

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL**

**FREDERICO SANTANA QUINTANILHA**

**AVALIAÇÃO DE UTILIZAÇÃO E DESEMPENHO DE  
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM BASES E  
SUB-BASES DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Goiânia  
2008

FREDERICO SANTANA QUINTANILHA

**AVALIAÇÃO DE UTILIZAÇÃO E DESEMPENHO DE  
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM BASES E  
SUB-BASES DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

**Área de Concentração:** Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

**Orientadora:** Prof<sup>ª</sup>. Lilian Ribeiro de Rezende, D.Sc.

**Co-Orientador:** Prof. João Carlos de Oliveira, D.Sc.

Goiânia  
2008

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

Q6a Quintanilha, Frederico Santana.  
Avaliação de utilização e desempenho de resíduos de construção e demolição em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis [manuscrito] / Frederico Santana Quintanilha. – 2008.  
114 f.: il., color., figs., tabs., qds.

Orientadora: Profa. Dra. Lílian Ribeiro de Rezende; Co-Orientador: Prof. Dr. João Carlos de Oliveira.

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

Bibliografia: f.109-114.  
Inclui listas de figuras, tabelas e de quadros..

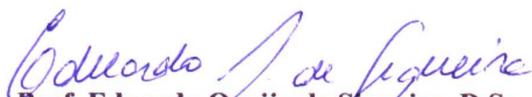
1. Reciclagem – Resíduos urbanos – Indústria da construção  
2. Agregados (Materiais de construção) 3. Agregados reciclados – Pavimentos 4. Resíduos sólidos – Construção Civil 5. Engenharia do Meio Ambiente I. Rezende, Lílian Ribeiro de. II. Oliveira, João Carlos de III. Universidade Federal de Goiás, **Escola de Engenharia Civil** IV. Título.

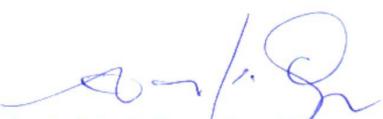
CDU: 628.2:504

FREDERICO SANTANA QUINTANILHA

**AVALIAÇÃO DE UTILIZAÇÃO E DESEMPENHO DE  
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM BASES E  
SUB-BASES DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Dissertação defendida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente (PPGEMA) da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do título de Mestre, aprovada em 21 de Agosto de 2008, pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes professores:

  
**Prof. Eduardo Queija de Siqueira, D.Sc.**  
Presidente da Banca

  
**Prof. André Luis Bortolacci Geyer, D.Sc.**  
Examinador Interno

  
**Prof. Rideci de Jesus Costa Farias, D.Sc.**  
Examinador Externo

## **DEDICATÓRIA**

Ao papai, Cleomar, grande conselheiro e amigo que me ensinou a grande virtude, a arte, a ciência e a técnica da Engenharia e a mamãe Tania pelo bom senso, carinho e paz transmitidas.

À minha esposa Máira, pelo imenso interesse e pelo grande incentivo.

Ao querido vovô Osmar Santana, homem puro e sincero, engenheiro nato, mestre por natureza.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar,

Graças e Louvores ao Senhor Jesus Cristo!

E Ele toda a Honra e toda a Glória!

Presença constante nos momentos de incerteza ou dúvida, pude sentir Tua mão na minha, a me guiar, Teu gesto no meu gesto, a me encorajar.

À minha orientadora, Professora Lilian Ribeiro de Rezende e ao meu co-orientador, Professor João Carlos de Oliveira, pela oportunidade, pela atenção, paciência, apoio e pela sabedoria transmitida;

À Universidade Federal de Goiás, pelo programa de Pós-Graduação. Aos mestres, meu respeito e eterna gratidão. Aos técnicos Elias Magalhães e João Júnior pelo apoio na realização dos ensaios laboratoriais.

À Prefeitura de Goiânia, em especial ao Coronel Paulo Afonso Sanches e ao amigo Leandro Wasfi Helou pelo apoio, atenção e interesse pessoal na viabilização dos estudos em campo.

Aos senhores Leonardo Castro, José Roberto Lima e Fernando Jorge Rodrigues, grandes colaboradores, pela amizade e pelo irrestrito apoio.

Aos meus pais, Tania e Cleomar, e a minha esposa Máira por todo apoio e principalmente por acreditarem na minha capacidade de concluir essa importante etapa, um sonho concretizado.

Aos meus irmãos, Rodolfo e Ana Lydía, pelo apoio e compreensão.

Aos colegas do programa de Pós-Graduação e aos fraternos amigos Adolfo Maciel e Flávio Alcântara pelo grande interesse.

A todos aqueles que, de forma direta ou indireta, puderam contribuir para a realização deste trabalho.

## RESUMO

### AVALIAÇÃO DE UTILIZAÇÃO E DESEMPENHO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A crescente geração e posterior acomodação dos rejeitos sólidos oriundos da indústria da construção - resíduos de construção e demolição (RCD) - torna-se, junto com outros problemas urbanos, um dos grandes entraves enfrentados pela sociedade brasileira. Os detritos gerados pelas obras de construção, reformas e demolições apresentam, geralmente, elevado volume e grande peso específico – relação existente entre massa e volume – tornando laborioso seu transporte e sua disposição final. Observa-se, também, que estes resíduos provocam um rápido enchimento dos aterros de inertes, quando existentes, e, quando depositados de forma irregular ou incorreta possuem potencial para provocar problemas sócio-ambientais, tais como a criação de ambientes propícios à proliferação de vetores de mazelas urbanas. Esse último caso ocorre com frequência nas periferias dos grandes centros urbanos. Uma das alternativas que podem minimizar o problema sócio-ambiental recorrente é a utilização, em vias urbanas, de agregados constituídos desses resíduos que se encontram sem a correta destinação final. Além de propiciar a solução de um problema ambiental – destinação final dos resíduos de construção, reforma e demolição – pode minimizar um outro problema existente na cadeia da construção civil – desmatamentos e aberturas de jazidas de materiais naturais para construção de estradas e vias de trânsito. Essa alternativa de uso dos RCD como constituintes estruturais de pavimentos flexíveis é o tema desta dissertação. Através de análises laboratoriais, as propriedades físicas e mecânicas de três dosagens contendo agregados reciclados foram determinadas, visando o seu emprego em camadas de reforço de subleito, sub-base e base. Os ensaios laboratoriais compreenderam o estudo da compactação das dosagens com energia modificada e a conseqüente avaliação granulométrica, determinação dos limites de Atterberg, determinação do peso específico dos grãos, absorção de água da fase graúda dos agregados, verificação do pH como medida de ocorrência de reações pozolânicas de auto-cimentação e emprego de ensaios de expansão e cálculo do Índice de Suporte Califórnia (ISC). Juntamente com as análises laboratoriais, foi avaliado em conjunto um estudo de caso – duas pistas experimentais executadas em Goiânia, Goiás. A primeira pista experimental possui extensão total de 56 metros executados com agregados reciclados em sua base e sub-base, sendo a espessura destas de quinze centímetros cada. Esta pista foi executada na entrada de compradores da CEASA-GO. A segunda pista experimental trata-se de uma rua executada no Setor Recanto das Minas Gerais e possui 140 metros de extensão, cuja base, de espessura de trinta centímetros, foi executada com agregados reciclados de RCD. Os ensaios de campo compreenderam a resistência à penetração pelo Penetrômetro Dinâmico de Cone (*DCP*), levantamento das deflexões totais e parciais com Viga Benkelman e averiguação de medidas de deslocamento com a realização de provas de carga sobre placa. Os resultados dos experimentos de laboratório mostraram que os agregados atendem às normas brasileiras para uso em bases e sub-base de pavimentos flexíveis. Os resultados dos ensaios de campo demonstram que os trechos analisados ainda apresentam bom comportamento estrutural, após um período de aproximadamente quatro anos de solicitação de tráfego, que corrobora a viabilidade técnica do uso de agregados de RCD.

# **ABSTRACT**

## **EVALUATION AND PERFORMANCE OF CONSTRUCTION WASTE USED IN BASES AND SUB-BASES OF FLEXIBLE PAVEMENTS**

The increase in the generation of Construction and Demolition (C&D) waste and their subsequent accommodation have become, along with other urban problems, one of the major obstacles faced by Brazilian society. The debris generated by construction, renovation and demolition have, generally, high volume and high specific weight (relationship between mass and volume), which makes their transport and final disposal laborious. Besides, these materials are responsible for the rapid filling of available landfills and, when deposited irregularly, they cause potential social and environmental problems, such as the proliferation of vectors of urban diseases, which mainly affect the outskirts of large cities. One of the alternatives that can minimize the socio-environmental problem is the reuse of C&D aggregates in urban roads with low traffic volume. In addition to presenting one possible solution to an environmental issue, the provided alternative can minimize significant problems in the construction chain, once deforestation and depletion of natural sources often occur in the construction of roads. The alternative use of C&D as constituents of the structure of roads is the theme of this dissertation. Through laboratory tests, the physical and mechanical properties of three doses containing recycled aggregates were determined, to use as reinforcement of natural terrain, sub-base and base. The laboratory tests involves the compaction of the samples with Proctor's modified energy and consequent evaluation; Limits of Atterberg; Specific weight of grain; Water absorption of the large stage of the aggregates; check the pH as a measure of occurrence of pozolanic reactions (self-cementation) and tests of expansion and California Bearing Ratio (CBR). With laboratory analysis, was evaluated a case study - two experimental tracks built in Goiania, Goiás. The first one has total length of 56 meters built with recycled aggregates in its base and sub-base layers, and the thickness of these layers is fifteen centimeters each. This track was executed at the buyers entrance of CEASA-GO. The second experimental track is a street built on Recanto of Minas Gerais and has total length of 140 meters long, whose base has thirty centimeters of thickness and was executed with recycled aggregate of RCD in its layers. The field tests covered the resistance to penetration with Dynamic Cone Penetrometer (DCP), measurement of total and partial deflections with Benkelman Beam and proceed the investigation with Plate Load tests. The results of laboratory experiments indicated that the samples could achieve Brazilian standards for its uses in bases and sub-bases of flexible pavements. The results of field tests indicated that the tracks still have good structural behavior, after a period of approximately four years old, which supports the technical viability of the application of recycled aggregates from construction and demolition in flexible pavements.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Composição das dosagens estudadas.....	53
Tabela 5.2 – Quantitativos de amostras para realização dos ensaios .....	54
Tabela 6.1 – Valores do Índice de Degradação ( $ID_p$ ) das dosagens de agregados reciclados após compactação em energia do Proctor Modificado .....	66
Tabela 6.2 – Caracterização da textura dos agregados estudados em laboratório.....	69
Tabela 6.3 – Dados granulométricos da dosagem ARC1 .....	69
Tabela 6.4 – Dados granulométricos da dosagem ARM1 .....	70
Tabela 6.5 – Dados granulométricos da dosagem NAT1 .....	70
Tabela 6.6 – Dados granulométricos da dosagem ARC2.....	71
Tabela 6.7 – Caracterização da textura do solo de adição.....	72
Tabela 6.8 – Valores obtidos nos ensaios dos Limites de Atterberg.....	72
Tabela 6.9 – Valores obtidos nos ensaios de Peso Específico dos Grãos passados na peneira de 4,8mm .....	73
Tabela 6.10 – Valores obtidos nos ensaios de Peso Específico dos Pedregulhos retidos na peneira de 4,8mm e Índice de Absorção de Água da fração graúda .....	73
Tabela 6.11 – Índices de absorção de água da fração graúda para agregados reciclados, adaptado de Leite (2006).....	74
Tabela 6.12 – Resultados encontrados no ensaio de compactação.....	75
Tabela 6.13 – Valores encontrados nos ensaios de <i>CBR</i> e Expansão.....	77
Tabela 6.14 – Possíveis utilizações das amostras estudadas .....	77
Tabela 6.15 – Resultados obtidos com ensaio de Viga Benkelman em Janeiro/2008 .....	79
Tabela 6.16 – Resultados obtidos com ensaio de Viga Benkelman em Junho/2008 .....	79
Tabela 6.17 – Análise temporal – médias obtidas nos ensaios de Viga Benkelman.....	81
Tabela 6.18 – Deflexões características e admissíveis para a pista experimental da CEASA.....	83
Tabela 6.19 – Resultados obtidos com ensaio de Viga Benkelman em Janeiro/2008 .....	84
Tabela 6.20 – Resultados obtidos com ensaio de Viga Benkelman em Junho/2008 .....	85
Tabela 6.21 – Análise temporal – médias obtidas nos ensaios de Viga Benkelman.....	87
Tabela 6.22 – Deflexões características e admissíveis para a pista experimental da Rua SR-68.....	88
Tabela 6.23 – Deslocamento de Prova de Carga – Pista Experimental da CEASA (Janeiro/2008).....	89
Tabela 6.24 – Deslocamento de Prova de Carga – Pista Experimental da CEASA (Junho/2008).....	90
Tabela 6.25 – Deslocamentos médios obtidos nos ensaios de Prova de Carga.....	90
Tabela 6.26 – Resultados de Prova de Carga; Rua SR-68, Recanto das Minas Gerais (Janeiro/2008).....	91
Tabela 6.27 – Resultados de Prova de Carga; Rua SR-68, Recanto das Minas Gerais (Junho/2008).....	92
Tabela 6.28 – Resultados obtidos nos ensaios de Prova de Carga .....	92
Tabela 6.29 – Resultados médios obtidos nos ensaios de Prova de Carga.....	92
Tabela 6.30 – Resultados do ensaio de <i>DCP</i> (bordo direito) para o acesso da CEASA (Janeiro/2008).....	95
Tabela 6.31 – Resultados do ensaio de <i>DCP</i> (bordo esquerdo) para o acesso da CEASA (Janeiro/2008).....	95

Tabela 6.32 – Resultados do ensaio de <i>DCP</i> (bordo direito) para o acesso da CEASA (Junho/2008).....	96
Tabela 6.33 – Resultados do ensaio de <i>DCP</i> (bordo esquerdo) para o acesso da CEASA (Junho/2008).....	96
Tabela 6.34 – Resultados de <i>DCP</i> para diferentes períodos.....	97
Tabela 6.35 – Valores de <i>CBR</i> obtidos por correlações específicas para agregados reciclados aplicados em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis (Janeiro/2008).....	98
Tabela 6.36 – Valores de <i>CBR</i> obtidos por correlações específicas para agregados reciclados aplicados em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis (Junho/2008).....	98
Tabela 6.37 – Resultados do ensaio de <i>DCP</i> (bordo esquerdo) para a Rua SR-68 (Janeiro/2008).....	99
Tabela 6.38 – Resultados do ensaio de <i>DCP</i> (bordo direito) para a Rua SR-68 (Janeiro/2008).....	100
Tabela 6.39 – Resultados do ensaio de <i>DCP</i> (bordo esquerdo) para a Rua SR-68 (Junho/2008).....	101
Tabela 6.40 – Resultados do ensaio de <i>DCP</i> (bordo direito) para a Rua SR-68 (Junho/2008).....	102
Tabela 6.41 – Resultados de <i>DCP</i> obtidos em diferentes períodos.....	102
Tabela 6.42 – Valores de <i>CBR</i> obtidos por correlações específicas para agregados reciclados aplicados em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis (Janeiro/2008).....	103
Tabela 6.43 – Valores de <i>CBR</i> obtidos por correlações específicas para agregados reciclados aplicados em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis (Junho/2008).....	104

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 4.1 – Correlações entre DCP e CBR .....	48
--	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Figura que demonstra o efeito devastador da <i>Tsunami</i> que se abateu sobre o território da Indonésia, em 2005 (AFFONSO, 2005).....	32
Figura 4.1 – Esquema do aparelho de ensaio de <i>DCP</i> .....	47
Figura 4.2 – Realização do ensaio de Prova de Carga Sobre Placa, em Janeiro/2008, na pista experimental da CEASA.....	50
Figura 5.1 – Mapa, sem escala, do trecho experimental da CEASA.....	59
Figura 5.2 – Mapa, sem escala, do trecho experimental da Rua SR-68.....	60
Figura 5.3 – Mapa, sem escala, da Pista Experimental da CEASA, para execução de ensaios .....	61
Figura 5.4 – Mapa, sem escalas, da Pista Experimental da Rua SR-68, para execução de ensaios. ....	61
Figura 6.1 – Curvas granulométricas da dosagem ARC1 antes e após a compactação .....	64
Figura 6.2 – Curvas granulométricas da dosagem ARM1 antes e após a compactação.....	65
Figura 6.3 – Curvas granulométricas da dosagem NAT1 antes e após a compactação .....	67
Figura 6.4 – Curvas granulométricas da dosagem ARC2 antes e após a compactação .....	67
Figura 6.5 – Verificação do enquadramento me faixas granulométricas .....	68
Figura 6.6 – Curva granulométrica do solo argiloso de adição .....	71
Figura 6.7 – Curvas de compactação das amostras .....	75
Figura 6.8 – Curvas dos resultados dos ensaios de <i>CBR</i> e Expansão.....	76
Figura 6.9 – Bacias, em diferentes períodos, na pista experimental da CEASA .....	80
Figura 6.10 – Média geral dos períodos em estudo – Pista experimental da CEASA .....	81
Figura 6.11 – Bacias de deflexão médias para a pista experimental da CEASA .....	82
Figura 6.12 – Bacias de deformação – Janeiro/2008.....	86
Figura 6.13 – Bacias de deformação – Junho/2008.....	86
Figura 6.14 – Média geral dos períodos em estudo – Pista experimental da Rua SR-68.....	87
Figura 6.15 – Bacias de deflexão médias para a Pista experimental da Rua SR-68 .....	88
Figura 6.16 – Curvas de ensaio de Prova de Carga – Pista CEASA (Janeiro/2008).....	89
Figura 6.17 – Curvas de ensaio de Prova de Carga – Pista CEASA (Junho/2008).....	90
Figura 6.18 – Curvas de ensaio de Prova de Carga – Rua SR-68 (Janeiro/2008).....	93
Figura 6.19 – Curvas de ensaio de Prova de Carga – Rua SR-68 (Junho/2008).....	93
Figura 6.20 – Curvas <i>DCP</i> da pista experimental da CEASA (Janeiro/2008).....	95
Figura 6.21 – Curvas <i>DCP</i> da pista experimental da CEASA (Junho/2008).....	97

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Objetivos .....	16
1.2.1	Objetivo Geral .....	16
1.2.2	Objetivos Específicos .....	16
<b>2</b>	<b>ASPECTOS GERAIS SOBRE OS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL .....</b>	<b>17</b>
2.1	O Problema Ambiental.....	17
2.2	Classificação de RCD.....	19
2.3	Aspectos Legais Vigentes .....	22
2.3.1	Resoluções do CONAMA .....	22
2.3.2	Legislação Municipal de Goiânia.....	23
2.3.3	Outros Dispositivos .....	25
2.4	Aspectos Normativos .....	26
<b>3</b>	<b>UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS EM OBRAS.....</b>	<b>29</b>
3.1	Perda e desperdício de materiais de construção .....	29
3.2	Histórico sobre a reciclagem de RCD .....	30
3.3	Reciclagem no Brasil.....	35
3.4	Utilização de RCD em obras de pavimentação .....	36
<b>4</b>	<b>ENSAIOS REALIZADOS EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO.....</b>	<b>40</b>
4.1	Ensaio Laboratoriais .....	40
4.1.1	Caracterização Física.....	40
4.1.1.1	Análise Granulométrica.....	40
4.1.1.2	Massa Específica dos Grãos .....	41
4.1.1.3	Limites de Consistência.....	41
4.1.2	Caracterização Ambiental .....	42
4.1.3	Compactação, Expansão e Índice de Suporte Califórnia - ISC.....	43
4.1.4	Módulo de Resiliência.....	45
4.1.5	Outros Ensaio Laboratoriais .....	46
4.2	Ensaio de Campo .....	46
4.2.1	Penetrômetro Dinâmico de Cone ( <i>DCP</i> ).....	46
4.2.2	Viga Benkelman ( <i>VB</i> ).....	48
4.2.3	Prova de Carga sobre Placa ( <i>PC</i> ) .....	49
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>51</b>
5.1	Introdução.....	51
5.2	Seleção de Amostras / Dosagens.....	51
5.2.1	Ensaio de Caracterização Física .....	54
5.2.1.1	Análise Granulométrica.....	55
5.2.1.2	Limite de Plasticidade .....	55
5.2.1.3	Limite de Liquidez .....	55
5.2.1.4	Massa Específica dos Grãos .....	55
5.2.1.5	Compactação .....	56
5.2.1.6	Expansão e Índice de Suporte Califórnia - ISC.....	56
5.2.1.7	Medição do pH.....	57
5.3	Pistas Experimentais.....	57

5.3.1	Pista Experimental da CEASA.....	57
5.3.2	Pista Experimental da Rua SR-68, Setor Recanto das Minas Gerais.....	59
5.4	Ensaaios em Campo .....	60
5.4.1	Viga Benkelman .....	61
5.4.2	Prova de Carga Sobre Placa .....	62
5.4.3	Penetrômetro Dinâmico de Cone ( <i>Dynamic Cone Penetration – DCP</i> ).....	62
<b>6</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>64</b>
6.1	Introdução.....	64
6.2	Caracterização dos Materiais em Laboratório.....	64
6.3	Compactação e Índice de Suporte Califórnia ( <i>California Bearing Ratio – CBR</i> ).....	74
6.3.1	Compactação .....	74
6.3.2	Índice de Suporte Califórnia ( <i>California Bearing Ratio – CBR</i> ) e Expansão.....	75
6.4	Medição de pH .....	77
6.5	Pistas Experimentais.....	78
6.5.1	Medidas de Deflexões Utilizando Viga Benkelman .....	79
6.5.1.1	Trecho Experimental da CEASA... ..	79
6.5.1.2	Trecho Experimental da Rua SR-68, Setor Recanto das Minas Gerais .....	83
6.5.2	Medidas de Deslocamento - Prova de Carga Sobre Placa.....	89
6.5.2.1	Pista Experimental da CEASA.....	89
6.5.2.2	Pista Experimental da Rua SR-68, Setor Recanto das Minas Gerais.....	91
6.5.3	Índice de Penetração - Penetrômetro Dinâmico de Cone ( <i>DCP</i> ) .....	94
6.5.3.1	Pista Experimental da CEASA.....	94
6.5.3.2	Pista Experimental da Rua SR-68, Setor Recanto das Minas Gerais.....	99
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>105</b>
7.1	Introdução.....	105
7.2	Análises de Laboratório.....	105
7.3	Pistas Experimentais.....	107
7.4	Sugestões para Pesquisas Futuras.....	108
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>109</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Sustentabilidade, como conceito, traduz-se em uma forma de configurar a sociedade e as atividades humanas de tal sorte que seus membros e suas economias possam preencher suas necessidades e expressar seu maior potencial no presente, e concomitantemente, preservar a biodiversidade e os ecossistemas naturais através de ações planejadas. Em termos mais simples, consiste em prover o melhor para as pessoas e para o ambiente tanto agora quanto para um futuro indefinido.

O termo original foi desenvolvimento sustentável, adotado pela Agenda 21, programa da Organização das Nações Unidas (ONU). Algumas pessoas hoje se referem ao termo desenvolvimento sustentável como um termo amplo, pois implica em desenvolvimento continuado e insistem que ele deve ser reservado somente para as atividades de desenvolvimento.

A sustentabilidade da construção civil, ou melhor, a construção sustentável, tem-se apresentado, nos dias de hoje, como um tema vasto e de extrema importância para discussão, admitindo-se que a indústria da construção civil causa imensos impactos ambientais no decorrer de sua cadeia produtiva. Considerações ecológicas tem se mostrado cada vez mais presentes nas construções modernas, conforme atesta Mehta (1994). De acordo com o autor, na ciência dos materiais deve-se sempre optar por aquele que está em maior harmonia com o meio ambiente.

Os impactos causados pela indústria da construção podem ser percebidos de forma clara e bastante objetiva ao observar-se as modificações de uso e ocupação de solos urbanos e rurais, os processos de extração de matérias-primas, produção e transporte de materiais, construção de edifícios, e, por conseguinte, a geração e disposição dos resíduos oriundos das construções.

O continuado debate de temas relacionados à sustentabilidade das construções têm conseguido obter sucesso através da elaboração de programas de gestão da qualidade e custos

na construção civil. Percebem-se grandes avanços nos últimos anos. De acordo com Sposto (2006), no Brasil, a discussão de temas voltados à sustentabilidade, consequência de discussões mais amplas realizadas na década anterior, iniciou-se com a realização da conferência ECO-92, em que se estabeleceram metas ambientais locais, incluindo a produção e a avaliação de edifícios e a busca de paradigmas para o desenvolvimento sustentável. Optou-se, com lógica, pela produção da maior quantidade de bens com a menor utilização de recursos natural e conseqüentemente, menor geração de poluição e menor impacto ambiental.

Dáí percebe-se que na indústria da construção o aproveitamento dos resíduos torna-se uma das ações que devem ser incluídas nas práticas comuns de produção de todas as obras, para promover o valioso conceito de maior sustentabilidade ambiental. Isto proporciona economia direta de recursos naturais e minimização do impacto ao meio ambiente. É notório que o potencial do reaproveitamento e reciclagem de resíduos da construção é muito grande e carece difusão, e a exigência da incorporação destes resíduos em determinados produtos pode vir a ser muito benéfica, já que proporciona economia de matéria-prima e energia primárias.

Entretanto, muito pouco ainda está sendo realizado. A falta de políticas públicas com o firme objetivo de promover o beneficiamento de resíduos da construção para o seu conseqüente reaproveitamento torna-se o maior entrave para o crescimento deste novo e importante ramo industrial. Políticas sérias de incentivo fiscal, bem como maior quantidade de fundos voltados à pesquisa de materiais a ser reaproveitados podem ser utilizadas para fazer florescer um novo mercado da sustentabilidade da construção.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

A análise do comportamento mecânico de agregados reciclados de construção civil em bases e sub-base de pavimentos flexíveis, com a ótica – ambiental – de promover o reaproveitamento ou reuso de tais matérias, é o objetivo primário deste trabalho.

A crescente geração e posterior acomodação dos rejeitos sólidos oriundos da indústria da construção torna-se, cada vez mais, um dos grandes problemas enfrentados pela sociedade. Os detritos gerados pelas obras de construção, reformas e demolições apresentam, geralmente, elevado volume e grande peso específico – relação existente entre massa e volume –

tornando-se laborioso seu transporte e sua disposição final. Observa-se, também, que estes resíduos provocam um rápido enchimento dos aterros de inertes onde são depositados e uma gama de problemas sócio-ambientais, como a criação de ambientes propícios à proliferação de vetores de mazelas urbanas, por exemplo, quando ocorrem disposições irregulares em áreas impróprias e nas periferias dos grandes conglomerados urbanos.

Face ao problema encontrado em todo o território nacional, autoridades federais, através do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução 307, de 05 de Julho de 2002 (CONAMA, 2002), estabeleceu diretrizes, critérios e procedimentos para serem observados na cadeia da indústria da construção, tangente à geração, transporte e correta disposição de resíduos. Tal norma estabelece, de forma tácita, as responsabilidades concernentes a todos os agentes envolvidos da geração de resíduos, desde o gerador propriamente dito, passando-se pelo acondicionamento, transporte e destinação final. Primordialmente, o CONAMA determina, no sexto artigo da Resolução supra mencionada, que os municípios e o Distrito Federal devem elaborar planos de gerenciamento de Resíduos da Construção Civil. Este plano é composto de projetos e um programa que organiza as diretrizes técnicas e os procedimentos para cada um dos atores envolvidos neste amplo contexto. Ao se analisar com maior objetividade, percebe-se que o principal objetivo desta Legislação é promover a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final.

Percebe-se, também, que obras de terraplenagem e pavimentação, necessárias à execução das vias de tráfego, consomem grande quantidade de agregados. A grande demanda existente faz com que haja constante necessidade da exploração de novas tecnologias voltadas à substituição dos materiais de origem natural, sem contar a incessante exploração das jazidas naturais. Junto à crescente demanda, percebe-se que cada vez mais há ausência dos cascalhos lateríticos em áreas de jazidas próximas às obras ou às zonas urbanizadas, tornando dispendioso o uso e conseqüente transporte dos mesmos para a região de realização dos serviços.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GERAL**

É o objetivo deste trabalho a realização de avaliações que permitam inferir conclusões acerca do comportamento estrutural de duas vias urbanas em cujas bases e sub-bases foram utilizados materiais provenientes de processos de reciclagem de agregados da Construção Civil.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Observar a variação das condições estruturais e da capacidade de suporte das vias em estudo ao longo do tempo;
- Efetuar comparações de resultados entre duas etapas de ensaios executados, bem como realizar avaliações da composição de misturas de agregados reciclados;
- Execução de ensaios laboratoriais para o entendimento acerca do comportamento mecânico destes resíduos;
- Oferecer alternativa, através da demonstração de resultados dos ensaios realizados, para a substituição do uso em bases e sub-bases, em casos de pequenas intervenções, de agregado britado natural (brita graduada) por agregado reciclado de origem cimentícia;

## **CAPÍTULO 2**

# **ASPECTOS GERAIS SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL**

### **2.1 O PROBLEMA AMBIENTAL**

Ao se analisar a situação atual dos resíduos gerados nos ambientes urbanos brasileiros, percebe-se que pela falta da presença de soluções adequadas, tanto para efluentes líquidos quanto para resíduos sólidos, o problema ambiental tem se agravado. Este quadro aparenta ser típico dos países em desenvolvimento, mas nem por isso permite tamanha tolerância da sociedade com assunto de tão grande importância.

Os resíduos gerados nas atividades construtivas também tem parte da responsabilidade no quadro deficitário descrito. São gerados grandes volumes que não recebem a solução adequada e, por conseguinte, providenciam grande impacto negativo ao meio ambiente vizinho, constituem local propício à proliferação de vetores de doenças, o que irá determinar piora no estado de bem estar social nas áreas adjacentes.

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) constituem parte dos resíduos sólidos urbanos, como os domiciliares, porém, com alguns agravantes:

- (i) Desconhecimento crônico dos volumes gerados;
- (ii) Desconhecimento dos reais impactos causados;
- (iii) Desconhecimento dos custos sociais envolvidos;
- (iv) Desconhecimento das práticas de reaproveitamento possíveis para os resíduos, o que faz com que os gestores deixem em compasso de espera as soluções e os testes de sua eficácia e, por fim,
- (v) Descaso das autoridades competentes com relação à aplicação das leis existentes.

Historicamente, quando se trata de resíduos sólidos, tem-se dado ênfase aos aspectos de abastecimento em detrimento aos aspectos voltados à análise das coletas, e de ambos sobre

a destinação. Ultimamente, o suprimento de água às comunidades têm primazia em relação à coleta e tratamento de esgoto, o que torna secundárias as preocupações com relação à destinação dos resíduos líquidos e só recentemente, percebe-se alguma preocupação com os resíduos sólidos.

As preocupações com o saneamento ambiental, no Brasil, iniciaram-se na década de 70, denominada década da regulamentação e do controle ambiental. Em 1972, a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente, em Estocolmo, marcou a percepção ambiental entre os países ricos e pobres. Após essa conferência, as nações começaram a estruturar seus órgãos ambientais. Somente a partir da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento Humano, ECO-92, que explicitou a necessidade de preservação natural e de reduzir os efeitos negativos diversos causados pelas atividades econômicas no meio ambiente, iniciou-se movimento mais consolidado e mais voltado às questões de desenvolvimento sustentável. A partir desse evento, muitos outros tiveram seqüência na avaliação da questão ambiental. A conferência RIO+5, realizada em 1997, avaliou os avanços obtidos desde a conferência inicial, a RIO-92. A cúpula mundial sobre o Desenvolvimento Sustentável, RIO+10, realizada em Joanesburgo, África do Sul, terminou demonstrando que os recursos naturais não são perenes caso não haja melhoras nos aspectos de consumo e tratamento dos mesmos (RIBEIRO, 2006).

A percepção da necessidade de se ampliar o conceito de saneamento básico para saneamento ambiental, que interage de forma integrada com os diversos atores existentes (água, esgoto, drenagem, resíduos e vetores) só recentemente vem ocorrendo. Exemplo disso está contido nos programas da Política Nacional de Saneamento do Governo Federal, que já inserem os problemas concernentes aos resíduos nas questões de saneamento. Neste cenário, paralelamente ao acentuado crescimento das populações urbanas, as questões de limpeza urbana e gestão dos resíduos sólidos foram deixadas a cargo dos municípios, sem o correspondente suporte de políticas públicas voltadas à área e sem instrumentos legais específicos para ação (PINTO, 1999).

Entretanto, com o aumento do número de problemas urbanos, o tema de estudo de resíduos sólidos tem sido introduzido na agenda dos administradores públicos e legisladores. Existem exemplos para a definição de políticas e estruturas de apoio à gestão dos resíduos, principalmente nas áreas metropolitanas. Percebe-se esforços da mesma natureza fora do

Brasil, em países como o Japão, Estados Unidos da América e outros países da Europa Central.

Nos países europeus e no Japão, devido à sua densidade demográfica e à falta de áreas e espaços para a acomodação dos resíduos, há políticas mais elaboradas e consolidadas de gestão e manejo dos resíduos sólidos. Motivos outros, como elevada industrialização e carência aguda de recursos naturais, fizeram com que houvesse grande desenvolvimento de esforços para o maior conhecimento e controle no aproveitamento do RCD. No Japão, a Lei de Limpeza e Tratamento de Resíduos, desde 1960 define como objetivos gerais a redução dos resíduos, a garantia da saúde pública pela disposição correta e apropriada, bem como a preservação dos recursos naturais pela reciclagem. A Lei da Reciclagem, outro documento legal japonês, estabelece que alguns ramos industriais, dentre eles a Construção Civil, a reciclagem de seus resíduos deve ser promovida. A experiência japonesa é acompanhada por missões técnicas chinesas, oriundas de Hong Kong, que buscam soluções para os notórios problemas de destinação de resíduos naquele território (PINTO, 1999).

Voltando-se à observação histórica, em 1998 promulgou-se a Lei de Crimes Ambientais (Lei Federal 9.605) que dispõe sobre as sanções penais e administrativas aplicáveis às condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Isto representou um significativo avanço na tutela do ambiente, por inaugurar uma sistematização das sanções administrativas e por tipificar organicamente os crimes ecológicos (MILARÉ, 2004 *apud* RIBEIRO, 2006).

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DE RCD

A prática brasileira, expressa pela norma NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004a) apresenta classificação para resíduos sólidos oriundos de qualquer natureza, quais sejam:

- **Resíduos de Classe I ou Resíduos Perigosos** – são todos aqueles que apresentam periculosidade em função de suas características físicas, químicas ou infecto-contagiosas e podem apresentar riscos à saúde pública, tendo como consequência a mortalidade, incidência de doenças ou o aumento dos seus índices, ou riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerado de forma inadequada. Ao observar a mesma

norma, pode-se perceber que são características dos resíduos perigosos a inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou a patogenicidade.

- **Resíduos de Classe II ou Não Perigosos** – são todos aqueles que não se enquadram como perigosos. São divididos em Classe II-A (Classe de Resíduos Não Perigosos Não Inertes) ou Classe II-B (Classe de Resíduos Não Perigosos Inertes).
  - **Classe II-A ou Resíduos Não Inertes** – Aqueles que se enquadram nas classificações de Perigosos ou Não Perigosos Inertes, entretanto apresentam propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (ABNT, 2004a).
  - **Classe II-B ou Resíduos Inertes** – Quaisquer outros resíduos que quando amostrados conforme a NBR 10.007 (ABNT, 2004d) e submetidos a contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, em temperatura ambiente, conforme NBR 10.006 (ABNT, 2004c) não possuam nenhum dos constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, com exceção dos aspectos de cor, turbidez, dureza e sabor.

Interessante perceber que poderá haver diferentes classificações dos resíduos, conforme sua origem e a origem dos materiais nas obras. A classificação da origem do RCD proposta pela *The Solid Waste Association of North America* (SWANA, 1993 *apud* PINTO, 1999) é bastante útil para a quantificação conforme sua geração:

- Material de obras viárias;
- Material de escavação;
- Demolição de edificações;
- Construção e renovação de edifícios;
- Limpeza de terrenos.

A composição dos RCD originados em cada uma dessas atividades é diferente em cada país, em função da variada utilização de tecnologias construtivas. Percebe-se que a madeira faz-se muito presente na construção americana e japonesa e tem presença menos marcante na construção européia e, principalmente, na construção civil brasileira. Entretanto, o gesso é fartamente encontrado na construção americana e européia e só recentemente tem sido utilizado de forma mais corriqueira nos maiores centros urbanos do Brasil. Da mesma

forma ocorre com obras de infra-estrutura viária, havendo preponderância do uso de pavimentos rígidos em concreto nas regiões no continente europeu, por motivos construtivos e culturais.

Muito embora o RCD apresente em sua composição diversos materiais que isoladamente podem ser reconhecidos como resíduos não inertes pela norma brasileira NBR 10.004 (ABNT, 2004a), inexistem na literatura análises qualitativas e quantitativas de caráter terminativo acerca dos parâmetros de solubilidade dos resíduos, considerando-os como um mosaico composto por vários materiais. Desta forma, não há garantias, em todos os casos, que não haja concentrações superiores às especificadas em normas específicas que garantam que o RCD possa continuar sendo classificado como Resíduo Classe II-B, Inerte, conforme a NBR 10.004 (RIBEIRO, 2006).

De maneira genérica, conforme a legislação em vigor, a coleta do entulho de obra (de maneira específica o resíduo de construção e demolição), de responsabilidade do gerador, é caracterizada e classificada como coleta especial de acordo com a NBR-12.980 (ABNT, 1993)

...a coleta especial contempla os resíduos não recolhidos pela coleta regular, tais como entulho, animais mortos e podas de jardins. Pode ser regular ou programada para onde e quando houver resíduos a serem removidos... (LIMA; CHENNA, 2000 *apud* RIBEIRO, 2006).

Observa-se que a resolução 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) define outra classificação para os resíduos de construção. Observando-se critérios voltados à sustentabilidade, a resolução prega que os resíduos de construção que podem ser reutilizados ou reciclados para a produção de agregados são aqueles que se enquadram na chamada classe A. Esta categoria de resíduos engloba os resíduos provenientes de:

- (i) construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, incluindo solos provenientes de terraplenagem;
- (ii) construção, demolição, reformas e reparos de edificações com componentes cerâmicos, argamassa e concreto e
- (iii) processos de fabricação ou demolição de peças pré-moldadas de concreto produzidas nos canteiros de obras.

Entende-se por agregado “o material particulado, incoesivo, de atividade química praticamente nula, constituído de misturas de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos” (BAUER, 1995, p. 63). Considerando-se que no decorrer deste poderá e será utilizada a terminologia agregado referindo-se ao Resíduo de Construção e Demolição (RCD) a ser substituído como opção viável de melhoramentos ambientais, mostrou-se conveniente definir, de forma técnica e precisa, para facilitar o entendimento.

Ainda, de acordo com a Resolução 307/2002 (CONAMA, 2002), os demais resíduos de construção civil (classes B, C e D) não são passíveis de reciclagem para a produção de agregados. Os resíduos classificados na classe B são materiais recicláveis para outras finalidades, das quais fazem parte os plásticos, papéis, metais, vidros, madeiras e outros. Os resíduos de classe C são os resíduos para os quais ainda não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam seu reuso ou reciclagem. Finalmente, os resíduos de classe D são resíduos perigosos oriundos dos processos de construção, como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados provenientes de demolições, reformas ou reparos em clínicas radiológicas ou instalações industriais.

Aproximadamente 80% de todo resíduo de construção gerado é passível de reciclagem (BODI *et al.*, 1995 *apud* MOTTA, 2005), por se tratar de resíduo proveniente de materiais duros, podendo tornar-se agregado. De qualquer forma, o uso de materiais alternativos deve aumentar consideravelmente no futuro em virtude de legislação ambiental mais severa e devido à escassez de agregados naturais.

## **2.3 ASPECTOS LEGAIS VIGENTES**

### **2.3.1 RESOLUÇÕES CONAMA**

Grande parte das cidades brasileiras, principalmente aquelas em que se observa acelerado desenvolvimento da urbanização, sofre com o desmazelo e os conseqüentes impactos ambientais provocados pela intensa deposição, de forma irregular, dos dejetos sólidos de origem da construção civil. Essa grande massa de resíduos, que conforme dados brasileiros varia entre 55 e 70% da massa de resíduos sólidos urbanos, segundo o Ministério

do Meio Ambiente (MMA, 2006), sobrecarrega os serviços públicos de limpeza das cidades e drena cada vez mais os poucos e escassos recursos públicos destinados à coleta, transporte e correta disposição dos resíduos, o que realmente representa, conforme a legislação, responsabilidade inerente aos geradores.

A Resolução 307, de 05 de julho de 2002 (CONAMA, 2002), complementada posteriormente pela Resolução 348, de 16 de agosto de 2004 (CONAMA, 2004), estabeleceram diretrizes, critérios e procedimentos para a correta gestão dos resíduos sólidos da construção civil. Conforme escrito na legislação, os resíduos não mais poderiam ser descartados em áreas de disposição de resíduos domiciliares, em áreas destinadas a bota-foras, em encostas, nascentes, lotes vagos de terras urbanas e em áreas protegidas pela força de Lei. Por ação das normas, os resíduos deveriam ser reutilizados, reciclados ou encaminhados para áreas específicas para a correta disposição, como aterros de inertes, por exemplo.

Interessante perceber que a Resolução 307 (CONAMA, 2002) do CONAMA foi publicada no Diário Oficial da União em 17 de julho de 2002 e entrou em vigor em 02 de janeiro de 2003. No entanto, até o presente, grande parte dos municípios não implantou as diretrizes apresentadas nesta peça legal.

### **2.3.2 LEGISLAÇÃO MUNICIPAL DE GOIÂNIA**

A legislação ambiental existente no município de Goiânia, de maneira geral, data da década de 90 e, logo, não possui preocupação proativa em relação à questão ambiental. As principais peças são aquelas que regem o uso e ocupação do solo urbano e que estabelece o código de posturas do município, conjunto de normas responsável pelas condutas dos munícipes em relação às várias ocorrências dentro do município. Destacam-se, dentre toda a legislação, a Lei Complementar n° 015, de 30 de dezembro de 1992 (Diretrizes de Desenvolvimento para o Município e a Política Urbana), a Lei Complementar n° 031, de 29 de dezembro de 1994 (Uso e a ocupação do solo nas Zonas Urbana e da Expansão Urbana do Município de Goiânia), a Lei Complementar n° 014 de 29 de dezembro de 1992 (Código de Posturas do Município de Goiânia), o Decreto n° 1.254 de 27 de junho de 2000 (Dispõe sobre a colocação e a permanência de caçambas para a coleta de resíduos inorgânicos)

e, finalmente a **Lei Municipal 8.330, de 20 de Julho de 2005** (Institui o Programa de Reciclagem de Entulhos da Construção Civil) (PREFEITURA DE GOIÂNIA, 2005).

O texto legal de Julho de 2005 demonstra o início das preocupações dos administradores públicos goianienses com as questões tangentes aos resíduos sólidos de construção. Demonstra de forma cabal que os administradores pretenderam dar cunho social à Lei, uma vez que a mesma diz ser de responsabilidade do poder público municipal apoiar a criação de centros de prestação de serviços e de comercialização, distribuição e armazenagem de matérias recicláveis no Município de Goiânia, bem como incentivar a criação de cooperativas populares e indústrias voltadas para reciclagem de matérias provenientes de entulhos de construção civil e promover campanhas de educação ambiental voltada para divulgação e valorização do uso de materiais recicláveis e seus benefícios. Desta forma existe o compromisso legal de se incentivar o desenvolvimento de projetos de utilização de materiais recicláveis.

O cunho social desta matéria é exposto de forma indelével quando o texto legal em referência, em seu artigo quarto, diz haver prioridade no aproveitamento da mão-de-obra local, com o fito de ampliar a capacidade de geração de trabalho, emprego e renda, e também, propiciar melhor qualidade de vida aos cidadãos goianienses, nos âmbitos ambientais e econômicos, estimular a organização de cooperativas de trabalhadores voltadas à reciclagem de entulhos da construção civil e finalmente colaborar com iniciativas e campanhas sócio-educativas, relacionadas à importante temática ambiental.

O texto também faz alusão, em seu artigo terceiro, à possibilidade de concessão de benefícios, incentivos e facilidades fiscais e de programas de financiamento ou a celebração de convênios de colaboração com órgãos ou entidades das administrações federal, estadual e municipal como forma de promover e desenvolver as atividades de reciclagem de RDC no município de Goiânia.

Contudo, até a presente data, apesar da aprovação da Câmara Municipal e da sanção do chefe do Poder Executivo, muito pouco foi executado, de forma concreta, para que este texto legal se tornasse factível. Observa-se nenhuma ação, por parte do Poder Público Municipal, para promover a reutilização de tão nobre material.

### 2.3.3 OUTROS DISPOSITIVOS

O município de São Paulo apresenta interessante arcabouço legal acerca do tema de resíduos sólidos de construção civil. Através de decretos do Chefe do Poder Executivo, procurou-se normatizar e regulamentar Leis Municipais que se referem ao tema em tela.

O Decreto 42.217, de 24 de Julho de 2002, da então prefeita Marta Suplicy, regulamenta a Lei 10.315 de 1987, no que se refere ao uso de áreas destinadas ao transbordo e triagem de resíduos de construção civil e resíduos volumosos (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2002).

Mais adiante, o Decreto 46.594, de 03 de Novembro de 2005, do então prefeito José Serra, regulamenta a coleta, transporte e a disposição final de resíduos inertes conforme trata a Lei Municipal 13.478 de dezembro de 2002 e suas alterações (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2005).

Notoriamente, demonstrando maior preocupação administrativa com a gestão dos resíduos sólidos, o Prefeito Gilberto Kassab edita o Decreto Municipal 48.075, de 28 de Dezembro de 2006, que dispõe da obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados, oriundos de resíduos sólidos da construção civil em obras de pavimentação das vias urbanas do município de São Paulo. O decreto foi concebido, conforme seu texto, considerando-se os benefícios da utilização de resíduos sólidos da construção civil para o meio ambiente, que poupará o uso e gerará economicidade na utilização de recurso natural não-renovável e escasso naquela região metropolitana (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2006).

Há de se observar que as áreas destinadas ao transbordo, triagem e reciclagem dos resíduos sólidos da construção civil em São Paulo têm que apresentar capacidade de suprir o fornecimento de materiais em quantidades suficientes para abastecer as obras e serviços de pavimentação do município de São Paulo.

Existe, também, a inserção de dispositivos normativos de extrema importância para a padronização dos processos ambientais. Em 1993, *International Organization for Standardization (ISO)* estabeleceu normas acerca da gestão ambiental dentro das corporações. Para tanto, reuniu profissionais e criou nove subcomitês, subordinados ao Comitê Técnico TC-207, que teve o objetivo de desenvolver as normas da série ISO 14.000 para as áreas cujos processos são envolvidos pelo meio ambiente.

O principal objetivo das normas série ISO 14.000 é a certificação e o atestado de capacidade de gestão de processos de uma atividade dentro de uma organização. Para a obtenção e manutenção da certificação ISO 14.000, a organização tem que se submeter a auditorias periódicas, realizadas por uma empresa certificadora, credenciada e reconhecida pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) e outros organismos internacionais credenciados

Entretanto, apesar do fato de que as empresas estejam procurando se adequarem às normas e à legislação ambiental vigente, a degradação ambiental persiste e continua em ritmo crescente. Apenas um número pequeno de empresas busca a sustentabilidade e as melhorias conseguidas são pequenas diante da demanda crescente por produtos e serviços por parte de consumidores treinados pela cultura ocidental e pelo desenvolvimento econômico.

## **2.4 ASPECTOS NORMATIVOS**

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou, em 2004, cinco normas técnicas de interesse direto em Resíduos de Construção e Demolição, a saber, NBR 15.112, NBR 15.113, NBR 15.114, NBR 15.115 e NBR 15.116.

A NBR-15.112 (ABNT, 2004i) normatiza as diretrizes para projeto, implantação e operação das áreas de transbordo e triagem para resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos. Conveniente perceber que por força desta, o ingresso de qualquer material deve ser precedido por documentação denominada Controle de Transporte de Resíduos (CTR) em que o nome do transportador, nome do gerador, endereço de coleta, volume, quantidade e descrição do material predominante são apresentados.

A NBR-15.113 (ABNT, 2004h) trata especificamente das diretrizes de projeto, implantação e operação de aterros de inertes para resíduos sólidos da construção civil. Os procedimentos desta norma apresentam uma quantidade de exigências similar à norma para aterros sanitários, em que toda a área deverá ser cercada, iluminada e dotada de sistema de comunicação para casos de emergência e a área de aterro poderá ter como destino futuro o reaproveitamento de todo o material estocado com o reuso ou ser utilizada, após atingido o limite de estocagem, como praça, construção de condomínios ou outros fins, com exceção da impermeabilização de fundo, que neste caso não é uma exigência, mas deixa claro que não deverá haver contaminação das águas subterrâneas (AFFONSO, 2005).

A administração da operação do aterro de inertes será obrigada a perfurar poços de monitoramento, com coletas periódicas de água para confirmação da não contaminação do aquífero freático. Em caso positivo, caberá aos operadores do aterro a tomada de medidas mitigadoras.

Necessário se faz ter o emprego e estudo das seguintes normas, para análise dos materiais que constituirão o aterro de RCD:

- NBR-10.004:2.004 - Resíduos Sólidos, Classificação (ABNT, 2004a);
- NBR-10.005:2.004 - Lixiviação de Resíduos – Procedimento (ABNT, 2004b);
- NBR-10.006:2.004 - Solubilização de Resíduos – Procedimento (ABNT, 2004c);
- NBR-10.007:2.004 - Amostragem de resíduos – Procedimentos (ABNT, 2004d).

A NBR-15.114, de 30 de julho de 2004 (ABNT, 2004f), trata especificamente das diretrizes para projeto, implantação e operação das áreas para reciclagem de resíduos sólidos de construção e demolição.

A NBR 15.115, de 30 de julho de 2004 (ABNT, 2004e), estabelece critérios e procedimentos para o uso de RCD em camadas de pavimentação. Participaram da sua elaboração, além de empresas privadas, as prefeituras de São Paulo e Santos, o Sindicato da Indústria da Construção de São Paulo (SINDUSCON/SP) e a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) (AFFONSO, 2005). Infelizmente, os debates acerca desta norma não contaram com a contribuição de outros estados que trabalham com este tema.

Por esta norma, alguns critérios foram estabelecidos para o uso de RCD em camadas de pavimentação:

- Indica o Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio (CBR)*, normatizado pela NBR-9.895 (ABNT, 1987), como parâmetro para análise da resistência dos materiais. Logo, a aceitação para uso dos agregados reciclados em reforço de subleito, sub-base e base de camadas de pavimentação está ligada à resistência e não à sua natureza. Caso o CBR seja maior do que 12%, o material é aceito para reforço de subleito; caso o CBR chegue a 20%, o material pode ser usado como constituinte de sub-base e, para execução de bases, o CBR deve ser superior a 60%;
- O agregado deve apresentar curva granulométrica bem graduada e não uniforme, como o similar natural, e não há qualquer restrição quanto à composição do agregado, podendo ser produto de resíduos de concreto, tijolos e blocos cerâmicos argamassas, agregados pétreos, camadas asfálticas de pavimentos e outros, sempre classificados conforme a Resolução 307 (CONAMA, 2002) na classificação “A”;

A NBR-15.116, de 30 de julho de 2004 (ABNT, 2004g), trata especificamente dos agregados de resíduos sólidos da construção civil e de sua utilização para pavimentação ou para preparo de concreto para fins não estruturais. A norma caracteriza os resíduos e define requisitos, os quais, em sendo preenchidos, deverão classificar os resíduos em ARC (Agregado de Resíduo de Concreto) ou ARM (Agregado de Resíduo Misto). Interessante perceber que a mesma peça normativa impõe requisitos a serem preenchidos pelos agregados reciclados para ser futuramente utilizado em pavimentação ou em concreto sem fins estruturais. Para agregados de pavimentação, tem-se que os requisitos são os mesmos da NBR 15.115 (ABNT, 2004e). A norma determina, também, bateria de tipos de ensaios e frequência de realização para a caracterização do agregado reciclado (ABNT, 2004g). O resultado dos ensaios determinará a aceitação ou não do lote de materiais, para a conseqüente liberação para uso nas pistas ou em outras obras.

## CAPÍTULO 3

### UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS EM OBRAS

#### 3.1 PERDA E DESPERDÍCIO DE MATERIAIS NA CONSTRUÇÃO

O estudo dos temas relacionados à sustentabilidade na construção civil torna-se cada vez mais importante, já que a indústria da construção causa um grande impacto ambiental ao longo de toda a sua cadeia produtiva. Os impactos estendem-se desde a ocupação de lotes de terras, extração incessante de matérias-primas para os diversos usos, produção e transporte de materiais, construção de edifícios e outras obras e a conseqüente geração e disposição de resíduos sólidos. No Brasil, entretanto, observa-se que as perdas em processos construtivos têm recebido melhorias no tratamento, uma vez que apresenta cada vez mais pesquisas voltadas para a área e extensa normatização com o propósito de combater seu aumento.

Conforme elenca Sposto (2006), estima-se que para cada metro quadrado de construção de obra do tipo edifício (bastante comum na indústria da construção civil) são gastos em torno de uma tonelada de materiais, o que demanda elevada quantidade de cimento e agregados minerais (considerando-se que o cimento *Portland* é o insumo mais abundante na maioria das obras de construção civil, conforme análises realizadas através da curva de Pareto ou curva ABC, que mostra que pequena parcela do número de insumos de uma obra é responsável por grande parte do impacto ou importância). Percebe-se, também, que são geradas elevadas quantidades de resíduos proveniente das perdas ou desperdícios que ocorrem nos diversos processos produtivos existentes dentro de uma obra.

Sposto (2006) declara que alguns levantamentos realizados em Brasília, Distrito Federal, estimaram geração média de resíduo de construção e demolição (RCD) na ordem de 120 kg/m<sup>2</sup>. De acordo com Pinto (1999), a intensidade de perda para a construção empresarial situa-se entre 20 e 30% da massa total de materiais, função do patamar de desenvolvimento tecnológico do executor dos serviços. Mais precisamente, conforme pesquisa realizada pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), com as informações coletadas,

apontou-se média de 27% de perda na massa nas obras estudadas, portanto, dentro do intervalo inicialmente considerado (entre 20 e 30%).

Ressalta-se, por importante que seja, que em função da variabilidade do estágio tecnológico do executor e em função das várias situações possíveis dentro de uma obra, os agentes executores podem e devem ter sua atenção voltada ao reconhecimento de seus próprios índices e do melhoramento de seu patamar tecnológico. Este melhoramento dá-se através de investimentos que, no médio prazo, pode conquistar competitividade mercadológica e trazer mais racionalidade tangente ao uso de recursos e insumos para a construção.

Há que se observar que existe predominância dos resíduos provenientes de construções, quando comparados às quantidades de resíduos de demolições e reformas. Essa afirmação demonstra o recente desenvolvimento das zonas urbanas brasileiras. Entretanto, em países de economia mais madura, em que as atividades de reforma e renovação são muito mais frequentes (devido inclusive ao fato de haver pleno desenvolvimento e ocupação do solo urbano), os resíduos oriundos de demolições são muito mais frequentes (PINTO, 1999).

Ademais, a disponibilidade de dados acerca de perdas e desperdício na construção, no Brasil, só ocorre para a construção residencial em edifícios, não havendo estudos mais qualificados sobre a intensidade e a quantidade das perdas em outras tipologias de construção (reformas e obras viárias, por exemplo). É imperioso crer que a construção industrializada tem espaço cada vez menor para a coexistência com o elevado percentual de perdas e com o desperdício de recursos naturais não renováveis, tanto por problemas econômicos, quanto a restrições ambientais.

### **3.2 HISTÓRICO SOBRE A RECICLAGEM DE RCD**

A adoção de políticas voltadas ao desenvolvimento contínuo do uso da reciclagem, reuso, reaproveitamento ou co-processamento de materiais torna-se cada vez mais necessária quando se observa o crescimento elevado das quantidades de resíduos, de forma geral, gerados e lançados no meio ambiente de forma descuidada.

Quando se trata especificamente de RCD, advindos das novas obras, reformas, demolições ou autoconstruções, percebe-se que existem novas tecnologias a serem aplicadas, como novos processos de gestão para reuso e reciclagem nos próprios canteiros e o refinamento de novas técnicas de demolição. Tais investimentos no desenvolvimento de novas tecnologias para reciclagem e reutilização têm somente um fundamento: a diminuição da extração de recursos naturais não renováveis.

Historicamente, as atividades construtivas sempre se caracterizaram como grandes geradoras de resíduos, oriundos de altos índices de desperdício, e também como potenciais consumidoras dos resíduos gerados por elas mesmas ou por outras atividades humanas de transformação, como é o caso do asfalto e produtos betuminosos, que constituem subprodutos da atividade refinadora de petróleo (PINTO, 1999).

Quem imagina que a reciclagem e o estudo de RCD começou apenas com o início da adoção de conceitos, técnicas e posturas mais sustentáveis por parte de todos os setores, engana-se. O reaproveitamento de resíduos de construção já é praticado há muito tempo. Schulz e Hendricks (1992), mencionam registros de utilização de alvenaria britada na produção de concreto pelos Romanos (eles já empregavam tijolos, telhas e louças de cerâmica moída como pozolanas - material silicoso ou sílico-aluminoso que, finamente moído e na presença de água, reage com hidróxido de cálcio e forma compostos com propriedade aglomerante). Curiosamente, o termo pozolana tem origem no nome da região italiana de *Pozzuoli* (SANTOS, 1975). Os Fenícios, 700 anos antes desta era, também lançaram mão do uso de reciclados em camadas de pavimentos, de acordo com a mesma fonte.

No período mais recente, na Alemanha, em torno de 1860, há notícias do uso de blocos de concreto britados como agregado para novos produtos de concreto. Devenny e Khalaf (1999), citados por Leite (2001), relatam que a primeira utilização de tijolos com cimento *Portland* para produção de concreto ocorreu em 1860 na Alemanha. Os primeiros estudos sistemáticos sobre as características dos agregados reciclados tiveram início neste mesmo país, em 1928. No entanto, o uso significativo de RCD reciclado só veio acontecer após a Segunda Guerra Mundial, em resposta à necessidade de satisfazer a enorme demanda por materiais de construção e à necessidade de remover os escombros das cidades européias (SCHULZ; HENDRICKS, 1992). Entretanto, as grandes catástrofes do século passado, como

terremotos e grandes guerras, realmente impulsionaram a prática do uso do material reciclado em locais com grandes volumes de resíduos e grande carência e urgência de construção de edificações e equipamentos de infra-estrutura (LIMA, 1999).

Durante a Segunda Guerra Mundial e até 1955 foram reciclados aproximadamente 115 milhões de metros cúbicos de resíduos de construção e demolição na Alemanha, os quais foram utilizados na construção de aproximadamente 175 mil unidades habitacionais. Em 1980 ocorreu um terremoto de grandes proporções na cidade de Al-Asnam, na Argélia, o que motivou uma pesquisa internacional para o reaproveitamento dos rejeitos na fabricação de blocos de concreto. Segundo as estimativas dos pesquisadores, poderiam ser fabricados aproximadamente 50 milhões de blocos de concreto para a construção de habitações, seguindo procedimentos normalizados. Curiosamente não foram implantadas unidades de reciclagem em grande escala: dentre outros motivos, a população se recusou a usar blocos fabricados com material de escombros que causaram a morte de seus parentes e conterrâneos (DE PAW; LAURITZEN, 1994).

A *tsunami* que se abateu sobre a Indonésia (em janeiro de 2005) destruiu, de uma só vez, 300 mil residências, mais de 200 quilômetros de estradas e 30 pontes em concreto armado. Estimativas iniciais dão conta de algo em torno de 80 milhões de metros cúbicos de resíduos (Figura 3.1), mas podendo chegar a índices ainda maiores. Tudo isso em menos de 5 minutos (AFFONSO, 2005).



Figura 3.1 - Figura que demonstra o efeito devastador da *Tsunami* que se abateu sobre o território da Indonésia (AFFONSO, 2005).

Num segundo momento, passam a se interessar pela reciclagem dos RCD os países e regiões da Europa que têm deficiências na oferta de materiais granulares: Holanda, Dinamarca, Bélgica e regiões da França (ITEC, 1995).

Nas últimas décadas, principalmente por razões ambientais e econômicas, vários países têm adotado a reciclagem realizada por empresas particulares ou públicas, tais como Holanda, Dinamarca, Estados Unidos, Japão, França, Itália, Espanha, Reino Unido, Rússia e mais recentemente o Brasil (ANVI, 1992; DE PAUW; LAURITZEN, 1994; HANSEN, 1992; LATTERZA, 1997; LEVY, 1997; SWANA, 1993; ZORDAN, 1997 *apud* LIMA, 1999; MEHTA, 1994). Durante o período de desenvolvimento da reciclagem de resíduos de construção realizaram-se pesquisas e proposições de normas para obtenção e classificação do agregado reciclado. Em alguns países existe conhecimento consolidado sobre o material e normas avançadas para sua aplicação em vários serviços. As aplicações, no entanto, variam conforme o país, em função de características particulares como oferta de materiais de construção e resíduos, disponibilidade de locais para deposição e o rigor das normas relativas a materiais a serem utilizados na construção.

Vários países no mundo já experimentam, com sucesso, práticas tecnológicas que utilizam os RCD de forma eficaz e eficiente. De forma generalizada, pode-se depreender que para que exista o efetivo uso de reciclados, necessário se faz a pesquisa dos mesmos e a conseqüente formação de normas técnicas para o uso, bem como a presença de sólida legislação que embase, permita e promova o uso dos reciclados de RCD.

- Japão: Em 1990, 25,4 milhões de toneladas de RCD foram gerados, sendo que 48% deste total foi reutilizado ou reciclado. Hodiernamente, aproximadamente 68% todo o volume de resíduo de concreto gerado é reciclado e utilizado, inclusive, para pavimentação de rodovias. Existe um plano para que seja estimulado o uso deste resíduo para produção de novos concretos (VÁSQUEZ; BARRA, 2000).

- Reino Unido: Observa-se que o governo britânico considera importante as iniciativas nesta área. Recentemente, em relatório publicado, denominado *Demolition Protocol*, foi estabelecido um protocolo e planejamentos para a execução dos serviços de demolição e conseqüente reaproveitamento dos resíduos. O mesmo relatório sugere técnicas para a identificação de áreas próprias para a disposição dos resíduos não reaproveitados. São

constantes deste caderno, técnicas de reaproveitamento de concreto, alvenaria, vidro, metais e madeira (ENVIROCENTRE, 2006). É política do governo trabalhista britânico abastecer 10% do mercado de agregados com produtos reciclados e ampliar essa taxa, em função do considerável potencial do mercado (COLLINS, 1998).

- Estados Unidos da América (EUA): Após 1982, as normas ASTM C33-82 e C125-79 criam condições para o reuso de RCD em pavimentos e concretos (AFFONSO, 2005). A Agência de Proteção do Meio Ambiente (*Environmental Protection Agency - EPA*) estimou, em seu relatório de 1996, que 20 a 30% dos RCD gerados no país estavam sendo recuperados (YOST, 1998 *apud* PINTO, 1999), mas esse não é um indicador seguro, dada a celeuma provocada na Indústria da Construção e Demolição (*C&D Industry*) e a posterior revisão do relatório. Ainda em 1996, foi estimada a existência de 1.800 instalações de reciclagem em operação no país, 1.000 delas processando asfalto, 500 processando madeira e 300 operando com resíduos misturados (PINTO, 1999).

- Dinamarca: Desde 1970 se pesquisa o emprego de agregados reciclados em concreto. Apenas em 1990, através de uma sobretaxa para a geração destes materiais, é que o governo conseguiu o aumento do interesse pelo seu reaproveitamento. Em consequência, em 1992, aproximadamente 25% dos resíduos foram reciclados, chegando em 2000 à taxa de 60%. Estas taxas continuaram a subir, de maneira paulatina. Hodiernamente, cerca de 90% é reciclado (AFFONSO, 2005). Tem-se que o estado Dinamarquês, dos estados europeus, é o que mais pratica a reciclagem de resíduos de construção e demolição (MOTTA; FERNANDES, 2004 *apud* AFFONSO, 2005).

- Alemanha: Ironicamente, no país onde se iniciou o trabalho de reciclagem, esta atividade se retraiu, só sendo reiniciada com a reunificação Alemã, em 1989. Na ocasião, 43 milhões de toneladas foram recicladas, quase 35% do volume total existente e a demolição seletiva e a desconstrução foram incentivadas.

- França: Observa-se que na nação francesa, de todo o volume gerado anualmente (25 milhões de toneladas) 80% provém de demolição, 8% da construção e 12% da realização de restaurações ou reformas. A França consome, anualmente, 400 milhões de toneladas de

agregados e a produção de agregados reciclados ainda é muito pequena, chegando a quatro milhões, ou seja, aproximadamente 1% do total consumido (AFFONSO, 2005).

De maneira geral, na Comunidade Econômica Européia, é estimada a geração anual de 500 milhões de toneladas de RCD (IVBR, 1995), somatória de gerações elevadas como a da Alemanha e outras bem menos significativas, como na Bélgica e Suíça, países de menor área territorial. Em praticamente todos os países-membros existem instalações de reciclagem de RCD, normas e políticas específicas para esse tipo de resíduo, desenvolvendo-se no período mais recente esforço de consolidação de normativa única para toda a comunidade. O chamado *Construction and Demolition Waste (C&DW)*, em português Resíduo de Construção e Demolição, foi identificado como prioridade extrema pelos estados membros da Comunidade Econômica Européia (CEE) e constitui a maior parcela (unitária) de resíduos gerada pela sociedade (VORONOVA, 2006).

### **3.3 RECICLAGEM NO BRASIL**

No Brasil, o primeiro estudo sistemático para a utilização de resíduos de construção e demolição foi concluído em 1986, pelo arquiteto Tarcísio de Paula Pinto. Sua pesquisa consistiu em estudar o uso do resíduo de construção e demolição reciclado para produção de argamassas (PINTO, 1986).

A reciclagem dos resíduos de construção teve início efetivo no país em 1991, na cidade de Belo Horizonte e hoje já existem algumas estações de tratamento e reciclagem deste material espalhadas em alguns estados do Brasil. Alguns estudos têm sido desenvolvidos em universidades nacionais com o propósito de obter um melhor entendimento sobre o comportamento deste material (ZORDAN, 1997; LEVY, 1997; LATTERZA, 1998; BAZUCO, 1999 *apud* LIMA, 1999; LEITE, 2001; REZENDE, 2003; AFFONSO, 2005; MOTTA, 2005; RIBEIRO, 2006; OLIVEIRA, 2007; RESPLANDES, 2007).

Como forma de se priorizar as ações voltadas à reciclagem de RCD no território brasileiro, observa-se, conforme descrito no Capítulo 2 deste trabalho, os marcos regulatórios legais instituídos pelo Governo Federal para ser seguido e implementado pelos administradores municipais e pela iniciativa privada. A legislação em tela pode ser melhorada

ou aperfeiçoada, conforme os casos específicos, pelos administradores ou legisladores municipais.

Paralelamente a esses estudos, estendeu-se bastante rapidamente, a partir do início da década de 80, o uso de masseiras-moinho, equipamentos de pequeno porte para uso exclusivo em obras de edificações. O resultado de seu uso é bastante positivo, tanto pela indução ao gerenciamento dos resíduos na obra, como pela redução dos custos das perdas nos processos construtivos - o que propicia rápida amortização do investimento e é positivo, inclusive, por contribuir para a minoração do impacto dos RCD nas áreas urbanas (PINTO, 1999).

### **3.4 UTILIZAÇÃO DE RCD EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO**

Alguns países já possuem legislação e normas compatíveis ao uso de reciclados em pavimentos asfálticos. Na Holanda, os requisitos para usufruto de agregados reciclados em obras de pavimentação foram lançados e publicados em 1995 e tem atenção voltada à granulometria dos agregados. Na Itália, os agregados aplicados em pavimentação seguem à norma *UNI Standard 10006* de construção de estradas. A Áustria apresenta a melhor técnica de reciclagem de pavimentos rígidos de concreto, conforme literatura a respeito. Os pavimentos antigos são reciclados, tornando-se agregados dos novos pavimentos de concreto de cimento *Portland* (MOTTA, 2005).

O Brasil já possui algumas experiências com o uso de agregados reciclados na pavimentação. O uso de agregados em base e sub-base torna-se cada vez mais objeto de pesquisa, bem como o uso de borracha de pneus juntamente com cimento asfáltico (AMARAL, 2004).

Em muitas das vias urbanas de São Paulo foi utilizado resíduos de construção como pavimento primário a fim de minimizar os problemas causados por lama nos períodos chuvosos e os problemas com poeira nos períodos de estiagem. Baseando-se no fato de que as vias públicas urbanas de São Paulo terem apresentado menor índice de manutenção, apesar de não terem sido imediatamente pavimentadas, em 1984 executou-se a pavimentação da primeira via utilizando-se de instrumentos de controle tecnológico (Rua Gervásio da Costa, na zona oeste da cidade, que apresenta baixo volume de tráfego). Nesta via, foram utilizados

agregados reciclados no reforço do subleito e na sub-base. Seu desempenho, à época, foi considerado satisfatório (BODI, 1995 *apud* MOTTA, 2005).

Em Belo Horizonte, os reciclados são utilizados desde 1996 na execução de reforço de subleito, sub-base e base de pavimentos. De acordo com Motta (2005), desde 1996 até 2001 foram utilizadas 137.000 toneladas de agregados reciclados em 271 vias implantadas ou reformadas, com extensão linear aproximada de 400 quilômetros. Os projetos executados foram executados com bases empíricas, considerando-se somente o *California Bearing Ratio* (CBR) e a experiência dos engenheiros do município.

Várias pesquisas foram efetuadas no Brasil para testar e aferir o desempenho dos agregados reciclados a serem utilizados em obras de pavimentação no Brasil. Bodi *et al.* (1995 *apud* MOTTA, 2005) analisaram três tipos de agregados reciclados em São Paulo (SP) (amarelo, vermelho e uma mistura). Os resultados foram considerados positivos. Trichês e Kryckyj (1999 *apud* MOTTA, 2005) analisaram agregados reciclados de Florianópolis (SC), segregados em frações e posteriormente misturados com solos areno-siltosos e argilosos. Conforme os resultados, o solo apresentou excelente alternativa para a execução de reforço de subleito e sub-base.

Carneiro *et al.* (2001 *apud* MOTTA, 2005) estudaram agregados reciclados de Salvador (BA) em frações graúda e miúda além de misturas com lateritas e saprólitos em diferentes proporções. Nas análises realizadas, a conclusão foi que os agregados reciclados de Salvador são adequados à obras de reforço de subleito e sub-base de pavimentos flexíveis.

Experiências efetuadas na cidade de Goiânia, por Ribeiro *et al.* (2001), Silva (2004), Ribeiro (2004), Mendes (2004), Ribeiro (2006), Resplandes (2007) e Oliveira (2007) demonstraram que o agregado reciclado apresenta propriedades interessantes para utilização na construção de bases e sub-bases de pavimentos, bem como estruturas de reforço para subleitos. 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 dos solos. Apresenta, também, segundo diversos autores, expansibilidade baixa ou nula, ou seja, mesmo sob saturação, não ocorre expansão das camadas compactadas (RIBEIRO, 2006).

Em Goiânia (GO) existem dois trechos experimentais construídos com sub-base e bases compostas de misturas de agregado reciclado e solo local. Esses trechos foram executados em 2004 e seus desempenhos estruturais têm sido acompanhados por meio da realização de ensaios de campo ao longo do tempo.

O primeiro trecho foi executado em um acesso à Central de Abastecimento de Goiás S/A (CEASA). Por meio da realização de ensaios de caracterização, compactação, expansão e *CBR*, foram identificadas as características do solo local e definidas as granulometrias e porcentagens de misturas solo-entulho (MENDES *et al.*, 2004). O entulho processado foi dividido em três frações denominadas de brita de 19mm, brita de 9,5mm e 4,8mm. As dosagens foram feitas combinando essas três frações do entulho processado entre si e com argila retirada no próprio local. Depois de feitos todos os estudos de caracterização com cada fração dos resíduos sólidos da construção civil - reciclados - e com a argila do local da pista experimental - foram realizados estudos de misturas das quatro frações, com a finalidade de enquadrar o material de acordo com uma das faixas granulométricas do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atualmente denominado Departamento de Infra-Estrutura e Transportes (DNIT), para utilização em camadas de sub-base e base de pavimentos flexíveis. Neste caso a faixa adotada foi a Faixa D (MENDES *et al.*, 2004; RESPLANDES, 2007).

Oliveira *et al.* (2005) realizaram ensaios de campo (Viga Benkelman, Prova de Carga, Penetrômetro Dinâmico de Cone e Pressiômetro Pencil) no trecho experimental em tela, para avaliar o comportamento estrutural 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.

As composições da sub-base são de 33% brita 19 mm, 33% brita 9,5 mm, 17% areia artificial, 17% argila; energia de compactação Proctor intermediária;  $\gamma_{dmax} = 18,31 \text{ kN/m}^3$ ;  $w_{ot} = 12,3\%$ ; *CBR* = 90%;

As características da base são de 25% de brita 19 mm, 25% de brita 9,5 mm, 25% de areia artificial, 25% de argila; energia de compactação: Proctor intermediária;  $\gamma_{dmax} = 17,7 \text{ kN/m}^3$ ;  $w_{ot} = 14,5\%$ ; *CBR* = 83%;

O segundo trecho foi executado no Setor Recanto das Minas Gerais (Rua SR-68) considerando-se os estudos e a experiência obtida da realização do primeiro trecho. Ribeiro

(2006), através de estudos, avaliou o comportamento estrutural da via do trecho 2, 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.

## **CAPÍTULO 4**

### **ENSAIOS REALIZADOS EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO**

Neste capítulo são apresentados ensaios utilizados na área de pavimentação e ambiental que tem por finalidade caracterizar os materiais, determinar suas propriedades e avaliar seu comportamento.

#### **4.1 ENSAIOS LABORATORIAIS**

##### **4.1.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA**

Para se definir e especificar os tipos de materiais que serão utilizados nas camadas de pavimentos flexíveis (base e sub-base) deve-se inicialmente conhecer suas propriedades e características. Desta forma, procede-se a execução de alguns ensaios laboratoriais para a caracterização física.

###### **4.1.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**

O objetivo da análise granulométrica é agrupar as partículas em diferentes intervalos de tamanho e determinar a porcentagem relativa, em massa seca, 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, em que se faz o material passar em cada uma delas, por meio de agitação manual ou utilizando-se 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 na análise das 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. Geralmente o ensaio é realizado de acordo com a norma da NBR-7.181 (ABNT, 1984a).

A análise granulométrica é representada, graficamente, pela curva granulométrica. Esta curva é traçada por pontos em um diagrama semi-logaritmo, no qual, sobre o eixo das abscissas, são marcadas em escala logarítma as dimensões das partículas e sobre o eixo das ordenadas as porcentagens, em massa, 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. Na prática, utilizam-se faixas granulométricas entre as quais deverá se situar a curva do material a utilizar. Quando o material em tela 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 adotadas (RESPLANDES, 2007).

#### **4.1.1.2 MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS**

Conforme descreve Senço (1997), a massa específica real 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, 1984d) e de grãos de pedregulho retidos na peneira de malha 4,8mm NBR-6.458 (ABNT, 1984e).

#### **4.1.1.3 LIMITES DE CONSISTÊNCIA**

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

Conforme 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 ( $\omega_L$ ). 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 ( $\omega_p$ ). Continuando a secagem, ocorre a passagem para o estado sólido. O limite entre esses dois últimos estados é denominado limite de contração ( $\omega_s$ ).

O limite de liquidez é determinado de acordo com NBR-6.459 (ABNT, 1984b), por meio 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 um 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 abscissas 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-sólido para o estado de consistência plástica (umidade crescente). O ensaio é realizado de acordo com a NBR-7.180 (ABNT, 1984c), 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).

#### **4.1.2 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL**

Os ensaios de lixiviação e solubilização prestaram o serviço de estabelecer parâmetros acerca da permissão do uso destes materiais como agregados de pavimentação e da pertinência acerca do uso dos mesmos para tal fim. Os ensaios de lixiviação e solubilização serão realizados conforme NBR-10005 (ABNT, 2004b), NBR-10006 (ABNT, 2004c) e NBR-10007 (ABNT, 2004d).

### 4.1.3 COMPACTAÇÃO, EXPANSÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA - ISC

A técnica moderna baseada no lançamento dos aterros em camadas horizontais e passagem de rolos compressores pesados, que evitam a terra fofa e a formação de vazios entre prováveis torrões chamam-se compactação. É, assim, um processo mecânico pelo qual se procura, por aplicação de peso ou apiloamento, aumentar a densidade aparente do solo e, portanto, conferir-lhe a resistência.

Em 1933 Ralph Proctor publicou uma série de artigos divulgando o seu método de controle de compactação, baseado num novo método de projeto empregado no estado da Califórnia. Nestes artigos é que pela primeira vez se enunciou um dos mais importantes princípios da Mecânica dos Solos: a densidade com que um solo é compactado sob uma determinada energia de compactação depende da umidade do solo no momento da compactação. Para a determinação experimental da correlação entre a massa específica aparente seca ( $\gamma_s$ ) de um solo ou aterro, sua umidade ( $\omega$ ) e a energia utilizada para compactação do mesmo, utiliza-se o chamado ensaio de compactação, idealizado por Proctor. Por este ensaio chega-se à conclusão de que há uma umidade ótima para compactar o solo, para cada energia de compactação (peso do rolo compressor e número de passadas por camada). A esta umidade corresponderá uma densidade máxima do solo atingida pela sua compactação.

Ademais, em torno deste procedimento básico surgiram diversas variações. Uma delas é o aumento da energia de compactação. Esta necessidade surgiu da evolução dos equipamentos, que se utilizando de massas cada vez maiores permitem obterem-se em campo densidades mais altas. O ensaio *normal*, idealizado por Proctor, correspondia à aplicação de uma energia chamada *normal*; uma variante foi desenvolvida para a nova realidade, utilizando energia *modificada* (diferente da *normal*) de compactação, aumentando-se o número e a altura da queda, a massa aplicada e o número de camadas. Posteriormente alguns órgãos criaram um padrão intermediário entre a energia *normal* e a *modificada*, denominada energia *intermediária*. Paralelamente, começou-se a trabalhar com cilindros maiores, para se adaptar à prensa do *CBR*.

Outro ensaio, denominado Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (*CBR*), é bastante difundido no meio rodoviário e realizado de acordo com a NBR-9.895 (ABNT, 1987). Através deste índice, expresso em porcentual, é possível dimensionar pavimentos por métodos empíricos, definindo o valor da capacidade de suporte de solos e materiais granulares empregados em pavimentação. O ensaio consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão em um corpo-de-prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração num material granular padrão de referência (DNIT, 2006).

A NBR-15.115 (ABNT, 2004e) utiliza o valor do *CBR* como parâmetro para emprego do agregado reciclado em pavimentação. São fixados valores mínimos de acordo com a função estrutural do material no pavimento: base, sub-base ou reforço de subleito. Além disso, considera-se também, a expansão do agregado reciclado.

#### **4.1.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA**

O ensaio de Módulo de Resiliência pode determinar a segurança estrutural do uso de materiais reciclados em bases de pavimentos flexíveis. Resiliência, em pavimentação, pode ser traduzido pela quantidade de energia armazenada em um corpo deformado elasticamente que é desenvolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações. Este tipo de ensaio pretende avaliar as propriedades mecânicas dos materiais, procurando simular as condições reais de solicitação no campo (MEDINA, 2005).

O ensaio é realizado com corpo de prova obtido de bloco de amostra indeformada ou compactada em laboratório, sendo que o diâmetro do molde deve ser superior ou igual a 4 vezes o diâmetro máximo das partículas de solo e sua altura guardar uma relação de aproximadamente 2 vezes o diâmetro, conforme norma específica (DNER, 1994b).

O equipamento é constituído de uma célula triaxial, sistema de controle e registro das deformações e um sistema pneumático de carregamento. A força vertical axial é aplicada de modo alternado no topo da amostra através de um pistão, de maneira que a passagem do ar comprimido pelo regulador de pressão atua diretamente sobre uma válvula ligada a um

cilindro de pressão. A abertura da válvula permite a pressão do ar no corpo de prova que está envolto por uma membrana impermeável. Fechando-se a válvula, a pressão do ar cessa. O tempo de abertura da válvula e a frequência desta operação podem ser controlados por um dispositivo mecânico digital. As deformações resilientes são medidas através dos *LVDT's* (*linear variable differential transducers* – par de transdutores mecânico-eletromagnéticos) que estão acoplados ao corpo de prova (PINTO; PREUSSLER, 2001 *apud* FORTES, 2004).

No Brasil os módulos têm sido determinados com repetição do carregamento de aproximadamente 200; frequência de 20 a 60 solicitações por minuto; duração de 0,10 a 0,15 segundos e intervalo entre cargas de 2,86 a 0,86 segundos (FORTES, 2004).

#### **4.1.5 OUTROS ENSAIOS LABORATORIAIS**

Para complementar a caracterização dos agregados e, por fim, assistir na análise dos resultados, podem ser realizados outros ensaios, como a determinações do pH das frações finas dos agregados reciclados com base nas orientações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNCE, 1967) e ensaios de Abrasão *Los Angeles*, de acordo com os métodos de ensaio ME 35 (DNER, 1998).

### **4.2 ENSAIOS DE CAMPO**

#### **4.2.1 PENETRÔMETRO DINÂMICO DE CONE (*DCP*)**

O ensaio de campo com o Penetrômetro Dinâmico de Cone ou *Dynamic Cone Penetration (DCP)* consiste na realização de uma investigação *in situ* das camadas do solo de maneira rápida, conforme a norma técnica americana ASMT D6951-03 (ASMT, 2003). De forma histórica, de acordo com Resplandes (2006), o *DCP* foi desenvolvido na década de 50 (1956) na África do Sul, e representa um equipamento de natureza simples e versátil para avaliar *in situ* a resistência das camadas de um pavimento. Segundo Resplandes (2007), o equipamento foi usado exaustivamente na África do Sul, no Reino Unido, nos Estados Unidos, na Austrália e em 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 técnicas competentes.

O princípio de seu funcionamento consiste na penetração de uma haste, com a ponta em forma de cone, sob a ação de uma massa fixa que cai de uma altura também fixa (REZENDE, 2003). A Figura 4.1 mostra, esquematicamente, o aparelho do *DCP*. Analiticamente, o equipamento consiste em uma haste metálica de 16 milímetros de diâmetro e 1910 milímetros de comprimento. Esta haste possui, presa em sua ponta, um cone de aço de 20 milímetros de diâmetro em sua base e um ângulo, em relação à horizontal, de 60 graus. Esta haste é presa a uma outra haste metálica (25 milímetros de diâmetro e 910 milímetros de comprimento) na qual é acoplado um martelo de aço de massa equivalente a 8,0kg e que cai de uma altura de 575 milímetros. Esta queda faz com que a haste inferior penetre na camada de solo a ser ensaiada. A partir deste ensaio, em que obtém-se o número de golpes necessários para cravar a haste no solo e as medidas das penetrações parciais e total, determina-se o índice de penetração das camadas e suas respectivas espessuras. Entende-se por Índice de Penetração (DN), medido em milímetros por golpes, a taxa de penetração medida pelos golpes para cada golpe no equipamento. Depreende-se, pois, que Índices de Penetração são grandezas inversamente proporcionais à característica de rigidez de uma camada. Pode-se, entretanto, estabelecer correlações com o valor do *CBR* (*California Bearing Ratio*) medido *in situ* (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

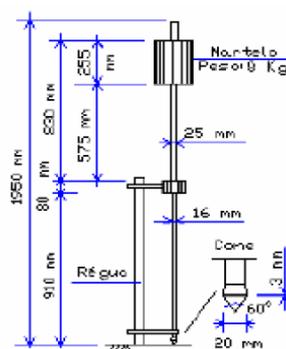


Figura 4.1 – Esquema do aparelho de ensaio de *DCP*.

Existe metodologia para o controle tecnológico de execução da camada final de terraplenagem de rodovias através do emprego do *DCP*. Inicialmente, deve-se estabelecer a chamada curva de calibração do solo que corresponde à relação DN x *CBR*. Com o valor do

*CBR* de projeto, define-se o valor de DN que deve ser obtido no campo (CARDOSO; TRICHÊS, 2000 *apud* REZENDE, 2003).

Logo, existem algumas equações que descrevem a correlação existente entre o *Dynamic Cone Penetration (DCP)* e o *CBR*, conforme descreve a Quadro 3 (CARDOSO; TRICHÊS, 2000 *apud* REZENDE, 2003; OLIVEIRA, 2007).

EQUAÇÃO	AUTORES	LOCAL
$\log CBR^1 = 2,60 - 1,26.(\log DN^2)$	Kleyn (1982)	Rodovias da África do Sul
$CBR = 443,45.(DN)^{-1,30}$	Heyn (1986)	Rodovias do estado do Paraná – Brasil
$\log CBR = 2,81 - 1,32.(\log DN)$	Harison (1987)	Solos argilosos, areias e pedriscos graduados na Indonésia
$CBR = 450.(DN)^{-1,05}$	Angelone <i>et al.</i> (1991)	Materiais da Argentina
$\log CBR = 2,490 - 1,057.(\log DN)$	Oliveira (1998)	Solos transicionais no Brasil
$CBR = 552,64.(DN)^{-1,25}$ ( <i>in situ</i> ) $CBR = 151,58.(DN)^{-1,03}$ (imerso)	Cardoso; Trichês (1998)	Duplicação da BR-101/SC
$CBR=126,35.(DN)^{-0,6354}$ $CBR=121,02.(DN)^{-0,659}$ (imerso)	Kryckyj; Trichês (2000)	Agregados reciclados

Quadro 4.1 – Correlações entre o *DCP* e *CBR* (CARDOSO; TRICHÊS, 2000 *apud* REZENDE, 2003).

Uma 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, interfere muito pouco no fluxo de trânsito veicular. Pode ser caracterizado, logo, como um ensaio semi-destrutivo.

#### 4.2.2 VIGA BENKELMAN (VB)

O ensaio de campo da Viga Benkelman para a determinação de deslocamentos ou deflexões tem a função de avaliar a capacidade estrutural do pavimento (DNER, 1994a). Analiticamente 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. A realização do

<sup>1</sup> *CBR* – Califórnia Bearing Ratio (%);

<sup>2</sup> DN – Índice de Penetração (mm/golpe);

ensaio dá-se de forma parametrizada no método ME 24 (DNER, 1994a), em que se deve 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 toneladas de carga no eixo traseiro e pneus calibrados com 560 kPa (80 lbs/pol<sup>2</sup>).

Historicamente, o emprego de equipamentos de deflexão no Brasil iniciou-se na década de 60 com a utilização da Viga Benkelman. Por ser um ensaio de fácil execução e classificado como não-destrutivo, esse equipamento foi considerado extremamente importante para ser utilizado na avaliação estrutural de pavimentos, visando medir os deslocamentos provocados por cargas de roda. Inicialmente, todas as análises eram baseadas na determinação do deslocamento máximo. Posteriormente, observou-se que a determinação de leituras adicionais permitia a obtenção da deformada da superfície, ou seja, da bacia de deslocamentos e com isto, a determinação de outros parâmetros (ROCHA FILHO; RODRIGUES, 1998 *apud* REZENDE, 2003).

Geralmente, para valores de raio de curvatura inferior a 100 metros ou para locais onde o produto entre R e D<sub>0</sub> for menor que 5.500 m.mm, pode-se observar problemas estruturais (MOREIRA, 1977; DNER, 1979; PAIVA; CAUSIN, 2000 *apud* REZENDE, 2003).

As leituras da viga são influenciadas por alguns fatores tais como condições ambientais, formas de operação do ensaio e condições de aplicação do carregamento. A baixa velocidade de aplicação do carregamento influencia na resposta viscoelástica da camada de asfalto. Assim sendo, qualquer variação no tempo de aplicação do carregamento pode alterar de forma significativa os resultados, principalmente nos dias mais quentes (RODRIGUES, 1995 *apud* REZENDE, 2003). Por esta gama de variáveis apresentadas de difícil controle e correção, pode tornar-se um ensaio de baixa precisão.

### **4.2.3 PROVA DE CARGA SOBRE PLACA (PC)**

O ensaio da Prova de Carga sobre Placa, também denominado ensaio da Prova de Carga, é descrito como sendo o mais antigo ensaio de campo realizado nas obras de engenharia geotécnica (BARATA, 1984 *apud* REZENDE, 2003).

Foi utilizado por McLeod, em 1948, para avaliar o desempenho de pavimentos flexíveis em aeroportos do Canadá. No Brasil, este ensaio vem sendo usado em várias pesquisas na área de pavimentação e seus resultados comparados com outros ensaios de campo (VIEIRA FILHO; LUCENA, 1995; SANTANA *et al.*, 1995; SANTANA *et al.*, 1998 *apud* REZENDE, 2003).

É realizado sobre uma placa e tem por objetivo principal a determinação do comportamento da relação tensão *versus* deformação, como pode ser observado na Figura 4.2. As cargas aplicadas produzem pequenos recalques que representam parcelas do recalque elástico e parcelas devido a um aumento na massa específica do solo, pois as provas de carga para fins rodoviários raramente atingem recalques que possam ser atribuídos à plastificação do solo (SOUZA, 1980 *apud* REZENDE, 2003; DNIT, 2004; RESPLANDES, 2007).



Figura 4.2 – Realização do ensaio de Prova de Carga sobre Placa, em Janeiro/2008, na pista experimental da CEASA.

O ensaio dá-se de forma a colocar uma placa com diâmetro conhecido, que irá distribuir a pressão do carregamento. Entre a placa e o sistema de carregamento insere-se um macaco hidráulico que tem a função de controlar a aplicação das tensões. Este controle é, geralmente, realizado por meio de um manômetro calibrado. Uma outra alternativa mais precisa para a leitura do carregamento é o uso de uma célula de carga colocada entre o

macaco e o sistema de reação, ou entre o macaco e a placa. As deformações são medidas através da colocação de, no mínimo, três deflectômetros, no mínimo, sobre a placa. A tensão máxima aplicada é de 50kN, com intervalos de 5 e 10kN a cada 5 minutos.

# **CAPÍTULO 5**

## **METODOLOGIA**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

Esta pesquisa está dividida em duas etapas distintas: o estudo laboratorial de amostras de agregados reciclados e o monitoramento, através de ensaios de campo, de duas pistas executadas em Goiânia.

Para a realização dos estudos laboratoriais, os agregados foram segregados, produzidos, coletados e caracterizados. Desta forma, espera-se realizar algumas análises de caracterização físicas e mecânicas com este material. As análises pretendidas serviram para promover conclusões acerca da resistência estrutural de bases e sub-bases de pavimentos flexíveis.

A segunda etapa consistiu na realização de ensaios em campo, em dois períodos diferentes do ano com o fito de avaliar, ao longo do tempo, através da comparação simples com ensaios realizados em períodos anteriores, a evolução e as alterações mecânicas existentes nas pistas submetidas ao tráfego de veículos.

### **5.2 SELEÇÃO DE AMOSTRAS / DOSAGENS**

Para a realização dos ensaios laboratoriais, inicialmente procurou-se encontrar resíduos de construção e demolição (RCD) devidamente segregados – resíduos da classe A, conforme Resolução 307 (CONAMA, 2002) e NBR-15.115 (ABNT, 2004e) – preparados para a britagem. A segregação dos resíduos deu-se de forma manual, através da separação em caçambas de deposição colocadas nos canteiros de obras. Houve, também, amostras de solo argiloso da região de Goiânia que foi adicionado e misturado à massa de RCD, em proporções definidas, para a execução dos ensaios laboratoriais. As proporções de mistura da parcela de solo argiloso e RCD estão definidas na Tabela 5.1.

Os ensaios laboratoriais executados com o agregado reciclado e com a parcela de solo foram realizados no Laboratório de Solos da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

Para a realização dos ensaios com a amostra de solo argiloso, de acordo com a NBR-6.457 (ABNT, 1986), previamente colocou-se a amostra para secar em temperatura ambiente, em seguida foi desterroada e, com ajuda do repartidor de amostras, foi efetuado o quarteamento da amostra, obtendo-se assim uma amostra representativa em quantidades suficientes para realização dos ensaios necessários.

Com relação à produção de agregados reciclados de construção civil, inicialmente, foram coletadas amostras de resíduos, em canteiros de obras, através de caçambas metálicas dispostas exclusivamente para esta finalidade. O RCD foi previamente segregado e limpo em canteiro de obras, em construções ou em laboratórios de concreto da cidade de Goiânia. Este procedimento mostrou-se necessário para minimizar o esforço com a etapa de limpeza e separação de resíduos indesejáveis ou contaminantes, como madeiras, vidros, plásticos, gessos, forros, tubulações, fiações elétricas, papéis e outros mais.

Após a escolha, carga e transporte dos resíduos, os mesmos foram britados até atender os requisitos estipulados por este estudo. A britagem dos resíduos selecionados ocorreu na pedreira do Departamento de Estradas de Rodagem do Município de Goiânia (DERMU). Para o atendimento dos requisitos deste estudo, especificou-se a britagem em três parcelas distintas, sendo a primeira com material de diâmetro máximo igual a 19,0mm, a segunda de material com diâmetro máximo igual a 9,5mm e a terceira de material com diâmetro máximo igual a 4,8mm. A proposta de granulometria encontra-se justificada por Silva (2004) e representa a dosagem do material utilizado em pistas urbanas, de baixo volume de tráfego, executadas na cidade de Goiânia.

Logo, foram preparadas em laboratório amostras com misturas de agregado reciclado de construção com solo para a realização e consecução dos ensaios propostos. As amostras encontram-se especificadas na Tabela 5.1. As quantidades de amostras trabalhadas são constantes da Tabela 5.2.

**Tabela 5.1** –Composição das dosagens estudadas.

<b>AMOSTRAS TRABALHADAS</b>	
<b>AMOSTRA 1: ARC1</b>	
Agregado reciclado composto por elementos cimentícios, utilizados por Oliveira (2007) - proporções foram justificadas por Silva (2004)	
Material 19,0mm	25%
Material 9,5mm	25%
Material 4,8mm	25%
Solo argiloso	25%
<b>AMOSTRA 2: ARM1</b>	
Agregado reciclado composto por elementos cimentícios e cerâmicos, utilizados por Oliveira (2007) - proporções foram justificadas por Silva (2004)	
Material 19,0mm	25%
Material 9,5mm	25%
Material 4,8mm	25%
Solo argiloso	25%
<b>AMOSTRA 3: NAT1</b>	
Material natural, extraído de jazida, utilizado pelo DERMU/COMPAV (brita graduada)	
Brita 1 ( $\frac{3}{4}$ " ) – Material 19,0mm	25%
Brita 0 ( $\frac{1}{2}$ " ) - Material 9,5mm	25%
Pó de Brita ( $\frac{1}{4}$ " )	25%
Solo argiloso	25%
<b>AMOSTRA 4: ARC2</b>	
Material reciclado, composto por elementos cimentícios, britado pelo DERMU/COMPAV	
Brita 1 ( $\frac{3}{4}$ " ) – Material 19,0mm	25%
Brita 0 ( $\frac{1}{2}$ " ) - Material 9,5mm	25%
Pó de Brita ( $\frac{5}{16}$ " )	25%
Solo argiloso	25%
<b>AMOSTRA 5: SOLO</b>	
Solo argiloso local (de adição)	
Solo argiloso	100%

Silva (2004) propôs mais de uma proporção granulométrica para avaliação. As misturas foram realizadas em laboratório e no campo, de forma a mensurar a trabalhabilidade e avaliar os resultados mecânicos. Concluiu-se que as misturas realizadas no campo poderiam ser mais controladas se as proporções fossem fixadas em 25% para cada parcela granulométrica e que a trabalhabilidade do material é maior quando há um quarto de finos em relação à fração graúda. Desta forma há menor quantidade de material solto.

Tabela 5.2 – Quantitativos de amostras para realização de ensaios.

<b>AMOSTRAS PARA OS ENSAIOS LABORATORIAIS</b>		
<b>ENSAIO</b>	<b>CORPOS DE PROVA</b>	
	<b>QUANT.</b>	<b>TIPO</b>
Caracterização Física (Análise Granulometria / LP / LL / Massa Específica)	1	ARC1
	1	ARM1
	1	NAT1
	1	ARC2
	1	SOLO
Compactação	1	ARC1
	1	ARM1
	1	NAT1
	1	ARC2
	1	SOLO
Expansão	1	ARC1
	1	ARM1
	1	NAT1
	1	ARC2
	1	SOLO
<i>CBR*</i>	5	ARC1
	5	ARM1
	5	NAT1
	5	ARC2
Granulometria após Compactação (Estado de Quebra)	1	ARC1/ $\omega_{ot}$
	1	ARM1/ $\omega_{ot}$
	1	NAT1/ $\omega_{ot}$
	1	ARC2/ $\omega_{ot}$
Medição de pH	5	ARC1/ $\omega_{ot}$
		ARM1/ $\omega_{ot}$

\* Curva de compactação e  $\omega_{ot}$ 

### 5.2.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Foram efetuados ensaios laboratoriais com o objetivo de caracterizar as amostras de agregados de resíduos sólidos da construção civil. Com as amostras determinou-se as características físicas e mecânicas através de ensaios de análise granulométrica, limites de consistência, massa específica dos grãos e compactação, expansão, *California Bearing Ratio (CBR)*, módulo resiliente, pH.

### **5.2.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**

Com a análise granulométrica caracterizou-se os agregados reciclados e o solo argiloso coletado para adição. Além disso, conduziu-se o ensaio de granulometria para a caracterização física do agregado reciclado trazido ao laboratório para verificar, antes e após a compactação, o seu estado de degradação. Os ensaios foram executados de acordo com a NBR-7.181 (ABNT, 1984a).

As análises granulométricas foram realizadas por peneiramento e sedimentação. Para a realização dos ensaios, tomou-se aleatoriamente um lote das amostras ora fabricadas para a consecução deste trabalho. Como forma de simular, com características mais fidedignas as condições existentes no campo, o material utilizado não foi ser previamente lavado, de acordo com os comentários de Resplandes (2007), corroborados por Oliveira (2007) acerca da pequena variação granulométrica existente entre os agregados não lavados e os lavados.

### **5.2.1.2 LIMITE DE PLASTICIDADE**

O limite de plasticidade do solo e das amostras de agregados reciclados foi determinado de acordo com a norma técnica NBR-7180 (ABNT, 1984c).

### **5.2.1.3 LIMITE DE LIQUIDEZ**

O limite de liquidez do solo e das amostras de agregados reciclados foi determinado de acordo com a norma técnica NBR-6459 (ABNT, 1984b).

### **5.2.1.4 MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS**

O ensaio para determinar a massa específica dos grãos / peso específico com o solo argiloso para adição foi executado de acordo com a norma técnica NBR-6508 (ABNT,

1984d). Com as amostras de agregados reciclados de construção civil, o ensaio foi executado de acordo com a norma técnica NBR-6458 (ABNT, 1984e).

### **5.2.1.5 COMPACTAÇÃO**

Com a finalidade de se obter a curva de compactação, e, em consequência os dados acessórios de umidade ótima e o seu respectivo peso específico aparente seco, foi realizado ensaio de compactação, utilizando-se cilindros e soquetes de acordo com a norma técnica NBR-7182 (ABNT, 1986a) com as amostras de agregado reciclado e com o solo argiloso para adição.

De acordo com resultados obtidos anteriormente por Leite (2007), utilizou-se energia modificada para a execução do ensaio de compactação dos agregados. O objetivo do uso da energia modificada nos ensaios é avaliar as alterações granulométricas através de quebras existentes nos materiais utilizados, após a compactação. Oliveira (2007) propõe a observação do índice de degradação ou quebra dos grãos devido à compactação, em seu trabalho.

### **5.2.1.6 EXPANSÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFORNIA (ISC)**

Após o ensaio de compactação, efetuou-se a análise de expansão e do ISC (*California Bearing Ratio - CBR*), da amostra de solo de adição e das amostras de agregados reciclados. Para tanto, utilizou-se o cilindro com a amostra compactada, introduziu-se no mesmo um peso anelar (tem a função de simular a situação de tráfego na via) e um extensômetro, que mede deslocamentos ou deformações. Com os cilindros preparados, os mesmos ficaram imersos em água por quatro dias consecutivos, sendo efetuada diariamente a leitura dos deslocamentos medidos pelo extensômetro.

O ensaio de *CBR* e de expansão foi realizado de acordo com a norma técnica NBR-9.895 (ABNT, 1987). A dinâmica do ensaio pode ser descrita pela aplicação de um carregamento estático em um corpo-de-prova. Este carregamento deu-se por meio da penetração de um pistão de diâmetro padrão, em velocidade constante, acompanhado de registros de cargas de reação por meio de um anel dinamométrico acoplado à prensa.

Para avaliar o ganho de resistência ao longo do tempo, foram moldados corpos-de-prova de cada amostra na umidade ótima e no peso específico aparente seco máximo, obtidos com a energia modificada. Os corpos-de-prova foram enviados para uma câmara úmida para serem curados e rompidos em sete, quatorze, vinte e um e vinte e oito dias, e após este período foram realizados os ensaios de expansão, *CBR* e medição de pH.

### **5.2.1.7 MEDIÇÃO DE pH**

Com o intuito de avaliar as alterações (ganhos ou perdas) de resistência porventura existentes em corpos de prova, experimentou-se a medição do pH de corpos de prova curados e rompidos em tempos diferentes, de acordo com a norma N-203, editada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC, 1967).

De acordo com as especificações, foram necessários um equipamento digital para medição de pH, além de reagentes para calibração, água destilada e a amostra de estudo de massa igual a 30 gramas. As amostras utilizadas foram as mesmas em que se realizaram os ensaios de *CBR*. O principal intuito na avaliação do pH das amostras, em diferentes tempos de cura, é verificar a existência de incrementos de resistência em função da hidratação dos elementos pozolânicos existentes nos agregados reciclados.

## **5.3 PISTAS EXPERIMENTAIS**

As figuras 5.1 e 5.2 mostram, de forma esquemática, os trechos experimentais executados em Goiânia.

### **5.3.1 PISTA EXPERIMENTAL DA CEASA**

O trecho de estudo localiza-se no acesso de compradores da Central de Abastecimento de Goiás S/A – CEASA, junto aos Sítios de Recreio Mansões Bernardo Sayão, na região nordeste da cidade. A via de acesso dos compradores à CEASA possui extensão total de

106,0m, sendo que 56 metros foram executados com agregados reciclados de RCD em sua base e sub-base.

A pista foi executada pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Município de Goiânia (DERMU), e os estudos foram desenvolvidos por meio de parceria entre a Prefeitura de Goiânia, Universidade Federal de Goiás, Universidade de Brasília e Furnas Centrais Elétricas.

De acordo com as Figura 5.3, desde a Estaca Zero até aproximadamente a Estaca 2+10m a base e sub-base foram executadas com argila aditivada (área hachurada) e o trecho posterior à Estaca 2+10m utilizou RCD em sua base e sub-base. A faixa de rolamento possui 8,0m de largura, com 9,0m de plataforma, inclinação transversal de 3% e seção transversal mista (houve corte de 0,4m no bordo esquerdo e aterro de 1,4m no bordo direito). O revestimento do pavimento foi executado com Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), com espessura de 0,05m.

De acordo com Resplandes (2007), para a execução da base e sub-base foram utilizados 226,8m<sup>3</sup> de resíduos sólidos oriundos da indústria da construção civil, fornecido por empresas de Goiânia. As amostras foram armazenadas e gerenciadas pelo complexo DERMU/COMPAV, da Prefeitura de Goiânia. Para a execução da pista, o RCD foi classificado visualmente em sete categorias distintas com quatro tipos de resíduos, quais sejam concreto convencional, concreto celular, cerâmicos e alvenaria. Após a etapa de britagem, pode-se obter a composição percentual de cada tipo de resíduo na amostra (composição gravimétrica). Como forma de garantir melhor trabalhabilidade, adicionou-se argila aos resíduos. Quando da época da execução da pista, procedeu-se o estudo dos materiais em laboratório para a realização de ensaios e, para tanto, efetuou-se britagem em três granulometrias diferentes: brita 19,0mm, brita 9,5mm e brita 4,8mm. Estudaram-se os materiais de forma separada e misturados em proporções. A partir dos resultados destes estudos, em função dos resultados dos ensaios de caracterização, compactação, expansão e resistência foram definidas as proporções de RCD e argila a ser utilizada na execução da pista.

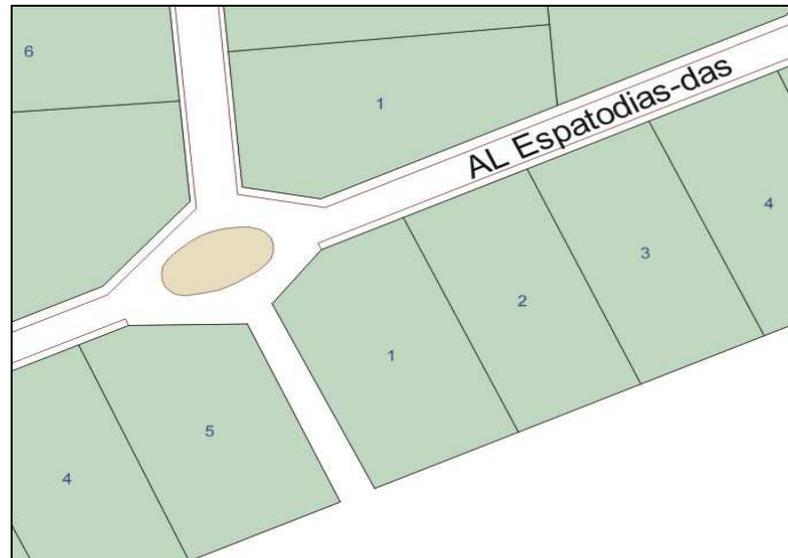


Figura 5.1 - Mapa, sem escala, do trecho experimental da CEASA (PREFEITURA DE GOIÂNIA, 1999)

### 5.3.2 PISTA EXPERIMENTAL DA RUA SR-68, SETOR RECANTO DAS MINAS GERAIS

A segunda pista a ser estudada localiza-se na Rua SR-68, conforme Figura 5.4, Setor Recanto da Minas Gerais, em frente à Quadra 93 (RIBEIRO, 2006). O trecho em tela é composto por uma camada de base que tem 140,0m de extensão por 8,0m de faixa de rolamento. Análoga ao primeiro trecho, foi executada com RCD 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. É importante destacar que não ocorreu acompanhamento tecnológico rigoroso durante a execução da pista (RIBEIRO, 2006). Este trecho foi concluído e aberto ao tráfego em outubro de 2004.

O pavimento é composto por uma camada de base que foi executada com RCD britado e classificado em granulometrias diferentes, sendo dosados nas seguintes dimensões: menor que 19mm, menor que 9,5mm, menor que 4,8mm e solo local, na proporção de 25% em

volume de cada material. Não houve acompanhamento tecnológico rigoroso durante a execução da pista.



**Figura 5.2** - Mapa, sem escala, do trecho experimental da Rua SR-68. (PREFEITURA DE GOIÂNIA, 1999)

## 5.4 ENSAIOS EM CAMPO

Com o firme propósito de avaliar, de forma continuada, o desempenho estrutural das duas pistas modelo, existentes em Goiânia, ao longo do tempo, foram efetuados ensaios de campo, preferencialmente em estações distintas do ano, para se avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre as condições estruturais das pistas. Os resultados obtidos, após devidamente analisados, foram comparados com os resultados dos exames efetuados por outros pesquisadores, nos mesmos trechos, em períodos anteriores.

Para a realização dos ensaios de Viga Benkelman e Prova de Carga sobre a Placa foi necessário o preparo de um caminhão (fornecido pela Superintendência Municipal de Trânsito da Prefeitura de Goiânia), de eixo traseiro simples, rodas duplas, pressão de instalação nos pneus de 560 kPa e carregado com 8,2t no eixo traseiro. Os equipamentos necessários à realização dos ensaios foram cedidos pelo Laboratório de Mecânica dos Solos da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (EEC/UFG).

As Figuras 5.3 e 5.4 demonstram, de maneira esquemática, os locais (estacas) em que serão executados os ensaios *in situ* nas pistas experimentais executadas em Goiânia.

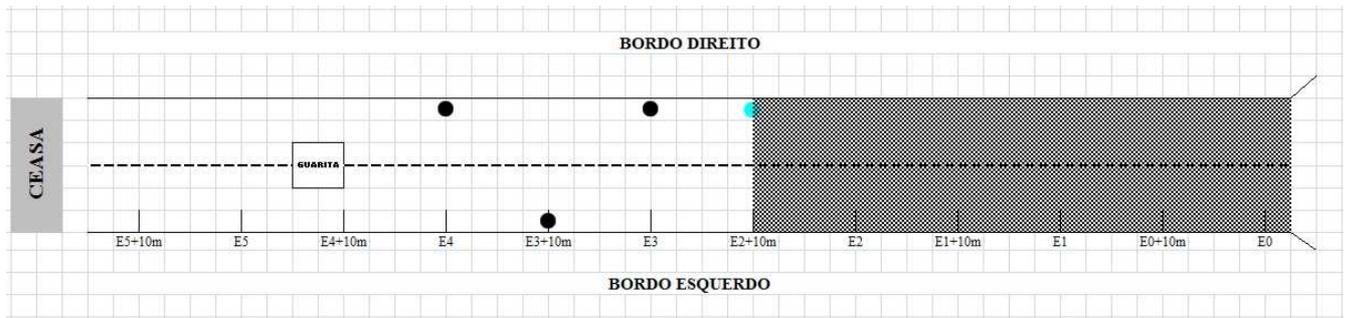


Figura 5.3 - Mapa, sem escala, da Pista Experimental da CEASA, para execução de ensaios.

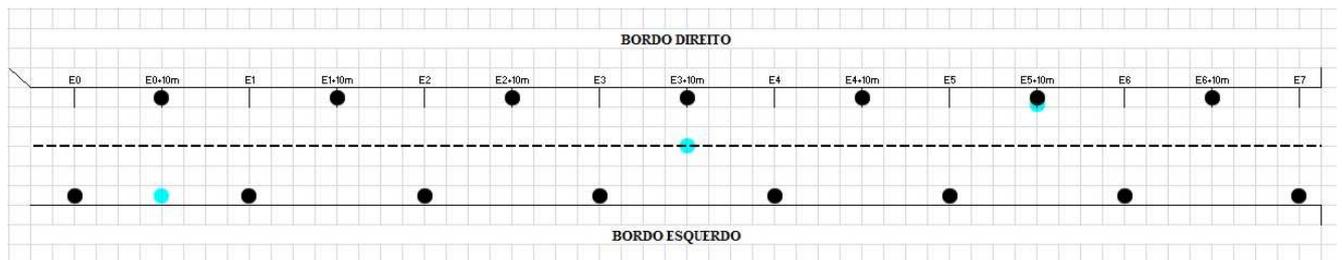


Figura 5.4 - Mapa, sem escalas, da Pista Experimental da Rua SR-68, para execução de ensaios.

### 5.4.1 VIGA BENKELMAN

O ensaio de Viga Benkelman foi realizado conforme a norma ME-024 (DNER, 1994), sendo executado sobre a camada de revestimento das pistas experimentais, nos bordos direito e esquerdo. A viga utilizada apresenta relação  $a/b$  igual a  $2/1$ , sendo “a” igual a 2,44m e “b” igual a 1,22m.

O equipamento do ensaio e o caminhão foram posicionados na marcação da estaca em que se realizaram o ensaio, o extensômetro será acionado e após três minutos da ligação do vibrador da viga, efetuou-se a leitura inicial logo após o funcionamento do caminhão. Em seguida o caminhão foi deslocado 0,25m e foram realizadas 9 leituras de deslocamento em cada distância de 0,25m até a extensão total de 2,00m.

### **5.4.2 PROVA DE CARGA SOBRE PLACA**

O ensaio de Prova de Carga Sobre Placa foi realizado de acordo com a norma ME-055 (DNIT, 2004) e consiste em simular as condições de carregamento do tráfego no pavimento. É caracterizado por identificar pequenos recalques, representados por curva de tensão *versus* deslocamento.

Os ensaios foram realizados utilizando-se placa circular de 0,30m de diâmetro, um macaco hidráulico cuja capacidade máxima seja equivalente a 500,00kN, três ou quatro extensômetros (conforme a disponibilidade) e outros acessórios necessários. A carga máxima adotada para os ensaios foi de 4000kg, aplicada em incrementos de 200kg, por meio do caminhão. Com quatro extensômetros (fixados numa haste através de quadro bases magnéticas), foram realizadas as leituras de deslocamento imediato e após 5 minutos de cada aplicação de incremento de carga.

### **5.4.3 PENETRÔMETRO DINÂMICO DE CONE (*DYNAMIC CONE PENETRATION – DCP*)**

O ensaio com *DCP* foi efetuado posicionando-se o aparelho na vertical e nivelando-se a régua graduada com a superfície do solo para se efetuar as medidas exatas de penetração. Logo, registra-se a penetração inicial, obtida com o assentamento do peso próprio do equipamento e após eleva-se o peso (martelo) até altura máxima de queda, liberando-o em queda livre. Desta forma, realizou-se os registros das penetrações, em milímetros, correspondentes a cada golpe do martelo ou somente à penetração final correspondente ao último golpe (SILVA JUNIOR *et al.*, 2004 *apud* RESPLANDES, 2007).

A medida, em milímetros, da penetração total é obtida subtraindo-se 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.*, 2004 *apud* RESPLANDES, 2007).

O resultado é uma curva que é a representação do número de golpes acumulado para a penetração do equipamento com a profundidade. Na curva *DCP*, o eixo das ordenadas indica a profundidade e o eixo das abscissas o número acumulado de golpes para alcançar tais profundidades. O Índice de Penetração é extraído pela inclinação das retas representadas no plano cartesiano considerado. (ANDRADE; SALES, 2005 *apud* RESPLANDES, 2007).

## CAPÍTULO 6

### APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 6.1 INTRODUÇÃO

Nesta etapa serão apresentados os resultados dos ensaios realizados em laboratório e nas pistas experimentais executadas com RCD em suas bases e sub-bases. Estas análises têm o propósito de avaliar o comportamento dos materiais e a variação do comportamento mecânico das duas pistas.

#### 6.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EM LABORATÓRIO

A Figura 6.1 apresenta os resultados da análise granulométrica da dosagem de agregados reciclados de concreto (ARC1), antes a após a compactação em energia modificada. A composição das fases dos agregados que compõe a dosagem ARC1 está demonstrada na Tabela 5.1 no Capítulo 5.

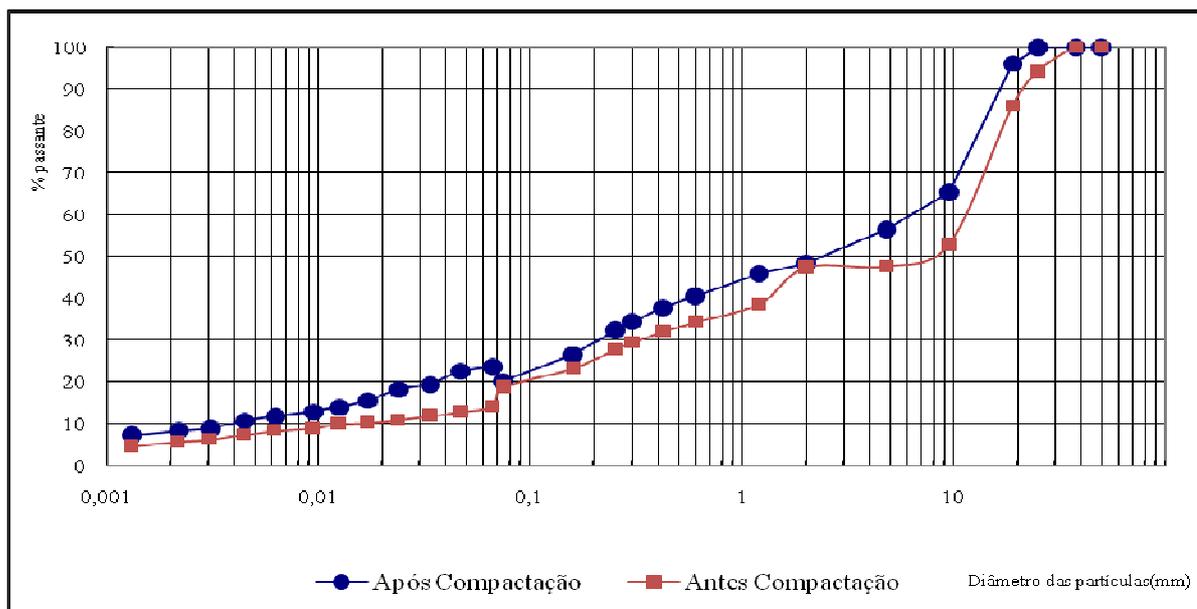


Figura 6.1 – Curvas granulométricas da dosagem ARC1 antes e após a compactação.

A Figura 6.2 apresenta os resultados da análise granulométrica da dosagem de agregados reciclados mistos (ARM1) antes e após a compactação. É importante ressaltar que o peneiramento foi realizado sem lavagem, opção de trabalho que procura simular as condições encontradas em campo e que a sedimentação foi realizada com o emprego de defloculante.

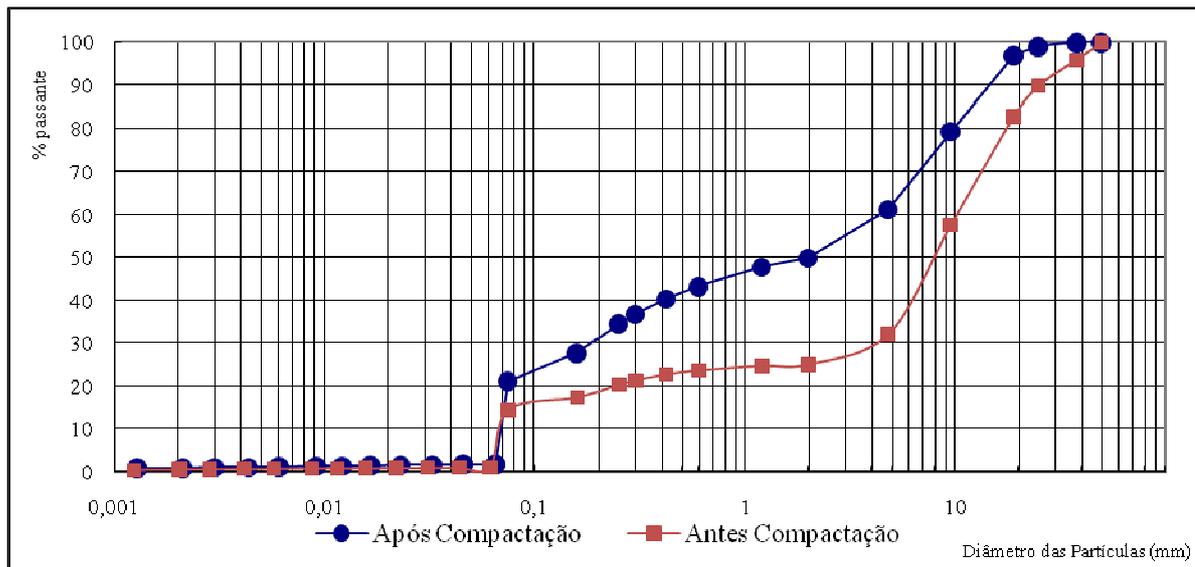


Figura 6.2 – Curvas granulométricas da dosagem ARM1 antes e após a compactação.

Observando-se as Figuras 6.1 e 6.2 verifica-se que há degradação ou quebra dos materiais durante o processo de compactação, devido ao desgaste por abrasão e pela aplicação de alta quantidade teor de energia.

De acordo com Leite (2006), estudando agregados reciclados de São Paulo, aconselhável é, o uso da maior energia de compactação possível em campo de forma a promover uma maior quebra dos agregados reciclados durante a obra, como forma de evitar quebras significativas posteriores pelo tráfego de usuário e o conseqüente aparecimento de deformação permanente indesejável em trilhas de rodas. Através da observação no trabalho de Leite (2006) percebe-se que os agregados utilizados possuem dimensões maiores daqueles empregados neste trabalho, razão pela qual a autora aconselha o uso de maiores energias como forma de promover maior quantidade de quebras no material na etapa de compactação.

Oliveira (2007) apresenta uma análise acerca do índice de degradação, que tem por objetivo analisar o comportamento do material em função do desgaste sofrido durante a compactação. Este índice pode ser calculado pela apuração da média das diferenças das porcentagens passantes da situação inicial pelas passantes no final, após a compactação. Os resultados apresentados neste trabalho, constantes da Tabela 6.1, foram determinados com Energia Modificada de compactação, parâmetro diferente do considerado por Oliveira (2007) em seus estudos, que utilizou Energia Intermediária e também diferente daquele estipulado pelo Método de Ensaio 398/99 (DNER, 1999).

Leite (2007) estudou a degradação dos agregados e inferiu que a degradação aumenta em função do acréscimo da energia de compactação.

Tabela 6.1 – Valores do Índice de Degradação (ID<sub>p</sub>) das dosagens de agregados reciclados após a compactação com energia do Proctor Modificado.

AMOSTRA	ID <sub>p</sub> (%)
ARC1	7,4
ARM1	10,7
NAT1	2,5
ARC2	7,1

Interessante perceber que a NBR-15115 (ABNT, 2004e) não fala, em seu corpo, sobre valores ou faixas limites para abrasão dos agregados. Entretanto, comparando-se com as informações concernentes aos agregados naturais estabilizados granulometricamente, os mesmos deverão apresentar abrasão *Los Angeles* de até 55%, de acordo com a NBR-11804 (ABNT, 1991a). Ademais, pode-se citar que brita graduada deve apresentar o mesmo parâmetro menor que 40%, conforme NBR-11806 (ABNT, 1991b). Nem sempre se pode garantir que agregados que atendam às especificações do ensaio de abrasão *Los Angeles* não estarão sujeitos à variações granulométricas, dependendo, também, das formas dos grãos e das condições de arranjos entre eles (MOTTA, 2005 *apud* DIAS, 2004).

Estudos com agregados reciclados de concreto efetuados na Dinamarca e na Coréia do Sul encontraram abrasão *Los Angeles*, em valores médios, entre 32% e 41%, respectivamente. Estudos efetuados no Brasil (MOTTA, 2005 *apud* FERNANDES, 2004). A variação existente pode existir em função da composição e da origem de cada agregado, demonstrando que é difícil tarefa estabelecer valores limites de desgastes para esse tipo de material.

A Figura 6.3 apresenta os resultados da análise granulométrica da dosagem de agregados naturais (NAT1) antes e após a compactação, a serem utilizados para comparação dos resultados com os agregados reciclados.

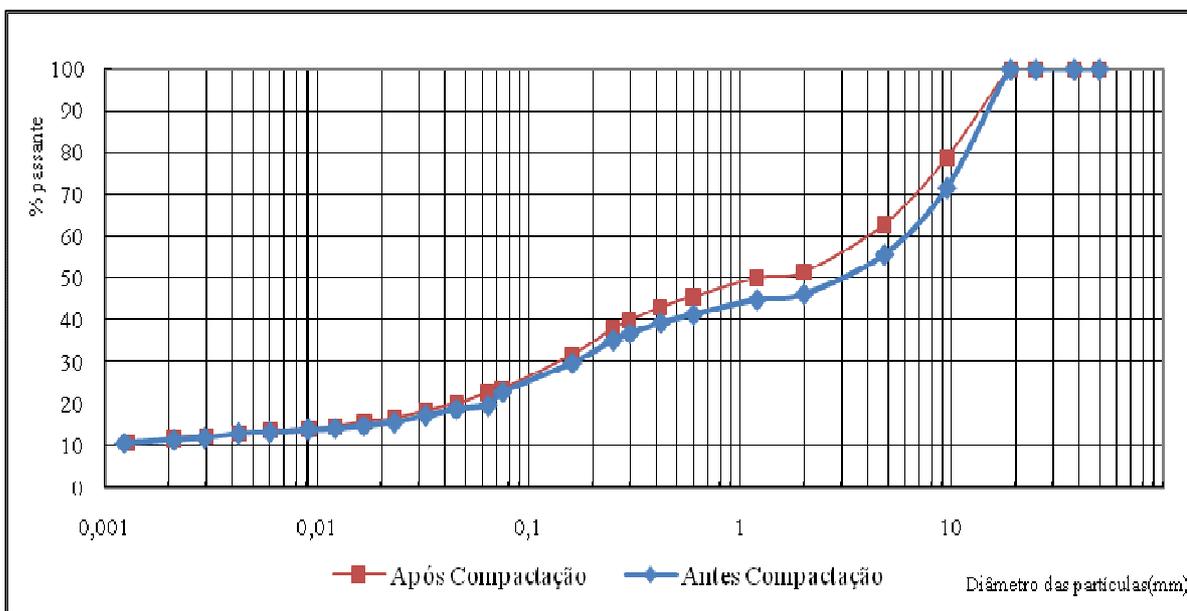


Figura 6.3 – Curvas granulométricas da dosagem NAT1, antes e após a compactação.

A Figura 6.4 apresenta os resultados da análise granulométrica da dosagem de agregados reciclados de concreto (ARC2) antes e após a compactação, a serem utilizados para comparação dos resultados com os agregados reciclados.

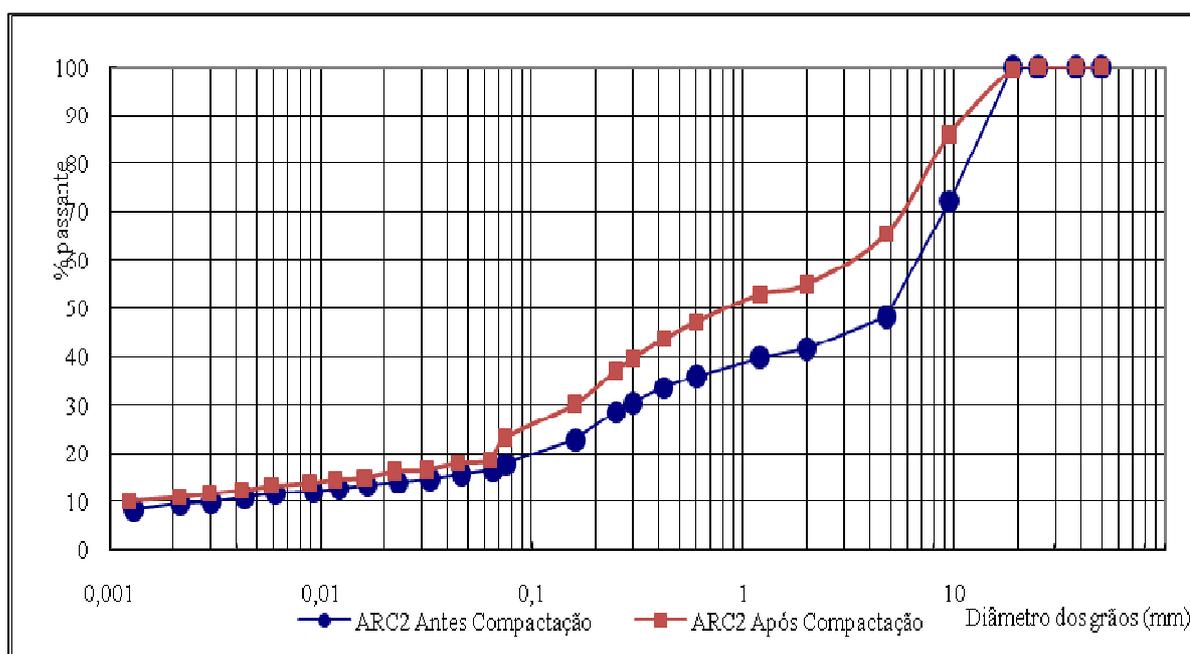


Figura 6.4 – Curvas granulométricas da dosagem ARC2, antes e após a compactação.

O valor crítico do índice de degradação ocorre quando a curva granulométrica ultrapassa os limites especificados para a faixa adotada, ou quando é possível identificar uma brusca inflexão da curva granulométrica, causada por uma fratura mais significativa de determinado tamanho de partículas (MACEDO *et al.*, 2001; CARNEIRO *et al.*, 2001 *apud* OLIVEIRA, 2007). A análise granulométrica em função de duas faixas normativas da Especificação de Serviço ES-303 (DNER, 1997) é constante da Figura 6.5. As tabelas 6.2 a 6.6 apresentam os dados das análises granulométricas das dosagens de agregados reciclados estudados em laboratório.

A análise acessória do enquadramento da curva granulométrica do material em faixas granulométricas estabelecidas por Especificação de Serviços 303/1997 (DNER, 1997), tem por objetivo garantir que a dosagem analisada apresenta curva granulométrica bem graduada e não uniforme. Existe outra forma de se perceber esta mesma característica da dosagem, observando-se o valor do Coeficiente de Uniformidade ( $C_u$ ), de acordo com a NBR-7181 (ABNT, 1984a). Este coeficiente deverá ser maior que 10, de acordo com a determinação da NBR 15115 (ABNT, 2004e).

Percebe-se, pela Figura 6.5, que as dosagens ensaiadas não se enquadram somente em uma única faixa do DNER, variando seus grãos entre as Faixas C e D.

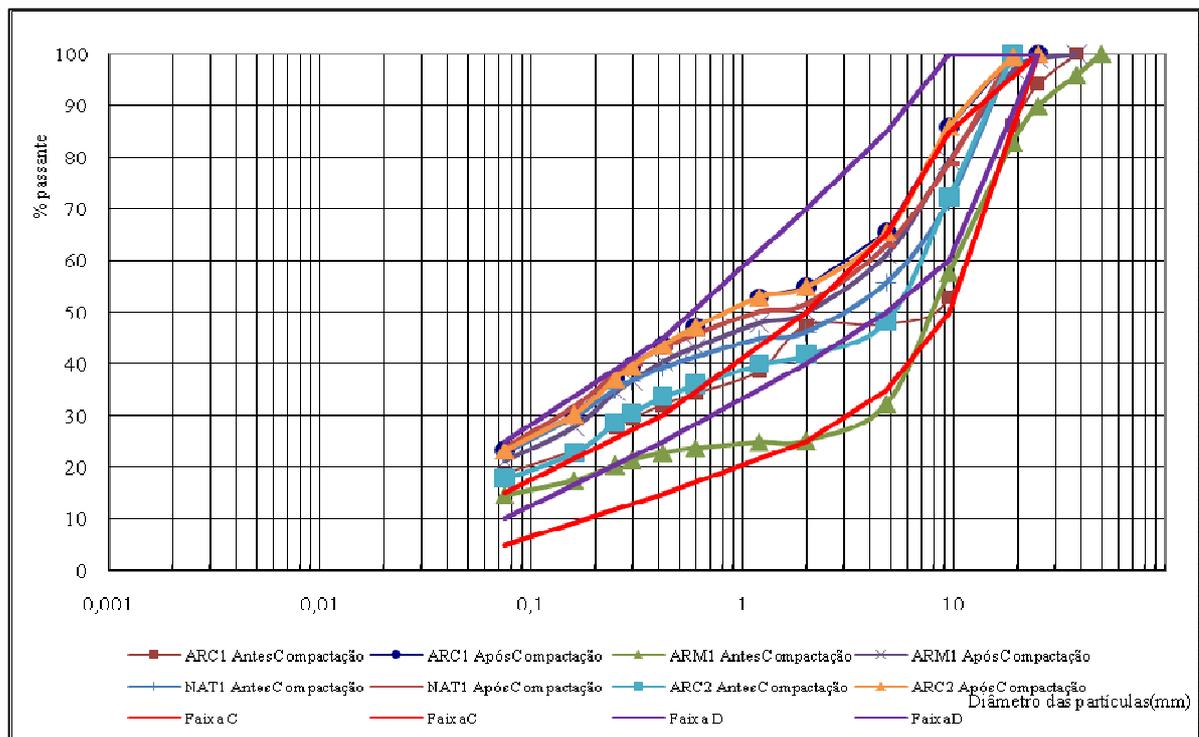


Figura 6.5 – Verificação do enquadramento em faixas granulométricas.

Tabela 6.2 – Caracterização da textura dos agregados estudados em laboratório.

		% PASSANTE								
PENEIRAS		ARC1		ARM1		NAT1		ARC2		SOLO
Nº	Abertura (mm)	ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS	
PENEIRAMENTO	2"	50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	1½"	38,0	100,0	100,0	95,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	1"	25,0	94,2	100,0	89,9	99,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	¾"	19,0	86,0	99,5	82,9	97,0	100,0	100,0	100,0	99,5
	3/8"	9,5	52,9	85,9	57,7	79,4	71,6	78,8	72,2	85,9
	Nº 4	4,8	47,6	65,5	32,3	61,2	55,7	62,9	48,2	65,5
	Nº 10	2,0	47,4	54,9	25,2	49,9	46,2	51,6	41,8	54,9
	16	1,20	38,6	52,9	24,8	47,9	44,9	50,1	39,9	52,9
	30	0,60	34,3	47,2	23,7	43,2	41,3	45,7	36,0	47,2
	40	0,42	32,0	43,6	22,8	40,4	39,3	43,1	33,6	43,6
	50	0,30	29,4	39,6	21,4	36,7	36,7	40,0	30,5	39,6
	60	0,25	27,8	37,2	20,5	34,5	35,1	38,0	28,5	37,2
	100	0,16	23,2	30,3	17,5	27,7	29,7	31,7	22,8	30,3
	200	0,075	18,7	23,3	14,6	21,1	22,8	23,7	17,8	23,3
SEDIMENTAÇÃO	0,0669	14,0	33,9	1,1	1,7	19,5	22,8	16,5	18,6	41,3
	0,0471	12,8	32,7	1,1	1,6	18,6	20,1	15,6	18,0	39,1
	0,0338	11,8	30,2	1,1	1,5	17,1	18,4	14,8	16,6	37,9
	0,0239	10,9	29,6	1,0	1,5	15,5	16,7	14,0	16,3	35,7
	0,0172	10,2	27,1	0,9	1,4	14,6	15,7	13,4	14,9	34,5
	0,0126	9,9	26,5	0,9	1,3	14,0	14,7	12,9	14,6	32,3
	0,0095	8,9	25,3	0,9	1,2	13,7	14,0	12,1	13,9	31,1
	0,0063	8,3	24,1	0,8	1,1	13,1	13,7	11,8	13,2	30,0
	0,0045	7,3	22,5	0,8	1,0	12,8	13,0	11,0	12,4	26,9
	0,0031	6,1	21,2	0,7	0,9	11,8	12,3	10,0	11,7	25,2
	0,0022	5,7	20,0	0,7	0,8	11,3	11,8	9,6	11,0	22,9
0,0013	4,6	18,4	0,6	0,7	10,5	10,6	8,4	10,1	20,4	

Tabela 6.3 – Dados granulométricos da dosagem ARC1.

ARC1					
DADOS ANTES DA COMPACTAÇÃO			DADOS APÓS A COMPACTAÇÃO		
FRAÇÃO	FAIXA (mm)	PORCENTAGEM (%)	FRAÇÃO	FAIXA (mm)	PORCENTAGEM (%)
ARGILA	< 0,002	5,5	ARGILA	< 0,002	8,1
SILTE	0,002 - 0,06	8,2	SILTE	0,002 - 0,06	15,2
AREIA FINA	0,06 - 0,20	11,6	AREIA FINA	0,06 - 0,20	5,9
AREIA MEDIA	0,20 - 0,60	9,0	AREIA MEDIA	0,20 - 0,60	11,4
AREIA GROSSA	0,60 - 2,0	13,1	AREIA GROSSA	0,60 - 2,0	7,8
PEDREGULHO	2,0 - 60	52,6	PEDREGULHO	2,0 - 60	51,6
<b>Σ</b>		<b>100,0</b>	<b>Σ</b>		<b>100,0</b>
PARAMETRO	UNIDADE	VALOR	PARAMETRO	UNIDADE	VALOR
% Passa # 200	%	18,73	% Passa # 200	%	20,15
D10	mm	0,01	D10	mm	0,00
D30	mm	0,33	D30	mm	0,21
D60	mm	11,54	D60	mm	6,70
CC		0,68	CC		1,72
CU		836,72	CU		1.708,32

Tabela 6.4 – Dados granulométricos da dosagem ARM1.

ARM1					
DADOS ANTES DA COMPACTAÇÃO			DADOS APÓS A COMPACTAÇÃO		
FRAÇÃO	FAIXA (mm)	PORCENTAGEM (%)	FRAÇÃO	FAIXA (mm)	PORCENTAGEM (%)
ARGILA	< 0,002	0,7	ARGILA	< 0,002	0,8
SILTE	0,002 - 0,06	0,5	SILTE	0,002 - 0,06	0,9
AREIA FINA	0,06 - 0,20	17,7	AREIA FINA	0,06 - 0,20	29,1
AREIA MEDIA	0,20 - 0,60	4,9	AREIA MEDIA	0,20 - 0,60	12,5
AREIA GROSSA	0,60 - 2,0	1,4	AREIA GROSSA	0,60 - 2,0	6,7
PEDREGULHO	2,0 - 60	74,8	PEDREGULHO	2,0 - 60	50,1
<b>Σ</b>		<b>100,0</b>	<b>Σ</b>		<b>100,0</b>

PARAMETRO	UNIDADE	VALOR	PARAMETRO	UNIDADE	VALOR
% Passa # 200	%	14,58	% Passa # 200	%	21,09
D10	mm	0,07	D10	mm	0,07
D30	mm	3,90	D30	mm	0,19
D60	mm	10,38	D60	mm	4,50
CC		20,84	CC		0,12
CU		147,31	CU		64,69

Tabela 6.5 – Dados granulométricos da dosagem NAT1

NAT					
DADOS ANTES DA COMPACTAÇÃO			DADOS APÓS A COMPACTAÇÃO		
FRAÇÃO	FAIXA (mm)	PORCENTAGEM (%)	FRAÇÃO	FAIXA (mm)	PORCENTAGEM (%)
ARGILA	< 0,002	11,2	ARGILA	< 0,002	11,6
SILTE	0,002 - 0,06	8,1	SILTE	0,002 - 0,06	10,6
AREIA FINA	0,06 - 0,20	12,8	AREIA FINA	0,06 - 0,20	12,3
AREIA MEDIA	0,20 - 0,60	9,2	AREIA MEDIA	0,20 - 0,60	11,2
AREIA GROSSA	0,60 - 2,0	4,8	AREIA GROSSA	0,60 - 2,0	5,9
PEDREGULHO	2,0 - 60	53,8	PEDREGULHO	2,0 - 60	48,4
<b>Σ</b>		<b>100,0</b>	<b>Σ</b>		<b>100,0</b>

PARAMETRO	UNIDADE	VALOR	PARAMETRO	UNIDADE	VALOR
% Passa # 200	%	22,78	% Passa # 200	%	23,71
D10	mm	-	D10	mm	-
D30	mm	0,17	D30	mm	0,14
D60	mm	6,07	D60	mm	4,08

Tabela 6.6 – Dados granulométricos da dosagem ARC2.

ARC2					
DADOS ANTES DA COMPACTAÇÃO			DADOS APÓS A COMPACTAÇÃO		
FRAÇÃO	FAIXA (mm)	PORCENTAGEM (%)	FRAÇÃO	FAIXA (mm)	PORCENTAGEM (%)
ARGILA	< 0,002	9,4	ARGILA	< 0,002	10,9
SILTE	0,002 - 0,06	6,8	SILTE	0,002 - 0,06	7,6
AREIA FINA	0,06 - 0,20	9,1	AREIA FINA	0,06 - 0,20	14,8
AREIA MEDIA	0,20 - 0,60	10,6	AREIA MEDIA	0,20 - 0,60	13,9
AREIA GROSSA	0,60 - 2,0	5,8	AREIA GROSSA	0,60 - 2,0	7,7
PEDREGULHO	2,0 - 60	58,2	PEDREGULHO	2,0 - 60	45,1
<b>Σ</b>		<b>100,0</b>	<b>Σ</b>		<b>100,0</b>

PARAMETRO	UNIDADE	VALOR	PARAMETRO	UNIDADE	VALOR
% Passa # 200	%	17,76	% Passa # 200	%	23,3
D10	mm	0,01	D10	mm	---
D30	mm	0,29	D30	mm	0,2
D60	mm	7,11	D60	mm	3,3
CNU		2.395,31	CNU	0	---
CC		3,92	CC	0	---
CU		2.395,31			

Com relação à granulometria das dosagens de agregados, as mesmas apresentaram curvas granulométricas mal graduadas.

A Figura 6.6 apresenta a distribuição granulométrica com defloculante do solo de adição utilizado nas dosagens experimentais.

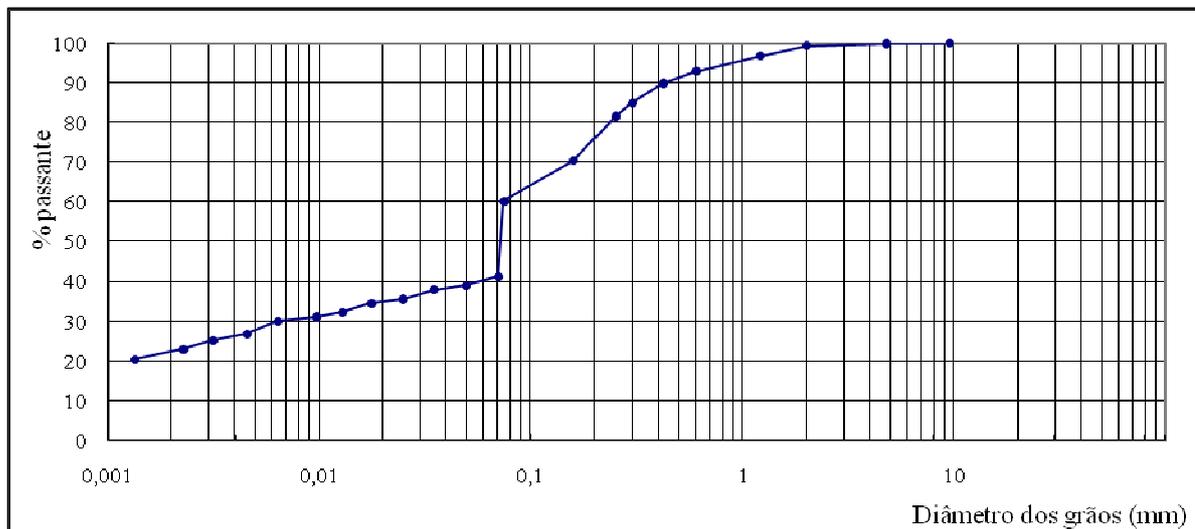


Figura 6.6 – Curva granulométrica do solo argiloso de adição.

A Tabela 6.7 apresenta os resultados da análise granulométrica do solo argiloso utilizado para adição nas amostras de agregados reciclados estudadas em laboratório.

Tabela 6.7 – Caracterização da textura do Solo de Adição.

<b>FRAÇÃO</b>	<b>FAIXA (mm)</b>	<b>PORCENTAGEM (%)</b>
ARGILA	< 0,002	22,20
SILTE	0,002 - 0,06	18,00
AREIA FINA	0,06 - 0,20	35,22
AREIA MEDIA	0,20 - 0,60	17,62
AREIA GROSSA	0,60 - 2,0	6,30
PEDREGULHO	2,0 - 60	0,66
		100,00

<b>PARAMETRO</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>VALOR</b>
% Passa # 200	%	60,25
D10	mm	---
D30	mm	0,01
D60	mm	0,07

Os valores dos limites de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade e limite de contração estão demonstrados na Tabela 6.8

Tabela 6.8 – Valores obtidos nos ensaios dos Limites de Atterberg

<b>AMOSTRA</b>	<b>W<sub>P</sub> (%)</b>	<b>W<sub>L</sub> (%)</b>	<b>IP(%)</b>
<b>ARC1</b>	21	30	8,7
<b>ARM1</b>	22	32	9,7
<b>NAT</b>	17	26	9,7
<b>ARC2</b>	20	28	8,3
<b>SOLO</b>	23	34	10,9

Obs.: W<sub>P</sub>=Limite de Plasticidade; W<sub>L</sub>=Limite de Liquidez; IP=Índice de Plasticidade.

A Tabela 6.9 mostra os resultados obtidos da massa específica dos grãos das amostras em estudo de laboratório, passados na peneira de 4,8mm.

Tabela 6.9 – Valores obtidos nos ensaios de Peso Específico dos Grãos passados na peneira de 4,8mm.

<b>AMOSTRA</b>	<b><math>\rho</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>
<b>ARC1</b>	27,52
<b>ARM1</b>	28,78
<b>NAT1</b>	27,55
<b>ARC2</b>	27,96
<b>SOLO</b>	27,98

A Tabela 6.10 apresenta os valores dos pesos específicos das dosagens estudadas dos pedregulhos retidos na peneira 4,8mm (fração graúda), bem como o índice de absorção de água. Os resultados das amostras submetidas a estudo de acordo com a NBR 6458 (ABNT, 1984e) não diferiram mais que 0,02 g/cm<sup>3</sup> nos cálculos.

Tabela 6.10 – Valores obtidos nos ensaios de Peso Específico dos Pedregulhos retidos na peneira 4,8mm e índice de Absorção de Água da fração graúda.

<b>AMOSTRA</b>	<b><math>\rho</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>S (%)</b>
<b>ARC1</b>	26,48	4,96%
<b>ARM1</b>	25,38	16,33%
<b>NAT1</b>	26,36	0,12%
<b>ARC2</b>	24,71	5,32%

De acordo com Pinto (2000), os valores de peso específico dos grãos para solo situam-se próximos a 26,50 kN/m<sup>3</sup>, sendo este valor adotado sempre quando não se dispõe do valor específico para um determinado solo em estudo. Dessa forma, apesar dos materiais não possuírem comportamento de solos granulares, o resultado obtido com os experimentos demonstram valores análogos e próximos daqueles utilizados para solos.

A Tabela 6.11 apresenta informações de absorção de outros trabalhos de mesma linha de pesquisa com misturas de solo-agregado reciclado.

Tabela 6.11 – Índices de absorção de água da fração graúda para agregados reciclados, adaptado de Leite (2006).

COMPOSIÇÃO	PROCEDÊNCIA	ABSORÇÃO (%)	AUTOR
Misto	Flórida, Estados Unidos	4,40%	Chini et al. (2001)
Misto	Salvador/BA	8,20%	Carneiro et al. (2001)
Misto	Maceió/AL	6,00%	Vieira et al. (2004)
Misto	São Paulo/SP	7,80%	Motta (2005)
Cerâmico	Hong Kong, China	19,00%	Poon e Chan (2006)
Misto	Santo André/SP	12,20%	Leite (2006)
Cimentício (ARC)	Goiânia/GO	9,70%	Oliveira (2007)
Misto (ARM)	Goiânia/GO	19,00%	Oliveira (2007)
Cimentício (ARC1)	Goiânia/GO	4,96%	Esta pesquisa
Cimentício (ARC2)	Goiânia/GO	5,32%	
Natural (NAT1)	Goiânia/GO	0,12%	
Misto (ARM1)	Goiânia/GO	16,33%	

Verifica-se que, de acordo com a Tabela 6.11 os agregados reciclados de composição mista apresentam absorção maior que agregados de composição cimentícia. Este fato pode ser explicado em consequência das diferentes concentrações de materiais presentes nos diferentes agregados reciclados mistos, principalmente materiais cerâmicos, que influem diretamente na sua capacidade de absorção.

### 6.3 COMPACTAÇÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CALIFORNIA BEARING RATIO – CBR)

#### 6.3.1 COMPACTAÇÃO

Neste item estão apresentados os resultados dos ensaios de compactação para as amostras em estudo. Os ensaios foram executados com energia de compactação Proctor Modificado para a definição da umidade ótima ( $\omega_{ot}$ ) e peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{d \text{ máx}}$ ), sendo que estes importantes parâmetros foram utilizados na moldagem e cura dos corpos de prova para ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) (*California Bearing Ratio* - CBR) e ensaios de Expansão.

A Figura 6.7 apresenta as curvas de compactação e saturação obtidas para as dosagens estudadas e também para o solo de adição, em separado. A Tabela 6.12 apresenta os resultados dos ensaios de compactação realizados.

Tabela 6.12 – Resultados encontrados no ensaio de compactação.

AMOSTRA	$\omega_{ot}$ (%)	$\gamma_d$ máx (kN/m <sup>3</sup> )
ARC1	10,8	19,70
ARM1	12,7	17,00
NAT1	6,6	21,72
ARC2	11,2	19,34
SOLO	20,8	15,80

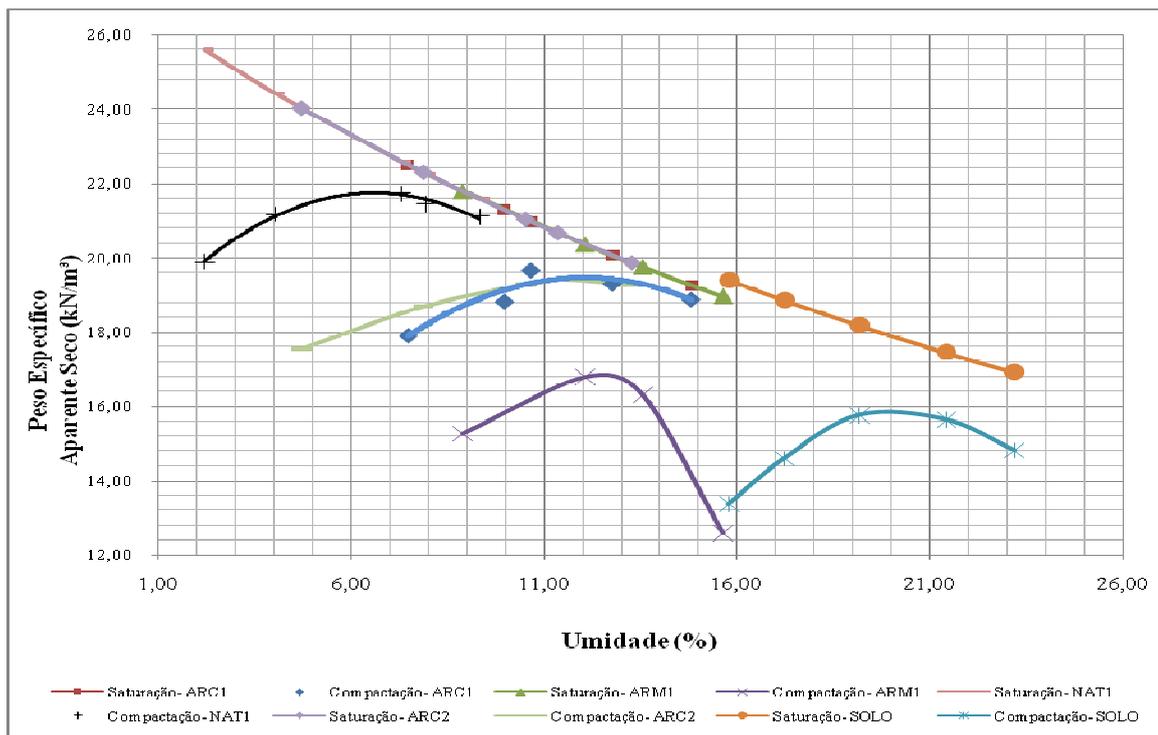


Figura 6.7 – Curvas de compactação das amostras.

Pode-se perceber que quanto maior a quantidade de finos presentes na amostra, maior será a umidade ótima encontrada (caso de ARM1 e SOLO). Já o peso específico máximo aparente seco tem-se menores valores para o Solo de Adição.

### 6.3.2 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (*CALIFORNIA BEARING RATIO – CBR*) E EXPANSÃO

A Tabela 6.13 representa os resultados dos ensaios de CBR e Expansão realizados com as dosagens estudadas em laboratório. A Figura 6.8 mostra os resultados gráficos, para as dosagens, de Expansão, CBR e o Peso Específico Máximo Aparente Seco *versus* o teor de umidade das amostras.

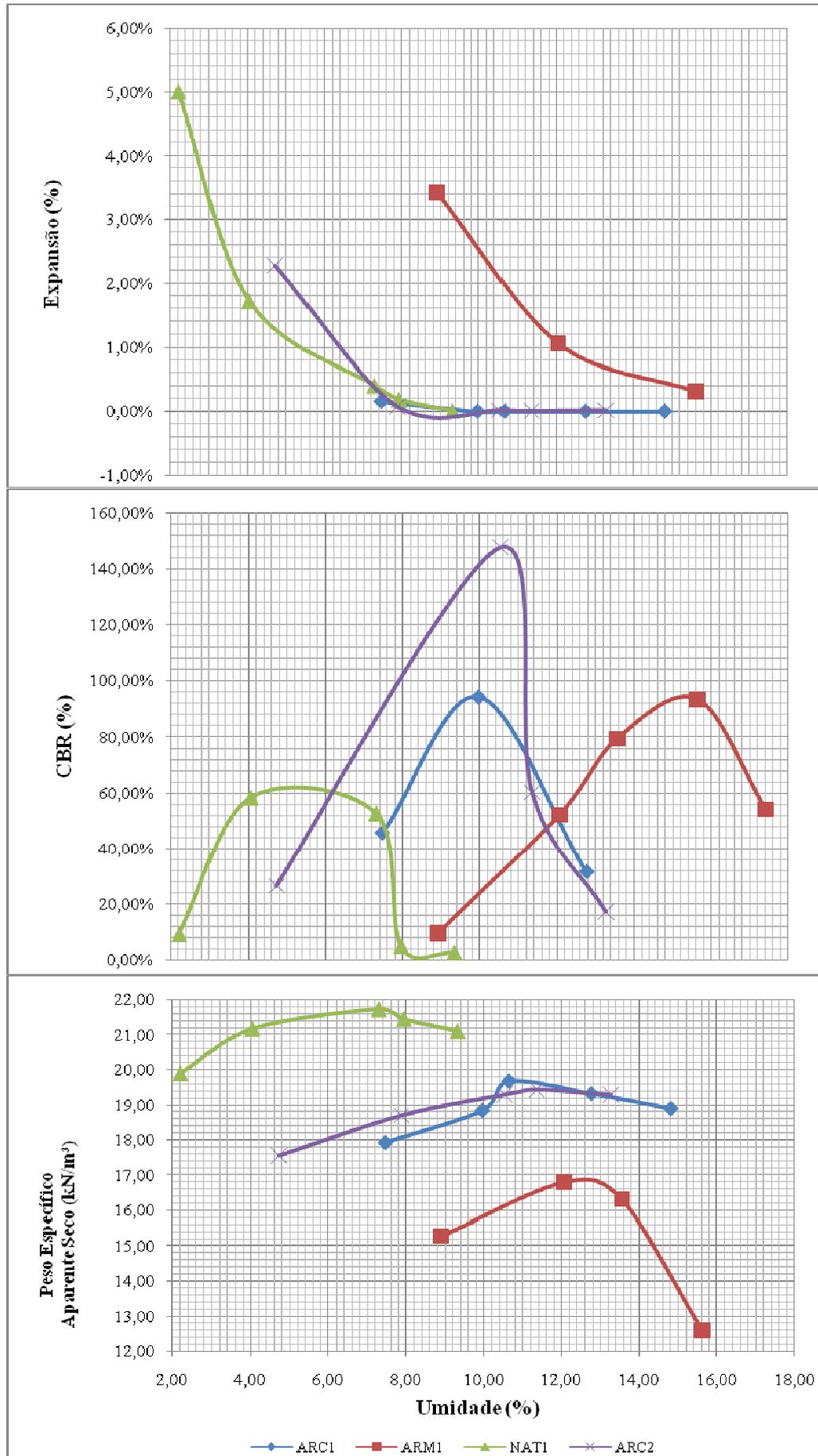


Figura 6.8 – Curvas dos resultados dos ensaios de CBR e Expansão.

Tabela 6.13 – Valores encontrados nos ensaios de CBR e Expansão.

<b>AMOSTRA</b>	<b>CBR (%)</b>	<b>EXPANSÃO (%)</b>
<b>ARC1</b>	82%	0,00%
<b>ARM1</b>	70%	0,96%
<b>NAT1</b>	58%	0,90%
<b>ARC2</b>	96%	0,48%

De acordo com a Tabela 6.13, verifica-se que as amostras apresentaram valores de CBR de 82% e 70%, 58% e 96%, respectivamente, para as dosagens ARC1, ARM1, NAT1 e ARC2. As normas vigentes solicitam, para sub-base valores de CBR  $\geq 20\%$  e para a base valores de CBR  $\geq 60\%$  para vias de baixo volume médio de tráfego e CBR  $\geq 80\%$  para vias de grande volume de tráfego, conclui-se que as dosagens preparadas e ora ensaiadas permitem utilização e apresentam viabilidade técnica. Na Tabela 6.14 sugere-se utilização às dosagens ensaiadas, com base nos dados apresentados.

Ao se analisar as curvas de expansão, constantes da Figura 6.8, percebe-se que as mesmas apresentam características diferentes daquelas encontradas em materiais tradicionais. Entretanto, as curvas apresentam, de forma vaga, mesmas tendências de comportamento com relação à expansão nos pontos representativos dos ramos secos, quando comparados aos materiais tradicionais para execução de bases e sub-bases com materiais lateríticos.

Tabela 6.14 – Possíveis utilizações das amostras estudadas.

<b>AMOSTRA</b>	<b>POSSIBILIDADE DE UTILIZAÇÃO</b>
<b>ARC1</b>	Reforço de Subleito; Sub-base; Base de vias de baixo volume de tráfego;
<b>ARM1</b>	Reforço de Subleito; Sub-base;
<b>ARC2</b>	Reforço de Subleito; Sub-base; Base de vias de baixo volume de tráfego;

## 6.4 MEDIÇÃO DE pH

Como forma de complementar os estudos das amostras e, como tentativa de se comprovar a possibilidade de ganhos de resistência dos agregados reciclados por motivo de reações químicas entre a água e componentes pozolânicos porventura existentes, procede-se a aferição do pH da fase fina das amostras quando da ruptura dos corpos-de-prova para ensaios de CBR.

Diferentemente dos resultados encontrados por Oliveira (2007) e Leite (2006), nesta pesquisa, os resultados que analisaram a variação do pH de amostras de dosagens de solo-agregado em diferentes e vários tempos de cura, não apresentaram resultados satisfatórios.

Oliveira (2007) concluiu em seus estudos que a aferição do pH de uma amostra pode servir para indicar o percentual de grãos cimentícios da mesma e, além disso, indica a possibilidade de ganhos de resistência, por auto-cimentação, ao longo do tempo. O ganho de resistência mostrou-se diretamente relacionado com o pH, de tal forma que dosagens com pH acima de 10,5 apresentaram incrementos de resistência, o que aponta a ocorrência de reações pozolânicas nas misturas.

Foram conduzidos ensaios de compressão simples com diferentes tempos de cura com amostras de agregado reciclado no estado de Utah, Estados Unidos da América. Os resultados obtidos indicaram um ganho considerável de resistência com o tempo: 0 a 3 dias houve um aumento de 130%, e de 0 a 7 dias um aumento de 180% (LEITE, 2007 *apud* BLANKENAGEL; GUTHRIE, 2006). Conforme exposto pelos autores, acredita-se que este aumento de resistência ocorreu em função de reações pozolânicas e/ou da hidratação de partículas de cimento presentes nos agregados reciclados (hidratação de cimento anidro).

Motta (2006), em seu trabalho, também analisou misturas de agregados reciclados e, através de ensaios de ISC (*CBR*) dos corpos em diferentes tempos de cura, mantidas as condições de umidade, concluiu que houve indícios da ocorrência de reações pozolânicas por parte das partículas do RCD que ainda possuíam potencial reativo. Essa reação dá-se pela manutenção da umidade e pelo esforço de compactação que pode aumentar o teor de finos da amostra.

## **6.5 PISTAS EXPERIMENTAIS**

Em janeiro de 2008 foi realizada a primeira etapa de ensaios de campo nas duas pistas experimentais: Acesso de Compradores do CEASA, no Setor de Mansões Bernardo Sayão, região Norte de Goiânia e na Rua SR-68 no Setor recanto das Minas Gerais. A segunda etapa de ensaios foi realizada em Junho de 2008. Os resultados obtidos foram comparados, para

efeito de avaliação de eventuais variações, com pesquisas anteriormente realizadas por Resplandes (2007), Oliveira (2007) e Ribeiro (2006), referentes aos ensaios efetuados.

Foram realizados os ensaios:

- (i) Viga Benkelman;
- (ii) Prova de Carga sobre a Placa;
- (iii) Penetrômetro Dinâmico de Cone;

Os resultados dos ensaios realizados nas pistas experimentais serão apresentados nos itens a seguir.

## 6.5.1 MEDIDAS DE DEFLEXÕES UTILIZANDO VIGA BENKELMAN

### 6.5.1.1 TRECHO EXPERIMENTAL DO CEASA

As Tabelas 6.15 e 6.16 mostram a deflexão real ou verdadeira medida no ponto de prova ( $D_0$ ), a deflexão medida a 25 centímetros do ponto de prova da Viga ( $D_{25}$ ), o raio de curvatura calculado (R) e o valor do produto  $RD_0$  para o trecho considerado.

Tabela 6.15 – Resultados obtidos com ensaio de Viga Benkelman em Janeiro/2008

ESTACA	DEFLEXÕES ( $\times 10^{-2}$ mm)		R (m)	RxD <sub>0</sub>
	D <sub>0</sub>	D <sub>25</sub>		
E03 (BD)	60,0	28,0	97,7	5.859,4
E04 (BD)	90,0	54,0	86,8	7.812,5
E3+10 (BE)	94,0	70,0	130,2	12.239,6
E4+10 (BE)	140,0	96,0	71,0	9.943,2
<b>MÉDIA</b>	<b>96,0</b>	<b>62,0</b>	<b>96,4</b>	<b>8.963,7</b>

Tabela 6.16 – Resultados obtidos com ensaio de Viga Benkelman em Junho/2008

ESTACA	DEFLEXÕES ( $\times 10^{-2}$ mm)		R (m)	RxD <sub>0</sub>
	D <sub>0</sub>	D <sub>25</sub>		
E03 (BD)	82,0	38,0	71,0	5.823,9
E04 (BD)	100,0	66,0	91,9	9.191,2
E3+10 (BE)	62,0	38,0	130,2	8.072,9
E4+10 (BE)	108,0	56,0	60,1	6.490,4
<b>MÉDIA</b>	<b>88,0</b>	<b>49,5</b>	<b>88,3</b>	<b>7.394,6</b>

De acordo com a Norma PRO-011 (DNER, 1979), valores do Raio de Curvatura (R) menores que 100 metros sugerem a existência de problemas estruturais no pavimento que requerem a realização de outros tipos de ensaios confirmatórios. Da mesma forma, pode-se efetuar análise das condições estruturais do pavimento através do produto  $RD_0$  (PAIVA; CAUSIM, 2000) Valores do produto menores que 5500 podem indicar provável existência de problemas estruturais.

Observando-se as Tabelas 6.15 e 6.16, percebe-se a que menores valores de deflexões foram encontrados em Junho, quando comparados aos valores referentes ao mês de Janeiro. Pode-se inferir, para este trecho experimental, que existe relação entre a variação das deflexões e as condições de umidade do meio (estações seca e chuvosa do ano).

Após a análise dos dados das Tabelas 6.15 e 6.16, pode-se perceber também que os Raios de Curvatura (R) apresentaram alguns valores menores que o parâmetro estabelecido para comparação. Porém, os produtos  $RD_0$  apresentaram valores superiores ao limite estabelecido. Desta forma, percebe-se que os resultados expressam bom comportamento estrutural do trecho estudado. Infere-se, inclusive, que a afirmação de Resplandes (2007) se confirmou, uma vez que observou-se valores ligeiramente menores de  $D_0$  para o bordo direito da pista em tela, para Janeiro/2008. Isso pode demonstrar que, provavelmente, houve menor rigor para o acompanhamento tecnológico desta face da pista.

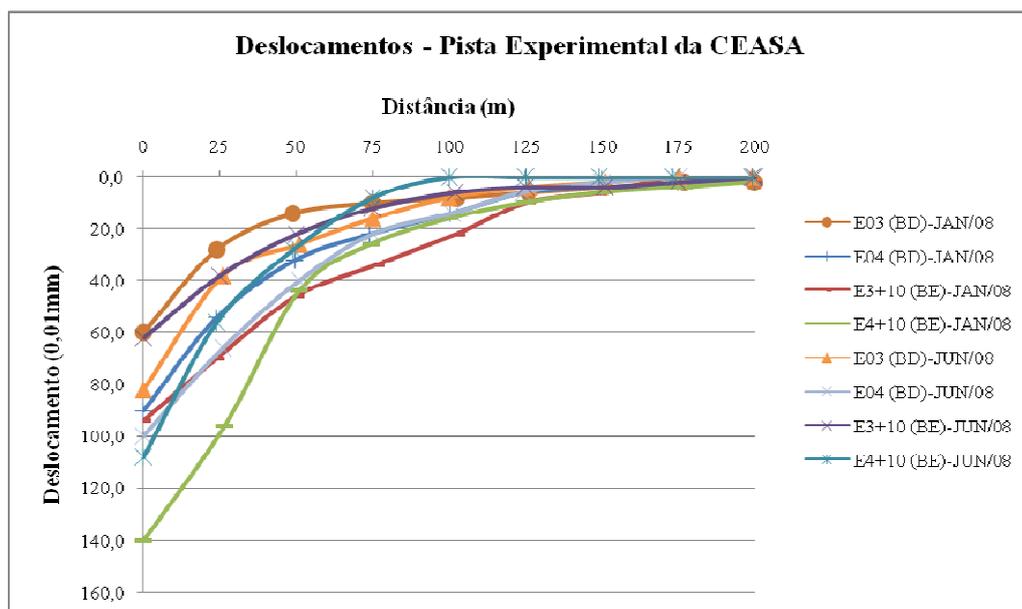


Figura 6.9 – Bacias, em diferentes períodos, na pista experimental da CEASA.

A Figura 6.9 apresenta as curvas das bacias de deformação encontradas através dos ensaios, para os bordos direito e esquerdo do trecho considerado, em Janeiro e Junho de 2008. A Figura 6.10 apresenta a média geral dos deslocamentos para os períodos em estudo, da pista experimental da CEASA.

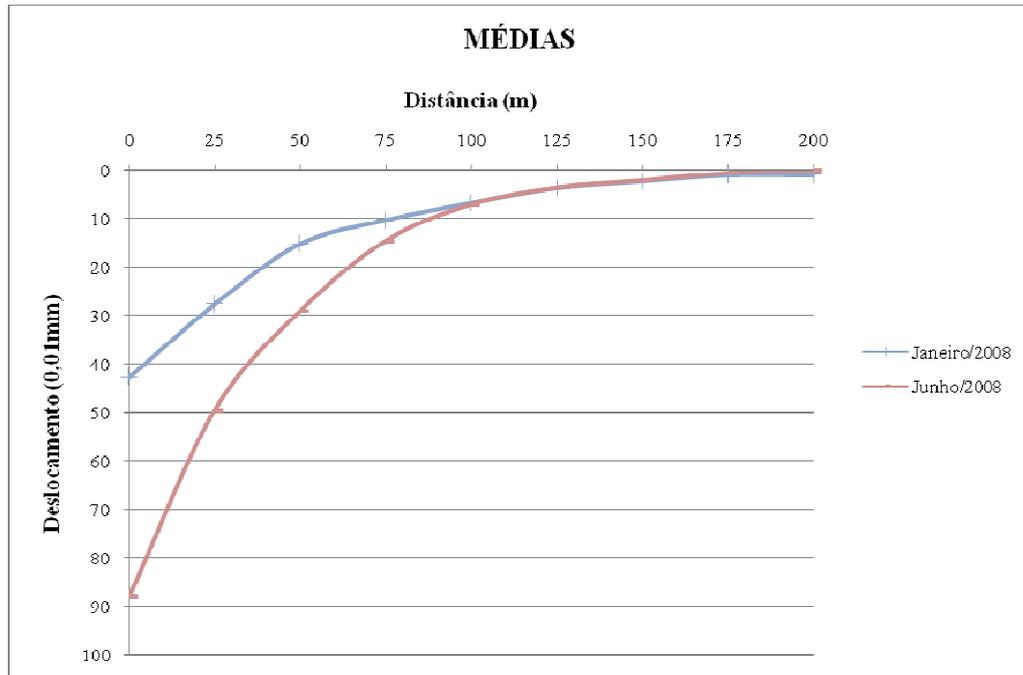


Figura 6.10 – Média geral dos períodos em estudo – Pista Experimental da CEASA.

A Tabela 6.17 demonstra a variação, através de comparação simples, dos dados obtidos por Oliveira (2007) para os anos de 2004 e 2005 e Resplandes (2007). A Figura 6.11 mostra, de forma gráfica, as bacias médias de deslocamento para os períodos descritos.

Tabela 6.17 – Análise temporal - médias obtidas nos ensaios de Viga Benkelman.

PERÍODO	D <sub>0</sub>	D <sub>25</sub>	R	RxD <sub>0</sub>
Janeiro/2004*	48	29	171	8.134
Setembro/2004**	41	30	291	11.846
Maió/2005*	64	33	101	6.464
Novembro/2005*	62	33	109	6.728
Maió/2006*	60	38	142	8.586
Novembro/2006***	61	30	105	6.426
<b>Janeiro/2008</b>	<b>96</b>	<b>62</b>	<b>96</b>	<b>8.964</b>
<b>Junho/2008</b>	<b>88</b>	<b>50</b>	<b>88</b>	<b>7.395</b>

\* Oliveira (2007)

\*\* Assis et al. (2004)

\*\*\* Resplandes (2007)

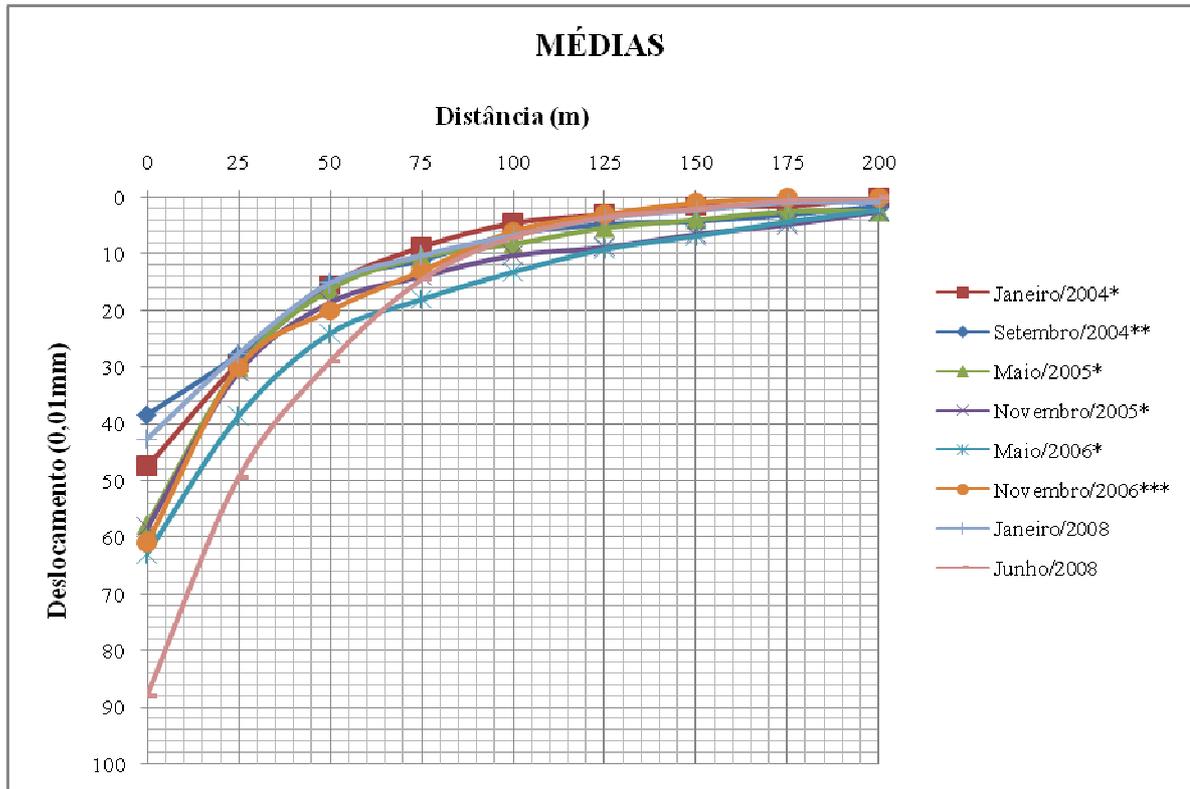


Figura 6.11 – Bacias de deflexão médias para a pista experimental da CEASA

De acordo com os dados obtidos das pesquisas de Oliveira (2007), Assis *et al.* (2004) e Resplandes (2007) e os dados ora apresentados na Tabela 6.17 e a Figura 6.11, verifica-se que, em média, a Deflexão Inicial ( $D_0$ ) apresentou pequenas variações ao longo dos períodos observados. Inicialmente, pode-se inferir que a média do deslocamento inicial cresceu em função da consolidação natural das camadas ou da própria variabilidade ou imprecisão deste tipo de ensaio. Após seis meses de ação de tráfego (Maio/2005) sobre a pista, observa-se aumento do valor de  $D_0$ , que se manteve constante até Novembro/2006. Em Janeiro/2008 os valores apresentaram um novo patamar de aumento podendo indicar sinais de fadiga do pavimento, frente às solicitações do tráfego.

Apesar dos resultados obtidos poder indicar sinais de fadiga do pavimento, visualmente a pista experimental em estudo não apresenta sinais depreciativos ou defeitos no pavimento, como rachaduras, afundamentos ou fissuras que, se existissem, poderiam corroborar os resultados encontrados e auxiliar sobremaneira na análise do comportamento do pavimento.

Oliveira (2007) efetuou, em Agosto de 2005, contagem volumétrica e classificatória no trecho experimental da CEASA durante o período de duas semanas. A principal inferência foi de que apenas 5% dos veículos de carga que trafegavam pela pista encontravam-se carregados. De acordo com o mesmo levantamento, apesar do volume de tráfego, o número N é baixo em virtude da baixa densidade volumétrica de veículos carregados.

Pode-se, também, efetuar a análise das Deflexões Características, conforme recomendações dos procedimentos PRO-011/79 (DNER, 1979) e PRO-269/94 (DNER, 1994d). A Tabela 6.16 apresenta os valores das deflexões máximas admissíveis. Para o cálculo dessas deflexões, utilizou-se o número N igual à  $10^6$ , que corresponde ao tráfego leve, compatível com o encontrado e medido na pista experimental por Oliveira (2007). Os resultados da Tabela 6.18 apresentam valores maiores daqueles admitidos como deflexões para a pista em questão.

Tabela 6.18 – Deflexões características e admissíveis para a pista experimental da CEASA.

PERÍODO	$D_{\text{Característica}}$	$D_{\text{adm}}$	$D_{\text{adm}}$
		PRO-011	PRO-269
Janeiro/2004*	57	90	105
Setembro/2004**	52	90	105
Maió/2005*	78	90	105
Novembro/2005*	71	90	105
<b>Janeiro/2008</b>	<b>129</b>	<b>90</b>	<b>105</b>
<b>Junho/2008</b>	<b>108</b>	<b>90</b>	<b>105</b>

\* Oliveira (2007)

\*\* Assis *et al.* (2004)

### 6.5.1.2 TRECHO EXPERIMENTAL DA RUA SR-68, SETOR RECANTO DAS MINAS GERAIS

As Tabelas 6.19 e 6.20 apresentam a deflexão real medida no ponto de prova ( $D_0$ ), a deflexão medida a 25 centímetros do ponto de prova da Viga ( $D_{25}$ ), o raio de curvatura calculado (R) e o valor do produto  $RD_0$  para o trecho considerado.

Tabela 6.19 - Resultados obtidos com ensaio de Viga Benkelman em Janeiro/2008

ESTACA	DEFLEXÕES ( $\times 10^{-2}$ mm)		R (m)	RxD <sub>0</sub>
	D <sub>0</sub>	D <sub>25</sub>		
E0 (BE)	222,0	102,0	26,0	5.781,3
E01 (BE)	290,0	190,0	31,3	9.062,5
E02 (BE)	120,0	90,0	104,2	12.500,0
E03 (BE)	108,0	88,0	156,3	16.875,0
E04 (BE)	152,0	124,0	111,6	16.964,3
E05 (BE)	154,0	104,0	62,5	9.625,0
E06 (BE)	122,0	74,0	65,1	7.942,7
E07 (BE)	104,0	76,0	111,6	11.607,1
E0+10 (BD)	118,0	78,0	78,1	9.218,8
E1+10 (BD)	190,0	120,0	44,6	8.482,1
E2+10 (BD)	140,0	100,0	78,1	10.937,5
E3+10 (BD)	214,0	168,0	67,9	14.538,0
E4+10 (BD)	248,0	168,0	39,1	9.687,5
E5+10 (BD)	278,0	170,0	28,9	8.044,0
E6+10 (BD)	238,0	180,0	53,9	12.823,3
<b>MÉDIA</b>	<b>179,9</b>	<b>122,1</b>	<b>70,6</b>	<b>10.939,3</b>
<b>DESVIO</b>	<b>64,1</b>	<b>41,6</b>	<b>37,1</b>	<b>3.280,9</b>

Após a análise dos dados da Tabela 6.19, cujos dados têm referencia de Janeiro de 2008, pode-se perceber que o Raio de Curvatura (R) apresentou valor muito abaixo daquele prescrito pela norma, para cerca de metade dos pontos ensaiados. O produto RD<sub>0</sub> obteve valor médio equivalente a 10.940 m x mm<sup>-2</sup>, mostrando que, com base nesse produto, o pavimento ainda pode ser considerado de boa qualidade estrutural.

Tabela 6.20 - Resultados obtidos com ensaio de Viga Benkelman em Junho/2008

ESTACA	DEFLEXÕES ( $\times 10^{-2}$ mm)		R (m)	RxD <sub>0</sub>
	D <sub>0</sub>	D <sub>25</sub>		
E0 (BE)	218,0	158,0	52,1	11.354,2
E01 (BE)	176,0	166,0	312,5	55.000,0
E02 (BE)	100,0	76,0	130,2	13.020,8
E03 (BE)	158,0	126,0	97,7	15.429,7
E04 (BE)	154,0	122,0	97,7	15.039,1
E05 (BE)	186,0	128,0	53,9	10.021,6
E06 (BE)	126,0	92,0	91,9	11.580,9
E07 (BE)	118,0	86,0	97,7	11.523,4
E0+10 (BD)	128,0	110,0	173,6	22.222,2
E1+10 (BD)	102,0	96,0	520,8	53.125,0
E2+10 (BD)	142,0	114,0	111,6	15.848,2
E3+10 (BD)	158,0	154,0	781,3	123.437,5
E4+10 (BD)	192,0	134,0	53,9	10.344,8
E5+10 (BD)	192,0	114,0	40,1	7.692,3
E6+10 (BD)	246,0	128,0	26,5	6.514,8
<b>MÉDIA</b>	<b>159,7</b>	<b>120,3</b>	<b>176,1</b>	<b>25.477,0</b>
<b>DESVIO</b>	<b>42,3</b>	<b>26,3</b>	<b>210,7</b>	<b>30.974,2</b>

O mesmo pode ser percebido ao analisar-se a Tabela 6.20, cujos dados são referentes ao mês de Junho de 2008, que mostra o Raio de Curvatura (R) com valores muito pequenos em cinco dos pontos ensaiados e o produto RD<sub>0</sub> com valor médio na ordem de 25.400m x mm<sup>-2</sup>, mostrando que, com base nesse produto, o pavimento ainda pode ser considerado de boa qualidade estrutural.

As Figuras 6.14 e 6.15 mostram as bacias de deformação encontradas através dos ensaios, em Janeiro de 2008 e Junho de 2008, respectivamente.

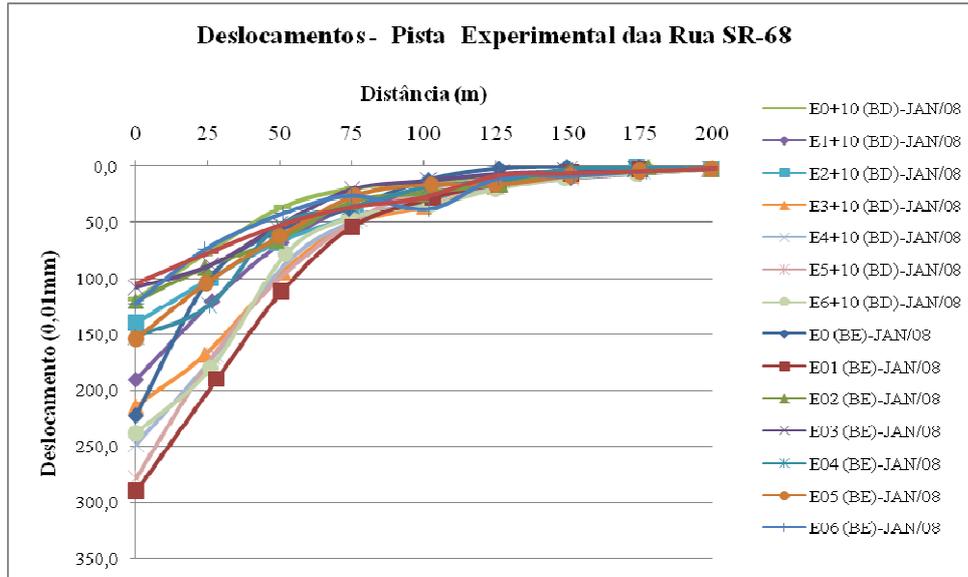


Figura 6.12 – Bacias de deformação – Janeiro/2008.

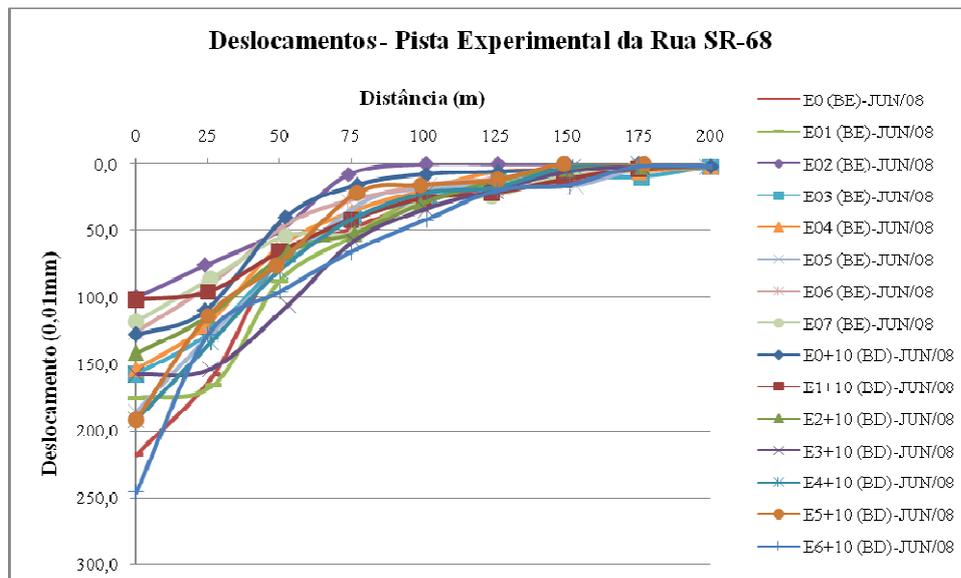


Figura 6.13 - Bacias de deformação – Junho/2008.

A Figura 6.14 apresenta a média geral das bacias de deformação dos períodos ensaiados por esta pesquisa.

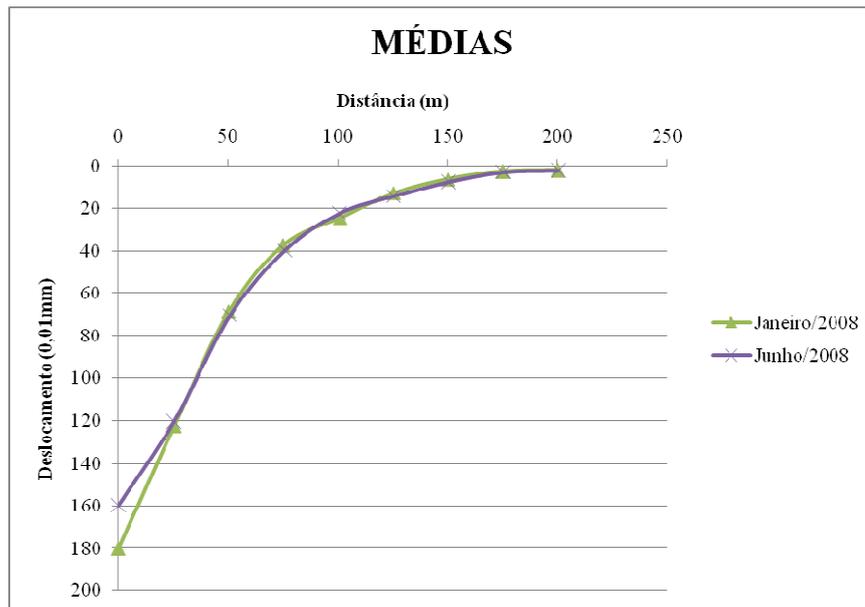


Figura 6.14 - Média geral dos períodos em estudo – Pista Experimental da Rua SR-68.

A Tabela 6.21 e a Figura 6.15 demonstram a variação, através de comparação simples, dos dados obtidos por Ribeiro (2006) para os anos de 2005 e 2006 e Resplandes (2007) para o final do ano de 2006. A figura 6.19 mostra, de forma gráfica, as bacias médias de deslocamento para os períodos descritos.

Tabela 6.21 - Análise temporal - médias obtidas nos ensaios de Viga Benkelman.

PERÍODO	D <sub>0</sub>	D <sub>25</sub>	R	RxD <sub>0</sub>
Abril/2005*	86	63	274	18.686
Janeiro/2006*	62	41	186	9.900
Novembro/2006**	91	62	129	11.803
<b>Janeiro/2008</b>	<b>180</b>	<b>122</b>	<b>71</b>	<b>10.939</b>
<b>Junho/2008</b>	<b>160</b>	<b>120</b>	<b>176</b>	<b>25.477</b>

\* Ribeiro (2006)

\*\* Resplandes (2007)

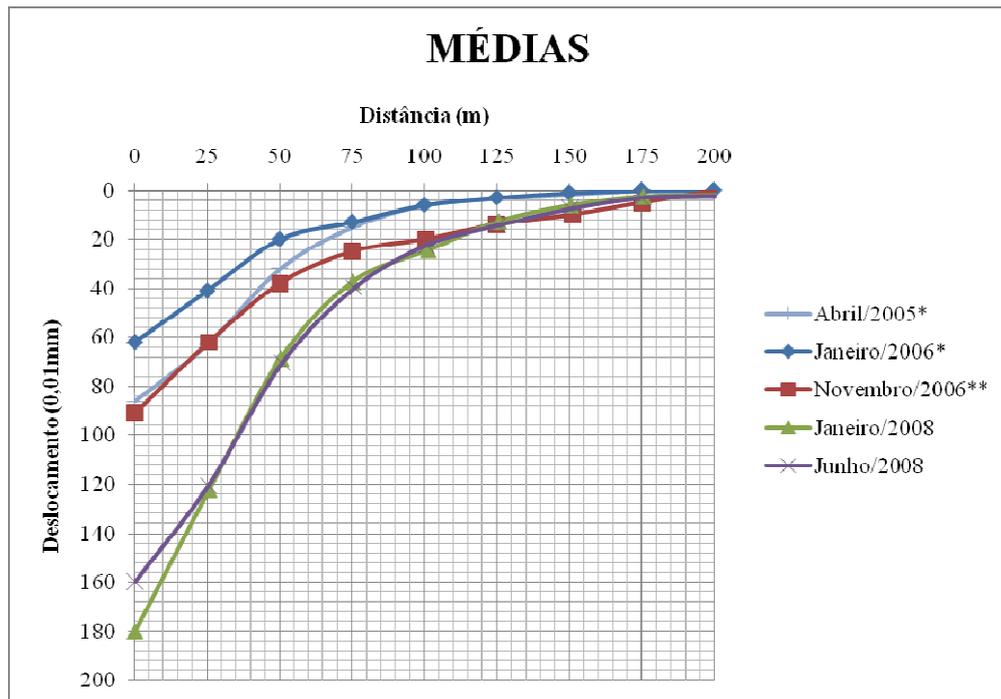


Figura 6.15 - Bacias de deflexão médias para a pista experimental da Rua SR-68.

Pode-se observar que os dados de Ribeiro (2006) obtidos no ano de 2005 e 2006 e Resplandes (2007) apresentaram deslocamentos de pouca variação quando comparados com os resultados dos ensaios realizados em 2008, que apresentaram grande discrepância daqueles primeiros.

Efetuiu-se a análise das Deflexões Características, conforme recomendações dos procedimentos PRO-011/79 (DNER, 1979) e PRO-269/94 (DNER, 1994d). A Tabela 6.22 apresenta os valores das deflexões máximas admissíveis.

Tabela 6.22 - Deflexões características e admissíveis para a pista experimental da Rua SR-68.

PERÍODO	$D_C$	$D_{adm}$	
		PRO 011	PRO 269
<b>Janeiro/2008</b>	<b>244</b>	90	105
<b>Junho/2008</b>	<b>202</b>	90	105

Os resultados da Tabela 6.22 apresentam valores maiores do que aqueles admitidos como deflexões para a pista em questão. Pode-se inferir que, por apresentar valores de deflexões características superiores aos recomendados, a pista experimental em tela já começa a apresentar características de defeitos estruturais em função das ações do tráfego que incide sobre a mesma. Entretanto, quando da realização dos ensaios, não foi verificada falha, trincas ou rachaduras no pavimento da pista experimental em estudo, em especial nas estacas em que

o Raio de Curvatura apresentou valores baixos e também nos locais em que a deflexão inicial apresenta valores elevados.

## 6.5.2 MEDIDAS DE DESLOCAMENTOS - PROVA DE CARGA SOBRE PLACA

### 6.5.2.1 PISTA EXPERIMENTAL DO CEASA

Os resultados do ensaio de Prova de Carga sobre Placa, realizado em Janeiro de 2008, em que foram efetuadas as leituras após cinco minutos passados os incrementos de carga, período suficiente para a estabilização dos deslocamentos, encontram-se na Tabela 6.23 e na Figura 6.19. Para a tensão de 560kPa, correspondente à tensão de dimensionamento do pavimento e para a tensão máxima aplicada no ensaio, estão representados os valores dos deslocamentos.

Tabela 6.23 – Deslocamento de Prova de Carga - Pista experimental da CEASA (Janeiro/2008).

ESTACAS	$d_{total}$	$d_{parcial}$
E3 BD	0,45	0,11

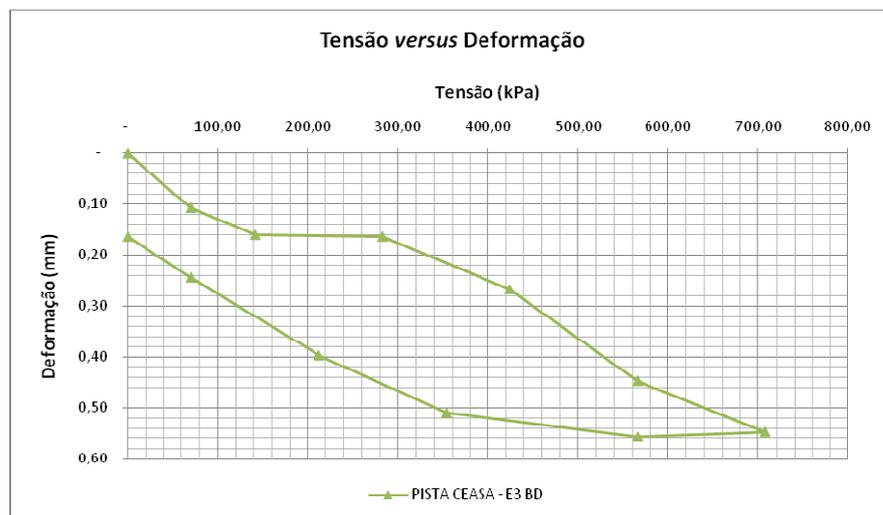


Figura 6.16 – Curvas de ensaio de Prova de Carga – Pista CEASA (Janeiro/2008)

A Figura 6.20 e a Tabela 6.24 apresentam as curvas obtidas nos ensaios de prova de carga para cada estaca ensaiada no trecho de acesso do CEASA, em Junho de 2008.

Tabela 6.24 - Deslocamento de Prova de Carga - Pista experimental da CEASA (Junho/2008).

<b>ESTACAS</b>	<b>d<sub>total</sub></b>	<b>d<sub>parcial</sub></b>
PISTA CEASA - E3 E	0,33	0,00
PISTA CEASA - E4 BD	1,11	0,15
PISTA CEASA - E4+10 BE	0,63	0,23
<b>MÉDIA</b>	<b>0,69</b>	<b>0,13</b>

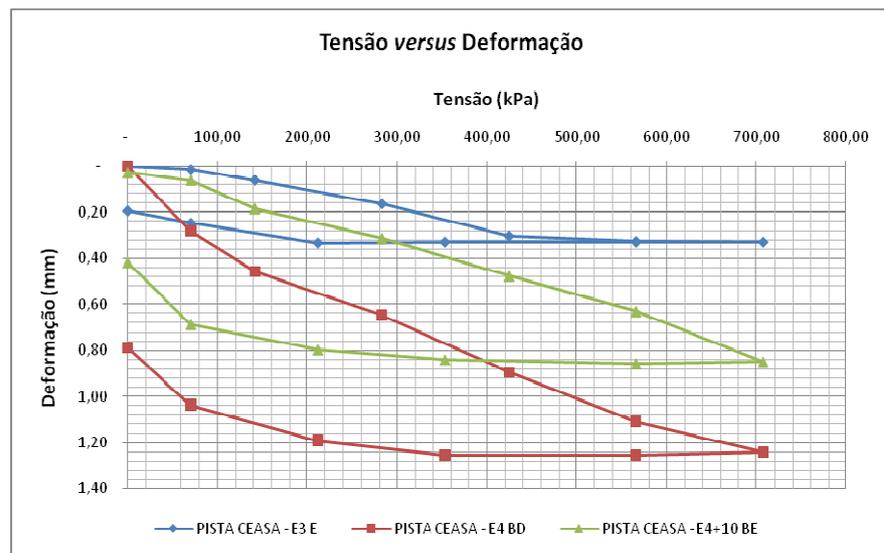


Figura 6.17 - Curvas de ensaio de Prova de Carga – Pista CEASA (Junho/2008)

Na Tabela 6.25 têm-se os valores médios obtidos nos ensaios realizados pela presente pesquisa, em 2008 e em períodos anteriores por outros pesquisadores.

Tabela 6.25 - Deslocamentos médios obtidos nos ensaios de prova de carga

<b>PERÍODO</b>	<b>d<sub>t</sub> (MÉDIO)</b>	<b>d<sub>p</sub> (MÉDIO)</b>
Janeiro/04*	1,25	0,49
Mai/05*	0,75	0,29
Novembro/05*	0,79	0,22
Mai/06*	0,84	0,24
Novembro/2006**	0,43	0,16
<b>Janeiro/2008</b>	<b>0,45</b>	<b>0,11</b>
<b>Junho/2008</b>	<b>0,69</b>	<b>0,13</b>

\*Oliveira (2007)

\*\*Resplandes (2007)

Obs: d<sub>t</sub> = deslocamento total; d<sub>e</sub> = deslocamento parcial

Observa-se que os valores obtidos em Janeiro/2008 são menores ou iguais aos valores obtidos por Oliveira (2007) e Resplandes (2007). Entretanto, ao se analisar os resultados de Junho/2008 percebe-se deslocamentos totais um pouco maiores dos que ocorridos em Janeiro, mas com deslocamentos parciais de mesma ordem. Pode-se inferir que no trecho em tela há manutenção das características de desempenho do pavimento ao longo do tempo. Uma justificativa plausível, ainda em estudo, é a ocorrência de reações pozolânicas ou cimentícias que podem ocorrer com os componentes do agregado reciclado, ocasionando ganhos de resistência. Outra hipótese a ser explorada é que a ação do tráfego tenha causado um acréscimo de compactação nas camadas e conseqüente redução dos deslocamentos. Tem-se, pois, que investigar este trecho doravante para verificar se realmente houve acomodação dos deslocamentos ou se esta hipótese poderá ser descartada, havendo, pois, valores menores de deslocamentos que venham a confirmar os ganhos de resistência.

### 6.5.2.2 PISTA EXPERIMENTAL DA RUA SR-68, SETOR RECANTO DAS MINAS GERAIS

Os resultados dos ensaios de Prova de Carga sobre a Placa, na Rua SR-68, Setor Recanto das Minas Gerais, encontram-se na Tabela 6.26 e 6.27. Na Tabela 6.28 estão apresentados os dados obtidos no ensaio para diferentes períodos e na Tabela 6.29 estão os dados médios calculados, obtidos no ensaio para diferentes períodos. Da mesma forma em que foi realizado o ensaio do trecho do CEASA, para as tensões de 560kPa, que corresponde à tensão utilizada no dimensionamento de pavimentos e para a tensão total aplicada no ensaio, obteve-se o deslocamento total ( $d_t$ ) e o deslocamento parcial ( $d_p$ ). Na Figura 6.20 e 6.21 podem-se observar as curvas de tensão versus deformação, obtidas para cada estaca ensaiada no trecho.

Tabela 6.26 - Resultados de Prova de Carga; Rua SR-68, Recanto das Minas Gerais (Janeiro/2008)

<b>ESTACAS</b>	<b><math>d_{total}</math></b>	<b><math>d_{parcial}</math></b>
E0+10 BE	0,90	0,18
E3+10 E	0,75	0,12
E5+10 BD	1,05	0,25
<b>MÉDIAS</b>	<b>0,90</b>	<b>0,18</b>

Tabela 6.27 - Resultados de Prova de Carga; Rua SR-68, Recanto das Minas Gerais (Junho/2008)

<b>ESTACAS</b>	<b>d<sub>total</sub></b>	<b>d<sub>parcial</sub></b>
E0+10 BE	1,54	0,17
E3+10 E	0,69	0,23
E5+10 BD	1,04	0,34
<b>MÉDIAS</b>	<b>1,09</b>	<b>0,24</b>

Tabela 6.28 - Resultados obtidos nos ensaios de prova de carga.

<b>Período</b>	<b>E1 + 10 (BE)</b>		<b>E3 + 10 (E)</b>		<b>E5 + 10 (BD)</b>	
	<b>d<sub>total</sub></b>	<b>d<sub>parcial</sub></b>	<b>d<sub>total</sub></b>	<b>d<sub>parcial</sub></b>	<b>d<sub>total</sub></b>	<b>d<sub>parcial</sub></b>
Abril/2005*	1,20	0,74	0,60	0,20	1,70	0,90
Janeiro/2006*	1,16	0,70	0,60	0,42	1,20	0,78
Novembro/2006**	0,95	0,22	0,68	0,20	1,17	0,25
<b>Janeiro/2008</b>	<b>0,90</b>	<b>0,18</b>	<b>0,75</b>	<b>0,12</b>	<b>1,05</b>	<b>0,25</b>
<b>Junho/2008</b>	<b>1,54</b>	<b>0,17</b>	<b>0,69</b>	<b>0,23</b>	<b>1,04</b>	<b>0,34</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>1,15</b>	<b>0,40</b>	<b>0,67</b>	<b>0,23</b>	<b>1,23</b>	<b>0,50</b>

\*Ribeiro (2006)

\*\*Resplandes (2007)

Obs: d<sub>t</sub> = deslocamento total; d<sub>p</sub> = deslocamento parcial

Tabela 6.29 – Resultados médios obtidos nos ensaios de Prova de Carga

<b>PERÍODO</b>	<b>d<sub>t</sub> (MÉDIO)</b>	<b>d<sub>p</sub> (MÉDIO)</b>
Abril/2005*	1,17	0,61
Janeiro/2006*	0,99	0,63
Novembro/2006**	0,93	0,22
<b>Janeiro/2008</b>	<b>0,90</b>	<b>0,18</b>
<b>Junho/2008</b>	<b>1,09</b>	<b>0,24</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>1,02</b>	<b>0,38</b>

\*Oliveira (2007)

\*\*Resplandes (2007)

Obs: d<sub>t</sub> = deslocamento total; d<sub>p</sub> = deslocamento parcial

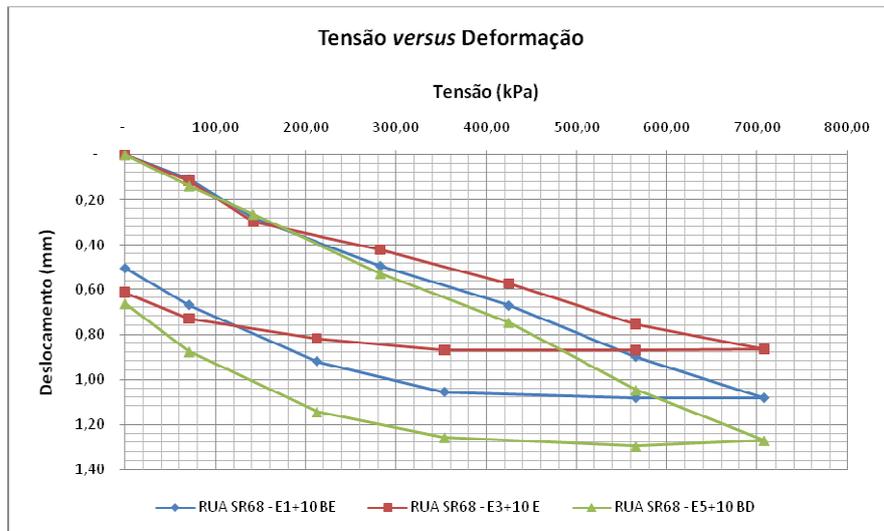


Figura 6.18 – Curvas de ensaio de Prova de Carga – Rua SR-68 (Janeiro/2008)

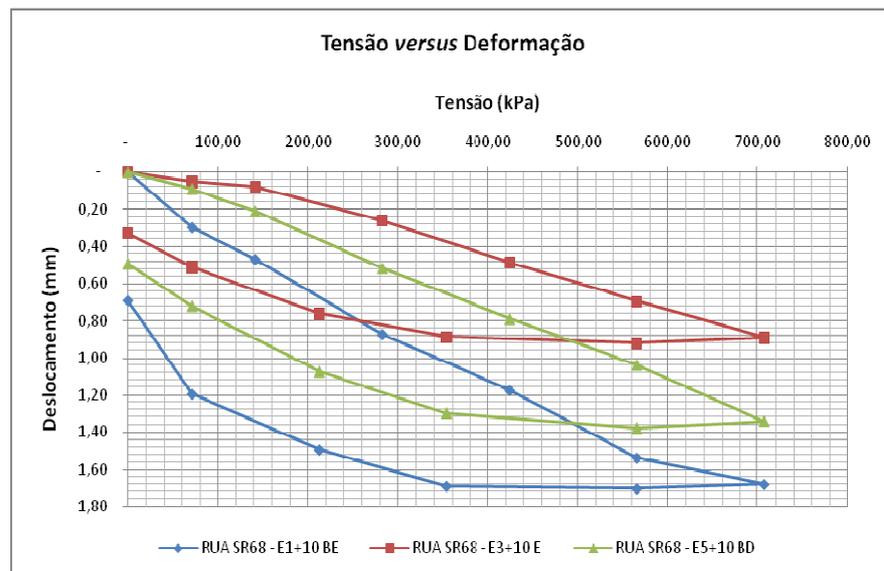


Figura 6.19 - Curvas de ensaio de Prova de Carga – Rua SR-68 (Junho/2008)

Através da observação dos dados constantes da Tabela 6.29, pode-se verificar que os deslocamentos parciais medidos no ensaio através do tempo apresentam nítida tendência a diminuir, enquanto que os recalques totais mantiveram-se constantes.

Em suma, nota-se que com os resultados encontrados nos dois trechos experimentais, pode-se perceber que os valores dos deslocamentos totais da pista de entrada de compradores da CEASA são menores do que os apresentados na pista experimental da Rua SR-68, Setor Recanto das Minas Gerais. Logo, observa-se que a pista da CEASA apresenta melhor

comportamento mecânico (o que corrobora com as conclusões anteriores de Resplandes (2007)). Existe uma suposta explicação pelo maior controle tecnológico ocorrido durante a execução da pista experimental do CEASA por Oliveira (2007), quando da execução de seus trabalhos e também pela diferença na estrutura dos pavimentos que, embora apresentem espessura de RCD iguais ( $e=0,30\text{m}$ ), na pista experimental da CEASA existem duas camadas (base e sub-base) e na pista experimental da Rua SR-68, somente uma camada (base).

Ademais, de posse dos resultados dos ensaios de Prova de Carga, pode-se inferir que, até o momento, os pavimentos ensaiados e estudados apresentaram comportamento estrutural satisfatório.

### **6.5.3 ÍNDICE DE PENETRAÇÃO - PENETRÔMETRO DINÂMICO DE CONE (*DCP*)**

#### **6.5.3.1 PISTA EXPERIMENTAL DA CEASA**

As Tabelas 6.30 a 6.33 apresentam os resultados obtidos no ensaio de *DCP* no trecho da acesso de compradores da CEASA, em ambos os bordos da pista, nos períodos de Janeiro e Junho de 2008, respectivamente. A Figura 6.22 apresenta as curvas do ensaio efetuado em Janeiro de 2008. Pode-se verificar, em função do Índice de Penetração (DN), a existência de três camadas de comportamento distinto (ou até quatro, em alguns casos), sendo que a primeira representa a base executada com agregado reciclado, a segunda, no caso da pista experimental da CEASA corresponde à sub-base e as demais ao subleito que apresenta maiores resistências em sua camada superficial.

Tabela 6.30 – Resultados do ensaio de *DCP* (bordo direito) para o acesso da CEASA (Janeiro/2008)

<b>ESTACAS / BORDOS</b>	<b>CAMADA</b>	<b>PROFUNDIDADE (cm)</b>	<b>ESPESSURA (cm)</b>	<b>DN (mm/Golpe)</b>
DCP - E3 BD	BASE	12	12	3,1
	SUB-BASE	27	15	2,3
	SUB LEITO	79	52	8,7
DCP - E4 BD	BASE	9	9	2,7
	SUB-BASE	22	13	1,9
<b>BORDO DIREITO</b>	<b>BASE</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>2,9</b>
	<b>SUB-BASE</b>	<b>25</b>	<b>14</b>	<b>2,1</b>
	<b>SUBLEITO 1</b>	<b>79</b>	<b>52</b>	<b>8,7</b>

Tabela 6.31 – Resultados do ensaio de *DCP* (bordo esquerdo) para o acesso da CEASA (Janeiro/2008)

<b>ESTACAS / BORDOS</b>	<b>CAMADA</b>	<b>PROFUNDIDADE (cm)</b>	<b>ESPESSURA (cm)</b>	<b>DN (mm/Golpe)</b>
DCP - E2+10 BE	BASE E SUB-BASE	28	28	7,2
	SUB LEITO 1	53	25	10,5
	SUB LEITO 2	76	22	18,6
DCP - E3+10 BE	BASE E SUB-BASE	24	24	2,5
	SUB LEITO 1	49	26	6,6
	SUB LEITO 2	78	29	23,8
<b>BORDO ESQUERDO</b>	<b>BASE</b>	<b>26</b>	<b>26</b>	<b>4,8</b>
	<b>SUB-BASE</b>	<b>26</b>	<b>26</b>	<b>4,8</b>
	<b>SUBLEITO 1</b>	<b>51</b>	<b>25</b>	<b>8,5</b>
	<b>SUBLEITO 2</b>	<b>77</b>	<b>25</b>	<b>21,2</b>

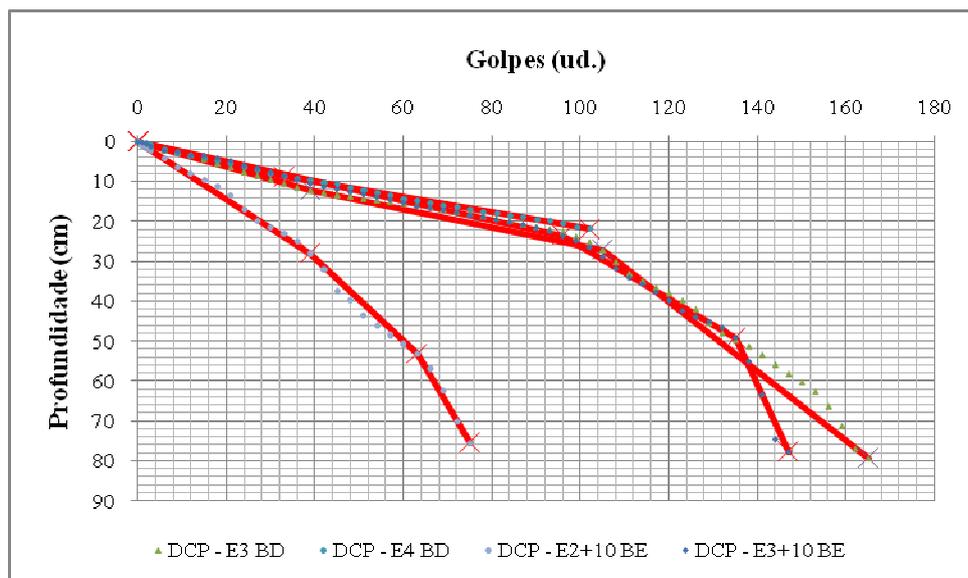


Figura 6.20 – Curvas DCP da pista experimental da CEASA (Janeiro/2008)

Tabela 6.32 – Resultados do ensaio de *DCP* (bordo direito) para o acesso da CEASA (Junho/2008)

<b>ESTACAS / BORDOS</b>	<b>CAMADA</b>	<b>PROFUNDIDADE (cm)</b>	<b>ESPESSURA (cm)</b>	<b>DN (mm/Golpe)</b>
DCP - E3 BD	BASE E SUB-BASE	27	27	2,2
	SUB LEITO 1	47	21	6,8
	SUB LEITO 2	81	34	10,2
DCP - E4 BD	BASE E SUB-BASE	23	23	2,1
	SUB LEITO 1	42	19	4,2
<b>BORDO DIREITO</b>	<b>BASE</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>2,2</b>
	<b>SUB-BASE</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>2,2</b>
	<b>SUBLEITO 1</b>	<b>44</b>	<b>20</b>	<b>5,5</b>
	<b>SUBLEITO 2</b>	<b>81</b>	<b>34</b>	<b>10,2</b>

Tabela 6.33 – Resultados do ensaio de *DCP* (bordo esquerdo) para o acesso da CEASA (Junho/2008)

<b>ESTACAS / BORDOS</b>	<b>CAMADA</b>	<b>PROFUNDIDADE (cm)</b>	<b>ESPESSURA (cm)</b>	<b>DN (mm/Golpe)</b>
DCP - E2+10 BE	BASE	5	5	0,9
	SUB-BASE	26	21	3,1
	SUB LEITO 1	42	16	10,8
DCP - E3+10 BE	BASE E SUB-BASE	23	23	2,2
	SUB LEITO 1	54	31	7,3
	SUB LEITO 2	81	28	22,9
DCP - E4+10 BE	BASE E SUB-BASE	26	26	2,2
	SUB LEITO 1	38	12	3,3
	SUB LEITO 2	55	18	19,6
<b>BORDO ESQUERDO</b>	<b>BASE</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>1,8</b>
	<b>SUB-BASE</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>2,5</b>
	<b>SUBLEITO 1</b>	<b>39</b>	<b>21</b>	<b>7,1</b>
	<b>SUBLEITO 2</b>	<b>59</b>	<b>20</b>	<b>21,2</b>

A Tabela 6.34 apresenta comparação, ao longo do tempo, dos resultados médios de ensaios de *DCP* no trecho em tela, obtidos por Oliveira (2007) e Resplandes (2006).

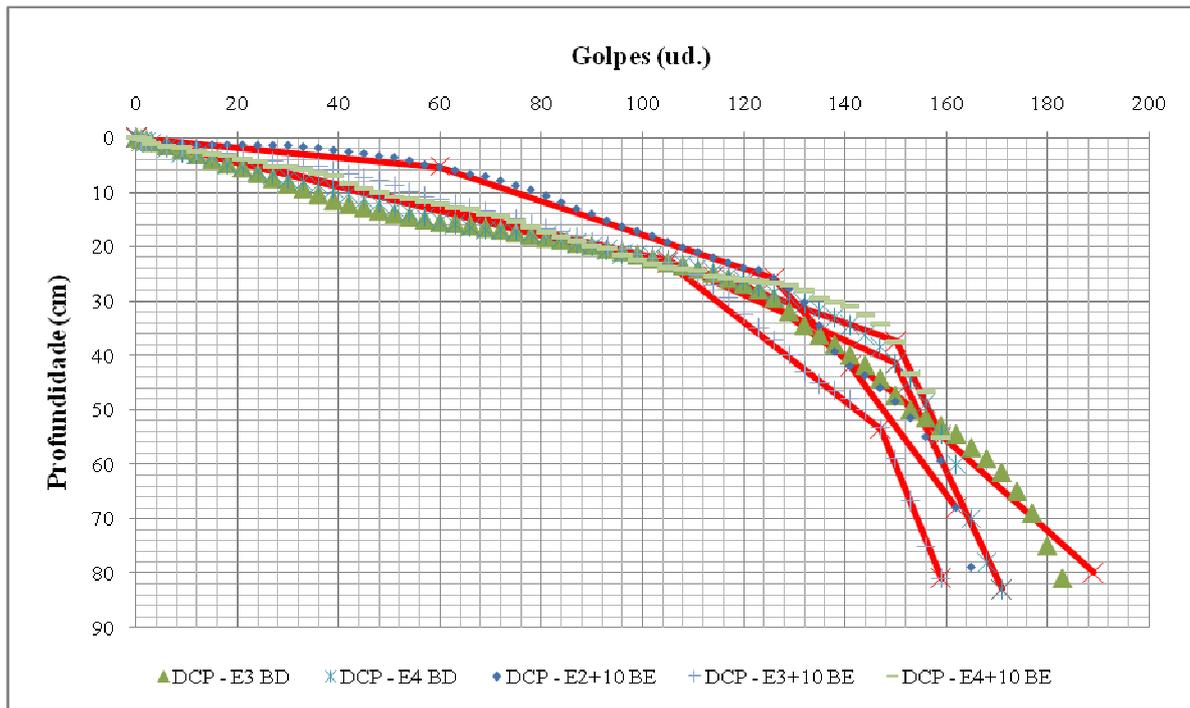


Figura 6.21 – Curvas DCP da pista experimental da CEASA (Junho/2008).

Tabela 6.34– Resultados de DCP obtidos para diferentes períodos.

PERÍODO	DN MÉDIO (mm/Golpe)			
	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO 1	SUBLEITO 2
Dezembro/2003*	3,2	1,8	5,6	-
Maió/2005*	1,8	1,6	4,7	-
Novembro/2005*	2,4	1,8	5,5	-
Maió/2006*	2,5	1,7	6,2	-
Novembro/2006**	2,9	4,7	15,7	-
<b>Janeiro/2008</b>	<b>3,9</b>	<b>3,4</b>	<b>8,6</b>	<b>21,2</b>
<b>Junho/2008</b>	<b>2,0</b>	<b>2,4</b>	<b>6,3</b>	<b>14,8</b>

\*Oliveira (2007)

\*\*Resplandes (2007)

Após a análise dos resultados obtidos em Janeiro/2008 e de Junho/2008 comparando-se com os resultados anteriores constantes da Tabela 6.34 podem-se inferir algumas conclusões:

- Para a camada de subleito, observa-se aumento do Índice de Penetração (DN) ao longo do tempo;
- Para a camada de sub-base executada com agregado reciclado, observaram-se valores do Índice de Penetração (DN) constantes até o mês de Maio/2006. Entretanto, a constância verificou-se incerta após este período, pois houve, também, aumento do referido índice

- Para a camada de base executada com agregado reciclado, pode-se notar relativa constância, quando comparados há tempos anteriores, do Índice de Penetração (DN).

A literatura apresenta várias correlações para calcular o valor do Índice de Suporte Califórnia (*California Bearing Ratio - CBR*) em função do Índice de Penetração (DN). Para esta pesquisa, adotaram-se as correlações realizadas em pavimentos brasileiros. As equações encontram-se constantes do quadro 4.1, apresentadas anteriormente no Capítulo 4, e são utilizadas para o agregado reciclado utilizado nas camadas de sub-base e base e também para o solo do subleito. As Tabelas 6.35 e 6.36 apresentam os valores de *CBR* calculados para a base e sub-base do trecho em estudo, considerando-se a amostra saturada como não saturada.

Tabela 6.35 - Valores de *CBR* obtidos por correlações específicas para agregados reciclados aplicados em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis (Janeiro/2008).

Estaca	Camada	Espessura (cm)	DN (mm/golpe)	CBR (%)	
				Amostra Saturada	Amostra não Saturada
DCP - E3 BD	BASE	12	3,1	57	61
DCP - E3 BD	SUB-BASE	15	2,3	71	75
DCP - E4 BD	BASE	9	2,7	63	68
DCP - E4 BD	SUB-BASE	13	8,7	29	32
DCP - E2+10 BE	BASE E SUB-BASE	28	7,2	33	36
DCP - E3+10 BE	BASE E SUB-BASE	24	2,5	67	71
<b>MÉDIA</b>				<b>53</b>	<b>57</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>				<b>18</b>	<b>19</b>

Tabela 6.36 - Valores de *CBR* obtidos por correlações específicas para agregados reciclados aplicados em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis (Junho/2008).

Estaca	Camada	Espessura (cm)	DN (mm/golpe)	CBR (%)	
				Amostra Saturada	Amostra não Saturada
DCP - E3 BD	BASE E SUB-BASE	27	2,2	71	76
DCP - E4 BD	BASE E SUB-BASE	23	6,8	34	37
DCP - E2+10 BE	BASE	5	0,9	131	137
DCP - E2+10 BE	SUB-BASE	21	3,1	57	61
DCP - E3+10 BE	BASE E SUB-BASE	23	2,2	72	77
DCP - E4+10 BE	BASE E SUB-BASE	26	2,2	71	76
<b>MÉDIA</b>				<b>73</b>	<b>77</b>
<b>DESVIO PADRÃO</b>				<b>32</b>	<b>33</b>

### 6.5.3.2 PISTA EXPERIMENTAL DA RUA SR-68, SETOR RECANTO DAS MINAS GERAIS

As Tabelas 6.37 a 6.40 apresentam os resultados obtidos no ensaio de *DCP* no trecho da Rua SR-68, Setor Recanto das Minas Gerais, nos dois períodos analisados. Apesar de haver somente uma camada de base de RCD de espessura 0,30m, as tabelas contemplam as nomenclaturas Base 1 e Base 2, pois há probabilidade de que o processo de compactação tenha imprimido características diferentes para camada de tal espessura.

Tabela 6.37 – Resultados do ensaio de *DCP* (bordo esquerdo) para a Rua SR-68 (Janeiro/2008).

<b>ESTACAS / BORDOS</b>	<b>CAMADA</b>	<b>PROFUNDIDADE (cm)</b>	<b>ESPESSURA (cm)</b>	<b>DN (mm/Golpe)</b>
DCP E0-BE	BASE 1	11	11	3,1
	SUBLEITO 1	76	65	35,9
	SUBLEITO 2	81	6	18,3
DCP - E1 BE	BASE	20	20	3,9
	SUBLEITO 1	54	34	16,2
	SUBLEITO 2	61	7	11,7
DCP - E2 BE	BASE 1	10	10	2,3
	BASE 2	31	22	6,0
	SUBLEITO	78	47	31,0
DCP - E3 BE	BASE 1	10	10	2,3
	BASE 2	23	14	4,5
	SUBLEITO	83	59	32,8
DCP - E4 BE	BASE 1	15	15	3,0
	BASE 2	31	16	13,5
	SUBLEITO	82	51	33,9
DCP - E5 BE	BASE 1	17	17	2,8
	BASE 2	34	17	14,5
	SUBLEITO	82	48	39,9
DCP - E6 BE	BASE 1	17	17	2,2
	BASE 2	35	18	14,8
	SUBLEITO	82	47	39,5
<b>BORDO ESQUERDO</b>	<b>BASE 1</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>2,8</b>
	<b>BASE 2</b>	<b>31</b>	<b>17</b>	<b>10,7</b>
	<b>SUBLEITO 1</b>	<b>77</b>	<b>50</b>	<b>32,8</b>
	<b>SUBLEITO 2</b>	<b>71</b>	<b>6</b>	<b>15,0</b>

Tabela 6.38 – Resultados do ensaio de *DCP* (bordo direito) para a Rua SR-68 (Janeiro/2008).

<b>ESTACAS / BORDOS</b>	<b>CAMADA</b>	<b>PROFUNDIDADE (cm)</b>	<b>ESPESSURA (cm)</b>	<b>DN (mm/Golpe)</b>
DCP - E0+10 BD	BASE 1	13	13	3,1
	BASE 2	30	17	14,2
	SUBLEITO 1	78	48	39,6
	SUBLEITO 2	83	5	17,0
DCP - E1+10 BD	BASE 1	12	12	4,8
	BASE 2	27	15	8,4
	SUBLEITO 1	83	56	46,5
DCP - E2+10 BD	BASE 1	16	16	3,6
	BASE 2	30	14	11,4
	SUBLEITO 1	82	52	43,0
DCP - E3+10 BD	BASE 1	12	12	4,4
	BASE 2	33	21	23,4
	SUBLEITO 1	82	49	41,1
DCP - E4+10 BD	BASE 1	8	8	5,4
	BASE 2	22	13	14,9
	SUBLEITO 1	78	56	62,6
DCP - E5+10 BD	BASE 1	8	8	5,6
	BASE 2	19	11	11,8
	SUBLEITO 1	81	62	68,4
DCP - E6+10 BD	BASE 1	13	13	3,9
	BASE 2	27	14	11,7
	SUBLEITO 1	81	54	60,2
<b>BORDO DIREITO</b>	<b>BASE 1</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>4,4</b>
	<b>BASE 2</b>	<b>27</b>	<b>15</b>	<b>13,7</b>
	<b>SUBLEITO 1</b>	<b>80</b>	<b>54</b>	<b>51,6</b>
	<b>SUBLEITO 2</b>	<b>83</b>	<b>5</b>	<b>17,0</b>

Tabela 6.39 – Resultados do ensaio de DCP (bordo esquerdo) para a Rua SR-68 (Junho/2008).

<b>ESTACAS / BORDOS</b>	<b>CAMADA</b>	<b>PROFUNDIDADE (cm)</b>	<b>ESPESSURA (cm)</b>	<b>DN (mm/Golpe)</b>
DCP E0-BE	BASE 1	13	13	4,3
	BASE 2	28	15	16,8
	SUBLEITO 1	82	54	35,9
DCP - E1 BE	BASE 1	19	19	4,5
	BASE 2	30	11	18,8
	SUBLEITO 1	82	51	51,4
DCP - E2 BE	BASE 1	19	19	4,5
	BASE 2	39	20	13,5
	SUBLEITO 1	82	43	35,4
DCP - E3 BE	BASE 1	13	13	2,7
	BASE 2	34	21	8,7
	SUBLEITO 1	83	49	32,5
DCP - E4 BE	BASE 1	23	23	7,5
	SUBLEITO 1	77	55	36,3
	SUBLEITO 2	81	4	13,3
DCP - E5 BE	BASE 1	19	19	6,3
	SUBLEITO 1	48	29	24,2
	SUBLEITO 2	82	34	67,0
DCP - E6 BE	BASE 1	23	23	5,5
	SUBLEITO 1	78	55	36,7
	SUBLEITO 2	81	3	10,0
DCP - E7 BE	BASE 1	7	7	1,0
	BASE 2	33	26	4,8
	SUBLEITO 1	80	47	26,1
<b>BORDO ESQUERDO</b>	<b>BASE 1</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	<b>4,5</b>
	<b>BASE 2</b>	<b>33</b>	<b>19</b>	<b>12,5</b>
	<b>SUBLEITO 1</b>	<b>76</b>	<b>48</b>	<b>34,8</b>
	<b>SUBLEITO 2</b>	<b>81</b>	<b>14</b>	<b>30,1</b>

Tabela 6.40 – Resultados do ensaio de *DCP* (bordo direito) para a Rua SR-68 (Junho/2008)

<b>ESTACAS / BORDOS</b>	<b>CAMADA</b>	<b>PROFUNDIDADE (cm)</b>	<b>ESPESSURA (cm)</b>	<b>DN (mm/Golpe)</b>
DCP - E0+10 BD	BASE 1	11	11	4,4
	BASE 2	33	22	12,2
	SUBLEITO 1	83	50	33,3
DCP - E1+10 BD	BASE 1	26	26	6,2
	BASE 2	36	10	16,2
	SUBLEITO 1	83	47	52,2
DCP - E2+10 BD	BASE 1	24	24	5,6
	BASE 2	36	12	20,3
	SUBLEITO 1	82	46	50,9
DCP - E3+10 BD	BASE 1	16	16	6,1
	SUBLEITO 1	49	33	36,7
	SUBLEITO 2	81	32	26,3
DCP - E4+10 BD	BASE 1	26	26	8,7
	SUBLEITO 1	69	43	72,0
	SUBLEITO 2	76	7	23,7
DCP - E5+10 BD	BASE 1	19	19	8,0
	SUBLEITO 1	53	33	37,0
	SUBLEITO 2	80	28	45,8
DCP - E6+10 BD	BASE 1	19	19	5,8
	BASE 2	36	17	18,6
	SUBLEITO 1	81	45	37,3
<b>BORDO DIREITO</b>	<b>BASE 1</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>6,4</b>
	<b>BASE 2</b>	<b>35</b>	<b>15</b>	<b>16,8</b>
	<b>SUBLEITO 1</b>	<b>71</b>	<b>42</b>	<b>45,6</b>
	<b>SUBLEITO 2</b>	<b>79</b>	<b>22</b>	<b>31,9</b>

A Tabela 6.41 apresenta comparação, ao longo do tempo, dos resultados de ensaios de *DCP* no trecho em tela.

Tabela 6.41 – Resultados de *DCP* obtidos em diferentes períodos.

<b>PERÍODO</b>	<b>DN MÉDIO (mm/Golpe)</b>			
	<b>BASE 1</b>	<b>BASE 2</b>	<b>SUBLEITO 1</b>	<b>SUBLEITO 2</b>
Abril/05*	3,1	-	11,1	40,1
Janeiro/06*	3,8	-	15,5	43,0
Novembro/06**	5,3	-	19,9	52,8
<b>Janeiro/08</b>	<b>3,6</b>	<b>12,2</b>	<b>42,2</b>	<b>16,0</b>
<b>Junho/08</b>	<b>5,5</b>	<b>14,7</b>	<b>40,2</b>	<b>31,0</b>

\*Ribeiro (2006)

\*\*Resplandes (2007)

Outra forma de avaliar as condições estruturais e mecânicas do pavimento é a utilização de correlações constantes do Quadro 4.1, apresentado no Capítulo 4, entre DN e CBR para agregados reciclados. A Tabela 6.42 e 6.43 apresentam os valores de CBR calculados para as bases encontradas pelo método DCP, do trecho em estudo, considerando-se a amostra saturada como não saturada, especificamente na camada de base do pavimento.

Tabela 6.42 – Valores de CBR obtidos por correlações específicas para agregados reciclados aplicados em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis (Janeiro/2008).

Estaca	Camada	Espessura (cm)	DN (mm/golpe)	CBR (%)	
				Amostra Saturada	Amostra não Saturada
DCP E0-BE	BASE 1	11	3,1	57	61
DCP - E1 BE	BASE 1	20	3,9	49	53
DCP - E2 BE	BASE 1	10	2,3	71	75
DCP - E2 BE	BASE 2	22	6,0	37	40
DCP - E3 BE	BASE 1	10	2,3	69	74
DCP - E3 BE	BASE 2	14	4,5	45	48
DCP - E4 BE	BASE 1	15	3,0	58	63
DCP - E4 BE	BASE 2	16	13,5	22	24
DCP - E5 BE	BASE 1	17	2,8	62	66
DCP - E5 BE	BASE 2	17	14,5	21	23
DCP - E6 BE	BASE 1	17	2,2	72	76
DCP - E6 BE	BASE 2	18	14,8	20	23
DCP - E0+10 BD	BASE 1	13	3,1	57	62
DCP - E0+10 BD	BASE 2	17	14,2	21	23
DCP - E1+10 BD	BASE 1	12	4,8	43	47
DCP - E1+10 BD	BASE 2	15	8,4	30	33
DCP - E2+10 BD	BASE 1	16	3,6	52	56
DCP - E2+10 BD	BASE 2	14	11,4	24	27
DCP - E3+10 BD	BASE 1	12	4,4	46	49
DCP - E3+10 BD	BASE 2	21	23,4	15	17
DCP - E4+10 BD	BASE 1	8	5,4	40	43
DCP - E4+10 BD	BASE 2	13	14,9	20	23
DCP - E5+10 BD	BASE 1	8	5,6	39	42
DCP - E5+10 BD	BASE 2	11	11,8	24	26
DCP - E6+10 BD	BASE 1	13	3,9	50	53
DCP - E6+10 BD	BASE 2	14	11,7	24	27
<b>MÉDIA</b>	<b>BASE 1</b>			<b>55</b>	<b>59</b>
	<b>BASE 2</b>			<b>25</b>	<b>28</b>
<b>DESVIO</b>	<b>BASE 1</b>			<b>11</b>	<b>11</b>
	<b>BASE 2</b>			<b>8</b>	<b>9</b>

Tabela 6.43– Valores de *CBR* obtidos por correlações específicas para agregados reciclados aplicados em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis (Junho/2008)

Estaca	Camada	Espessura (cm)	DN (mm/golpe)	CBR (%)	
				Amostra Saturada	Amostra não Saturada
DCP E0-BE	BASE 1	13	4,3	47	50
DCP E0-BE	BASE 2	15	16,8	19	21
DCP - E1 BE	BASE 1	19	4,5	45	48
DCP - E1 BE	BASE 2	11	18,8	17	20
DCP - E2 BE	BASE 1	19	4,5	45	49
DCP - E2 BE	BASE 2	20	13,5	22	24
DCP - E3 BE	BASE 1	13	2,7	63	67
DCP - E3 BE	BASE 2	21	8,7	29	32
DCP - E4 BE	BASE 1	23	7,5	32	35
DCP - E5 BE	BASE 1	19	6,3	36	39
DCP - E6 BE	BASE 1	23	5,5	39	43
DCP - E7 BE	BASE 1	7	1,0	122	128
DCP - E7 BE	BASE 2	26	4,8	43	47
DCP - E0+10 BD	BASE 1	11	4,4	46	49
DCP - E0+10 BD	BASE 2	22	12,2	23	26
DCP - E1+10 BD	BASE 1	26	6,2	36	40
DCP - E1+10 BD	BASE 2	10	16,2	19	22
DCP - E2+10 BD	BASE 1	24	5,6	39	42
DCP - E2+10 BD	BASE 2	12	20,3	17	19
DCP - E3+10 BD	BASE 1	16	6,1	37	40
DCP - E4+10 BD	BASE 1	26	8,7	29	32
DCP - E5+10 BD	BASE 1	19	8,0	31	34
DCP - E6+10 BD	BASE 1	19	5,8	38	41
DCP - E6+10 BD	BASE 2	17	18,6	18	20
<b>MÉDIA</b>	<b>BASE 1</b>			<b>46</b>	<b>49</b>
	<b>BASE 2</b>			<b>23</b>	<b>25</b>
<b>DESVIO</b>	<b>BASE 1</b>			<b>23</b>	<b>23</b>
	<b>BASE 2</b>			<b>9</b>	<b>9</b>

## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSÕES**

#### **7.1 INTRODUÇÃO**

Neste Capítulo são apresentadas as conclusões obtidas nesta pesquisa com base nas análises dos resultados dos ensaios laboratoriais e de campo realizados em dosagens preparadas e nas pistas experimentais. A partir dos resultados dos ensaios laboratoriais, com o fito de avaliar a aplicabilidade dos agregados reciclados de RCD como material de pavimentação e a avaliação de desempenho das pistas experimentais, são realizadas algumas discussões, que, em última análise, versam sobre a utilização de agregados reciclados de construção civil em bases e sub-base de pavimentos flexíveis, com a ótica – ambiental – de promover o aproveitamento ou o uso de tais matérias.

#### **7.2 ANÁLISES DE LABORATÓRIO**

Muito embora experiências tenham mostrado que o uso de agregados reciclados sem classificação granulométrica tenham apresentado bons resultados, a classificação ou dosagem dos agregados permite maior controle sobre o comportamento mecânico dos materiais a serem inseridos em campo. Percebe-se, outrossim, que a quantificação das fases cimentícias e cerâmicas influenciam sobremaneira sobre as propriedades de resistência. Logo, é interessante que as operações de beneficiamento dos agregados promovam gestões para melhorar as condições de seleção e segregação dos resíduos de construção e demolição.

Pode-se perceber, também, que aspectos ligados à porosidade e à degradação influenciam o comportamento das dosagens. A análise desta degradação do agregado é tema pertinente, pois apesar da NBR 15115 (ABNT, 2004e) prescrever alguns aspectos referentes à granulometria, durante a aplicação e compactação ocorrem alterações. Assim, um material que não atendesse inicialmente o projeto, poderia após a sua quebra tornar-se de acordo com o especificado.

Com a realização dos ensaios de compactação as dosagens foram submetidas à análise de degradação através de índice que mensura o desgaste dos agregados por ação da compactação. As dosagens de RCD de concreto, pela própria natureza dos materiais constituintes, obtiveram desgastes menores do que as dosagens de RCD mistas.

As dosagens de solo-agregados de concreto ou cerâmico sugeridas e ensaiadas se mostraram em conformidade com as solicitações da NBR 1515 (ABNT, 2004e) nas questões tangentes à qualificação granulométrica dos materiais. Observaram-se alterações no Coeficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) e na quantidade de material passante na peneira 40 quando se compara os resultados granulométricos de antes e após o ensaio de compactação utilizando-se energia de compactação modificada.

Os resultados das dosagens que utilizaram RCD de concreto, quando comparados com a dosagem de agregados naturais, utilizada pela Prefeitura de Goiânia para a execução de pequenos reparos na malha urbana da cidade apresentou resultados satisfatórios. As dosagens de RCD de concreto apresentaram resistência, medida pelo ensaio de *CBR*, de 82% com expansão média nula e de 96% com expansão em 0,48%. Estes resultados qualificam as dosagens a serem utilizadas, conforme as especificações da NBR 15115 (ABNT, 2004e).

A dosagem de RCD misto também apresentou resultados satisfatórios, contudo, possui desempenho estrutural inferior às dosagens de concreto. Por possuir boa resistência (*CBR*) de 70% mas expansão maior que as dosagens de agregados de concreto, a dosagem de RCD mista tem sua utilização limitada à execução de camadas de reforço de subleito, de sub-base de pavimentos flexíveis, podendo, outrossim, ser utilizada como camada de base de vias de baixo volume de tráfego.

Para este trabalho, considerando-se as dosagens realizadas e ensaiadas, não foi possível verificar ganhos ou aumentos da resistência das dosagens por processos de autocimentação, verificados pelo acompanhamento e medição do *CBR* e pH das amostras. Alguns autores já verificaram em seus estudos a ocorrência desse ganho de resistência com o tempo.

### 7.3 PISTAS EXPERIMENTAIS

Através da interpretação e da análise dos resultados dos ensaios executados nas pistas experimentais da CEASA e da Rua SR-68, pode-se concluir que:

- Os trechos analisados ainda apresentam bom comportamento estrutural, o que comprova tecnicamente a viabilidade da construção de vias urbanas, preferencialmente de baixo volume de tráfego, com o emprego de agregados reciclados;
- A pista experimental da CEASA começa a demonstrar, neste momento, processo de fadiga estrutural, comparando-se os dados de deflexão característica e deflexão admitida para o trecho em tela, muito embora não se verifique a existência de defeitos superficiais. Necessário se faz o estudo mais aprofundado dessa característica ao longo do tempo;
- Nitidamente há variação da média de todos os índices verificados nos ensaios em função da estação ou época do ano. Pode-se observar que as pistas experimentais apresentam melhores índices estruturais na época mais seca do ano em que foram realizados os ensaios (junho de 2008);
- Fica patente que a pista experimental da CEASA, apesar de apresentar variabilidade em seus resultados, possuiu controle tecnológico de execução mais apurado que a pista experimental da Rua SR-68. Entretanto, pode-se perceber, através dos dados dos ensaios de *DCP* e de observações locais, que houve falha no controle da espessura das camadas finais executadas nos dois trechos experimentais. Isso demonstra a boa eficiência do ensaio de *DCP* para essa análise.

Com os dados obtidos neste trabalho, pode-se compreender que agregados reciclados oriundos de resíduos de construção e demolição (RCD), embora possuam grande variabilidade de características e comportamento, possuem viabilidade técnica e ambiental para serem utilizados em estruturas de pavimentos flexíveis.

## 7.4 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Realização continuada de novos ensaios para comparação. Desta forma, poderá haver acompanhamento das condições estruturais através da conseqüente aferição, ou não, dos resultados apresentados por este trabalho e outros anteriores.
- Avaliar, de forma mais sistemática, a alteração das propriedades do resíduo ao longo de períodos de cura, por exemplo, através da investigação da existência de reações pozolânicas ou cimentícias nas dosagens de RCD, propiciando maior quantidade de informações para melhorar o entendimento sobre essa interessante propriedade deste material;
- Investigar as alterações da granulometria do material após a compactação, tarefa de execução tanto em laboratório quanto em campo;
- Estudar o comportamento de outras dosagens de RCD produzidas de forma aleatória quanto por dosagens previamente efetuadas. Para caracterizar as condições climáticas locais, captar água de precipitação e providenciar a imersão dos corpos de prova nesta água;
- Avaliar a influência da relação entre a umidade do meio ou a precipitação de chuvas com as condições de resistência medidas nas pistas experimentais;
- Ensaiar novas dosagens para permitir aferir os resultados de resistência através do módulo de resiliência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFFONSO, F.J.A. **Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos**. 2005. 161p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ/COPPE). Rio de Janeiro, 2005.

AMARAL, S.C. **Estudo de misturas laterita-asfalto da região metropolitana de Belém-PA para revestimentos de pavimento**. 2004. 189p. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004a. 63p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004d. 21p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação. Rio de Janeiro, 2004e. 10p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.114**: Resíduos Sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004f. 7p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004g. 12p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004h. 12p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.112**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas para transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004i. 7p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9.895**: Solo – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 12.980**: Coleta, varrição e acondicionamento de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1993.

\_\_\_\_\_. **NBR 6.457**. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 7.181**. Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984a.

\_\_\_\_\_. **NBR 6.459**. Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984b.

\_\_\_\_\_. **NBR 7.180**. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984c.

\_\_\_\_\_. **NBR 6.508**. Solo – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm- Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984d.

\_\_\_\_\_. **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, 1984e.

\_\_\_\_\_. **NBR 7.182**. Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986a.

\_\_\_\_\_. **NBR 11.804**. Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1991a

\_\_\_\_\_. **NBR 11.806**. Materiais para sub-base ou base de brita graduada. Rio de Janeiro, 1991b.

American Society for Testing and Materials. **ASTM D 6951-03**. Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications. West Conshohocken, Pennsylvania, 2003.

BAUER, L. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro, LTC, 1995.

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

COLLINS, R. **Recycled aggregates in readymix**. Concrete Engineering International, p. 49-54, Mar., 1998

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Brasília. 2002. **Resolução CONAMA 307, de 05 de julho de 2002**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em: 26 fev. 2007.

\_\_\_\_\_. Brasília. 2004. **Resolução CONAMA 348, de 16 de agosto de 2004**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res34804.html>>. Acesso em: 26 fev. 2007.

CREA-GO. Sem destino. **Revista do CREA-GO**. Goiânia, Ano II, p.29-30, Abr. 2007.

DE PAUW, C.; LAURITZEN, E.K. **Disaster planning, structural assessment, demolition and recycling (RILEM REPORT 9)**. Londres, E&FN Spon, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER/PRO 011. **Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis**. Procedimento, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1979. 16p.

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, 1994a. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER/ME 131. **Solos - Determinação do módulo de resiliência.** Método de ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994b. 8p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER/ME 24. **Solos – Determinação do índice de suporte califórnia utilizando amostras não trabalhadas.** Método de ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994c. 14p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER/PRO 269. **Projeto de restauração de pavimentos flexíveis.** Procedimento, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994d. 17p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER/ES 330. **Pavimentação – base estabilizada granulometricamente.** Especificação de Serviço, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997. 7p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER/ME 35. **Agregados – Determinação da Abrasão “Los Angeles”.** Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER/ME 398. **Agregados – Índice de degradação após compactação proctor ( $ID_p$ ).** Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999. 6p.

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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação.** 3ª Ed., Rio de Janeiro, 2006.

ENVIROCENTRE, Ltd. **A Report On The Demolition Protocol.** London, 2006.

FORTES, R.M. **Ensaio de Resiliência.** São Paulo, 2004, 10p. Notas.

GUSMÃO, A.D., **Projeto de gerenciamento de resíduos da construção civil (PGRCC).** In: Apresentações de Tópicos Temáticos - SINDUSCON/PE, 2006, Recife.

INSTITUT DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÓ DE CATALUNYA - ITEC. **Guia d'aplicació del Decret 201/1994, regulador dels enderrocs i altres residus de la construcció.** ITEC & Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient, Junta de Resius. Março, 1995.

INTERNATIONALE VEREINIGUNG BAUSTOFF-RECYCLING – IVBR. **Bauschutt-recycling in Europa**. Bonn, 1995.

LABORTÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. **Norma E-203. Solos. Determinação do pH.** Disponível em: <[http://www.student.estg.ipleiria.pt/~ec11280/e\\_203\\_1967.pdf](http://www.student.estg.ipleiria.pt/~ec11280/e_203_1967.pdf)>. Acesso em: 6 set. 2007.

LEITE, F.C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2007. 185p. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

LEITE, M.B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

LIMA, J.A.R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 240p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M., **Concreto: propriedades e materiais**. São Paulo, Ed. Pini, 1994, 573p.

MEDINA, J.M., MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro, 2005. 574p.

MENDES, T.A., REZENDE, L.R., OLIVEIRA, J.C., GUIMARÃES, R.C., CAMAPUM, J. VEIGA, R., **Parâmetros de uma pista experimental executada com entulho reciclado**. 35ª Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, 2004.

MMA. **Áreas de Manejo de Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos**. Seminário de Licenciamento Ambiental de Destinação Final de Resíduos Sólidos. Brasília, 2006.

MOTTA, R.S. **Estudo Laboratorial de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil para Aplicação em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego**. 2005. 134p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2005.

OLIVEIRA, J.C. **Indicadores de potencialidades e desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis**. 2007. 163p. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 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, 2005.

PAIVA, C. E. L.; CAUSIM, P. B. **Estudo de avaliações das condições estruturais de um pavimento a partir de bacias de deformação**. 32ª Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, Distrito Federal, 2000.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas**. São Carlos, 1986. 140p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Arquitetura e Planejamento da Universidade de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1986.

PINTO, T. P. **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção**. Projeto Entulho Bom. Salvador – Editora EDUFBA, 2001. 309 p.

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.

PREFEITURA DE GOIÂNIA. Goiânia, 2005. **Lei Municipal 8330, de 20 de julho de 2005**. Disponível em: <<http://www.goiania.go.gov.br/Download/legislacao/diariooficial/do20050801.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2007.

\_\_\_\_\_. Goiânia, 2007. **Projeto de Reforma da Administração**. 2007.

\_\_\_\_\_. Goiânia, 2007. [**Sobre resíduos sólidos**]. Companhia de Urbanização de Goiânia. Goiânia, Janeiro, 2007a.

\_\_\_\_\_. Goiânia, 2007. [**Sobre a gestão de resíduos sólidos na cidade**]. Secretaria Municipal do Meio Ambiente. Goiânia, Janeiro, 2007b.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. São Paulo, 2002. **Decreto 42.217, de 24 de julho de 2002**. Disponível em: <[http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios\\_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=25072002D422170000](http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=25072002D422170000)>. Acesso em: 28 ago. 2007.

\_\_\_\_\_. São Paulo, 2005. **Decreto 46.594, de 03 de novembro de 2005**. Disponível em: <[http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios\\_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=04112005D465940000](http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=04112005D465940000)>. Acesso em: 28 ago. 2007.

\_\_\_\_\_. São Paulo, 2006. **Decreto 48.075, de 28 de dezembro de 2006**. Disponível em: <[http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios\\_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=29122006D480750000](http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=29122006D480750000)>. Acesso em: 28 ago. 2007.

RESPLANDES, H.M.S., **Estudo ambiental e técnico da aplicação do agregado reciclado na estrutura de pavimentos flexíveis**. 2007. 210p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil. Programa de Pós Graduação em Engenharia do Meio Ambiente (PPGEMA). Goiânia, 2007.

REZENDE, L.R. **Estudo do comportamento de materiais alternativos utilizados em estruturas de pavimentos flexíveis**. 2003. 372p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2003.

RIBEIRO, F; SERRA, N. G. S. **Utilização de entulho na pavimentação**. Projeto final de curso. Universidade Estadual de Goiás, Anápolis – GO, 2001. 105p.

RIBEIRO, H.C. **Aplicação de resíduos sólidos da construção civil em revestimento asfáltico tipo CBUQ** (Monografia). Universidade Estadual de Goiás, Anápolis – GO, 2004. 106 p.

RIBEIRO, F. **Estudo da aplicação do agregado reciclado na base de um pavimento flexível**. 2006. 171p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2006.

SANTOS, P.S., **Tecnologia de Argilas: Aplicações**. São Paulo: Edgar Blücher, 1975, v.2.

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

SCHULZ, R.R.; HENDRICKS, C.F. **Recycling of demolished Concrete and Masonry – Report 6**. London , E&FN Spon, 1992.

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, 210p.

SCHNEIDER, D.M. **Deposições Irregulares de Resíduos da Construção Civil na Cidade de São Paulo**. 2003. 131p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Saúde Pública. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

SPOSTO, R.M. Os resíduos da construção: solução ou problema? **Revista Espaço Acadêmico**, São Paulo, Ano VI, Edição 61, Junho/2006. Disponível em: <http://www.espacoacademico.com.br/061/61sposto.htm>. Acesso em: 15 dez. 2006.

VÁSQUEZ, E.; BARRA, M. **Recycling of aggregates in the construction industry**. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. Proceedings... [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 8p.

VORONOVA, V. **Construction And Demolition Waste Management In United Kingdom (UK)**. 2006. 11f. Department of Civil Engineering, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia, 2006.