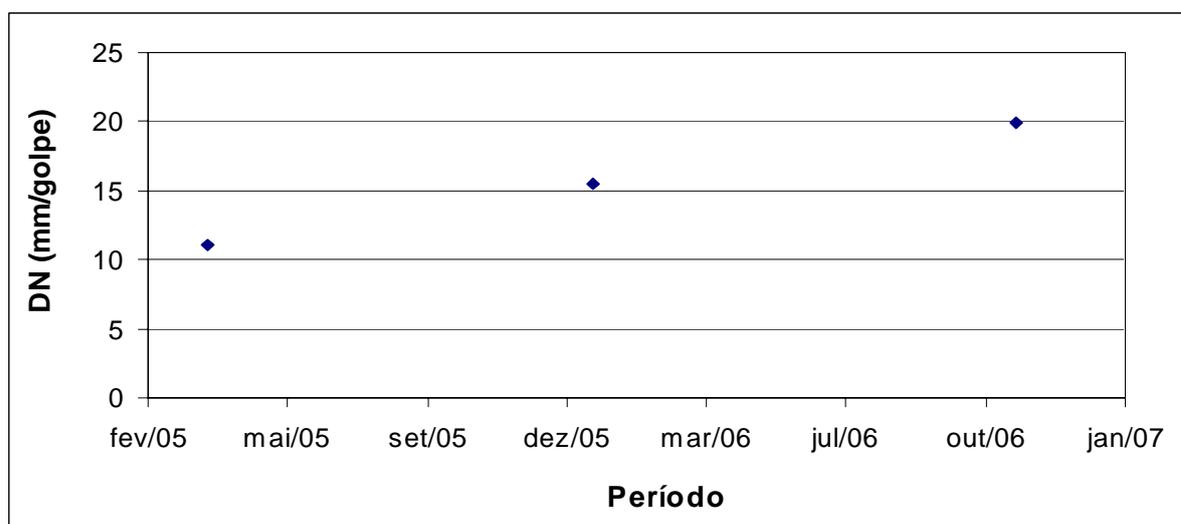


Figura 5.38 Médias de DN obtidas para a camada de subleito compactado em diferentes períodos no trecho do Recanto

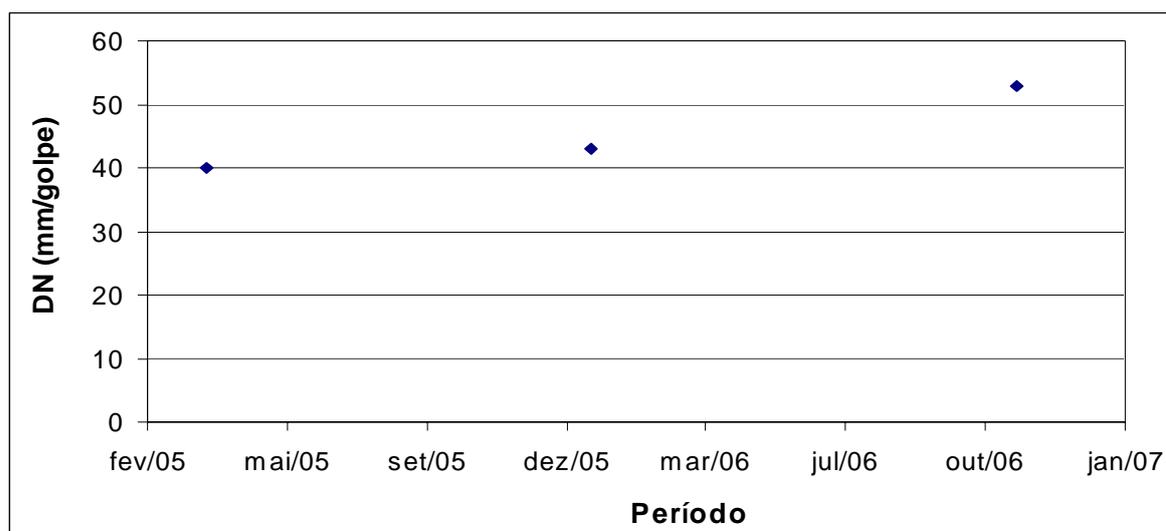


Figura 5.39 Médias de DN obtidas para a camada de subleito natural em diferentes períodos no trecho do Recanto

Assim, tem-se que pode estar acontecendo uma queda de desempenho do pavimento. No entanto, esta queda é igual em todas as camadas e ainda não atingiu níveis que comprometam a qualidade da estrutura. A base de agregado reciclado ainda pode ser considerada tecnicamente viável. Outro aspecto que pode ser ressaltado é que, mais umas vez, as condições do trecho do CEASA estão melhores que o trecho do Recanto.

Utilizando as mesmas correlações entre DN e CBR aplicadas para as análises realizadas no trecho do CEASA, na Tabela 5.36 tem-se os valores de CBR determinados para a base do trecho do Recanto considerando tanto a amostra saturada como não saturada.

Tabela 5.36 Valores de CBR obtidos por correlação específica para agregado reciclado em base e sub-base de pavimentos

Estaca	Camada	Espessura (cm)	DN (mm/golpe)	CBR (%)	
				Amostra saturada	Amostra não saturada
E1+10 BE	Base	19,5	7,2	32,9	36,0
E1+10 Eixo	Base	22,3	4,1	47,7	51,5
E1+10 BD	Base	21,0	8,8	28,9	31,7
E3+10 BE	Base	13,2	4,4	45,6	49,3
E3+10 Eixo	Base	9,9	3,3	55,1	59,2
E3+10 BD	Base	12,0	4,4	45,6	49,3
E5+10 BE	Base	21,2	7,1	33,2	36,4
E5+10 Eixo	Base	13,9	3,1	57,4	61,6
E5+10 BD	Base	16,8	5,6	38,9	42,3

Obs: BE = bordo esquerdo; BD = bordo direito; DN = índice de penetração obtido no ensaio com DPC; CBR = CALIFORNIA BEARING RATIO

Com os dados obtidos na Tabela 5.36, observa-se que para as correlações utilizadas, o CBR da base apresentou valor médio de 43% para a amostra saturada e de 46% para a amostra não saturada. Neste caso, a sua utilização fica limitada apenas para base de pavimentos urbanos com baixo volume de tráfego ($CBR \geq 40\%$) ou como sub-base ($CBR \geq 20\%$).

De acordo com as correlações citadas por Cardoso e Trichês (1998) foi calculado o CBR para as duas últimas camadas encontradas no ensaio de DCP (Tabela 5.33), as quais foram chamadas de subleito compactado e subleito natural. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.37.

Tabela 5.37 Valores de CBR obtidos por correlação de dois autores para subleito de pavimentos

Estaca	Camada	Espessura (cm)	DN (mm/golpe)	CBR (%)	
				Heyn	ITA
E1+10	Subleito Compactado	20,2	33,7	4,6	7,5
BE	Subleito Natural	43,8	73,0	1,7	3,3
E1+10	Subleito Compactado	16,8	14,0	14,3	19,0
Eixo	Subleito Natural	44,9	29,9	5,3	8,5
E1+10	Subleito Compactado	12,8	21,3	8,3	12,3
BD	Subleito Natural	49,9	55,4	2,4	4,4
E3+10	Subleito Compactado	15,8	17,6	10,7	14,9
BE	Subleito Natural	54,0	45,0	3,1	5,5
E3+10	Subleito Compactado	10,3	6,9	36,0	40,1
Eixo	Subleito Natural	63,1	30,0	5,3	8,5
E3+10	Subleito Compactado	9,0	15,0	13,1	17,7
BD	Subleito Natural	62,5	52,1	2,6	4,7
E5+10	Subleito Compactado	23,3	38,8	3,8	6,5
BE	Subleito Natural	40,5	67,5	1,9	3,6
E5+10	Subleito Compactado	18,8	10,4	21,1	26,0
Eixo	Subleito Natural	49,5	27,5	6,0	9,3
E5+10	Subleito Compactado	12,7	21,2	8,4	12,2
BD	Subleito Natural	56,7	94,5	1,2	2,5

Obs: BE = bordo esquerdo; BD = bordo direito; DN = índice de penetração obtido no ensaio com DPC; CBR = CALIFORNIA BEARING RATIO

O subleito compactado e o subleito natural apresentaram, em sua maioria, valores de CBR, maiores que 10% (Tabela 5.37). Como esses valores foram obtidos de correlação, pode ser que eles estejam sub ou superestimados. No entanto, isso não muda o fato de que as duas primeiras camadas estão mais compactas. A terceira camada provavelmente corresponde ao subleito natural.

Compilando os valores médios obtidos para DN e seus respectivos CBR tem-se os dados apresentados na Tabela 5.38. Comparando com os valores obtidos por Ribeiro (2006) tem-se que nesta pesquisa os valores de CBR diminuíram.

Tabela 5.38 Valores médios de CBR obtidos por camadas para o trecho do Recanto

Camada	CBR médio(%)	CBR médio(%) Modificado de Ribeiro (2006)
Base	43,0	55,8
Subleito compactado	15,6	21,8
Subleito Natural	4,4	6,8

Na Figura 5.40 tem-se o diagrama estrutural obtido para a pista do Recanto e na Figura 5.41 os perfis obtidos a partir deste diagrama. Consta-se uma grande variação na espessura das camadas, sendo que este pode ser um dos motivos pelo qual alguns ensaios de campo realizados neste trecho não conseguem apresentar repetibilidade, conforme foi detectado na viga Benkelman.

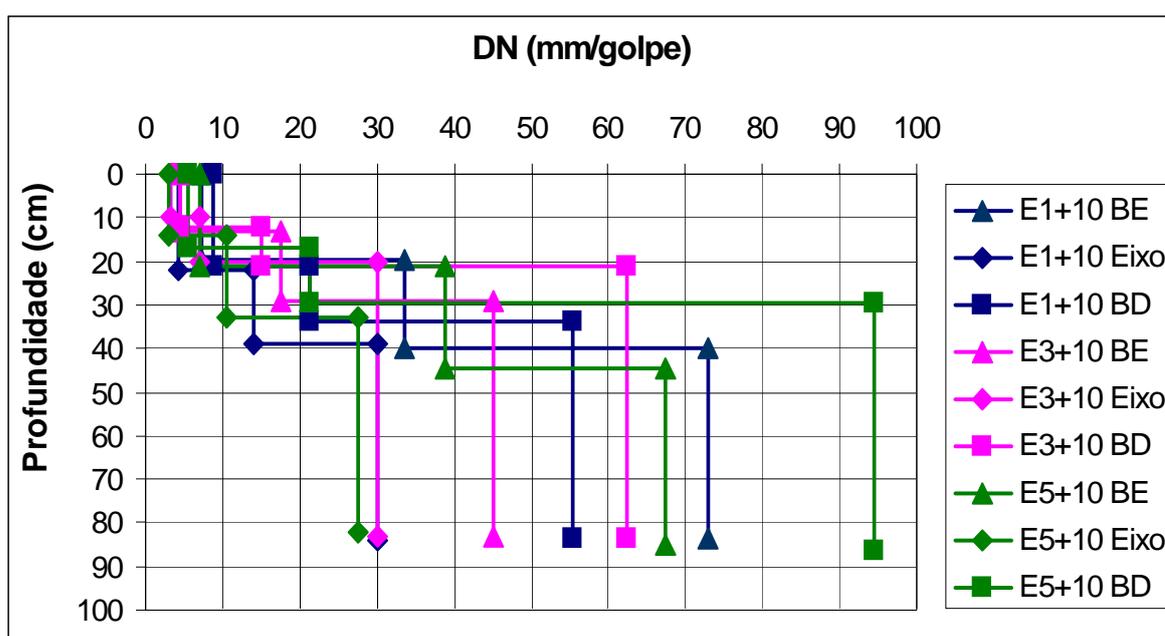


Figura 5.40 Diagrama Estrutural nos ensaios de DCP no trecho do Recanto

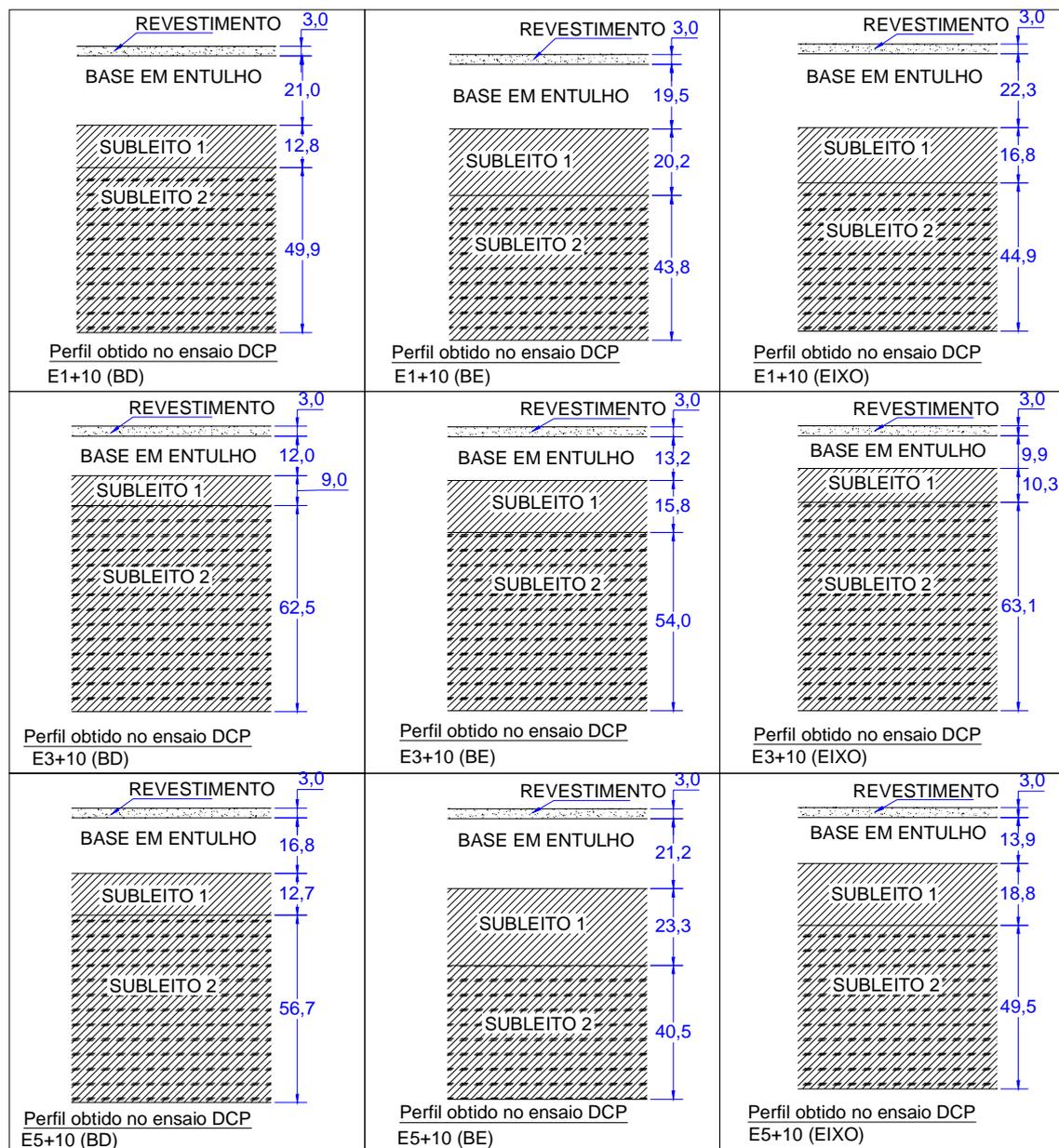


Figura 5.41 Perfis obtidos no ensaio de DCP no trecho do Recanto

5.5 RETROANÁLISES

Com os dados obtidos nos ensaios de viga Benkelman e prova de carga sobre placa é possível determinar os módulos de elasticidade da estrutura do pavimento realizando procedimentos da retroanálise.

Para os trechos experimentais estudados foi definida uma malha de elementos retangulares com 3m de largura e 3m de profundidade, composta por 1600 elementos e 5147 nós (Figura 5.42). Na análise do ensaio de prova de carga, a placa de aço também foi

discretizada, considerando-se seu módulo de elasticidade igual a 2000.000 MPa e o coeficiente de Poisson igual a 0,27. Sobre ela foi aplicada a tensão de 560 kPa uniformemente distribuída.

Na análise do ensaio de viga Benkelman, a tensão de 560 kPa foi aplicada diretamente sobre o revestimento no raio de contato pneu – pavimento. As espessuras das camadas foram definidas com base nos perfis obtidos no ensaio com o Penetrômetro Dinâmico de Cone (Figuras 5.36 e 5.41).

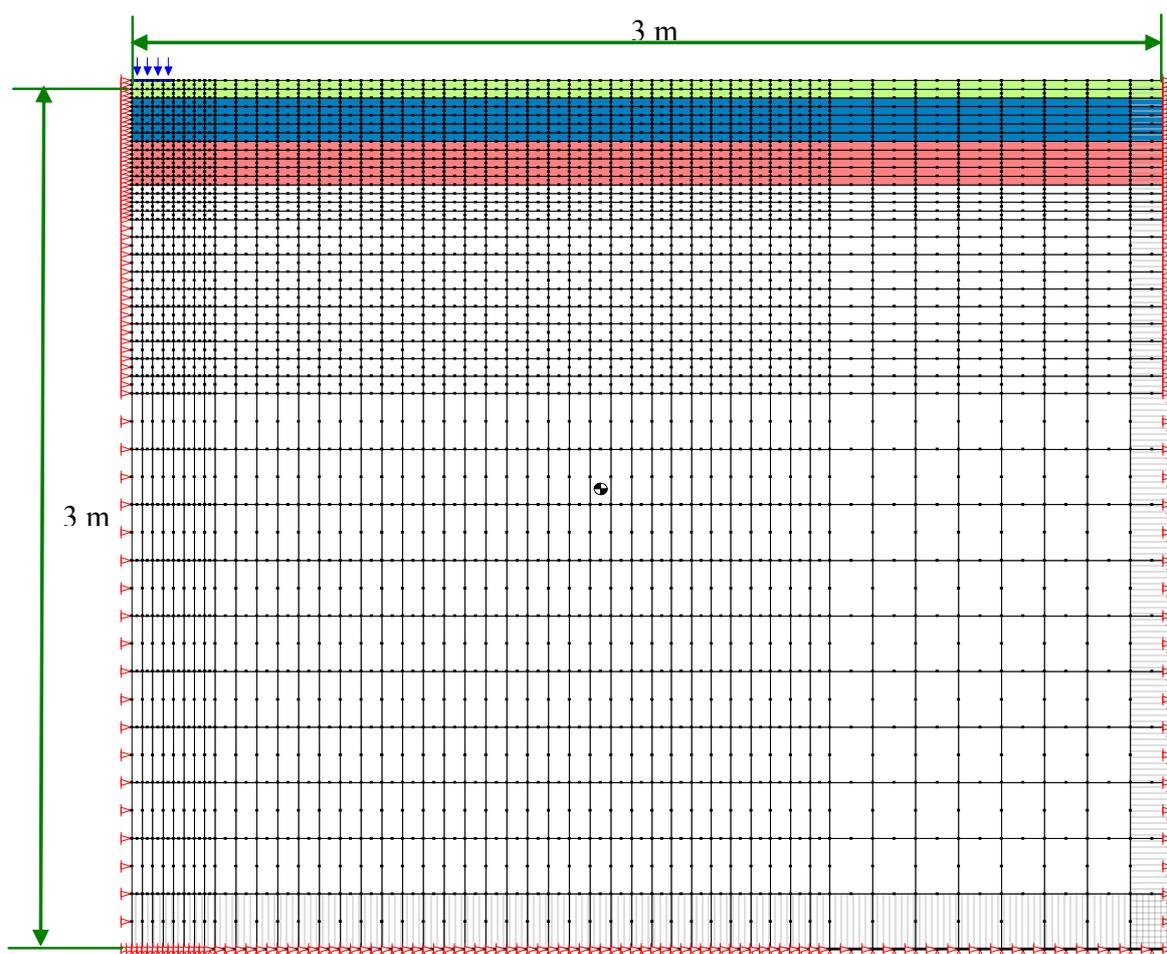


Figura 5.42 Exemplo de uma malha de elementos retangulares

Para as condições de controle adotou-se:

- Eixo vertical abaixo da aplicação da carga: deslocamento horizontal restringido;
- Eixo vertical a 3mm do eixo central: deslocamento horizontal e vertical restringidos;
- Eixo horizontal: deslocamento horizontal e vertical restringidos.

Os coeficientes de Poisson considerados para as camadas de subleito, base e revestimento do trecho do Recanto foram fixados em função do tipo de material utilizado:

para o subleito (solo fino) adotou-se 0,40, para a base de agregado reciclado 0,35 e para o revestimento em CBUQ 0,33. Já para o trecho do CEASA adotou-se o coeficiente de 0,35 para a sub-base e os demais foram considerados iguais aos do Recanto.

Com base nos dados de ensaios realizados no trecho experimental com o Penetrômetro Dinâmico de Cone, verificou-se que no trecho do Recanto, o subleito tem duas camadas de resistência diferentes. Essa constatação deve ser considerada nas retroanálises. Assim, foram consideradas a camada denominada Subleito 1 para a mais superficial e mais resistente e a camada Subleito 2 para a mais profunda e menos resistente. No caso, do trecho do CEASA, considerou-se a base e a sub-base de agregado reciclado assente sobre o subleito. Nas análises, optou-se ainda por fixar o valor do módulo total (E_t) do revestimento em 2000 MPa e para o módulo elástico (E_e) 4000 MPa, para os dois trechos. Os resultados obtidos estão representados a seguir em função do tipo de ensaio analisado.

5.5.1 VIGA BENKELMAN

A partir das bacias de deslocamento médias determinadas nos ensaios, foram selecionados os valores médios de D_0 para realizar as retroanálises. Assim, obteve-se apenas um valor de módulo para cada camada. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.39 para o trecho do CEASA e a Tabela 5.40 para o trecho do Recanto.

Tabela 5.39 Resultados dos módulos retroanalizados dos ensaios de viga Benkelman no trecho do CEASA

Período	$D_0(x0,01mm)$	$E_{\text{Revestimento}}$ (MPa)	E_{Base} (MPa)	$E_{\text{Sub-base}}$ (MPa)	E_{Subleito} (MPa)
Janeiro/04	48	2000	500	350	60
Setembro/04	41	2000	650	600	60
Mai/05	64	2000	300	200	60
Novembro/05	62	2000	330	200	60
Mai/06	60	2000	350	200	60
Novembro/06	64	2000	300	200	60

Obs: D_0 = deflexão real medida no ponto de prova; $E_{\text{Revestimento}}$ = módulo retroanalizado no revestimento; E_{Base} = módulo retroanalizado na base; $E_{\text{Sub-base}}$ = módulo retroanalizado na sub-base; E_{Subleito} = módulo retroanalizado no subleito

Tabela 5.40 Resultados dos módulos retroanalizados dos ensaios de viga Benkelman no trecho do Recanto das Minas Gerais

Período	$D_0(x0,01mm)$	$E_{Revestimento}$ (MPa)	E_{Base} (MPa)	$E_{Subleito 1}$ (MPa)	$E_{Subleito 2}$ (MPa)
Abril/05*	86	2000	450	80	30
Janeiro/06*	62	2000	470	90	60
Novembro/06	91	2000	400	80	30

*Ribeiro (2006)

Obs: D_0 = deflexão real medida no ponto de prova; $E_{Revestimento}$ = módulo retroanalizado no revestimento; E_{Base} = módulo retroanalizado na base; $E_{Subleito 1}$ = módulo retroanalizado no subleito compactado; $E_{Subleito 2}$ = módulo retroanalizado no subleito natural

Mantendo-se os módulos do revestimento fixos e variando-se os módulos das demais camadas até serem encontrados os valores determinados no campo para D_0 tem-se que:

- No trecho do CEASA, no primeiro ano de abertura ao tráfego (janeiro e setembro/2004) os módulos obtidos para a sub-base e base foram elevados. A partir de maio/2005 os módulos tenderam a uma estabilização com valores menores na ordem de 300 MPa para a base e 200 MPa para a sub-base;
- No trecho do Recanto, Ribeiro (2006) observou uma pequena melhora nos valores dos módulos de abril/2005 para janeiro/2006. No entanto, em novembro/2006 verificou-se redução, sendo que a base apresentou um módulo da ordem de 400 MPa.

5.5.2 PROVA DE CARGA SOBRE PLACA

Com os dados de campo foram determinados dois tipos de módulos: o módulo de deformabilidade (E_t), encontrados com valores do deslocamento total (d_t) para a tensão de 560 kPa, e o módulo de elasticidade (E_e), calculado com os valores do deslocamento elástico (d_e) para 560 kPa, nas retroanálises também foram avaliados os dois parâmetros.

Na Tabela 5.41 tem-se os valores de módulos obtidos para cada estaca ensaiada no trecho do CEASA. Percebe-se a existência de módulos menores nos bordos do pavimento (E4 e E4+15) e maiores no eixo (E3). E nas Tabelas 5.42 e 5.43 tem-se a comparação dos valores dos módulos obtidos a partir de retroanálises realizadas com os valores de deslocamentos médios determinados nesta pesquisa e por Oliveira (2007).

Tabela 5.41 Resultados dos módulos obtidos nas retroanálises no trecho do CEASA

ESTACA	$E_{\text{Revestimento}}$		E_{Base}		$E_{\text{Sub-base}}$		E_{Subleito}	
	E_t (MPa)	E_e (MPa)	E_t (MPa)	E_e (MPa)	E_t (MPa)	E_e (MPa)	E_t (MPa)	E_e (MPa)
E4	2000	4000	350	800	200	500	35	250
E3	2000	4000	700	900	600	500	120	350
E4 + 15	2000	4000	350	800	200	600	55	300

Obs: $E_{\text{Revestimento}}$ = módulo retroanalizado no revestimento; E_{Base} = módulo retroanalizado na base; $E_{\text{Sub-base}}$ = módulo retroanalizado na sub-base; E_{Subleito} = módulo retroanalizado no subleito; E_t = módulo de deformabilidade; E_e = módulo de elasticidade

Tabela 5.42 Resultados do deslocamento total médio (d_t médio) e os módulos correspondentes, em diferentes períodos no trecho do CEASA

Período	d_t médio (mm)	$E_{\text{Revestimento}}$ (MPa)	E_{Base} (MPa)	$E_{\text{Sub-base}}$ (MPa)	E_{Subleito} (MPa)
Janeiro/04	1,25	2000	100	100	20
Maio/05	0,75	2000	300	120	30
Novembro/05	0,79	2000	280	100	30
Maio/06	0,89	2000	250	100	25
Novembro/06	0,43	2000	400	200	70

Obs: $E_{\text{Revestimento}}$ = módulo retroanalizado no revestimento; E_{Base} = módulo retroanalizado na base; $E_{\text{Sub-base}}$ = módulo retroanalizado na sub-base; E_{Subleito} = módulo retroanalizado no subleito; d_t = deslocamento total médio

Tabela 5.43 Resultados do deslocamento elástico médio (d_e médio) e dos módulos correspondentes, em diferentes períodos no trecho do CEASA

Período	d_e médio (mm)	$E_{\text{Revestimento}}$ (MPa)	E_{Base} (MPa)	$E_{\text{Sub-base}}$ (MPa)	E_{Subleito} (MPa)
Janeiro/04	0,49	4000	300	200	50
Maio/05	0,29	4000	550	350	100
Novembro/05	0,22	4000	700	500	150
Maio/06	0,24	4000	700	500	100
Novembro/06	0,16	4000	750	550	200

Obs: $E_{\text{Revestimento}}$ = módulo retroanalizado no revestimento; E_{Base} = módulo retroanalizado na base; $E_{\text{Sub-base}}$ = módulo retroanalizado na sub-base; E_{Subleito} = módulo retroanalizado no subleito; d_e = deslocamento elástico médio

Em termos de deslocamento total médio (Tabela 5.42), observa-se que os módulos das camadas vão aumentando ao longo do tempo: para a base de agregado reciclado o módulo

aumentou de 100 MPa para 400 MPa e para a sub-base a variação foi de 100 MPa para 200 MPa. Em termos de deslocamento elástico total (Tabela 5.43), a sub-base chega a apresentar módulos da ordem de 550 MPa e a base de 750 MPa.

Na Tabela 5.44 tem-se os valores de módulos obtidos para cada estaca ensaiada no trecho do Recanto. Semelhante ao trecho do CEASA, percebe-se a existência de módulos menores nos bordos do pavimento (E1+10 e E5+10) e maiores no eixo (E3+10).

Tabela 5.44 Resultados dos módulos obtidos nas retroanálises no trecho do Recanto

ESTACA	$E_{\text{Revestimento}}$		E_{Base}		$E_{\text{Subleito 1}}$		$E_{\text{Subleito 2}}$	
	E_t (MPa)	E_e (MPa)	E_t (MPa)	E_e (MPa)	E_t (MPa)	E_e (MPa)	E_t (MPa)	E_e (MPa)
E1 + 10	2000	4000	310	900	50	280	20	120
E3 + 10	2000	4000	320	1100	80	320	50	170
E5 + 10	2000	4000	220	900	30	200	20	100

Obs: $E_{\text{Revestimento}}$ = módulo retroanalísado no revestimento; E_{Base} = módulo retroanalísado na base; $E_{\text{Subleito 1}}$ = módulo retroanalísado no subleito compactado; $E_{\text{Subleito 2}}$ = módulo retroanalísado no subleito natural; E_t = módulo de deformabilidade; E_e = módulo de elasticidade

Nas Tabelas 5.45 e 5.46 tem-se a comparação dos valores dos módulos obtidos a partir de retroanálises realizadas com os valores de deslocamentos médios determinados nesta pesquisa e por Ribeiro (2006).

Tabela 5.45 Resultados do deslocamento total médio (d_t médio) e os módulos correspondentes, em diferentes períodos no trecho do Recanto

Período	d_t médio (mm)	$E_{\text{Revestimento}}$ (MPa)	E_{Base} (MPa)	$E_{\text{Subleito 1}}$ (MPa)	$E_{\text{Subleito 2}}$ (MPa)
Abril/2005*	1,17	2000	250	50	30
Janeiro/2006*	0,99	2000	520	50	30
Novembro/2006	0,93	2000	700	50	30

*Ribeiro (2006)

Obs: $E_{\text{Revestimento}}$ = módulo retroanalísado no revestimento; E_{Base} = módulo retroanalísado na base; $E_{\text{Subleito 1}}$ = módulo retroanalísado no subleito compactado; $E_{\text{Subleito 2}}$ = módulo retroanalísado no subleito natural; d_t = deslocamento total médio

Em termos de deslocamento total médio (Tabela 5.45), observa-se que o módulo da base do agregado reciclado aumentou de 250 MPa para 700 MPa. Em termos de

deslocamento elástico total (Tabela 5.46), a base chegou a apresentar módulos da ordem de 1500 MPa.

Tabela 5.46 Resultados do deslocamento elástico médio ($d_{e \text{ médio}}$) e os módulos correspondentes, em diferentes períodos no trecho do Recanto

Período	$d_{e \text{ médio}}$(mm)	$E_{\text{Revestimento}}$ (MPa)	E_{Base} (MPa)	$E_{\text{subleito 1}}$ (MPa)	$E_{\text{Subleito 2}}$ (MPa)
Abril/2005*	0,61	4000	800	80	50
Janeiro/2006*	0,63	4000	700	80	50
Novembro/2006	0,22	4000	1500	320	170

*Ribeiro (2006)

Obs: $E_{\text{Revestimento}}$ = módulo retroanalísado no revestimento; E_{Base} = módulo retroanalísado na base; $E_{\text{Subleito 1}}$ = módulo retroanalísado no subleito compactado; $E_{\text{Subleito 2}}$ = módulo retroanalísado no subleito natural; d_e = deslocamento elástico médio

Ao contrário da tendência observada na retroanálise do ensaio de viga Benkelman, nos dois trechos experimentais os módulos das camadas de base continuam aumentando ao longo do tempo, comportamento este que não é comum de ser observado nas bases composta de materiais tradicionalmente utilizados em pavimentação. Se esta hipótese for confirmada com a continuidade das pesquisas, além de todos os ganhos ambientais envolvidos com a reutilização do agregado reciclado, em um curto prazo este material apresentará grande vantagem de utilização.

Capítulo 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Comparando a construção civil aos outros setores da economia, este age com grande intensidade sobre o meio ambiente, já que trabalha com a transformação em todas as suas etapas. Além disso, os resíduos oriundos deste setor são descartados em aterros sanitários, provocando graves problemas ambientais, já que estes são materiais não degradáveis e seu acúmulo diminui a vida útil dos aterros. Quando descartados em locais inadequados, causam inúmeros problemas sócio-ambientais como enchentes, assoreamento de córregos e rios, entupimento de redes de drenagem, dentre outros.

Na cidade de Goiânia os problemas relacionados ao mal gerenciamento de resíduos da construção civil foram detectados através da vistoria realizada em oito bairros da cidade, demonstrando o não cumprimento da Instrução Normativa nº 18 (PREFEITURA DE GOIÂNIA, 2005) e da Resolução nº 307 (CONAMA, 2002). Apesar da quantidade dos pontos amostrados não ser grande, constata-se que nas demais regiões da cidade, a situação não é diferente. Significativa quantidade de resíduo da construção civil (RCC) está sendo irregularmente descartada em lotes vagos e nas proximidades e leitos de cursos d'água. É necessário que o poder público e todos os agentes envolvidos (geradores e transportadores) realizem um diagnóstico preciso sobre o RCC gerado na cidade, elaborem efetivamente o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Construção Civil e dêem um destino adequado e nobre a este resíduo.

Nesta pesquisa, com os ensaios de campo realizados nos trechos experimentais do CEASA e do Setor Recanto das Minas Gerais executados com agregado reciclado no ano de 2004, verificou-se que:

- Os dois trechos apresentam bom comportamento estrutural, mostrando a viabilidade prática da construção de pavimentos urbanos com RCC em suas camadas;

- Fica clara a superioridade técnica do trecho do CEASA sobre o trecho do Recanto, pois o primeiro apresenta maior número de camadas em sua estrutura e foi executado com maior controle tecnológico;
- Os resultados do ensaio de viga Benkelman apresentam menos repetibilidade do que os resultados do ensaio de prova de carga sobre placa, principalmente para o trecho do Recanto;
- Nos dois trechos é possível verificar que o eixo das pistas está melhor compactado do que os bordos. Assim, no processo executivo recomenda-se maior controle desta etapa para que a estrutura se torne mais homogênea e mais resistente nas trilhas de roda e que seja implantado um sistema de drenagem adequado para evitar a saturação dos bordos e conseqüente perda de resistência;
- Com os dados do penetrômetro dinâmico de cone, observa-se que não houve controle da espessura das camadas finais executadas nos dois trechos. Isto também pode implicar numa heterogeneidade de comportamento das estruturas dos pavimentos. As correlações do índice de penetração com o *California Bearing Ratio* (CBR) existentes na literatura conseguem estimar, com certa aproximação, os valores encontrados em laboratório;
- Em alguns ensaios de campo, é possível observar a melhoria das propriedades medidas ao longo do tempo. Isto pode ser explicado pelas reações pozolânicas que continuam ocorrendo neste tipo de material. Para confirmar esta conclusão é importante que sejam realizados ensaios periodicamente nestas pistas;
- As retroanálises realizadas com os dados obtidos nos ensaios de viga Benkelman e prova de carga sobre placa confirmam as tendências determinadas nos ensaios e apresentam uma estimativa do módulo de elasticidade encontrado para este resíduo. Com os valores determinados, tem-se que as bases e sub-bases de agregado reciclado apresentam características semelhantes aos materiais tradicionalmente utilizados na confecção dessas camadas, como o cascalho laterítico e os solos estabilizados granulometricamente.

Com os resultados obtidos a partir de ensaios de laboratório tem-se que:

- Apesar da amostra L1 estar enquadrada na Faixa B, ela não apresentou melhores características de laboratório. Isto pode ser explicado pela falta de finos na mistura, o que gera a inexistência de coesão no material;
- A amostra L2 ficou enquadrada na Faixa D. Mesmo com 25% do solo argiloso incorporado na mistura, com relação à amostra L1, ainda não houve ganho de resistência;

- Já na amostra L3, que se enquadra na Faixa F, mantendo-se constante a quantidade de solo argiloso (25%) e aumentando a porcentagem de material classificado como brita 2,00mm(4,8mm) (de 33% para 58%) tem-se significativa melhoria das propriedades determinadas, incluindo o aumento da capacidade de suporte (de 68% para 90%);
- As amostras produzidas em laboratório (L1, L2 e L3) atenderam todos os requisitos descritos na NBR-15115 (ABNT, 2004g), com exceção da porcentagem de grãos passantes na peneira de 0,42 mm que ficou superior a 40%. No entanto, como nos demais ensaios as amostras apresentaram viabilidade de aplicação em obras reais, constata-se que esta especificação não seria considerada como prioritária. Já as amostras retiradas dos trechos experimentais atenderam todos os requisitos da referida norma;
- A partir da moldagem e cura de copos-de-prova constatou-se que houve aumento significativo do valor de suporte do material com o decorrer do tempo de cura. Então, há indícios de que houve reação pozolânica por parte de partículas que ainda possuíam potencial reativo, provocada pela adição de água para atingir o teor de umidade e pela compactação, que aumenta a finura do material. Após 15 dias de cura, as amostras L2 e L3 ultrapassaram a marca dos 100%, indicando que o agregado reciclado estudado possui, nestas condições, uma capacidade de suporte maior do que a da brita-padrão. Percebe-se, ainda, que, após a cura, a amostra L3 apresenta melhores resultados nos ensaios de CBR e abrasão *Los Angeles*;
- Tanto as amostras produzidas em laboratório (L1, L2 e L3) como aquelas retiradas dos trechos foram ambientalmente classificadas como não inerte, não perigosas e pertencentes à Classe II-A. Alguns componentes apresentaram valores superiores aos limites especificados pela NBR-10004 (ABNT, 2004a). No entanto, esta constatação não impede o uso do resíduo, porque esses elementos podem ou serem característicos do próprio solo, ou estarem relacionados com a origem do entulho, ou aparecerem devido à utilização das vias urbanas.

Com os dados obtidos nesta pesquisa conclui-se que o agregado reciclado oriundo do RCC tem viabilidade técnica e ambiental para ser utilizado na estrutura de pavimentos flexíveis. Este resíduo sólido pode ter uma reutilização nobre, não sendo, no primeiro momento, interessante a sua aplicação na recuperação de erosões. Este fato ainda pode ser impulsionado pela escassez regional de material natural granular tradicionalmente utilizado na confecção de bases e sub-bases de pavimentos. Assim, após a implantação de um plano adequado de gerenciamento e de uma usina de reciclagem de RCC, novas vias urbanas

poderão ser construídas na região metropolitana de Goiânia, as vias existentes poderão receber manutenção adequada, o aterro sanitário terá sua vida útil preservada e os danos ambientais serão significativamente minimizados.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

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

- Realizar de ensaios de campo periodicamente nos trechos experimentais existentes;
- Acompanhar projetos, execução e comportamento de novas pistas executada com RCC;
- Avaliar, de uma forma mais sistemática, a questão da alteração das propriedades do resíduo ao longo de períodos de cura;
- Investigar a alteração da granulometria do material após a compactação tanto em laboratório quanto em campo;
- Realizar ensaios para determinação do módulo resiliente das amostras;
- Realizar outros ensaios de laboratório que ajudem a explicar o comportamento desses materiais, como pH e índice de forma;
- Estudar o comportamento de outras dosagens de RCC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENDA 21 BRASILEIRA. **Base para discussão por Washington Novaes; Otto Ribas e Pedro da Costa Novaes.** Brasília MMA/PNUD, 2000.

ANDRADE, E; SALES, M. M. Desenvolvimento e Utilização do DCP In: Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão da UFG - Conpeex, 2., Goiânia, 2005.

ÂNGULO, S. C; ZORDAN, S. E; JOHN, V.M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil.** 2005

ÂNGULO, S. C; KAHN, H; JOHN, V. M; ULSEN, C. **Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição** . In: Seminário Desenvolvimento Sustentável e a reciclagem na construção civil, São Paulo: IBRACON, 2003.

ARAÚJO. A. F. **A aplicação da metodologia de produção mais limpa:** Estudo em uma empresa do setor da construção civil. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002, 120p.

ASSIS, L. M. R; VILELA, M. T. L; SOUSA, R. V; REZENDE, L. R; OLIVEIRA, J. C. **Análise comportamental de um pavimento com base e subbase compostas com resíduos sólidos da indústria da construção civil (entulho).** 36ª Reunião Anual de Pavimentação. Curitiba/PR, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: **Resíduos sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro, 2004a. 71p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.007: **Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004b. 21p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.005: **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004i. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.006: **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004c. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.112. **Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro, 2004d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.113. **Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro, 2004e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.114. **Resíduos sólidos da construção civil** - Áreas de Reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.115. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil** – Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004g.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.116. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil** – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos, 2004h.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6.457. **Amostras de solo** – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7.181. **Solo** - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508. **Solo** – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm- Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6.458. **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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6.459. **Solo** – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6.502. **Solo** – Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7.180. **Solo** – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7.182. **Solo** - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7.207. **Solo** – Terminologia e Classificação de Pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9.895. **Solo** - Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1987a.

AZEVEDO, G. O. D. **Por menos lixo: A minimização dos resíduos sólidos urbanos na cidade do Salvador/Bahia**. Dissertação de mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Ambiental Urbana. Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2004, 146p.

- BAPTISTA, C. N. Pavimentação. Tema II. 2ª Edição. Editora Globo. Rio de Janeiro. 1976. 275p.
- BARBOSA, M. F. C. **Aplicação da reciclagem como alternativa de gerenciamento para o entulho**: O caso da construtora Everest Construmar. Curso de graduação em Engenharia Civil. Universidade Salvador. Salvador, 2004, 53p.
- BARROS, M. C. **Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura**. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005, 96p
- BODI, J.; B FILHO J.A.; ALMEIDA S. Resíduos de construção civil reciclado na pavimentação urbana. 29ª reunião anual de pavimentação/MT, Salvador – BA, 1995. 409-435p.
- BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>> Acesso em: 28 abr. 2006.
- BRITO FILHO, J. A. Cidades versus entulhos. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, Anais. São Paulo, 1999.
- CAPUTO, H. P. Mecânica dos Solos e suas Aplicações. 3ª Edição. Vol. 1. Ed. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro. 1973. 242p
- CARDOSO, A.B; TRICHÊS, G. Avaliação da capacidade suporte de aterros e subleito de rodovias utilizando o penetrômetro dinâmico de cone. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG)- Volume I. Brasília, 1998.
- CARNEIRO, A. P; BURGOS, P. C; ALBERTE, E. P. V. **Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos**. Projeto Entulho Bom. Salvador: EDUFBA/ Caixa Econômica Federal, 2001, 188-227 p.
- CARNEIRO, F. P. **Diagnóstico e ações da atual situação dos resíduos de construção e demolição na cidade do Recife**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana da Universidade Federal de Paraíba. João Pessoa, 2005.
- CASSA, J. C. S. **Diagnóstico dos setores produtores de resíduos na região metropolitana de Salvador/Bahia**. Projeto Entulho Bom. Salvador: EDUFBA/ Caixa Econômica Federal, 2001, 47-75p.
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Nº 307, de 5 de julho de 2002a. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/2002.
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Nº 313, de outubro de 2002. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação, 2002b.

CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. 2ª edição. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais, 2006.

CORCUERA CAVALCANTI, D. K. Políticas para reciclagem de resíduos da construção civil, 2003. Disponível em: <<http://www.ciabrasil.org.br/artigos>> Acesso em: 25 nov. 2006.

COSTA, N. A. A. **A reciclagem do resíduo de construção e demolição: uma aplicação da análise multivariada.** Dissertação de Doutorado. Pós-Graduação em engenharia de produção. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003. 188p.

DANISH ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Waste 21: waste management plan 1998 – 2004.** Danish Ministry of Environment and Energy, 1999, 135 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER/ME 24. **Determinação das deflexões no pavimento pela viga benkelman;** Método de ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER/ES 303. **Pavimentação – base estabilizada granulometricamente;** Especificação de serviço, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997. 7p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER/ME 035. **Agregados – Determinação da abrasão Los Angeles;** Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER/PRO 011. **Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis.** Normas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1979. 16p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT/ME 055. **Pavimento rígido – Prova de carga estática para determinação do coeficiente de recalque de subleito e sub-base em projeto e avaliação de pavimentos;** Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004. 6p.

DIAS, J. F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo.** Dissertação de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004. 251p.

DORSTHORST, B.J.H. State of deconstruction in the Netherlands. Report 5, 2000. Disponível em: <<http://www.resol.com.br>> Acesso em: 10 abr. 2006.

EC – EUROPEAN COMMISSION. **Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts:** Final Report, 1999. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw/cdw>> Acesso em: 10 set. 2006.

EPA – U.S.ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2000. **Construction and demolition waste management**. Disponível em: <<http://www.sustainableschools.dgs.ca.gov>>. Acesso em: 05 mai. 2006.

FACHIN, L. C. **A reciclagem de resíduos sólidos como meio de geração de emprego e renda, análise dos problemas sócio-ambientais e do custo de oportunidade**. Monografia para obtenção do título de bacharel em Ciências Econômicas. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004, 66p.

FELDMAN, W. Reciclagem de entulho: Uma proposta sócio-ambiental. Prefeitura da cidade de São Paulo. Secretaria de Coordenação das Subprefeituras. São Paulo, 2005.

FERNANDES, C. G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação**. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004. 109p.

FRANKLIN, Associates. **Characterization of building related construction and demolition debris in the United States**. A report to the U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Energy Response, Washington, D.C., 1998.

GEOSLOPE. Sigma/W version 3 – User’s Guide. Geo-Slope International Ltd, Calgary, Alberta, Canadá, 1995. 390p.

GOIÂNIA (Estado). Lei nº 14.248 de 29 de julho de 2002, Goiânia, GO. Disponível em: <http://www.gabcivil.go.gov.br/leis_ordinarias/2002/lei_14248.htm>. Acesso em: 28 abr. 2006a.

GOIÂNIA (Estado). Decreto-lei nº 1.745 de 06 de dezembro de 1979, Goiânia, GO. Disponível em: <<http://www.agenciaambiental.go.gov.br/legislacao/index.php>>. Acesso em: 28 abr. 2006b.

GOOGLE EARTH. Aplicativo de imagens de satélite. Europa Technologies Image. Digital globe. Terra Métrics. Site da internet: <www.superdownloads.com.br> Acessado em: Outubro/2006.

GUSMÃO, A. D; SIQUEIRA, M. S; CARNEIRO, F. P; BARKOKEBAS, B. **Caracterização geotécnica e reciclagem de resíduos de construção civil**. In: III Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia. Curitiba, 2006, 315-320p.

IBAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 2000. Disponível em: <www.ibge.gov.br> Acesso em 28 abr. 2006.

JOHN, V. M; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. In: Seminário – Reciclagem de resíduos sólidos domiciliares. São Paulo, 2001, 13 p.

JOHN, V. M. **Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção.** Projeto Entulho Bom. Salvador: EDUFBA/ Caixa Econômica Federal, 2001, 28-45 p.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil:** Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. Tese de Livre Docência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000. 102p.

KRYCKYJ, P. R; TRICHÊS, G. **Use of Civil Construction Waste in Urban Pavements: A Feasibility Study.** 5TH International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development. Belo Horizonte- MG, Brasil. 2000.

LATTERZA, L. M. **Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição. Um novo material para fabricação de painéis leves de vedação.** Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 1998, 116p.

LAWSON, N; DOUGLAS, I; GARVIN, S; CLODAGH, G; MANNING, D. **Recycling construction and demolition wastes- a UK perspective.** Environmental Management and health. Volume 12, 2001, 146-157p. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com>>. Acesso em: 05 mai. 2006.

LEITE, F.C; BERNUCCI, L.L.B; PREUSSLER, L.A; MOTTA, R.S; MOURA, E; ABDU, M.R. **Monitoramento de trecho experimental com agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil e asfalto-borracha.** n° 43. 36ª Reunião Anual de Pavimentação/11º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Goiânia-GO, Brasil, 2006.

LEITE, F.C; MOTTA, R.S; BERNUCCI, L. L. B; MOURA, E; SILVA, P. F.A. **Comparação de valores de Índice de Suporte Califórnia de agregados reciclados de resíduo sólido da construção civil.** 35ª Reunião Anual de Pavimentação, Curitiba, Brasil, 2005.

LIMA, F. S. N. **Aproveitamento de resíduos de construção na fabricação de argamassas.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana da Universidade Federal de Paraíba. João Pessoa, 2005. 93p.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduos de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concreto.** Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Tecnologia do Ambiente. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 1999. 223p.

LIMP-ENTULHO. Entrevista concedida pelo presidente da Limp-Entulho, Goiânia, 10.mai.2006.

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.

MILARÉ, E. **Direito do Ambiente:** doutrina, jurisprudência, glossário. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais, 2004.

MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego.** Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Transporte. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.134p.

MOTTA, L. M. G; FERNANDES, C. Utilização de resíduos sólido da construção civil em pavimentação urbana. In: 12ª Reunião Anual de Pavimentação - Anais, Aracajú, 2003.

OLIVEIRA, J. C. **Estudo do comportamento de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis.** Dissertação de Doutorado em Geotecnia da Universidade de Brasília (em conclusão). Brasília, 2007.

OLIVEIRA, J.C.; REZENDE, L.R.; GUIMARÃES, R. C.; CARVALHO, J.C.; SILVA, A.L.A. Avaliação do desempenho de um pavimento flexível com base e sub-base de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil (entulho) no município de Goiânia – Goiás. Simpósio Internacional sobre Reciclagem de Pavimentos, São Paulo, SP, Brasil, 2005.

OLIVEIRA, S; PASQUAL, A; SALAZAR, V. L. P; LEO, A. L. **Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos em comunidades de médio porte.** In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Peru, 1998.

PAIVA, P. A; RIBEIRO, M. S. **A reciclagem na construção civil:** como economia de custo. Universidade São Paulo, 2005.

PINTO, T. P. **Gestão dos resíduos de construção e demolição em áreas urbanas – da ineficácia a um modelo de gestão sustentável.** Projeto Entulho Bom. Salvador: EDUFBA/ Caixa Econômica Federal, 2001. p. 76-112.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** Dissertação de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999. 189p.

PMGRSIC – Plano Municipal de Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Indústria da Construção Civil de Goiânia, GO. Diagnóstico Preliminar e Planejamento. Relatório de Novembro de 2004, 76 p.

POON, C. S; YEUNG, J. S. K; FONG, W. F. K. **Hong Kong experience of using recycled aggregates from construction and demolition materials in ready mix concrete.** In: Interntional Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, 2004, 267-275p.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. Gestão Sustentável de Resíduos. Superintendência de Limpeza Urbana, 2006. Disponível em: <www.pbh.gov.br/limpeza-urbana> Acesso em: 05 dez. 2006.

PREFEITURA DE GOIÂNIA. Instrução Normativa nº 18, de 26 de dezembro de 2005, Goiânia, 2005.

PREFEITURA DE GOIÂNIA-SEMMA. Entrevista concedida de técnicos da Secretaria Municipal do Meio Ambiente- SEMMA, Goiânia, 2006.

REZENDE, L. R. **Estudo do comportamento de materiais alternativos utilizados em estruturas de pavimentos flexíveis.** Dissertação de doutorado, G.TD-014A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2003. 372p.

RIBEIRO, F. **Avaliação do comportamento estrutural de uma via com aplicação de entulho em sua base.** Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2006, 159p.

RIBEIRO, F; SERRA, N. G. S. **Utilização de entulho na pavimentação.** Projeto final de curso. Universidade Estadual de Goiás, Anápolis – GO, 2001. 105p.

SCHENINI, P. C.; BAGNATI, A. M. A.; CARDOSO, A. C. F. **Gestão de resíduos da construção civil.** In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Anais. Florianópolis: COBRAC, 2004.

SCHNEIDER, D. M. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo.** Dissertação de Mestrado pela Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003, 130P.

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

SILVA, A. L. A. **Aplicação de resíduos da construção civil em base e sub-base de pavimentos** (Trabalho de conclusão de curso). Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás, Goiânia – GO, 2004, 215 p

SILVA JÚNIOR, F. A; RODRIGUES, J. K. G; MORAIS, C. A. S. Cone de penetração dinâmica (DCP): Uma alternativa ao dimensionamento de pavimentos urbanos. 36ª Reunião Anual de Pavimentação. Curitiba/PR, 2005.

SILVEIRA, P. E. M. **A aplicação do resíduo de construção e demolição reciclado no compósito solo-cimento.** Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Geociências. Universidade Estadual Paulista- Campus de Rio Claro. Rio Claro, 2005, 122 p.

SIRNVINSKAS, L. P. **Manual de Direito Ambiental**, 3ª edição. São Paulo: Editora Saraiva, 2005.

TRICHÊS, G; DAL PAI, C. M. **Dimensionamento da espessura total do pavimento a partir de dados obtidos com o penetrômetro dinâmico de cone DCP.** In: IV Jornada Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias. Recife/PE, 2006.

VAZQUEZ, E. **Aplicación de nuevos materiales reciclados em la construcción civil.** In: IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclados e suas Aplicações. São Paulo, 2001, 11-21 p.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN. D. C. C. **Contribuição ao estudo e análise de viabilidade da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** In: II Seminário de Patologia das Edificações - Novos Materiais e Tecnologias Emergentes. Porto Alegre: UFRGS, 2004.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Civil na área de Saneamento. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 1997, 140p

APÊNDICE A

- Curvas obtidas nos ensaios com o DCP -

Os resultados obtidos nos ensaios de DCP em novembro de 2006 no trecho do CEASA estão apresentados nas Figuras A.1, A.2 e A.3.

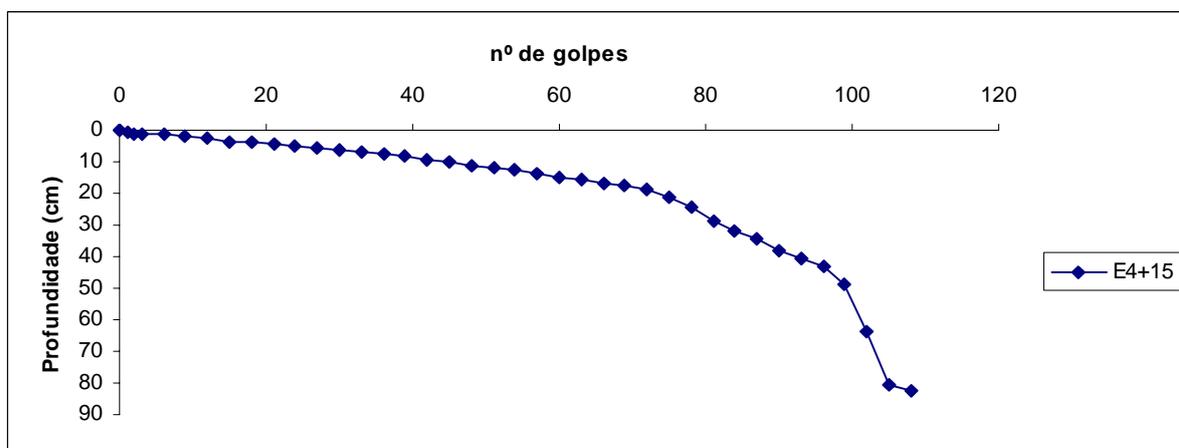


Figura A.1 Curva DCP no bordo esquerdo - Estaca 4+15

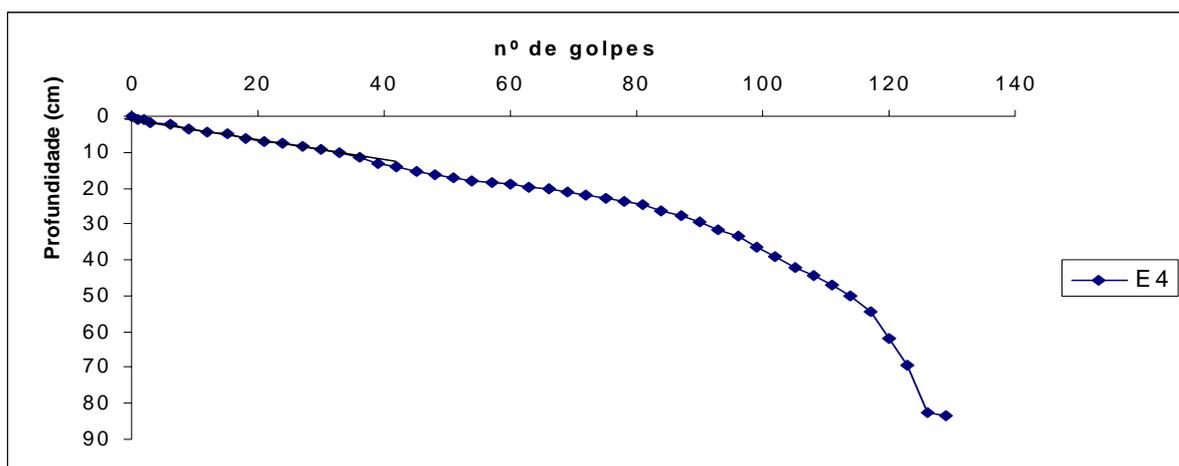


Figura A.2 Curva DPC no bordo direito - Estaca 4

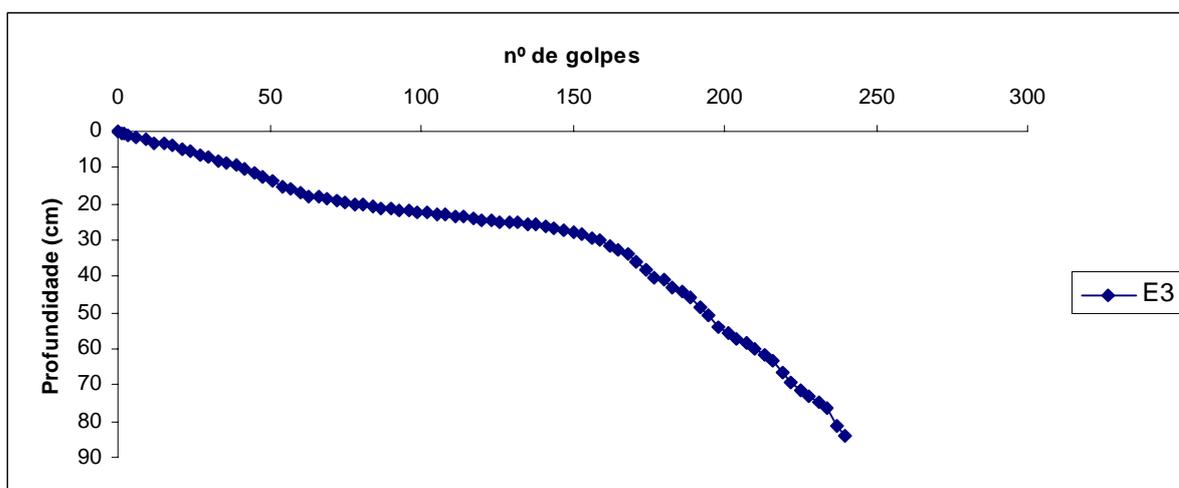


Figura A.3 Curva DPC no eixo - Estaca 3

As Figuras A.4, A.5, A.6, mostram os resultados obtidos nos ensaios de DCP em novembro de 2006 no trecho do Recanto das Minas Gerais na Estaca E1 + 10, nos bordos direito, esquerdo e no eixo.

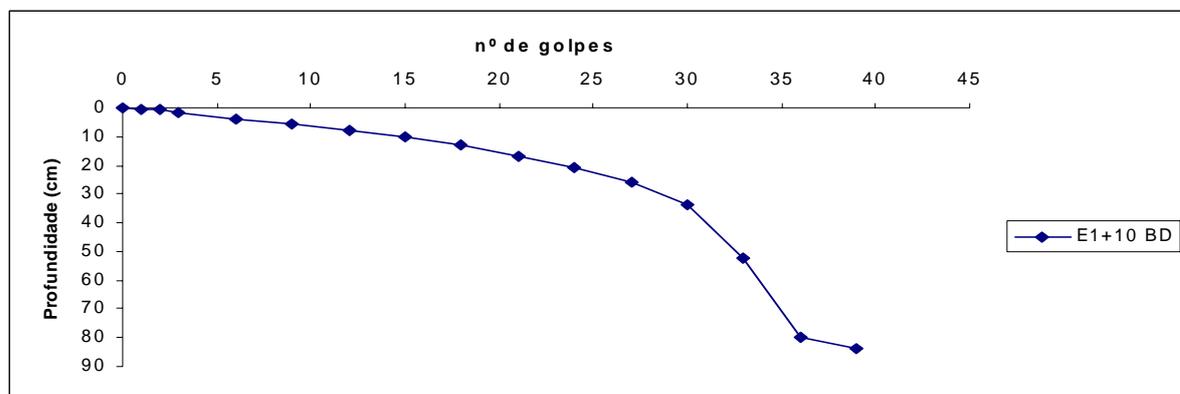


Figura A.4 Curva DCP no bordo direito na Estaca 1 + 10

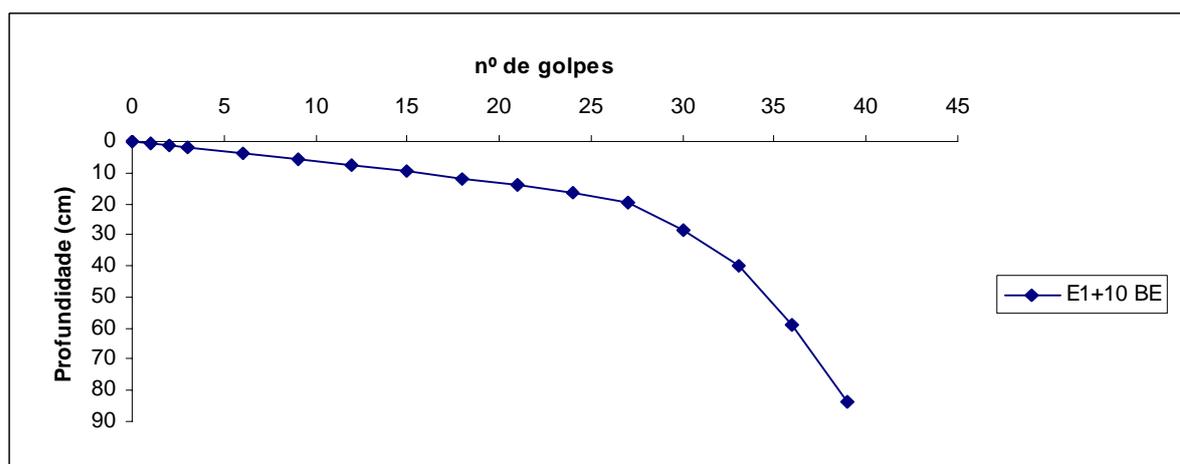


Figura A.5 Curva DCP no bordo esquerdo na Estaca 1 + 10

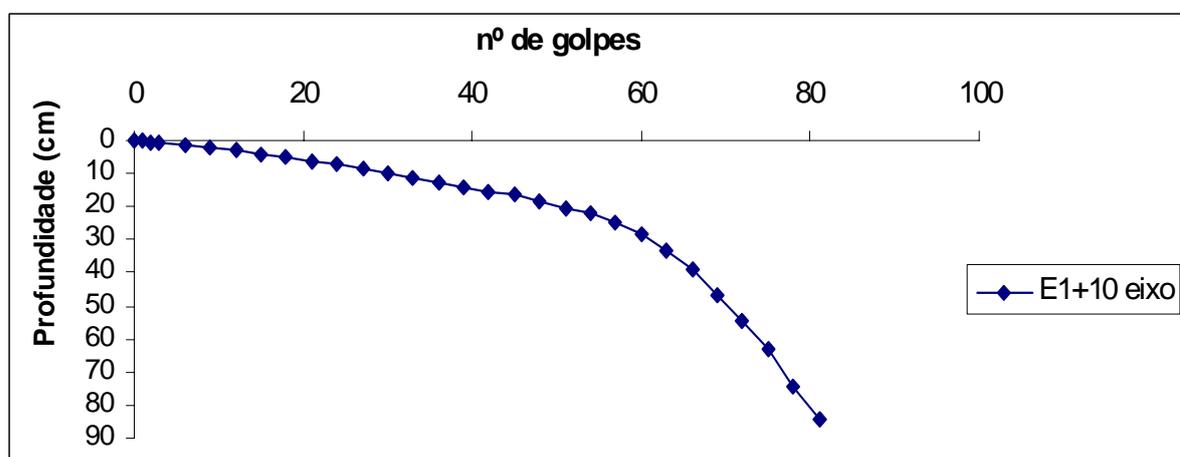


Figura A.6 Curva DCP no eixo na Estaca 1 + 10

As Figuras A.7, A.8, A.9, mostram os resultados obtidos nos ensaios de DCP em novembro de 2006 no trecho do Recanto das Minas Gerais na Estaca E3 + 10, nos bordos direito, esquerdo e no eixo.

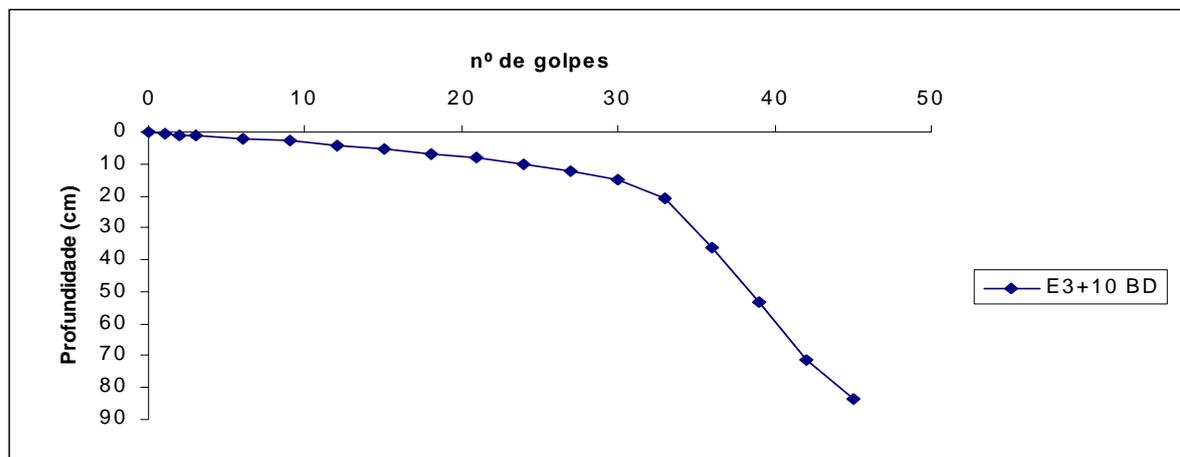


Figura A.7 Curva DCP no bordo direito na Estaca 3 + 10

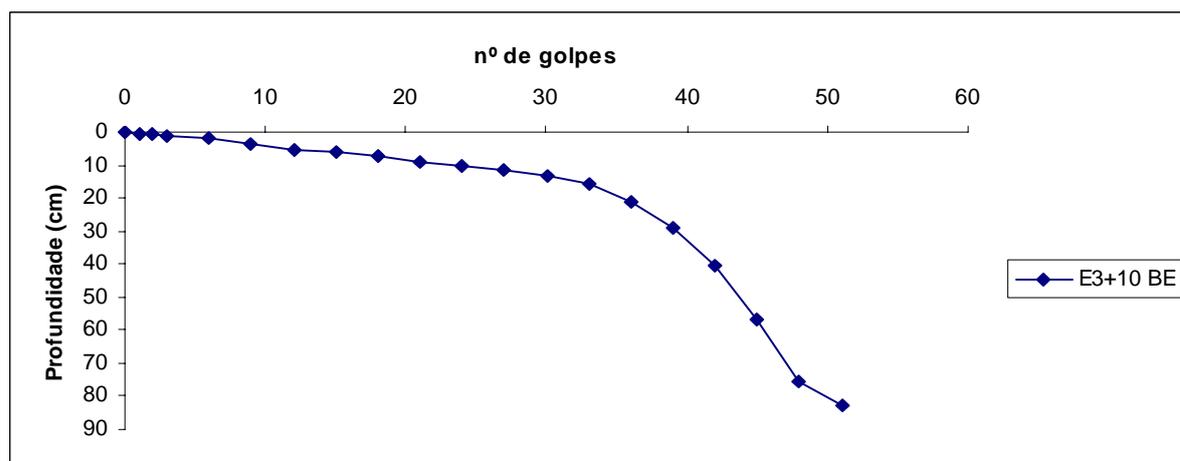


Figura A.8 Curva DCP no bordo esquerdo na Estaca 3 + 10

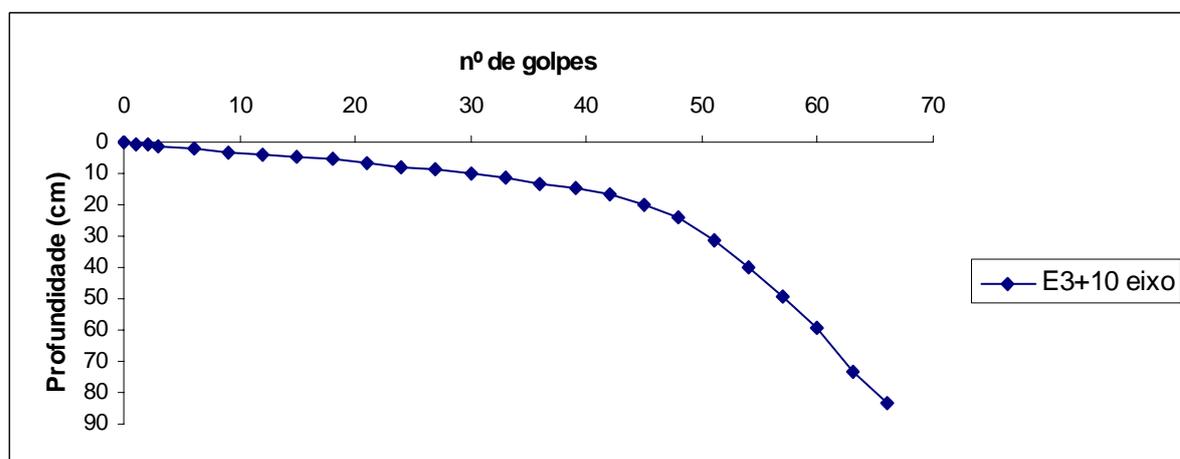


Figura A.9 Curva DCP no eixo na Estaca 3 + 10

As Figuras A.10, A.11 e A.12, mostram os resultados obtidos nos ensaios de DCP em novembro de 2006 no trecho do Recanto das Minas Gerais na Estaca E5 + 10, nos bordos direito, esquerdo e no eixo.

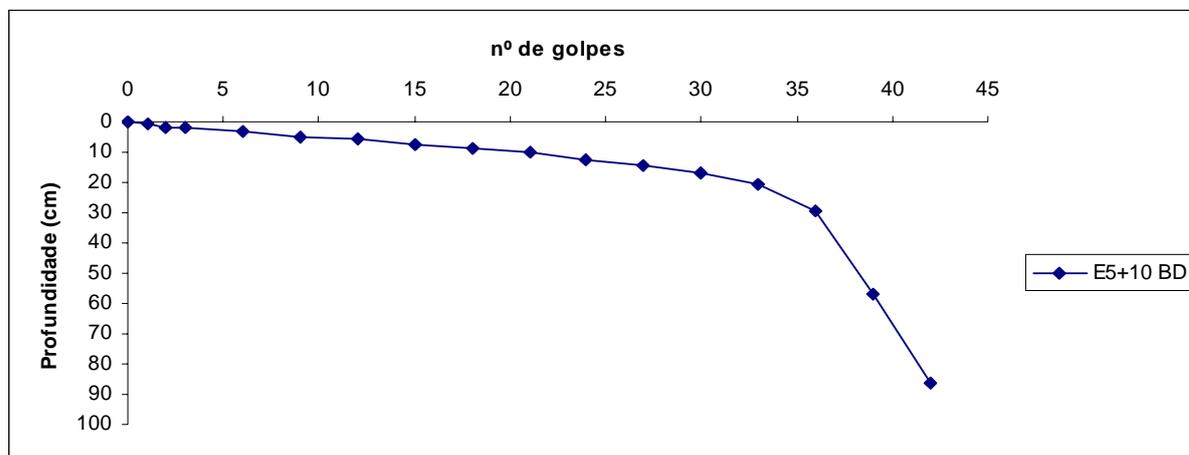


Figura A.10 Curva DCP no bordo direito na Estaca 5 + 10

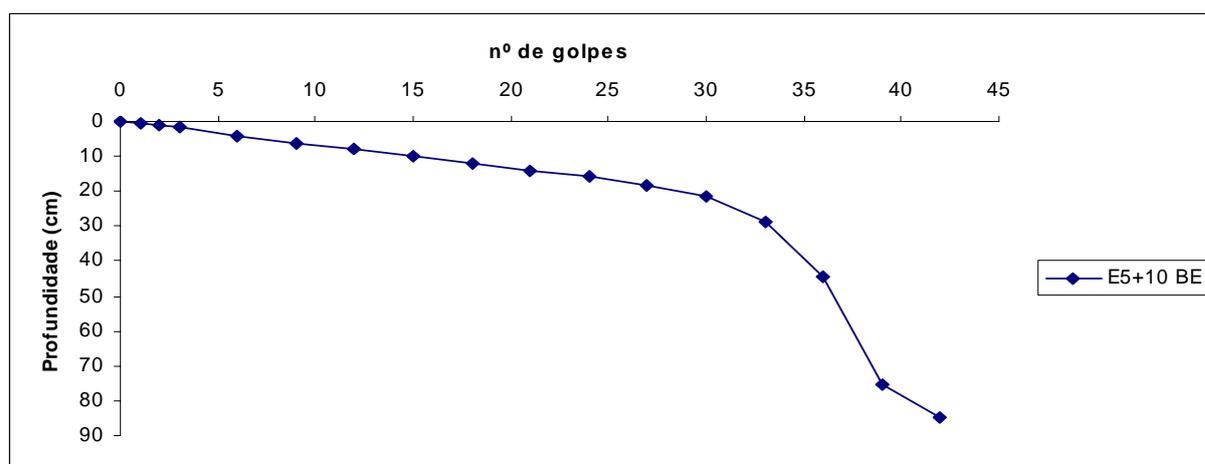


Figura A.11 Curva DCP no bordo esquerdo na Estaca 5 + 10

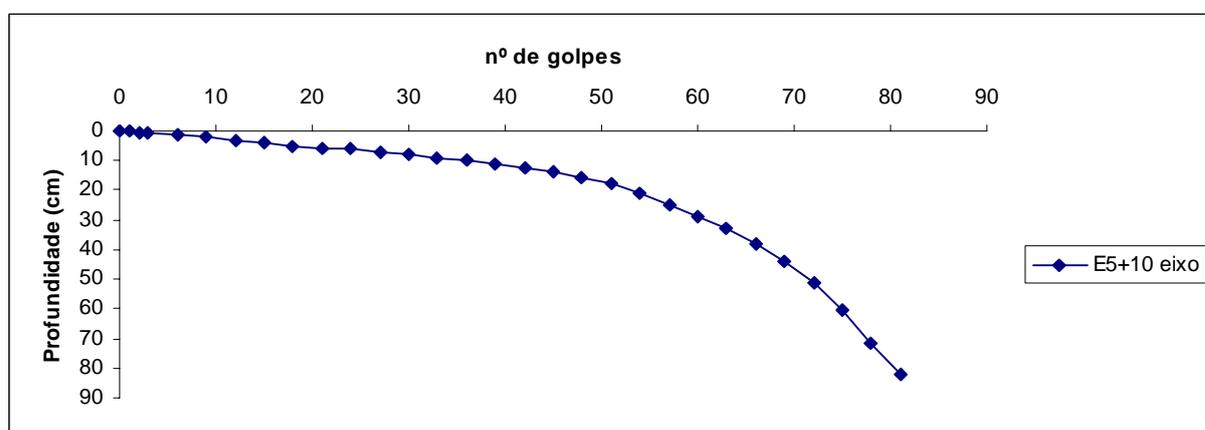


Figura A.12 Curva DCP no eixo na Estaca 5 + 10

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)