

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**INDICADORES DE POTENCIALIDADES E DESEMPENHO DE AGREGADOS
RECICLADOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

JOÃO CARLOS DE OLIVEIRA

**ORIENTADOR: PROF. JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD
CO-ORIENTADORA: PROF. LILIAN RIBEIRO DE REZENDE, D.Sc.**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.TD-049/07**

BRASÍLIA/DF: JULHO/2007

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**INDICADORES DE POTENCIALIDADES E DESEMPENHO DE AGREGADOS
RECICLADOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

JOÃO CARLOS DE OLIVEIRA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS.

APROVADA POR:

PROF. JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)

PROF. LILIAN RIBEIRO DE REZENDE, D.Sc. (UFG)
(CO-ORIENTADORA)

PROF. WASHINGTON PERES NÚÑEZ, D.Sc. (UFRGS)
(EXAMINADOR EXTERNO)

PROF. JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES, D.Sc. (UFCG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

PROF. MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

PROF. LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

Brasília – DF, 31 de Julho de 2007.

FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, JOÃO CARLOS DE

Indicadores de Potencialidades e Desempenho de Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Pavimentos Flexíveis, 2007.

xxi, 167 p., 210 x 297 mm (ENC/ FT/ UnB, Doutor, Geotecnia, 2007)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Agregados Reciclados

2. Resíduos Sólidos

3. Pavimentação

4. Reciclagem

I. ENC/ FT/ UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, J. C. de (2007). Indicadores de Potencialidades e Desempenho de Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-049/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 167 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: João Carlos de Oliveira.

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Indicadores de Potencialidades e Desempenho de Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Pavimentos Flexíveis.

GRAU / ANO: Doutor / 2007

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias, somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

João Carlos de Oliveira

Rua Jari Q-75 L-18 Parque Amazônia

74.840-600 – Goiânia - GO – Brasil

e-mail: jco@cefetgo.br

DEDICATÓRIA

A minha esposa Luz Dalma, por tudo;
Aos meus filhos Lucas e Davi;
Aos meus pais Geraldo Rosa de Oliveira (*in memorian*) e
Osminda Brito de Oliveira (*in memorian*);
A toda minha grande família, em especial ao meu irmão e padrinho Cleone;

Ao Prof. José Henrique Feitosa Pereira, da UnB (*in memorian*);
À colega de curso Suzana Michelinne, da UnB (*in memorian*).

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há
tempo para todo o propósito debaixo do céu.”

Eclesiastes 3,1-8

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, pela realização e conclusão do presente trabalho. Obrigado Senhor!

Ao meu orientador, Prof. José Camapum de Carvalho e à minha co-orientadora, Prof. Lílian Ribeiro de Rezende, pela amizade, apoio e conhecimentos transmitidos.

Aos demais professores do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UnB, André Pacheco de Assis, Ennio Marques Palmeira, Newton Moreira de Souza, José Henrique Feitosa Pereira (*in memorian*), Márcio Muniz de Farias, Pedro Murrieta Santos Neto, Luís Fernando Martins Ribeiro, Manoel Porfírio Cordão Neto, Noris Costa Diniz e Renato Pinto da Cunha, pelos quais guardo um profundo respeito e admiração.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro, através da bolsa de estudos.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás - CEFET-GO, pela licença concedida das minhas atividades profissionais, imprescindível à realização do curso de doutorado.

A FURNAS Centrais Elétricas S.A. – DACT – Departamento de Apoio e Controle Técnico, Goiânia-GO, em especial ao engenheiro Renato Cabral Guimarães e aos técnicos de laboratório Lucimar, Edmilson, Saulo, Nivaldo, Valdivino, Luís César, Luís Antônio, Amaurí, Valdemar, Ademar e outros, pelo apoio na realização dos ensaios laboratoriais e de campo.

À Prefeitura Municipal de Goiânia pelo apoio na construção da pista experimental e realização dos ensaios de campo; pela disponibilização do caminhão utilizado nos ensaios de prova de carga e viga Benkelman.

Ao Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal, pelo empréstimo do penetrômetro dinâmico de cone.

À CTE Engenharia Ltda., de Goiânia, pelo empréstimo da viga Benkelman.

Ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - LTP-EPUSP, em especial à professora Liedi Légi Bariani Bernucci e ao Tecnólogo Edson de Moura, pelo apoio na realização dos ensaios triaxiais cíclicos para determinação dos módulos de resiliência.

Ao meu grande amigo de Brasília (ou de Belém do Pará) Rideci Costa Farias, companheiro de todas as horas. Mais que amigo, irmão.

A minha esposa, minha grande parceira, Luz Dalma, por todo apoio, por acreditar na minha capacidade de realizar este trabalho. Aos meus filhos, a toda minha grande família que sempre me incentivou e acreditou no meu potencial.

A todos os amigos da pós-graduação em geotecnia, bloco SG-12, com os quais convivi nesse longo período de estudo. Guardarei a saudade de todos para sempre.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização da presente tese.

Muito obrigado!

INDICADORES DE POTENCIALIDADES E DESEMPENHO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

RESUMO

Os resíduos sólidos gerados pela construção civil durante os processos de construção e demolição, geralmente são considerados inservíveis e causam inúmeros problemas sócio-ambientais quando não dispostos de forma adequada: ocupação irregular de áreas e vias urbanas, entupimento de sistemas de drenagem, proliferação de vetores de doenças, etc. Algumas experiências realizadas em várias partes do país e do mundo têm demonstrado a viabilidade do aproveitamento desses resíduos, em particular os constituídos de concretos, argamassas e elementos cerâmicos, para a produção de agregados reciclados e aplicação em camadas de pavimentos. A presente pesquisa foi realizada com o intuito de estabelecer indicadores de potencialidades e desempenho para a utilização desses agregados em pavimentos flexíveis. O programa experimental consistiu na realização de ensaios de laboratório e de campo, em uma pista experimental com base e sub-base de agregados reciclados. Para a realização dos ensaios de laboratório foram selecionadas duas amostras de resíduos sólidos no município de Goiânia – Goiás, uma constituída de resíduos de concreto e a outra de resíduos cerâmicos. Essas amostras foram britadas separadamente e agrupadas em três frações granulométricas. Os ensaios de laboratório foram realizados com cada tipo de agregado reciclado, com a mistura de ambos e com a adição de solo argiloso. A partir das análises de laboratório foram estabelecidos alguns indicadores como a constituição dos grãos dos agregados reciclados, identificada por análise visual e pelo pH, que também indica a possibilidade de ganho de resistência com o tempo; a textura final das dosagens; a porosidade interna dos grãos dos agregados reciclados e a porosidade interagregados, que participa efetivamente do comportamento das dosagens; a resistência dos grãos, determinada pelos índices de abrasão Los Angeles e de degradação após a compactação Proctor - ID_p e os parâmetros de índice de suporte Califórnia e módulo de resiliência, que apresentam valores semelhantes aos de materiais naturais, tradicionalmente utilizados. A pista experimental, com 56 metros de comprimento, foi construída no final de 2003, sendo as camadas de base e sub-base compostas por dosagens de agregados reciclados mistos e solo argiloso local. Os agregados reciclados utilizados na construção da pista experimental foram produzidos na pedreira da prefeitura municipal de Goiânia, a partir da britagem de resíduos sólidos fornecidos por construtoras locais. Durante o monitoramento da pista experimental, na fase de construção e ao longo da ação de aproximadamente três anos de tráfego, os resultados dos ensaios de campo atestaram as boas condições estruturais do pavimento e a viabilidade técnica da aplicação de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis. As deflexões e os deslocamentos medidos pela viga Benkelman e provas de carga sobre placa, o índice de penetração dinâmica e a resistência não drenada obtidos pelos penetrômetros dinâmico de cone - DCP e Panda, respectivamente e os módulos do pressiômetro Pencil e geogauge, se apresentaram como bons indicadores de desempenho do pavimento.

INDICATORS OF POTENTIALITIES AND PERFORMANCE OF RECYCLED AGGREGATES OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTES IN FLEXIBLE PAVEMENTS

ABSTRACT

The solid residues produced during construction and demolition are generally considered useless and cause several social and environmental impacts when not disposed appropriately. Solid residues are often deposited irregularly, result in obstruction of drainage systems, and cause the proliferation of vectors of diseases. Some experimental programs undertaken in several parts of the country and worldwide have demonstrated the viability of the use of construction and demolition residues, particularly the residues constituted of concretes, mortars and ceramic elements. These residues have been used in the production of recycled aggregates and application in pavement construction. This thesis deals with the establishment of indicators of potentialities and performance for the use of these aggregates in flexible pavements. The experimental program consisted of laboratory and field tests, all of which were applied to an experimental track. The base and sub-base of the experimental track was constructed employing recycled aggregates. Two samples of typical solid residues were collected in the municipal district of Goiânia – Goiás. The first sample was comprised of concrete residues. The second sample was comprised of ceramic residues. The samples were crushed separately and grouped in three distinct grain size distribution fractions. The laboratory tests were performed with each type of recycled aggregate, with the mixture of both, and with the addition of clayey soil. Based on the laboratory analyses, some parameters were determined. The constitution of the grains of the recycled aggregates was determined by visual analysis and pH analysis, indicating the possible resistance increase with the time. The final texture of the mixtures and the internal porosity of the grains of the recycled aggregates were also determined. The porosity between of the aggregates was measured. This porosity determines the behavior of the mixtures. The resistance of the grains was determined by abrasion Los Angeles indexes and by examination of the degradation after Proctor compaction. Finally, California bearing ratio and resilient modules were measured. An experimental track 56 meters in length was built in the end of 2003, using mixed of recycled aggregates and local clayey soil at the base and sub-base layers. The recycled aggregates used for the construction of the experimental track were produced in the Municipal quarry of Goiânia, where crushing took place. The experimental track was monitored during the construction phase and during approximately three years of operation. The results of the field tests indicated good structural conditions of the pavement and the technical viability of the application of recycled aggregates from construction and demolition in flexible pavements. Good indicators of performance of the pavement were also obtained from Benkelman beam measurements, plate load tests, dynamic penetration indexes, the non drained resistance obtained by the dynamic penetrometers of cone and Panda, and the Pencil pressuremeter and geogauge moduli.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ASPECTOS GERAIS	1
1.2	MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	2
1.3	HIPÓTESE	3
1.4	OBJETIVOS	3
1.4.1	OBJETIVO GERAL	3
1.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.5	ESTRUTURA DA TESE	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	INTRODUÇÃO	5
2.2	OS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	5
2.2.1	ASPECTOS GERAIS E AMBIENTAIS	5
2.2.2	LEGISLAÇÃO VIGENTE	9
2.2.3	A RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	13
2.2.4	CAMPOS DE APLICAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS	17
2.3	APLICAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	18
2.3.1	PANORAMA GLOBAL.....	18
2.3.2	NORMAS BRASILEIRAS EM VIGOR	19
2.3.3	ALGUMAS PESQUISAS E EXPERIÊNCIAS REALIZADAS.....	23
2.3.3.1	O CASO EM ESTUDO: PISTA EXPERIMENTAL DE GOIÂNIA.....	38
2.4	AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	45
2.4.1	DEFORMAÇÃO RESILIENTE	46
2.4.2	PARÂMETROS DETERMINADOS EM CAMPO	49
2.4.2.1	MEDIDAS DE DEFLEXÕES	49
2.4.2.2	DESLOCAMENTOS - PROVA DE CARGA SOBRE PLACA.....	51
2.4.2.3	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO – PENETRÔMETRO DINÂMICO DE CONE (DCP)	52
2.4.2.4	MÓDULOS ELÁSTICOS – PRESSIÔMETRO PENCEL	53
2.4.2.5	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO - PENETRÔMETRO DINÂMICO PANDA .	53
2.4.2.6	MÓDULO DE YOUNG E RIGIDEZ - GEOGAUGE.....	55
3	METODOLOGIA	58
3.1	INTRODUÇÃO	58
3.2	FASE DE ESTUDOS DE LABORATÓRIO	58

3.2.1	OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS	59
3.2.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	61
3.2.3	PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC).....	62
3.2.4	ANÁLISE DA ABSORÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS NA UMIDADE ÓTIMA DE COMPACTAÇÃO.....	65
3.2.5	ÍNDICE DE DEGRADAÇÃO OU QUEBRA DOS GRÃOS DEVIDO À COMPACTAÇÃO	66
3.2.6	DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	66
3.2.7	MEDIDA DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO SOLO ARGILOSO DO SUBLEITO DEVIDO AO RESSECAMENTO.....	68
3.2.8	DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO ARGILOSO DO SUBLEITO.....	69
3.3	FASE DE CONSTRUÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL	71
3.3.1	ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DE DEFLEXÕES COM EMPREGO DA VIGA BENKELMAN	73
3.3.2	ENSAIOS DE PROVA DE CARGA SOBRE PLACA.....	74
3.3.3	ENSAIOS COM O PENETRÔMETRO DINÂMICO DE CONE (DCP).....	74
3.3.4	ENSAIOS COM O PRESSIÔMETRO PENCEL.....	76
3.4	FASE DE MONITORAMENTO DA PISTA EXPERIMENTAL.....	76
3.4.1	ENSAIOS COM O PENETRÔMETRO DINÂMICO PANDA.....	77
3.4.2	ENSAIOS COM O GEOGAUGE.....	78
3.4.3	ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DOS PESOS ESPECÍFICOS DE CAMPO.....	78
3.4.4	ENSAIOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DO REVESTIMENTO ASFÁLTICO DA PISTA EXPERIMENTAL.....	79
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	80
4.1	INTRODUÇÃO	80
4.2	FASE DE ESTUDOS DE LABORATÓRIO	80
4.2.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	80
4.2.2	DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS	90
4.2.3	PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA.....	90
4.2.4	ABSORÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS NA UMIDADE ÓTIMA DE COMPACTAÇÃO.....	104
4.2.5	ÍNDICE DE DEGRADAÇÃO OU QUEBRA DOS GRÃOS DEVIDO À COMPACTAÇÃO	105
4.2.6	RESULTADOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	107
4.2.7	VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO SUBLEITO ARGILOSO DEVIDO AO RESSECAMENTO	115
4.2.8	DETERMINAÇÃO DA SUCCÃO DO SOLO DO SUBLEITO.....	115

4.2.8.1	RELAÇÃO ENTRE A SUCCÃO ESTIMADA E O ISC DAS MISTURAS.....	116
4.2.8.2	RELAÇÃO ENTRE A SUCCÃO ESTIMADA E O MÓDULO DE RESILIÊNCIA	117
4.3	PISTA EXPERIMENTAL	118
4.3.1	CONTAGEM DE TRÁFEGO E DETERMINAÇÃO DO NÚMERO N.....	118
4.3.2	CARACTERÍSTICAS DO REVESTIMENTO ASFÁLTICO DA PISTA EXPERIMENTAL	120
4.3.3	RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE PESO ESPECÍFICO DE CAMPO	120
4.3.3.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O FRASCO DE AREIA.....	120
4.3.3.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O DENSÍMETRO NUCLEAR	122
4.3.4	RESULTADOS DAS MEDIDAS DE DEFLEXÃO UTILIZANDO A VIGA BENKELMAN.....	124
4.3.5	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O PENETRÔMETRO DINÂMICO DE CONE (DCP)	134
4.3.6	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PROVA DE CARGA SOBRE PLACA.....	140
4.3.7	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O PRESSIÔMETRO PENCIL.....	145
4.3.8	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O PENETRÔMETRO DINÂMICO PANDA.....	151
4.3.9	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O GEOGAUGE.....	154
5	CONCLUSÕES	156
5.1	INTRODUÇÃO	156
5.2	ANÁLISES DE LABORATÓRIO	156
5.3	MONITORAMENTO DA PISTA EXPERIMENTAL.....	158
5.4	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	159
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	161

LISTA DE TABELAS

2.1	Parâmetros de compactação e ISC de amostras de resíduos sólidos puros do município de São Paulo (Modificado – Bodi et al., 1995).....	24
2.2	Caracterização de agregados reciclados de Salvador - Bahia (Modificado - Carneiro et al., 2001).	27
2.3	Comparação de resultados de compactação e ISC de misturas contendo agregado reciclado graúdo em Salvador – Bahia (Modificado - Carneiro et al., 2001).	27
2.4	Caracterização das frações de agregados reciclados de resíduos sólidos utilizados na construção da pista experimental de Goiânia – brita 19 mm e brita 9,5 mm.....	41
2.5	Caracterização da fração areia de agregados reciclados e da argila do local da pista experimental do município de Goiânia.	41
2.6	Caracterização das misturas empregadas nas camadas de sub-base e base da pista experimental de Goiânia.	41
2.7	Percentuais de pedregulho, areia, silte e argila das misturas das camadas de sub-base e base da pista experimental de Goiânia.....	41
2.8	Parâmetros de compactação e ISC das camadas do pavimento da pista experimental de Goiânia.....	42
4.1	Caracterização textural dos agregados reciclados estudados em laboratório.....	82
4.2	Peso específico, absorção e porosidade dos grãos > 4,8 mm dos agregados reciclados estudados em laboratório – NBR 6508 (ABNT, 1984d).....	83
4.3	Peso específico, absorção e porosidade dos grãos > 4,8 mm dos agregados reciclados estudados em laboratório – NBR 6508 (ABNT, 1984d), com imersão lenta.....	83
4.4	Peso específico dos grãos dos agregados reciclados estudados em laboratório – frações maiores e menores que 4,8 mm – NBR 6508 (ABNT, 1984d).....	84
4.5	Perda de massa por abrasão Los Angeles - agregados reciclados estudados em laboratório.....	84
4.6	Índice de forma dos agregados reciclados estudados em laboratório.	85
4.7	Caracterização de oito solos argilosos do município de Goiânia.....	88
4.8	Análise química de dois solos argilosos do município de Goiânia.....	89
4.9	Caracterização do solo argiloso do município de Goiânia (CEASA), utilizado nas dosagens com agregados reciclados.....	89
4.10	Composição das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.	91
4.11	Distribuição granulométrica das dosagens de agregados reciclados e solo argiloso estudadas em laboratório.....	91

4.12	Parâmetros de compactação e ISC das dosagens com agregados reciclados estudadas em laboratório.....	92
4.13	Parâmetros de compactação e ISC do solo argiloso do município de Goiânia (CEASA) utilizado nas dosagens com agregados reciclados.....	94
4.14	Variação do ISC ao longo da altura dos corpos de prova das dosagens de agregados reciclados e do solo argiloso estudados em laboratório.....	103
4.15	Grau de saturação das dosagens de agregados reciclados após a imersão em água por 96 horas.....	104
4.16	Absorção de água de duas dosagens de agregados reciclados, na umidade ótima de compactação.....	104
4.17	Valores de índice de degradação (IDP) de dosagens de agregados reciclados após a compactação na energia do Proctor intermediário.....	105
4.18	Resumo dos parâmetros de resiliência de algumas das dosagens de agregados reciclados estudadas.....	113
4.19	Parâmetros de resiliência do solo argiloso das dosagens e do subleito da pista experimental (CEASA).....	114
4.20	Contagem de tráfego na pista experimental (CEASA) - Agosto de 2005.....	119
4.21	Número equivalente de solicitações do eixo padrão de 82 kN na pista experimental (número N), calculado com os fatores de carga do USACE.....	119
4.22	Pesos específicos de campo utilizando o frasco de areia – camada de base ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Novembro/2005.....	- 121
4.23	Pesos específicos de campo utilizando o frasco de areia – camada de base ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.....	- 121
4.24	Pesos específicos de campo utilizando o frasco de areia – camada de sub-base - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.....	121
4.25	Pesos específicos de campo utilizando o frasco de areia – camadas de base e sub-base - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) na fase de construção (Silva, 2004).....	121
4.26	Pesos específicos de campo utilizando o densímetro nuclear – camadas de base e sub-base - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2005.....	122
4.27	Pesos específicos de campo utilizando o densímetro nuclear – camadas de base e sub-base - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Novembro/2005.....	123
4.28	Pesos específicos de campo utilizando o densímetro nuclear – camadas de base e sub-base - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.....	123
4.29	Pesos específicos de campo utilizando o densímetro nuclear – camadas de base e sub-base - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) na fase de construção (Silva, 2004).....	123

4.30	Ensaio de viga Benkelman sobre o subleito da pista experimental (CEASA) - Novembro/2003.....	125
4.31	Ensaio de viga Benkelman sobre a sub-base da pista experimental (CEASA) - Dezembro/2003.....	125
4.32	Ensaio de viga Benkelman sobre a base da pista experimental (CEASA) - Dezembro/2003.....	126
4.33	Ensaio de viga Benkelman sobre o revestimento da pista experimental (CEASA) - Janeiro/2004.....	126
4.34	Resumo dos ensaios de viga Benkelman realizados na pista experimental (CEASA) - valores médios do subleito, sub-base, base e revestimento.....	126
4.35	Ensaio de viga Benkelman sobre o revestimento da pista experimental (CEASA) - Setembro/2004 (Assis et al., 2004).....	128
4.36	Ensaio de viga Benkelman sobre o revestimento da pista experimental (CEASA) - Maio/2005.....	129
4.37	Ensaio de viga Benkelman sobre o revestimento da pista experimental (CEASA) - Novembro/2005.....	129
4.38	Ensaio de viga Benkelman sobre o revestimento da pista experimental (CEASA) - Maio/2006.....	129
4.39	Resumo dos ensaios de viga Benkelman sobre o revestimento asfáltico da pista experimental (CEASA) - valores médios.....	130
4.40	Umidades médias das camadas da pista experimental (CEASA), nos ensaios de viga Benkelman.....	132
4.41	Deflexões características e admissíveis da pista experimental.....	133
4.42	Índices de penetração do DCP (DN) de ensaios realizados na pista experimental (CEASA), em todos os períodos ensaiados.....	135
4.43	Correlações entre o índice de penetração (DN) médio e o ISC – ensaios realizados sobre o subleito da pista experimental (CEASA) na fase de construção – Novembro/2003.....	140
4.44	Valores de ISC obtidos das correlações com o índice de penetração médio (DN) – ensaios realizados sobre a base da pista experimental (CEASA).....	140
4.45	Resumo das prova de carga - subleito, sub-base, base e revestimento – fase de construção da pista experimental – Novembro/2003 a Janeiro/2004.....	141
4.46	Resumo dos deslocamentos medidos nas provas de carga realizadas sobre o revestimento asfáltico da pista experimental (CEASA) em quatro períodos – carga de 28 kN (570,42 kPa).....	142
4.47	Resumo dos deslocamentos medidos nas provas de carga realizadas sobre o revestimento asfáltico da pista experimental (CEASA) em quatro períodos – carga de 40 kN (814,88 kPa).....	142
4.48	Módulos pressiométricos horizontais, obtidos em furos verticais, do subleito da pista experimental (CEASA) nos quatro períodos ensaiados.....	146
4.49	Módulos pressiométricos horizontais, obtidos em furos verticais, da base e sub-base da pista experimental (CEASA) nos quatro períodos ensaiados.....	146

4.50	Módulos pressiométricos verticais, obtidos em furos horizontais, do subleito da pista experimental (CEASA) nos quatro períodos ensaiados.	148
4.51	Módulos pressiométricos verticais, obtidos em furos horizontais, da base e sub-base da pista experimental (CEASA) nos quatro períodos ensaiados.	148
4.52	Módulos de Young do geogauge - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Novembro/2005 e Maio/2006.	155

LISTA DE FIGURAS

2.1	Área clandestina de descarte de resíduos sólidos, no município de Goiânia - Goiás (PMGRSIC, 2004).	8
2.2	Usina de reciclagem de resíduos sólidos de Estoril - Belo Horizonte (Leal, 2001).	17
2.3	Curva de ISC - mistura de entulho de São Paulo com solo siltoso (Modificado - Bodi et al., 1995).....	25
2.4	Curva de ISC – Mistura de entulho de São Paulo com solo argiloso (Modificado - Bodi et al., 1995).....	25
2.5	Valores de índice de suporte Califórnia – ISC de agregados reciclados de Goiânia (Modificado – Ribeiro & Serra, 2001).....	26
2.6	Distribuições granulométricas de agregados reciclados de Florianópolis – SC (Modificado - Kryckyj & Trichês, 2000).....	29
2.7	Valores de ISC de agregados reciclados de Florianópolis – SC (Modificado - Kryckyj & Trichês, 2000).	29
2.8	Armazenamento de resíduos sólidos no município de Goiânia (Silva, 2004).	40
2.9	Produção de agregados reciclados no britador da prefeitura municipal de Goiânia (Silva, 2004).....	40
2.10	Detalhe do britador da prefeitura municipal de Goiânia: correia transportadora com os resíduos sólidos britados e sistema de peneiras (Silva, 2004).	40
2.11	Vista superior das camadas da pista experimental de Goiânia após a compactação: (a) sub-base; (b) base (Silva, 2004).....	43
2.12	Meio-fio com sarjeta de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: (a) vista geral - bordo direito; (b) detalhe da superfície do concreto (Silva, 2004).	44
2.13	Primeiros modelos de comportamento tensão-deformação de solos, observados no Brasil: (a) granular, (b) argiloso, (c) areno argiloso, (d) combinado, (e) constante (modificado – Medina, 1997a).....	49
2.14	Penetrômetro dinâmico tipo PANDA: (a) detalhe do equipamento; (b) realização do ensaio.....	55
3.1	Resíduos sólidos de concreto antes da britagem: (a) demolição de pisos de concreto; (b) corpos-de-prova rompidos.	59
3.2	Resíduos sólidos cerâmicos antes da britagem: (a) vista geral da pilha; (b) detalhe dos elementos constituintes da amostra.	59
3.3	Britador de mandíbulas - processamento dos resíduos sólidos: (a) caçamba de alimentação; (b) britador e correia transportadora; (c) vista geral do sistema de britagem; (d) peneiramento e descarga do material.	60

3.4	Agregados reciclados obtidos da britagem de resíduos sólidos: (a) pilhas de ARM; (b) detalhe do ARM 19,1; (c) secagem do ARC 4,8; (d) detalhe do ARC 19,1.....	61
3.5	Execução dos ensaios de compactação, expansão e ISC: (a) homogeneização da amostra (b) compactação; (c) medida da expansão; (d) ensaio de penetração (ISC);.....	65
3.6	Realização de um dos ensaios triaxiais de cargas repetidas para determinação do módulo de resiliência.....	68
3.7	Imagem de satélite com a localização da pista experimental (Google, 2006).	71
3.8	Desenho esquemático da seção transversal da pista experimental.....	72
3.9	Execução da pista experimental: (a) subleito compactado; (b) pilhas de agregados reciclados; (c) processo de homogeneização na pista; (d) compactação da sub-base.....	73
3.10	Desenho esquemático dos pontos de medidas de deflexão com a viga Benkelman na pista experimental.	74
3.11	Medidas de deflexões com a viga Benkelman: (a) sobre o subleito; (b) sobre o revestimento.....	74
3.12	Ensaio de prova de carga: (a) sobre o revestimento.; (b) sobre o subleito.	75
3.13	Execução do ensaio com o penetrômetro dinâmico de cone (DCP).	75
3.14	Ensaio pressiométrico: (a) detalhe da unidade de controle e execução de furo vertical no subleito; (b) furo horizontal no subleito.	76
3.15	Geogauge: detalhe do equipamento e ensaio sobre a base de agregados reciclados.....	78
3.16	Determinação do peso específico de campo utilizando o densímetro nuclear.....	79
4.1	Curvas granulométricas dos agregados reciclados de concreto – ARC, com e sem lavagem.	81
4.2	Curvas granulométricas dos agregados reciclados mistos – ARM, com e sem lavagem.	81
4.3	Curvas granulométricas de todos os agregados reciclados estudados em laboratório.	82
4.4	Imagem em lupa binocular do agregado reciclado ARM 4,8 - fração passante na peneira de 1,2 mm de abertura e retida na peneira 0,59 mm.	86
4.5	Imagem em lupa binocular do agregado reciclado ARM 4,8 - fração passante na peneira de 0,59 mm de abertura e retida na peneira 0,42 mm.	86
4.6	Determinação do pH da fração fina dos agregados reciclados estudados em laboratório: (a) Vista geral do equipamento; (b) Detalhe do eletrodo imerso na amostra.....	87
4.7	Valores de pH dos agregados reciclados estudados em laboratório.....	87
4.8	Curvas granulométricas, com e sem defloculante, do solo argiloso do município de Goiânia (CEASA) utilizado na pesquisa.....	89

4.9	Curvas granulométricas das dosagens de agregados reciclados ARM 50/50 com solo argiloso e faixa C da ES 303/97 do DNER.	92
4.10	Valores de ISC obtidos das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.	93
4.11	Valores de ISC obtidos das dosagens de agregados reciclados estudados em laboratório - variações por grupo.	93
4.12	Relação entre o peso específico seco máximo e o ISC das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.	94
4.13	Relação entre a umidade ótima e o ISC das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.	95
4.14	Relação entre a umidade ótima interagregado e total e o ISC das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.	96
4.15	Relação entre índice de vazios total e interagregados e o ISC das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.	97
4.16	Relação entre a umidade ótima e o peso específico seco máximo das dosagens com agregados reciclados estudadas em laboratório.	97
4.17	Curvas de compactação de algumas das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.	98
4.18	Variação do ISC com a textura para a dosagem de agregado reciclado ARM 25/75 20% SA.	99
4.19	Variação do ISC com a energia de compactação - dosagem com agregado reciclado ARM 50/50.	100
4.20	Variação do ISC com o tempo de cura para três das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.	101
4.21	Variação do pH com o tempo de três das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.	101
4.22	Variação do ISC com o pH de três das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.	102
4.23	Curvas granulométricas das dosagens de agregados reciclados ARC e ARM, antes e após a compactação.	106
4.24	Curvas granulométricas das dosagens de agregados reciclados da pista experimental (CEASA), antes e depois da compactação, em diferentes épocas e condições.	107
4.25	Módulo de resiliência - dosagem ARC.	108
4.26	Módulo de resiliência - dosagem ARM.	109
4.27	Módulo de resiliência - dosagem ARM 50/50.	109
4.28	Módulo de resiliência - dosagem ARM 50/50 30% SA.	110
4.29	Módulo de resiliência - dosagem da base da pista experimental (CEASA).	110
4.30	Módulo de resiliência - dosagem da sub-base da pista experimental (CEASA).	111

4.31	Tensão de desvio versus módulo de resiliência para $\sigma_3 = 0,07$ MPa para algumas das dosagens de agregados reciclados estudadas.	111
4.32	Tensão desvio versus módulo de resiliência para $\sigma_3 = 0,14$ MPa para algumas das dosagens de agregados reciclados estudadas.	112
4.33	Módulo de resiliência do solo argiloso das dosagens e do subleito da pista experimental (CEASA).	114
4.34	Curvas características do solo argiloso do subleito da pista experimental (CEASA).	116
4.35	Variação do ISC de dosagens de agregados reciclados e solo argiloso em função da sucção estimada - energia do Proctor intermediário.	117
4.36	Variação do módulo de resiliência de dosagens de agregados reciclados e solo argiloso em função da sucção estimada - energia do Proctor intermediário.	118
4.37	Curva granulométrica do concreto asfáltico da pista experimental.	120
4.38	Relação entre D ₀ e o produto R.D ₀	127
4.39	Bacias de deflexão médias do subleito, sub-base, base e revestimento da pista experimental (CEASA), logo após a construção.	127
4.40	Comparação entre as deflexões das camadas do pavimento da pista experimental (CEASA).	128
4.41	Bacias de deflexões médias dos ensaios realizados sobre o revestimento asfáltico da pista experimental (CEASA), em todos os períodos ensaiados.	131
4.42	Valores médios mensais típicos de precipitação e temperatura no município de Goiânia (INMET, 2007).	131
4.43	Relação entre os teores de umidade do subleito e as deflexões máximas (D ₀) medidas sobre o revestimento asfáltico, da pista experimental, nos períodos ensaiados.	133
4.44	Trincamento do subleito da pista experimental após a compactação Novembro/2003.	136
4.45	Curvas DCP do subleito da pista experimental – Novembro/2003.	136
4.46	Curvas DCP da camada de base da pista experimental – estaca 3 EX.	137
4.47	Curvas DCP da camada de base da pista experimental – estaca 4 BD.	138
4.48	Curvas DCP da camada de base da pista experimental – estaca 4+ 15 BE.	138
4.49	Relação entre o teor de umidade e os deslocamentos das provas de carga de construção da pista experimental - Novembro a Dezembro/2003.	142
4.50	Curvas médias das provas de carga realizadas sobre o revestimento asfáltico da pista experimental (CEASA) nos quatro períodos ensaiados.	143
4.51	Provas de carga sobre o revestimento asfáltico da pista experimental (CEASA) com dois diâmetros de placa diferentes – Maio 2005.	143
4.52	Provas de carga sobre o revestimento asfáltico da pista experimental (CEASA) com dois diâmetros de placa diferentes – deslocamentos normalizados - Maio 2005.	144

4.53	Relação entre os deslocamentos das provas de carga e os índices de penetração (DN) do DCP - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em quatro etapas.	144
4.54	Curvas típicas corrigidas do ensaio com o pressiômetro Pencil na pista experimental (CEASA), em Maio/2005.	145
4.55	Furos horizontais dos ensaios pressiométricos nas camadas de base, sub-base e subleito da pista experimental (CEASA) – estaca 4 BD – Novembro de 2005.	149
4.56	Variação do módulo pressiométrico horizontal das camadas de base, sub-base e subleito da pista experimental (CEASA) com o teor de umidade, até dois metros de profundidade – Maio/2006.	150
4.57	Variação do módulo pressiométrico horizontal de recompressão das camadas de base, sub-base e subleito da pista experimental (CEASA) com o teor de umidade, até dois metros de profundidade – Maio/2006.	150
4.58	Variação da pressão limite horizontal das camadas de base, sub-base e subleito da pista experimental (CEASA) com o teor de umidade, até dois metros de profundidade – Maio/2006.	151
4.59	Perfis de resistência de ponta (qd) do penetrômetro Panda – ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.	152
4.60	Relação entre os índices de resistência obtidos com o penetrômetro dinâmico de cone (DN) e o penetrômetro Panda (qd) - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.	152
4.61	Variação da resistência de ponta do penetrômetro Panda (qd) com o teor de umidade - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.	153
4.62	Relação entre o módulo pressiométrico horizontal e a resistência de ponta do penetrômetro Panda - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.	153
4.63	Relação entre o módulo pressiométrico horizontal de recompressão e a resistência de ponta do penetrômetro Panda - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.	154
4.64	Relação entre a pressão limite do pressiômetro Pencil e a resistência de ponta do penetrômetro Panda - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.	154

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIÇÕES

A-7-6	Solos argilosos – Classificação TRB
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AR	Agregado (s) Reciclado (s)
ARC	Agregados Reciclados de Concreto
ARM	Agregados Reciclados Mistos
BD	Bordo Direito
BE	Bordo Esquerdo
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	Califórnia Bearing Ratio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
C_c	Coefficiente de curvatura do solo
CEASA	Centrais de Abastecimento S. A.
CL	Argila magra arenosa – Classificação SUCS
cm	Centímetro
cm^2	Centímetro quadrado
cm^3	Centímetro cúbico
COMPAV	Companhia de Pavimentação do Município de Goiânia
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cu	Coefficiente de não uniformidade do solo
D_{10}	Diâmetro abaixo do qual encontra-se 10% do solo
D_{30}	Diâmetro abaixo do qual encontra-se 30% do solo
D_{60}	Diâmetro abaixo do qual encontra-se 60% do solo
DCP	Penetrômetro Dinâmico de Cone
DERMU	Departamento de Estradas de Rodagem do Município de Goiânia
DESVPAD	Desvio Padrão
dm^3	Decímetro cúbico
DN	Índice de Penetração do DCP em mm/golpe
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes

e	Índice de vazios
ES	Especificação de Serviço
EX	Eixo
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas S. A.
FWD	Falling Weight Deflectometer
g	Grama
IP	Índice de plasticidade
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo
ISC	Índice de Suporte Califórnia
kg	Quilograma
km	Quilômetro
kN	Quilo-Newton
LG'	Solo de comportamento laterítico argiloso - Classificação MCT
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
MCT	Classificação Geotécnica MCT
ME	Método de Ensaio
mm	Milímetro
NBR	Norma Brasileira
°C	Graus Celsius
pH	Potencial de hidrogênio
PMSP	Prefeitura Municipal de São Paulo
PRO	Procedimento
RBV	Relação Betume Vazios
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos da ASTM
t	Tempo
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UFG	Universidade Federal de Goiás
UnB	Universidade de Brasília
w	Teor de umidade

W_L	Limite de liquidez
W_P	Limite de plasticidade
ε	Deformação
ρ_s	Massa específica dos sólidos
ρ	Massa específica dos sólidos
σ	Tensão normal total

1 INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

O estudo de materiais alternativos para execução de pavimentos flexíveis tem sido objeto de diversas pesquisas no país. Estes estudos são motivados por vários fatores dentre os quais destacam-se as restrições ambientais enfrentadas para a exploração de materiais naturais, as econômicas devido às grandes distâncias de transporte das jazidas e a existência de diversos materiais descartados pelas indústrias no meio ambiente, que apresentam potencial para serem aproveitados. Exemplos desses materiais são os expurgos de pedreira, os pneus usados, as escórias de alto forno e aciaria, os rejeitos de mineração e os resíduos sólidos da construção civil, sendo estes últimos, o objeto do presente estudo.

A indústria da construção civil, nos processos de construção, reforma e demolição, gera um grande volume de resíduos sólidos que, geralmente, são considerados inúteis e descartados de forma nem sempre adequada. A disposição inadequada desses resíduos causa inúmeros problemas sócio-ambientais como, por exemplo, a ocupação irregular de áreas urbanas, o exaurimento da capacidade de armazenamento de aterros sanitários, o assoreamento de córregos e rios, o entupimento de redes de drenagem, a proliferação de vetores de doenças e a degradação da paisagem urbana e rural. Apesar de causarem tantos problemas, os resíduos sólidos da construção civil, especificamente os compostos por concretos, argamassas e elementos cerâmicos, devem ser vistos como fonte de materiais alternativos de grande potencial e utilidade na engenharia. Seu uso mais tradicional em aterros nem sempre é o mais racional, pois ele pode também substituir materiais naturais normalmente extraídos de jazidas ou ser transformado em matéria-prima para componentes de construção com qualidade comparável aos materiais tradicionais.

Uma solução para minimizar e até mesmo resolver os problemas oriundos do descarte inadequado, é a reciclagem dos resíduos sólidos da construção civil e utilização dos agregados gerados em pavimentação, confecção de concretos, argamassas, blocos e outros. O aproveitamento dos resíduos sólidos da construção civil na produção de agregados, além de mostrar-se viável, contribui de várias formas para a preservação do meio ambiente: utilização dos agregados reciclados em substituição a materiais naturais de construção, eliminação ou redução do descarte dos resíduos sólidos em áreas urbanas e de preservação ambiental e prolongamento da vida útil dos aterros sanitários.

Visando equacionar os problemas causados pelo grande volume de resíduos sólidos da construção civil gerados nas cidades, o Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, órgão vinculado ao Ministério do Meio Ambiente, estabeleceu por meio da resolução N° 307, de julho de 2002 (CONAMA, 2002), que os municípios e o Distrito Federal devem elaborar um plano integrado de gerenciamento de resíduos sólidos da construção civil, com o objetivo de cessar a disposição desses resíduos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de bota-fora, em encostas, corpos d'água, lotes vagos e áreas protegidas por lei. Uma segunda resolução, a de N° 313, de outubro de 2002, estabeleceu que as indústrias deveriam fornecer ao Estado informações sobre a geração, as características, o armazenamento, o transporte, o tratamento, a reutilização, a reciclagem, a recuperação e a disposição final dos resíduos sólidos gerados pelas mesmas. Em agosto de 2004 a resolução N° 348 do CONAMA alterou a Resolução N° 307 e incluiu o amianto na classe de resíduos perigosos.

Programas de coleta seletiva de resíduos sólidos de construção e demolição, bem como a implantação de áreas de disposição, processamento e armazenamento, associados à estudos técnicos para a aplicação dos materiais, são necessários para viabilizar a utilização dos agregados reciclados. Em algumas cidades brasileiras, como São Paulo, Belo Horizonte, Uberlândia, Ribeirão Preto e mais recentemente em Goiânia, têm sido realizados estudos e experiências objetivando a utilização de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentação.

1.2 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Segundo John & Agopyan (2000), se o processo de produção de agregados reciclados em sua versão tecnológica mais simples está consolidado no Brasil, o mesmo não pode ser dito do emprego do agregado. Embora existam experiências do emprego de agregados mistos (solo, concreto, pedras, argamassas, cerâmica vermelha e branca) na construção de pavimentos e este procedimento esteja em uso no Brasil desde o final da década de 80, não está disponível ao público, no entanto, uma documentação técnica abrangente e consistente.

Segundo Carneiro et al. (2001), apesar das experiências realizadas em muitas cidades se mostrarem satisfatórias, as condições nas quais as mesmas foram executadas e o desempenho dos materiais utilizados apresentam variações significativas, o que indica a necessidade de estudos regionais para a comprovação e afirmação da viabilidade da utilização do agregado reciclado ou do entulho bruto na execução de pavimentos.

1.3 HIPÓTESE

Apesar da heterogeneidade dos agregados reciclados produzidos pelo beneficiamento de resíduos sólidos da construção civil, especificamente os constituídos por concretos, argamassas e materiais cerâmicos, em uma mesma região ou em regiões diferentes e da variabilidade dos parâmetros obtidos dos mesmos, é possível estabelecer indicadores de referência de potencialidades e desempenho para a aplicação dos agregados reciclados em pavimentos flexíveis, a partir da realização de ensaios de laboratório e de campo.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GERAL

Estabelecer, a partir da realização de ensaios de laboratório e de campo, indicadores de potencialidades e desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em camadas de pavimentos flexíveis.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil a fim de avaliar seu potencial e definir dosagens adequadas para utilização em pavimentos;
- Estudar o comportamento resiliente de dosagens de agregados reciclados puros e com a adição de um solo argiloso, para uso em pavimentação;
- Verificar a adequação de ensaios e equipamentos ao estudo de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil;
- Avaliar o comportamento de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis, em função da solicitação do tráfego, a partir do monitoramento de uma pista experimental;
- Ampliar a base de dados e os conhecimentos técnico-científicos sobre a utilização de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

A presente tese está dividida em cinco capítulos:

- No capítulo 1 – Introdução, são apresentados aspectos gerais sobre o tema estudado, a motivação da pesquisa, a hipótese testada, os objetivos e a estrutura do trabalho;

- No capítulo 2 - Revisão Bibliográfica, é feita uma abordagem geral sobre os resíduos sólidos da construção civil, alguns estudos e experiências realizadas com sua aplicação em pavimentos flexíveis e sobre aspectos relativos à avaliação estrutural de pavimentos flexíveis;
- No capítulo 3 – Metodologia, é feita uma descrição detalhada dos materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da pesquisa;
- No capítulo 4 - Apresentação e Análise dos Resultados, são apresentados e discutidos todos os resultados obtidos com a realização do programa experimental;
- No capítulo 5 - Conclusões e Sugestões para Pesquisas Futuras, são apresentadas as conclusões obtidas com a tese e as sugestões para a realização de pesquisas futuras.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas durante a realização da tese.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é realizada uma abordagem geral sobre os resíduos sólidos gerados pela construção civil, sobre os estudos e experiências de utilização de agregados reciclados desses resíduos em pavimentos flexíveis e sobre a avaliação estrutural de pavimentos flexíveis.

2.2 OS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.2.1 ASPECTOS GERAIS E AMBIENTAIS

Os impactos no meio ambiente provenientes da cadeia produtiva da indústria da construção civil ocorrem ao longo de todos os seus estágios e atividades: na ocupação de terras, na extração de matéria-prima, no seu processamento e produção de componentes, no transporte da matéria-prima e seus componentes, no processo construtivo e no produto final ao longo de sua vida útil, até a demolição e descarte. Ao longo de toda esta cadeia recursos naturais são explorados muitas vezes de forma criminosa, energia é consumida indiscriminadamente, resíduos são gerados de forma excessiva e dispostos, muitas vezes, irregularmente (Blumenschein, 2004). A geração de resíduos sólidos da construção civil, bem como a destinação dos mesmos, tem sido motivo de preocupação e estudo em diversos países do mundo, inclusive no Brasil, para que problemas de ordem ambiental, social e financeira decorrentes dos mesmos, sejam minimizados. Os resíduos sólidos da construção civil contribuem para o esgotamento prematuro de aterros sanitários, causam a obstrução de elementos de drenagem urbana, a degradação de mananciais, a poluição de vias públicas, a proliferação de insetos e roedores e a contaminação do solo e águas periféricas.

Segundo Latterza (2000), a construção civil é um dos setores que mais gera resíduos sólidos, considerando-se proporcionalmente o seu produto final. As estatísticas apontam que no Brasil as perdas chegam a atingir entre 20 e 30% da massa de material de construção que entra em cada obra. Segundo John & Agopyan (2000), a geração de resíduos durante a fase de construção é decorrência das perdas dos processos construtivos, sendo que parte das perdas permanece incorporada nas construções na forma de elementos cujas dimensões finais são superiores àquelas projetadas. Este é o caso das argamassas de revestimento, concretos, etc. Outra parcela vai se converter em resíduos sólidos. A geração de resíduos na fase de

manutenção está associada a vários fatores: correção de defeitos (patologias); reformas ou modernização do edifício ou de partes do mesmo que normalmente exigem demolições parciais; descarte de componentes que tenham se degradado e atingido o final da vida útil e por isso necessitam ser substituídos. A redução da geração de resíduos causada pela demolição de edifícios depende do prolongamento da vida útil dos mesmos e seus componentes, que depende tanto de tecnologia de projeto quanto de materiais; da existência de incentivos para que os proprietários realizem modernização e não demolições e de tecnologia de projeto e demolição ou desmontagem que permitam a reutilização dos componentes.

Os resíduos sólidos surgem não só da substituição de componentes pela reforma ou reconstrução. Muitas vezes é gerado por deficiências no processo construtivo: erros ou indefinições na elaboração dos projetos ou execução, má qualidade dos materiais empregados, perdas na estocagem e no transporte. Estes desperdícios podem ser atenuados através do aperfeiçoamento dos controles sobre a realização das obras públicas e também através de trabalhos conjuntos com empresas e trabalhadores da construção civil, visando aperfeiçoar os métodos construtivos, reduzindo a produção de resíduos sólidos e os desperdícios de material. O gerenciamento desses resíduos torna-se mais complicado quanto maior for a quantidade produzida, necessitando, assim, que novas tecnologias para sua reciclagem sejam desenvolvidas e melhor difundidas.

A gerência do ciclo de vida dos materiais de construção inclui as cadeias de produção, construção, demolição, reuso ou reciclagem e disposição. Isto implica na redução dos usos dos recursos naturais (fontes de energia e matéria-prima) e em mantê-los no ciclo de vida de produção o máximo de tempo possível. Tal conceito enfatiza a importância do projeto no processo construtivo que é visto como um processo de reciclagem (Hendriks & Pietersen, 2000). O conceito do processo construtivo como processo de reciclagem envolve a utilização de recursos naturais de maneira preventiva. Uma vez que tenham sido transformados em resíduos é feita sua reinserção dentro do processo construtivo, reutilizando-os em novas construções ou nos processos para a produção de novos materiais (Hendriks, 2000).

Levando-se em conta apenas os resíduos sólidos reutilizáveis ou recicláveis como agregados provenientes de construção, demolição, reformas e reparos de edificações, a proporção que seus elementos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, argamassa, concreto, etc.) assumem dentro da massa total faz com que resultem materiais de grande heterogeneidade, cujas composições física e química irão condicionar o seu comportamento.

Segundo Leal (2001), em média, 65% dos resíduos sólidos dos bota-foras são de origem mineral, 13% é madeira, 8% plástico e 14% outros materiais. Segundo dados da Prefeitura de São Paulo, em 2001 a cidade gerava 144 mil m³ por mês de resíduos sólidos da construção civil, mas informações extra-oficiais sugerem cerca de 326 mil m³ mensais. O custo projetado do metro cúbico de argamassa com material reciclado era de 36 dólares, enquanto o mesmo volume de argamassa tradicional saía por 62 dólares. Levantamentos apontam que apenas 20 a 25% dos resíduos sólidos das cidades são gerados por construtoras, sendo o restante é originado em obras de auto-construção, sobretudo reformas.

Segundo Pinto (1999), os resíduos produzidos nas atividades de construção, manutenção e demolição têm estimativa de geração bastante variável. Os valores encontrados na bibliografia internacional variam de 163 a mais de 3000 kg/hab.ano. No entanto, os valores comumente encontrados variam entre 400 e 500 kg/hab.ano, valor igual ou superior à massa de resíduos sólidos urbanos. Partes significativas desses resíduos são depositadas ilegalmente, acumulam-se nas cidades gerando custos e agravando problemas urbanos como, por exemplo, as enchentes.

Dados levantados por Medeiros (2002) mostram que no Brasil os resíduos sólidos da construção chegam a corresponder a 60% dos resíduos sólidos urbanos e a falta de soluções vem agravando a situação. Segundo Pinto (1999), nas cidades brasileiras de médio e grande porte, a massa de resíduos gerados variava de 41% a 70% da massa total de resíduos sólidos urbanos. A deposição irregular dos resíduos estimada para cinco cidades de porte médio apresentou variação entre 10 e 47% do total gerado.

Além das consequências já citadas, a deposição irregular de resíduos sólidos onera bastante os cofres municipais. Segundo as estimativas de Pinto, citado por John & Agopyan (2000), os custos de remoção variavam entre US\$ 5,4/ton e US\$ 14,8/ton para diferentes cidades e técnicas de recolhimento. Segundo Brito Filho, também citado pelos autores, a prefeitura municipal de São Paulo recolhia diariamente 4 mil toneladas de resíduos sólidos da construção civil a um custo mensal de R\$ 4,5 milhões, o que permitia estimar um custo de US\$ 30/ton. Os resíduos sólidos da construção civil representam um negócio estabelecido em quase todas as grandes cidades brasileiras, envolvendo as empresas contratadas pela prefeitura para recolher os resíduos sólidos depositados irregularmente, as empresas contratadas pela prefeitura que operam os aterros regulares de resíduos, empresas de tamanho variado que trabalham com o transporte de resíduos sólidos utilizando caminhões poliguindaste e caçambas e também um grupo de transportadores autônomos, que utilizam carroças e até

carrinhos de mão. A Figura 2.1 apresenta uma área clandestina de descarte de resíduos sólidos, no município de Goiânia.



Figura 2.1 - Área clandestina de descarte de resíduos sólidos, no município de Goiânia - Goiás (PMGRSIC, 2004).

Triches & Kryckyj (1999) apontaram que a reciclagem dos resíduos sólidos representa uma série de vantagens econômicas para a administração pública municipal, tais como:

- redução dos custos com a remoção do material depositado clandestinamente ao longo das vias públicas, terrenos baldios, cursos d'água e encostas;
- aumento da vida útil dos aterros sanitários, reduzindo a necessidade de áreas para a implantação de novos aterros;
- diminuição nos custos de operação dos aterros sanitários, pela exclusão dos resíduos sólidos;
- diminuição nos custos de pavimentação e infra-estrutura urbana.

Além do mais, a reciclagem dos resíduos sólidos contribui para a preservação dos recursos naturais, reduzindo a degradação ambiental causada pela extração das matérias-primas convencionais. Em São Paulo, por exemplo, em função do esgotamento das reservas próximas à capital, a areia natural é transportada a longas distâncias, até superiores a 100 km, o que causa um enorme consumo de energia e aumento de poluição (Triches & Kryckyj, 1999).

2.2.2 LEGISLAÇÃO VIGENTE

A Resolução Nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (CONAMA, 2002), de 05 de Julho de 2002, que entrou em vigor em 02 de Janeiro de 2003, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais. A resolução considera que a disposição dos resíduos em locais inadequados contribui para a degradação da qualidade ambiental, que há viabilidade técnica e econômica para a produção e uso de materiais provenientes de resíduos da construção civil e que a gestão integrada dos resíduos deverá proporcionar benefícios de ordem social, econômica e ambiental. Segundo a resolução, os resíduos sólidos da construção civil, também conhecidos pela sigla RCD (resíduos de construção e demolição), são os provenientes de construções, reformas e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de aterros: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassas, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica e que são comumente chamados de entulhos de obras, calça ou metralha. Esses resíduos enquadram-se em quatro classes, a saber:

I – Classe A – São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplenagem;

- de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, etc.), argamassa e concreto;

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

II – Classe B – São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, metais, vidros, madeiras e outros;

III – Classe C – São os resíduos para os quais não ainda não foram desenvolvidas ou consolidadas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação como os produtos oriundos do gesso.

IV – Classe D – São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Segundo a resolução N^o 307, os geradores devem ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, reutilização, reciclagem e destinação final. Os resíduos da construção civil não poderão ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de bota-fora, encostas, corpos d'água, lotes vagos ou áreas protegidas por lei. Os resíduos classe A, que são objetos do presente trabalho, deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados para áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.

Cabe aos municípios e ao Distrito Federal a elaboração de um Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, que deverá incorporar um Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, elaborados e implementados pelos grandes geradores de resíduos. Os projetos de gerenciamento deverão contemplar as seguintes etapas: caracterização – o gerador deverá identificar e quantificar os resíduos; triagem – realizada preferencialmente pelo gerador, na origem, ou nas áreas de destinação licenciadas para essa finalidade; acondicionamento – garantia de confinamento dos resíduos após a geração, até a etapa de transporte; transporte – de acordo com as normas técnicas vigentes para o transporte de resíduos e destinação – de acordo com o estabelecido na resolução.

A resolução N^o 307 estabeleceu os seguintes prazos máximos a serem atendidos:

- doze meses, a partir de 02 de Janeiro de 2003, para que os municípios e o Distrito Federal elaborassem seus Planos Integrados de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil – prazo até 02 de Janeiro de 2004;

- dezoito meses, a partir de 02 de Janeiro de 2003, para que os Municípios e o Distrito Federal cessassem a disposição de resíduos de construção civil em aterros de resíduos domiciliares e em áreas de bota-fora – prazo até 02 de Julho de 2004;

- vinte e quatro meses, a partir de Janeiro de 2003, para que os geradores incluíssem os Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil nos projetos de obras a serem submetidos à aprovação ou ao licenciamento dos órgãos competentes – prazo até 02 de Janeiro de 2005.

A resolução N^o 348 do CONAMA, de 16 de Agosto de 2004, alterou a resolução N^o 307, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. A resolução N^o 313 do CONAMA dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Industriais e obriga as indústrias a fornecer ao Estado informações sobre a geração, características, armazenamento, transporte, tratamento,

reutilização, reciclagem, recuperação e disposição final dos resíduos sólidos gerados pelas indústrias do país (PMGRSIC, 2004). Embora os prazos estabelecidos pela resolução N^o 307 do CONAMA já tenham expirado há mais de dois anos, nem todos os municípios e grandes geradores de resíduos tem as diretrizes estabelecidas implementadas.

Segundo Ribeiro & Serra (2001), o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT apresentou uma classificação dos resíduos sólidos da construção civil em três grupos:

- grupo I – Resíduos sólidos Brancos – São materiais compostos basicamente de cimento, areia, cal e brita. Ex.: Concreto, argamassas e blocos;

- grupo II – Resíduos sólidos Vermelhos – São os materiais cerâmicos. Ex.: telhas, tijolos e azulejos;

- grupo III – Outros materiais passíveis de reciclagem, porém não como agregados. Ex.: Solo, gesso, metal, madeira, papel, plástico, matéria orgânica, vidro e isopor.

De uma maneira geral, em nível estadual e municipal existem leis que tratam de forma específica a questão dos resíduos sólidos, estabelecendo critérios e proibições para seu acondicionamento, transporte e disposição final. Na cidade de Goiânia, por exemplo, no dia 26 de dezembro de 2005, foi promulgada a Instrução Normativa n^o 018 (Prefeitura de Goiânia, 2005), que estabelece, que os locais de destinação final dos resíduos da construção civil deverão ser previamente licenciados pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SEMMA), atendendo diretrizes técnicas e legislação pertinente ao licenciamento ambiental da atividade. Ficando vetada a disposição dos RCD em aterros de resíduos domiciliares, em encostas, corpos d'água ou em suas margens, lotes vagos, áreas protegidas por lei, áreas recobertas com vegetação de cerrado nativo ou em regeneração, áreas alagadiças ou com lençol freático aflorante, margens das rodovias, estradas vicinais e ferrovias e as demais áreas não licenciáveis. A SEMMA poderá autorizar, excepcionalmente, a disposição do entulho limpo para recuperação de áreas urbanas, de expansão urbana e rural, degradadas como erosões e voçorocas, mediante apresentação e aprovação de Projeto de Recuperação de Área Degradada (PRAD). A referida norma estabelece ainda, que a responsabilidade pelos resíduos da construção civil pertence ao gerador, sendo o transportador co-responsável a partir do momento da retirada dos resíduos do local de origem. Todas as transportadoras que exerçam suas atividades no município de Goiânia deverão obrigatoriamente proceder junto à SEMMA o Licenciamento Ambiental.

A reciclagem pode ser incentivada através de instrumentos legais que promovam o

interesse econômico do uso do material reciclado. Na Dinamarca, por exemplo, o governo elevou a taxa de disposição de material potencialmente reciclável em aterros controlados, tornando a reciclagem economicamente viável. Também no Brasil, nota-se que a reciclagem de resíduos sólidos está começando a receber apoio da legislação. Em Belo Horizonte, por exemplo, em 1996 a prefeitura propôs a isenção da taxa de habite-se para obras cujos resíduos fossem encaminhados à usina de reciclagem de resíduos sólidos da cidade.

Segundo Pinto (2001), a busca de nova destinação para os resíduos sólidos deve permitir flexibilidade de soluções, como a construção de parcerias entre o poder público e a iniciativa privada, parcerias entre municípios conurbados, recurso e equipamentos locados em municípios onde não se justifique a mobilização de investimentos e o aproveitamento de antigas instalações de mineração inseridas em áreas urbanas, tendo como exemplo a cidade de Chicago, onde extintas jazidas minerais são utilizadas, atualmente, para acumulação e reciclagem de resíduos sólidos da construção civil. Atualmente, as soluções adotadas para o gerenciamento do volume de resíduos, na maioria dos municípios, são emergenciais, sendo considerada uma gestão corretiva. A gestão corretiva caracteriza-se por englobar atividades não preventivas, repetitivas e custosas, que não surtem resultados adequados, e são, por isso, profundamente ineficientes.

Um modelo de gestão diferenciada dos resíduos de construção possibilita, em contraposição a todas as deficiências diagnosticadas na gestão corretiva, atingir a qualidade dos serviços e dos espaços urbanos e reconquista da qualidade ambiental desses espaços. A gestão diferenciada estrutura-se sobre a reciclagem intensa dos resíduos de construção, reforma e demolição, mas também possibilita novas formas de destinação para outros tipos de resíduos que com eles são descartados. A atração dos grandes volumes de resíduos sólidos e a centralização dos pequenos volumes captados, em áreas onde seja estruturada a reciclagem, permite conferir perenidade a tais áreas, substituindo-se a solução dos bota-foras emergenciais por centrais de reciclagem racionais. Qualquer sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos deve considerar, além das alternativas tecnológicas para minimizar os impactos ambientais decorrentes da geração dos resíduos, os aspectos sociais e econômicos envolvidos nessa questão. Sob esta ótica, os resíduos deverão ser organizados em grupos, de acordo com o tipo de tratamento a que devam ser submetidos, tendo em vista a re-incorporação ambiental ou o retorno ao ciclo produtivo da maior parcela possível (e viável, em cada caso) dos mesmos. Assim, os resíduos sólidos, ao invés de serem misturados a outros tipos de resíduos (domiciliares, comerciais ou públicos), se coletados diferenciadamente ou acumulados em

locais apropriados, poderão ser reciclados e adequadamente re-integrados ao meio, por meio de seu reaproveitamento “in natura” ou como matéria-prima em novas obras públicas ou privadas (Pinto, 2001).

2.2.3 A RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A reciclagem de resíduos sólidos pode ser realizada com instalações e equipamentos de baixo custo, apesar de existirem opções mais sofisticadas tecnologicamente. Havendo condições e se for feito um planejamento para a destinação dos resíduos sólidos, a reciclagem pode ser realizada na própria obra que gera o resíduo, reduzindo os custos de transporte. Os resíduos sólidos, que podem ser usados sozinhos ou misturados ao solo, devem ser processados por equipamentos de britagem até alcançar a granulometria desejada.

É possível contar com diversas opções tecnológicas, mas todas exigem áreas e equipamentos destinados à seleção, trituração e classificação dos materiais. As opções mais sofisticadas permitem produzir materiais a custos mais baixos, empregando menos mão-de-obra e com qualidade superior. Exigem, no entanto, mais investimentos e uma escala maior de produção. Por estas características, adequam-se, normalmente, a cidades de maior porte.

Segundo Agopyan, citado por Leal (2001), cidades com 50 mil habitantes já teriam resíduos sólidos suficientes para viabilizar uma central de reciclagem. Miranda & Selmo (2003) fizeram um alerta sobre a divulgação de que o agregado reciclado é mais barato que o agregado natural. Segundo esses autores, na grande maioria dos casos isso é verdade; mas é necessária uma produção mínima para que esta vantagem econômica exista, e de preferência deve-se agregar valor ao produto e ter muito bem delineado o mercado onde será oferecido. A Prefeitura Municipal de São Paulo, pioneira no Brasil em reciclagem em resíduos sólidos da construção civil, implantou em 1991 a primeira usina de reciclagem do Hemisfério Sul, conhecida como usina de Itatinga.

A montagem das instalações de reciclagem pode estar baseada na utilização de britadores de impacto ou de mandíbula, associados a moinhos de martelos. A diferença entre os dois tipos de instalação está principalmente na produtividade, maior nos britadores de impacto, e no formato dos grãos obtidos, com maior cubicidade nos britadores de impacto, e maior lamelaridade nos britadores de mandíbula. O equipamento mais flexível para britagem em termos operacionais é o britador de impacto, constituído por um rotor de eixo horizontal que proporciona impactos do material contra os próprios martelos e as placas de impacto internas. A granulometria de saída dos materiais pode ser controlada pela regulagem da

aproximação das placas de impacto junto aos martelos. O peneiramento deve ser feito por uma peneira do tipo vibratória e os materiais já classificados devem ser empilhados até posterior utilização. A área para a implantação de uma central de reciclagem deverá contar com energia elétrica, para acionar os motores elétricos dos equipamentos, água potável, além de obras civis para instalação dos equipamentos e obras de infra-estrutura de apoio. Em função de estudo de viabilidade pode-se adotar o uso de usinas móveis para britagem e classificação de resíduos sólidos.

Segundo John & Agopyan (2000), além das tecnologias de separação manual e magnética em uso no Brasil, existem tecnologias de classificação que se valem da diferença de massa específica das diferentes fases. Estas tecnologias permitem, inclusive, a separação dos agregados cerâmicos da fração concreto e rocha das frações porosas. Evidentemente, estes processos significam acréscimos no custo da produção do agregado. Uma etapa normalmente não incluída nas centrais brasileiras é a criação de pilhas de homogeneização dos agregados, de forma a diminuir a variabilidade natural do produto ao longo do processo. Uma das condições do sucesso das centrais é a construção de uma rede de captação de resíduos dentro da malha urbana capaz de atrair, via redução de distâncias de transporte, as caçambas de coleta bem como os coletores autônomos.

De acordo com Monteiro (2001), uma central de reciclagem de resíduos sólidos deve apresentar as seguintes características:

- receber somente resíduos inertes, não existindo, portanto, a possibilidade destes materiais liberarem poluentes;
- o alimentador do britador deve estar equipado com aspersores de água, visando minimizar a emissão de poeira, e revestimento de borracha, de forma a reduzir o nível de ruído, respeitando assim os limites estabelecidos pelos órgãos de controle ambiental.

A seqüência de operação deve ser:

- o entulho trazido pelos caminhões de coleta deve ser pesado na balança da usina de reciclagem, de onde deve ser encaminhado para o pátio de recepção;
- no pátio de recepção ele deve ser vistoriado superficialmente por um encarregado para verificar se a carga é compatível com o equipamento de trituração. Caso esteja fora dos padrões, não se permite a descarga do veículo, que é encaminhado para um aterro;
- caso seja compatível com o equipamento, o veículo faz a descarga no pátio, onde

também se processa a separação manual dos materiais inservíveis, como plásticos, metais e pequenas quantidades de matéria orgânica;

- a separação, apesar de manual, é feita com o auxílio de uma pá carregadeira que revira o material descarregado de modo a facilitar a segregação dos inservíveis pela equipe de serventes;

- os materiais segregados são classificados em comercializáveis (sucata ferrosa) e inservíveis (material restante), sendo depositados em locais separados para armazenamento e destinação futura;

- não devem ser aceitos materiais de grande porte, com dimensões maiores que a boca do alimentador, assim como blocos de concreto com ferragem embutida, que poderia prejudicar a operação do moinho e quebrar os martelos. Eventualmente, se a quantidade de blocos for pequena, os serventes alocados no pátio de recepção podem efetuar a quebra e separação dos mesmos;

- em nenhuma hipótese devem ser admitidos materiais contaminados por grande quantidade de plásticos, que podem danificar os equipamentos;

- os resíduos sólidos de pequenas obras, que normalmente vêm ensacados, são desensacados manualmente, prosseguindo-se com a operação de seleção e trituração;

- livre dos inservíveis, os resíduos sólidos devem ser levemente umedecidos através de um sistema de aspersão, de forma a minimizar a quantidade de poeira gerada pela trituração. Em seguida, devem ser colocados pela pá carregadeira no alimentador, que faz a dosagem correta do material;

- passando pelo alimentador, o material segue para o moinho, onde é triturado. Do britador, o material segue numa pequena esteira rolante equipada com um separador magnético, onde é feita a separação dos resíduos de ferro que escaparam da triagem e foram introduzidos no britador de impacto;

- após esta separação inicial, o material é encaminhado à peneira vibratória, que faz a separação do material nas granulometrias selecionadas;

- da peneira, cada uma das frações é transportada para o seu respectivo pátio de estocagem por meio de uma esteira transportadora, convencional, de velocidade constante.

As esteiras transportadoras são montadas sobre rodízios, de forma a permitir o seu deslocamento lateral em semicírculo no pátio de estocagem (Figura 2.2). Essa providência

evita que se tenha que efetuar a remoção das pilhas de material triturado com pá mecânica, permitindo a estocagem contínua de material, sem paralisar a operação. O deslocamento dos rodízios se faz sobre piso cimentado, dimensionado para suportar os esforços da correia. A operação de deslocamento da correia é feita manualmente pelos serventes alocados no pátio de estocagem e realizada toda vez que a pilha de agregados reciclados atinge a altura máxima permitida pela declividade da esteira. O material estocado deve ser mantido permanentemente úmido para evitar a dispersão de poeiras e para impedir seu carregamento pelo vento. A carga dos veículos que levam os agregados reciclados para aproveitamento é feita por uma pá carregadeira, similar à do pátio de recepção.

Em Belo Horizonte, na portaria das estações de reciclagem de resíduos sólidos, os materiais que chegam são inspecionados para verificar sua composição e grau de contaminação e, se aceitos, são encaminhados ao pátio da estação para seleção. A parcela rejeitada pela inspeção é destinada ao aterro sanitário. Os materiais aceitos são agrupados de acordo com a Secretaria de Limpeza Urbana nas seguintes classes:

- Classe 1 – Resíduo composto de materiais à base de concreto e argamassa sem a presença de impurezas tais como gesso, solo, metais, papel, vidro, plástico, madeira madura e matéria orgânica. Destina-se à preparação de argamassa e concreto sem função estrutural;

- Classe 2 – Resíduo de composição à base de produtos cerâmicos, em que se admite a presença de pequenas porções de solo, concreto e argamassa, sem a presença de impurezas. Destinam-se à base e sub-base de pavimentos, drenos, camadas drenantes e rip-rap e servem como material de preenchimento de valas.

Segundo Moreira et al. (2006), em 2006 existiam 16 unidades de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil em operação no Brasil, localizadas nas cidades de Belo Horizonte, São Paulo, Ribeirão Preto, São José dos Campos, Londrina, Piracicaba, Guarulhos, Ribeirão Pires, São José do Rio Preto, Macaé, Brasília, Rio de Janeiro, São Gonçalo, Vinhedo e Uberlândia, que passava a integrar o grupo para contribuir com o desenvolvimento efetivamente sustentável das cidades brasileiras.

Os agregados reciclados resultantes do beneficiamento dos resíduos da construção civil apresentam aspectos econômicos viáveis para alguns tipos de aplicação, se forem comparados os preços médios finais da produção dos mesmos e o os preços dos materiais naturais usualmente utilizados. Segundo dados levantados pela Comissão de Meio Ambiente

do Sindicato da Indústria da Construção de Minas Gerais, o valor final do metro cúbico de agregado reciclado foi igual a R\$ 8,00, em Outubro de 2005 (SINDUSCON – MG, 2005).



Figura 2.2 - Usina de reciclagem de resíduos sólidos de Estoril - Belo Horizonte (Leal, 2001).

2.2.4 CAMPOS DE APLICAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS

Segundo Blumenschein (2004), os resíduos classe A e B, de acordo com a resolução Nº 307 do CONAMA, são os resíduos com possibilidades de serem absorvidos por processos de reciclagem. Os resíduos classe B, ou seja, papel, papelão, metal, plástico, entre outros, são possíveis de serem absorvidos por processos de reciclagem em indústrias fora da cadeia produtiva da indústria da construção civil. Já os resíduos classe A, ou seja, concreto, argamassa, materiais cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, etc.), podem ser absorvidos pela cadeia principal da indústria da construção civil. Esses resíduos podem ser utilizados na execução de bases e sub-bases de pavimentos, no preparo de concretos sem função estrutural, na confecção de blocos para alvenaria e outros. A metodologia para identificação da aplicação dos resíduos sólidos, aplicada especialmente aos resíduos classe A, vem respeitando alguns passos fundamentais, segundo Hendriks (2000) e John & Agopyan (2000). Entre eles tem-se:

- a caracterização dos resíduos com base em análises químicas, físicas e de microestrutura, visando inclusive detectar possíveis riscos ambientais relacionados, principalmente, a metais tóxicos;

- a caracterização dos resíduos permite identificar a relação entre fatores tecnológicos com a estrutura de poros; e da relação entre estrutura dos poros e propriedades do material;

- com base na análise anterior, parte-se para identificação das possíveis aplicações dos resíduos de acordo com as necessidades da aplicação especificada. O processo de avaliação das possíveis aplicações requer estudos de desempenho dos resíduos de acordo com a aplicação definida;

- uma vez definidos a aplicação e o processo de produção do resíduo, também se define a análise do seu ciclo de vida e, portanto, a avaliação de seus diferentes impactos ambientais. Esta análise inclui os impactos que podem ser identificados durante o processamento, aplicação e pós-aplicação, considerando possíveis riscos ao solo, lençóis freáticos, ar e, dependendo do processo de aplicação, também aos usuários.

2.3 APLICAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

2.3.1 PANORAMA GLOBAL

Segundo Carneiro et al. (2001) a utilização de resíduos de construção reciclados em várias das camadas dos pavimentos tem-se mostrado viável na base tecnológica existente. Em várias cidades do Brasil e no exterior, tem-se utilizado agregados reciclados em pavimentação e seus resultados satisfatórios vêm demonstrando a boa adequação desse material.

Nos Estados Unidos, Japão, França, Itália, Inglaterra, Alemanha e outros países a reciclagem de resíduos sólidos já se consolidou, com centenas de unidades instaladas. Os governos locais dispõem de leis exigindo o uso de materiais reciclados na construção e em serviços públicos. Segundo dados levantados por Leal (2001), o país com melhor índice de reaproveitamento de material é a Holanda, com valores em torno de 80%. Esse exemplo serve mais como modelo de filosofia, não como referência prática, pois a falta de recursos naturais no país é tão grande que eles importam areia da Sibéria e resíduos sólidos da Inglaterra. Segundo especialistas, uma das normas aplicadas na Holanda prevê que concretos com até 20% de agregados reciclados são considerados normais. Cerca de 95% de toda a base dos pavimentos das ruas na Holanda é feita com restos da construção civil.

As principais vantagens da utilização dos resíduos sólidos da construção civil em pavimentação, segundo Zordan (1997), são:

- a pavimentação é a forma de reciclagem que exige menor utilização de tecnologia, o que implica em um menor custo do processo;

- a pavimentação permite a utilização de todos os componentes minerais dos resíduos sólidos (concretos, argamassas, materiais cerâmicos, areias, pedras, etc.), sem a necessidade de separação de nenhum deles;

- ocorre uma economia de energia no processo de moagem dos resíduos sólidos (em relação à sua utilização em argamassas), uma vez que parte do material permanece em granulometrias graúdas;

- possibilidade de utilização de maior parcela dos resíduos sólidos produzidos, como o proveniente de demolições e de pequenas obras que não suportam o investimento em equipamentos de moagem / trituração;

- maior eficiência do resíduo quando adicionado ao solo, em relação à mesma adição feita com brita. Enquanto a adição de 20% de resíduos sólidos reciclados ao solo gera um aumento de 100% do ISC, na mistura com brita natural, o aumento do ISC só é perceptível com dosagens a partir de 40%.

Segundo Trichês & Kryckyj (1999), o agregado reciclado apresenta propriedades interessantes para utilização na construção de pavimentos. Do ponto de vista geotécnico é considerado um material não plástico, o que permite sua utilização em locais com presença de água, por gerar pouca ou nenhuma lama. Pode, ainda, ser utilizado como redutor de plasticidade, contribuindo, assim, na estabilização dos solos. Apresenta, também, expansibilidade baixa ou nula, ou seja, mesmo sob saturação, não ocorre expansão das camadas compactadas.

2.3.2 NORMAS BRASILEIRAS EM VIGOR

A norma brasileira NBR 10.004 (ABNT, 2004a) classifica os resíduos sólidos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente. A norma define resíduos sólidos como sendo os resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. São incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistema de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções

técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. A classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes ou características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. Segundo a norma, os resíduos sólidos são classificados em:

- classe I – Perigosos – São aqueles que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podem apresentar periculosidade à saúde pública e ao meio ambiente. E também por apresentarem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;

- classe II – Não perigosos;

- classe II A – Não inertes – aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;

- classe II B – Inertes – quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a NBR 10.007 (ABNT, 2004b), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10.006 (ABNT, 2004c), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os aspectos de, cor, turbidez, dureza e sabor.

Quanto à natureza ou origem os resíduos sólidos podem ser agrupados em cinco classes: lixo doméstico, lixo comercial, lixo público, lixo de fontes especiais e lixo domiciliar especial. Este último grupo compreende os entulhos de obras, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes e pneus (IBAM, 2001). Os entulhos de obra, também conhecido como resíduos da construção civil, só estão enquadrados nesta categoria por causa da grande quantidade gerada e pela importância que sua recuperação e reciclagem vem assumindo no cenário nacional.

A norma brasileira NBR 15115 (ABNT, 2004d) estabelece critérios para a execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos, bem como camadas de revestimento primário, com agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil. De acordo com a norma, agregados reciclados são materiais granulares obtidos por britagem ou beneficiamento mecânico de resíduos da construção civil, que são provenientes de

construções, reformas, reparos ou demolições de obras de construção civil, de acordo com a resolução CONAMA Nº 307/2002, nos quais incluem-se tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, agregados pétreos, argamassas, telhas, camadas asfálticas de pavimentos e outros, adequados à execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base, bem como camada de revestimento primário. Com base na NBR 15115, os agregados reciclados devem atender aos seguintes requisitos:

- devem ser isentos de madeiras, vidros, plásticos, gessos, forros, tubulações, fiações elétricas, papéis ou quaisquer materiais orgânicos ou não inertes, classificados como B, C e D pela Resolução CONAMA Nº 307;

- devem apresentar curvas granulométricas, obtidas por meio do ensaio da NBR 7181 (ABNT, 1984b), bem graduadas, não uniformes, com coeficiente de não uniformidade $C_U \geq 10$;

- a porcentagem que passa na peneira Nº 40 (0,42 mm) deve estar entre 10 e 40%;

- serem classificados quanto ao tipo de emprego possível na execução de camadas de pavimentos, segundo parâmetros de Índice de Suporte Califórnia (ISC), obtidos por meio do ensaio específico, conforme abaixo discriminado:

- material para reforço de subleito: $ISC \geq 12\%$, expansão $\leq 1\%$ (energia de compactação normal);

- material para execução de sub-base: $ISC \geq 20\%$, expansão $\leq 1\%$ (energia de compactação intermediária);

- material para execução de base: $ISC \geq 60\%$, expansão $\leq 0,5\%$ (energia de compactação intermediária). É permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo padrão de 80 kN no período de projeto;

- no caso de materiais que não atendam às exigências do item anterior, estes poderão ser estabilizados granulometricamente ou com adição de cimento ou cal hidratada. Nestes casos, deverão ser moldados corpos de prova com a energia de compactação especificada e os mesmos deverão ser submetidos ao ensaio de resistência a compressão simples, após 7 dias de cura, e deverão apresentar resistência de no mínimo 2,1 MPa;

- a porcentagem máxima admissível, em massa, para grãos de forma lamelar é de 30%;

- dimensão característica máxima dos grãos: 63,5 mm (tolerância de 5% da porcentagem retida na peneira de 63,5 mm, limitada a 2/3 da espessura da camada

compactada;

- materiais indesejáveis de grupos distintos: máximo de 3% em massa;
- materiais indesejáveis de mesmo grupo: máximo de 2% em massa;
- não são permitidos materiais nocivos ao meio ambiente ou à saúde do trabalhador.

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

Segundo a NBR 15.116 (ABNT, 2004e), os resíduos sólidos da construção civil classificados como classe A, oriundos de áreas de reciclagem na forma de agregados, destinados a aplicações em obras de pavimentação viária ou preparo de concreto sem função estrutural, classificam-se em:

- agregado de resíduo de concreto (ARC) – É o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas;
- agregado de resíduo misto (ARM) – É o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo classe A, composto na sua fração graúda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

A determinação do percentual de grãos compostos por fragmentos à base de cimento Portland e rochas é feita lavando-se uma amostra de aproximadamente 4 kg na peneira de malha igual a 4,8 mm e colocando a mesma para secar em estufa com 105 ± 5 °C até constância de massa. Após a secagem a amostra deve ser resfriada, feita a separação dos grãos, determinação das massas e percentuais (ABNT, 2004e).

A especificação de serviço ETS 001 da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP, 2003) também define critérios para a execução de camadas de pavimentos com a utilização de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil de forma similar à ABNT. A realização de estudos regionais e locais, certamente servirá para validar ou ajustar as prescrições das normas técnicas vigentes.

2.3.3 ALGUMAS PESQUISAS E EXPERIÊNCIAS REALIZADAS

Segundo Bodi et al. (1995), em 1989 começou-se a estudar na Superintendência das Usinas de Asfalto da Prefeitura Municipal de São Paulo, as possíveis formas de aproveitamento dos resíduos sólidos da construção civil gerados na cidade, para aplicação em pavimentação urbana. A primeira preocupação do estudo era de aproveitamento dos resíduos sólidos gerados de modo a possibilitar sobrevida aos aterros sanitários que já se encontravam com uma curta previsão de vida. Na época, os estudos foram orientados pelos seguintes fatores:

- várias eram as vias não pavimentadas em São Paulo, onde a população utilizou entulhos de construção civil como revestimento primário do subleito, visando minimizar a ocorrência de lama nos períodos chuvosos ou poeiras nos períodos de estiagem, sendo que estas, apesar de não receberem uma pavimentação definitiva, passaram a requerer menores intervenções para manutenção do trânsito local;

- verificando-se os arquivos técnicos prefeitura, constatou-se que no ano de 1984, a execução da rua Gervásio da Costa, na região oeste de São Paulo, com resíduos sólidos da construção civil em sua camada de reforço do subleito, a qual teve acompanhamento tanto executivo como de desempenho pelo IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo apresentou desempenho altamente satisfatório. O tipo de resíduos sólidos utilizado constituiu-se basicamente de solos, pedaços de tijolos e telhas de barro cozido, blocos de concreto, argamassas, ladrilhos cerâmicos, concreto, madeira e plástico. Sua execução deu-se em duas camadas de 10,0 cm, sendo seu espalhamento efetuado com trator de esteiras e compactação por meio de rolo vibratório tipo CA-25.

Na pesquisa realizada por Bodi et al. (1995) foram realizadas coletas de resíduos sólidos em vários pontos de despejo clandestino na cidade de São Paulo e feita sua classificação como entulho branco (predominância de concreto e argamassa), vermelho (predominância de materiais cerâmicos), misto (resíduos brancos e vermelhos) e com contaminação (resíduos com presença expressiva de solos, madeiras, plásticos, papéis, etc.). Após a classificação os materiais foram britados e realizados ensaios de ISC; os ensaios foram realizados com os resíduos puros e com os resíduos mistos representaram 80% das amostras coletadas, os mesmos foram utilizados para realizar misturas solo e agregados reciclados em intervalos percentuais de 10 em 10%, indo desde o solo puro (100%) até os agregados reciclados puros, de forma a obter-se curvas de variação de capacidade de suporte (ISC),

umidade ótima, massa específica aparente seca e expansão. Essas misturas de agregados reciclados e solo foram chamadas pelos autores de estabilização dos solos e tiveram o objetivo de melhorar a capacidade de suporte dos mesmos. Esse procedimento foi realizado com dois tipos de solo, um siltoso (saprolítico) e outro argiloso (de comportamento laterítico).

Segundo os autores, quando comparados os resultados de ISC entre misturas de solos e agregado natural britado com solo e agregados reciclados britados, verificou-se que no segundo caso a ação estabilizante na mistura começa a ser sentida em baixas porcentagens (20 a 30%), enquanto que no caso das misturas com solo e agregado natural britado, o aumento de suporte ocorre somente a partir de aproximadamente 40% de agregado, ou seja, com entulho as misturas atingem valores de ISC equivalentes em menores porcentagens que com o agregado britado. Os autores atribuíram essa diferença a dois fatores: o agregado reciclado apresentar uma carga aglomerante, tais como cimentos e cales ainda ativos e à ausência de finos, no caso do agregado natural britado. Os resultados obtidos de ISC, para os resíduos puros estão apresentados na Tabela 2.1. As Figuras 2.3 e 2.4 apresentam a variação dos valores de ISC em função da quantidade de solo nas dosagens. Além dos bons resultados de ISC, foi verificado que os resíduos sólidos, sendo materiais não expansivos, ao serem misturados ao solo, contribuíram para a redução da taxa de expansão das misturas.

Tabela 2.1 - Parâmetros de compactação e ISC de amostras de resíduos sólidos puros do município de São Paulo (Modificado – Bodi et al., 1995).

MATERIAL	CBR (%)	EXPANSÃO (%)	γ_d (kN/m³)	w_{ot} (%)
ENTULHO VERMELHO	63	0,09	16,57	18,3
ENTULHO MISTO	98	0,01	17,55	14,8
ENTULHO BRANCO	111	0	18,83	14,4

Obs.: $g = 9,807 \text{ m/s}^2$

Ribeiro & Serra (2001) realizaram coletas manuais de resíduos sólidos brancos (concreto e argamassa) e vermelhos (telhas de barro, tijolos e outros materiais cerâmicos), em contêineres e em áreas abertas, no município de Goiânia – Goiás. Em seguida foi feita a britagem das duas amostras em laboratório, separadamente, produzindo-se duas amostras de agregados reciclados, uma de resíduos brancos e outra de resíduos vermelhos, para a realização de ensaios de laboratório. Foram realizados ensaios de compactação (energia intermediária) e ISC com as amostras puras, misturadas uma com a outra (50% de cada) e cada uma com a adição de 20% de um solo do tipo CL – Argila Arenosa (Sistema Unificado)

ou A-7-5 – Solos argilosos (Classificação TRB). Em termos de textura, as amostras enquadraram-se nas faixas A ou C da especificação de serviço ES 303 – Base estabilizada granulometricamente (DNER, 1997a). A Figura 2.5 apresenta os valores de ISC obtidos pelos autores.

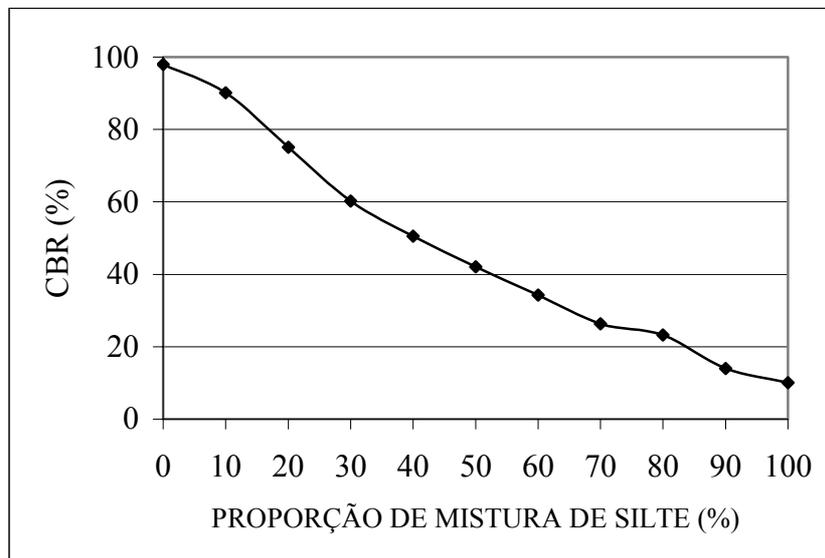


Figura 2.3 - Curva de ISC - mistura de entulho de São Paulo com solo siltoso (Modificado - Bodi et al., 1995).

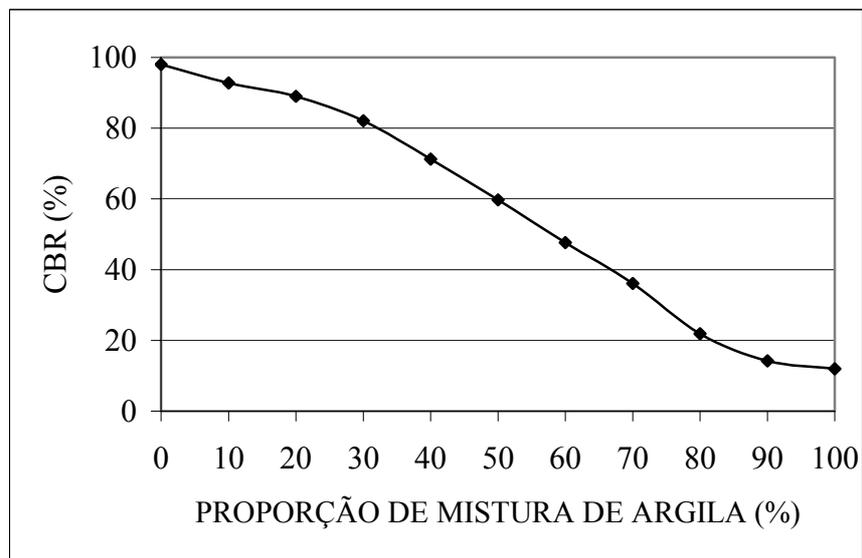


Figura 2.4 - Curva de ISC – Mistura de entulho de São Paulo com solo argiloso (Modificado - Bodi et al., 1995).

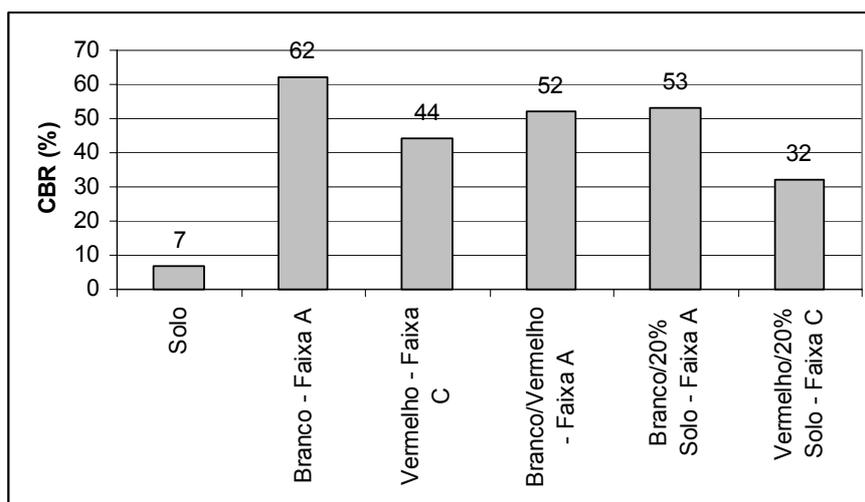


Figura 2.5 - Valores de índice de suporte Califórnia – ISC de agregados reciclados de Goiânia (Modificado – Ribeiro & Serra, 2001).

Carneiro et al. (2001), dentro do Projeto Entulho Bom, desenvolveram estudos laboratoriais para verificar a viabilidade do uso de agregados reciclados de Salvador - Bahia, em pavimentos. Esses estudos buscaram contribuir para o aumento da oferta de pavimentação de vias necessárias à expansão urbana e à fundamentação no meio técnico a respeito dessa forma de reciclagem. A avaliação da viabilidade do uso do agregado reciclado de Salvador, em camadas de base e sub-base de pavimentos, consistiu na:

- determinação das características físicas dos solos e do agregado reciclado de Salvador para utilização em base e sub-base de pavimentos;
- avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais produzidos;
- identificação das proporções mais adequadas dos materiais e análise das diferentes situações em que é viável a utilização do agregado reciclado em pavimentação, de modo que suas propriedades sejam maximizadas para o uso.

Foram utilizados dois solos geneticamente distintos e típicos da região de Salvador: um solo de comportamento laterítico, proveniente da formação Barreiras, e um solo de comportamento não laterítico, do horizonte pedológico C saprolítico. Foi utilizado, também, entulho de Salvador reciclado (britado e classificado) nas frações agregado reciclado miúdo (material passante na peneira 4,8 mm) e agregado reciclado graúdo (material passante na peneira 19 mm). O agregado reciclado miúdo e o agregado reciclado graúdo eram predominantemente constituídos de areia (grossa, média e fina) e pedregulho, respectivamente, ambos apresentando baixos percentuais granulométricos de argila e silte. A Tabela 2.2 apresenta as características dos materiais estudados e a Tabela 2.3 alguns dos

parâmetros de compactação e ISC determinados (energia de compactação intermediária).

Tabela 2.2 – Caracterização de agregados reciclados de Salvador - Bahia (Modificado - Carneiro et al., 2001).

PROPRIEDADES		MÉTODO UTILIZADO	UN	SOLO LATERÍTICO	SOLO SAPROLÍTICO	AG. REC. MIÚDO	AG. REC. GRAÚDO
Análise Granulométrica	Pedregulho	NBR 7181	%	0	0	0	50
	Areia		%	80	32	82	44
	Silte		%	1	30	2	3
	Argila		%	19	38	16	3
Coeficiente de Permeabilidade		Hazen	-	-	-	-	2,22X10 ⁻²
Classificação AASHTO / HRB (índice de grupo)		AASHTO / HRB	-	A-2-4 (0)	A-7-5 (5)	A-2-4 (0)	A-2-4 (0)
Limite de Liquidez		NBR 6459	%	20	62	NL	-
Limite de Plasticidade		NBR 7180	%	5	42	NP	-
Índice de Plasticidade		NBR 7180	%	15	20	-	-
Equivalente de Areia		NBR 12052	%	14	2	68	-
Massa Unitária		NBR 7251	g/cm ³	1,27	1,05	1,30	1,07
Massa específica dos sólidos		NBR 6508	g/cm ³	2,59	2,65	2,59	2,19
Abrasão Los Angeles		NBR 6465	%	-	-	-	45

Tabela 2.3 - Comparação de resultados de compactação e ISC de misturas contendo agregado reciclado graúdo em Salvador – Bahia (Modificado - Carneiro et al., 2001).

MATERIAIS	UMIDADE ÓTIMA (%)	MASSA ESPECIF. SECA (g/cm ³)	CBR (%)	EXPANSÃO (%)
100% Solo Laterítico	9,3	1,8	114	0,14
30% Solo Laterítico / 70% Ag. Rec. Graúdo	14,2	1,8	112	0
100% Solo Sapolítico	22,0	1,4	25	5,69
30% Solo Sapolítico / 70% Ag. Rec. Graúdo	25,8	1,5	50	0,65
100% Ag. Rec. Miúdo	16,0	1,6	70	0
30% Ag. Rec. Miúdo / 70% Ag. Rec. Graúdo	16,2	1,7	100	0

Os autores concluíram que os resultados obtidos comprovaram que os agregados reciclados de Salvador, tanto na fração miúda quanto na graúda, apresentaram-se como material adequado para execução de bases e sub-bases de pavimentos. Em estudos realizados em outras cidades também foi verificado o bom desempenho dessa matéria-prima alternativa em camadas de pavimentos. Contudo, compreende-se a importância da realização de estudos específicos para os materiais regionais, visto que tanto o solo quanto o agregado reciclado possuem características próprias, que podem variar de acordo com cada região e, portanto, as

experiências realizadas em outras localidades não podem ser generalizadas. A utilização do agregado reciclado em pavimentos pode apresentar vantagens tanto em relação a aspectos técnico-econômicos, quanto em relação a questões ambientais e sociais. Essa forma de reciclagem do entulho contribui para o desenvolvimento sustentável local, reduzindo a extração de matérias-primas não renováveis, otimizando o uso dos aterros e contribuindo para aumentar a oferta de infra-estrutura urbana.

Kryckj & Trichês (2000) estudaram locais de deposição de resíduos sólidos na cidade de Florianópolis, fizeram a caracterização dos diferentes tipos de resíduos descartados e coletaram amostras para a realização de ensaios de laboratório. Foram formadas amostras compostas de resíduos vermelhos, resíduos brancos, mistura dos dois resíduos e dos dois tipos de resíduos com dois tipos de solos, sendo um uma areia siltosa e um solo argiloso. O caminho de acesso a um dos locais estudados, com revestimento primário em resíduos sólidos, foi utilizado como pista experimental e o ensaio com o penetrômetro dinâmico de cone (DCP) foi feito para avaliar a capacidade de carga dos materiais “in situ”, compactados pelo tráfego de caminhões. Em laboratório, os resíduos coletados foram britados e com os mesmos e as amostras de solo foram realizados ensaios de granulometria, compactação, ISC com e sem saturação e DCP, nos corpos de prova compactados. O ensaio de DCP foi feito para obter correlações entre o índice de penetração (DN) e o ISC. Os ensaios de ISC foram realizados com dezenove dosagens diferentes, combinando amostras de resíduos brancos, vermelhos e os dois tipos de solos. A Figura 2.6 apresenta a distribuição granulométrica das amostras utilizadas para compor as dosagens. A Figura 2.7 apresenta os valores de ISC obtidos, para a energia do Proctor normal. As Equações 2.1 e 2.2 apresentam as correlações obtidas entre os valores de DN e o ISC, medidos em laboratório, para as amostras com e sem imersão, respectivamente. Após o estabelecimento das correlações, os autores fizeram uma verificação das mesmas, a partir da realização de uma série de ensaios de DCP em campo e encontraram bons resultados.

- Para amostras com imersão:

$$CBR = 121,02 \times DN^{-0,659} \quad (2.1)$$

- Para amostras sem imersão:

$$CBR = 126,35 \times DN^{-0,6354} \quad (2.2)$$

Onde:

ISC = índice de suporte Califórnia (%);

DN = índice de penetração do penetrômetro dinâmico de cone – DCP (mm/golpe)

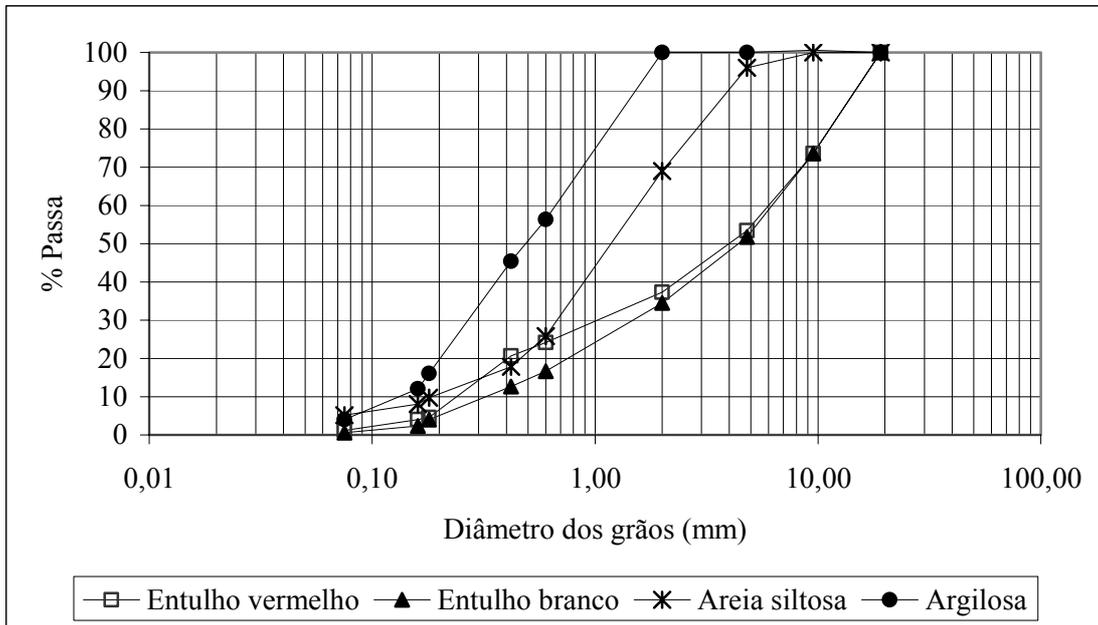


Figura 2.6 - Distribuições granulométricas de agregados reciclados de Florianópolis – SC (Modificado - Kryckyj & Trichês, 2000).

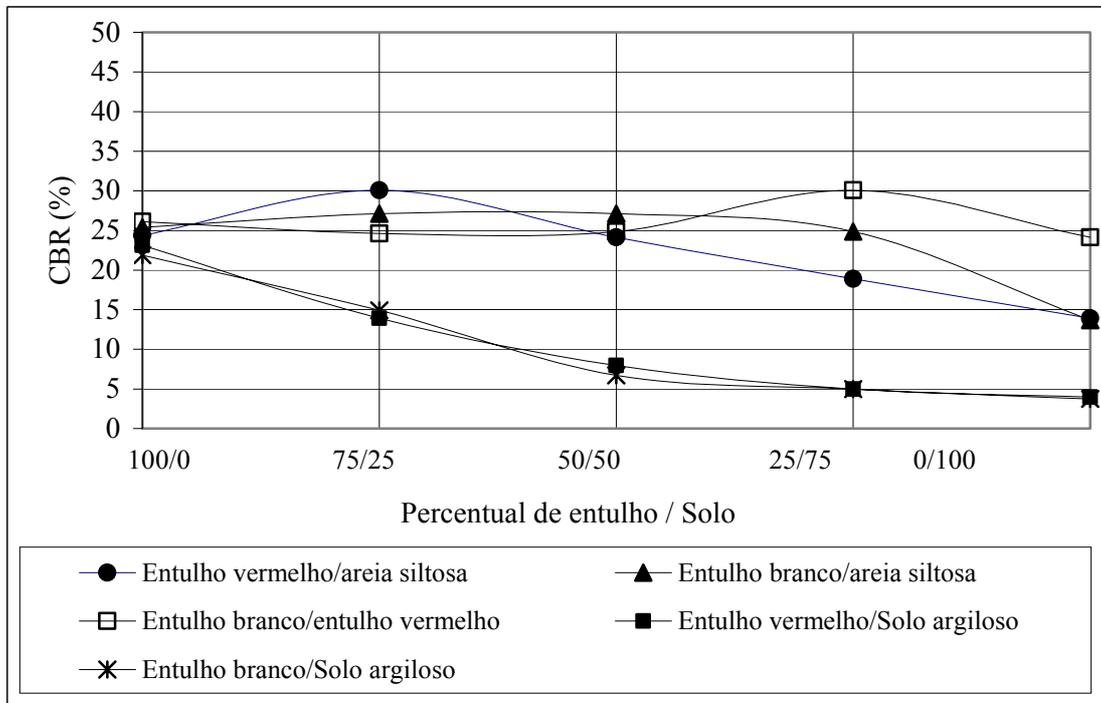


Figura 2.7 - Valores de ISC de agregados reciclados de Florianópolis – SC (Modificado - Kryckyj & Trichês, 2000).

Motta (2005) analisou em laboratório os aspectos físicos e o comportamento mecânico de agregados reciclados da cidade de São Paulo, a serem utilizados em camadas de base, sub-base ou reforço do subleito de pavimento, em substituição aos materiais convencionais, com enfoque em vias urbanas de baixo volume de tráfego. O estudo envolveu a análise de agregados reciclados “*in natura*”, além de sua mistura com 4% de cal ou 4% de cimento Portland, como forma de promover um aumento da resistência. Além disso, foram realizados alguns ensaios com brita graduada (material comumente empregado em pavimentos), a fim de comparar os resultados. A autora concluiu que o agregado reciclado analisado é promissor o uso em pavimentação, dadas suas propriedades físicas e mecânicas satisfatórias, comparáveis com tradicionais materiais estabilizados granulometricamente ou mesmo a brita graduada simples. Complementarmente, a adição de cal ou cimento Portland apresentou-se como excelente alternativa quanto ao requisito de aumento de resistência do material reciclado. Na pesquisa foi estudado o agregado proveniente da usina recicladora da Prefeitura Municipal de São Paulo, com grãos de dimensão característica igual ou inferior a 63,5 mm. O comportamento mecânico do agregado reciclado foi avaliado pelos ensaios de índice de suporte Califórnia (ISC ou ISC) com a energia intermediária, resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência.

Segundo Motta (2005), a fim de verificar se o agregado reciclado estudado poderia sofrer reações pozolânicas que implicariam em possíveis ganhos de resistência nos ensaios mecânicos, foi realizado o ensaio denominado de Método de Chapelle Modificado, que consiste em colocar 1g da parte fina da amostra a ser analisada juntamente com 1g de óxido de cálcio (CaO) em uma solução aquosa, que permanece em banho-maria a 97°C e sob agitação, por um período de 16 horas. O resultado dessa experiência é expresso em mg de CaO/g consumido, sendo que para ser considerado uma pozolana o material deve apresentar um índice de consumo de óxido de cálcio de pelo menos 330mg, segundo Raverdy et al. (1980). Segundo a autora, embora os valores encontrados tenham sido inferiores aos 330mg especificados (da ordem de 100 a 150 mg), não se pode descartar que a reatividade pozolânica do agregado reciclado não possa influenciar positivamente na resistência mecânica do pavimento. Isto porque os 330 mg de consumo de CaO são especificados para o concreto, cujos valores de resistência são extremamente elevados. Desta forma, um ganho de resistência que pode ser considerado baixo para o concreto pode não o ser para um pavimento. Segundo a autora, Hamassaki et al. (1996) também obtiveram valores de atividade pozolânica abaixo dos 330mg especificados e mencionaram que isto não anula a possibilidade de se contar com esse

efeito, principalmente com relação aos materiais de origem cerâmica, mas sugere que se busquem meios de adequar estes materiais e avaliar até quanto, a pozolanicidade, ainda que pequena, pode contribuir no desempenho. Tanto os valores de ISC como os de módulo de resiliência obtidos dos agregados reciclados naturais ensaiados por Motta (2005), apresentaram ganho de resistência com o tempo. Segundo a autora, isso dá indícios de que houve reação pozolânica por parte das partículas que ainda possuíam potencial reativo.

Guimarães et al. (2004) desenvolveram uma pesquisa com o objetivo de verificar a viabilidade técnica da aplicação de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil, do município de Goiânia, em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Na pesquisa foram realizados ensaios laboratoriais baseados no método de dosagem Marshall, com dois tipos de agregados reciclados e também com um agregado natural de micaxisto, comumente utilizado no município, para fins de comparação. As dosagens estudadas foram enquadradas na faixa C da especificação de serviço ES 313 (DNER, 1997b) e para tanto, receberam a adição de areia artificial de micaxisto. Dos agregados reciclados estudados, um era constituído apenas de grãos de resíduos de concreto britado (ARC) e o outro por grãos provenientes de resíduos diversos, de concreto, materiais cerâmicos e argamassas (ARM). Apesar de o agregado reciclado misto não ter atendido a prescrição da norma com relação ao desgaste Los Angeles (o valor máximo é de 40% e a amostra apresentou desgaste de 51 e 45% para duas diferentes granulometrias ensaiadas), a dosagem Marshall foi realizado com o mesmo. Foi utilizado como ligante o CAP 20 (viscosidade) também denominado de CAP 50/70 (penetração) e os ensaios foram realizados aplicando-se 50 e 75 golpes.

Os autores verificaram que mesmo para um alto consumo de CAP (até 13%) a dosagem com agregado reciclado misto (ARM) apresentou alta porcentagem de vazios (10,6 a 18,7%) e conseqüentemente baixa relação betume/vazios (RBV), que variou de 43 a 66%, ou seja, valores distantes dos especificados pela ES 313 (DNER, 1997b), que são respectivamente de 3 a 5% para a porcentagem de vazios e de 75 a 82% para a relação betume/vazios. O alto consumo de CAP e a alta porcentagem de vazios apresentados pelas dosagens de agregado reciclado misto está ligada à alta porosidade e, conseqüentemente, alta absorção que o mesmo apresenta. Silva (2004) verificou, em ensaios realizados com amostras do município, que este tipo de agregado reciclado apresenta porosidade em torno de 24% e absorção de até 15%, enquanto que agregados naturais normalmente apresentam porosidade em torno de 3% e absorção em torno de 1%. As dosagens realizadas utilizando agregados reciclados obtidos de resíduos de concreto (ARC) demonstraram que tecnicamente é possível

utilizar este tipo de agregado em misturas betuminosas do tipo CBUQ, em revestimentos de pavimentos flexíveis. A viabilidade econômica deste tipo de agregado depende das condições regionais, em alguns casos, onde há a escassez de agregados naturais, a utilização dos mesmos pode tornar-se viável. O teor ótimo de ligante encontrado igual a 8% é superior à maioria das dosagens que utilizam agregados naturais, no entanto a utilização de agregados reciclados pode trazer vários benefícios ao meio ambiente, podendo-se destacar a preservação de jazidas, a deposição indiscriminada deste material e o custo que esta deposição causa à maioria das cidades brasileiras.

Segundo Frota et al. (2005), a falta de material pétreo para aplicação na construção civil consiste num mal típico de regiões de bacia sedimentar. Nessas áreas o processo de intemperismo provoca diminuição no grau de consolidação das rochas e formação de uma espessa camada de solo residual, o que dificulta a extração das mesmas. No caso da construção de pavimentos, a ausência de materiais pétreos obriga a adoção de soluções que, costumeiramente, não apresentam resultados técnicos apreciáveis. Uma das soluções mais utilizadas na cidade de Manaus é o uso do seixo rolado como agregado graúdo. Contudo, esta opção tem dois infortúnios: sob a ótica técnica, revestimentos asfálticos confeccionados com seixo apresentam maior susceptibilidade às patologias como ondulações, deflexões e rupturas prematuras, uma vez que o seu formato esférico e a sua textura superficial lisa diminuem o ângulo de atrito interno e sob a ótica ambiental, por conta do impacto causado pela dragagem do leito dos rios. Os autores estudaram o comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo concreto betuminoso usinado a quente, produzidas integralmente com resíduos sólidos da construção civil processado, quando submetidas ao ensaio de fluência uniaxial estática (*creep* estático). Foram utilizados corpos-de-prova confeccionados somente com entulho (resíduo da construção civil), advindo de demolições, devidamente britado conforme a granulometria desejada. As misturas asfálticas foram confeccionadas com o Cimento Asfáltico de Petróleo classificado como CAP 50/70. As dosagens foram feitas levando em consideração as indicações constantes na Superpave – *Superior Performance Pavement* (SHRP, 1995). Foram elaboradas três misturas distintas entre si por passarem acima (Grupo A), abaixo (Grupo B) ou através da zona de restrição (Grupo C). Para obtenção dos corpos-de-prova optou-se por fracionar todo o entulho conforme as peneiras estabelecidas pela Superpave. As principais vantagens desse procedimento foram: flexibilidade quanto às faixas granulométricas desejadas, melhor controle do material utilizado na mistura e obtenção de máximo desempenho do mesmo. Para as três misturas foi utilizado o teor de ligante de 8%. Segundo

dados da literatura, o processo de envelhecimento da mistura asfáltica ocorre segundo duas fases: a primeira, a curto prazo, durante a fase de construção do revestimento, quando a mistura ainda está quente e se dá, essencialmente, pela perda de componentes voláteis e oxidação do asfalto; a segunda, a longo prazo, se dá em campo, durante a vida útil do revestimento, ocorrendo por ação conjunta da oxidação dos componentes do ligante, perda de componentes oleosos por absorção do agregado ou por ação da radiação solar (em especial na superfície).

As misturas ensaiadas por Frota et al. (2005) foram submetidas a envelhecimento em estufa, não ventilada, a temperatura de 60 °C e na pressão atmosférica, pelos tempos de 2h, 4h, 8h, 12h e 24h. Tal processo não é capaz de precisar a idade de serviço que os corpos foram submetidos. No ensaio de compressão uniaxial estática (creep estático) pode-se correlacionar deformações $\epsilon(t)$ com tempo de aplicação de uma tensão constante. Utilizou-se uma prensa destinada ao ensaio de adensamento, uma vez que esta cumpre bem o intuito de manter constante a pressão nas faces do corpo-de-prova (Merighi & Fortes, 2003). As deformações foram medidas por meio de dispositivo LVDT (*linear variable differential transformer*), com precisão de 0,01mm, sendo as leituras enviadas para um aparelho de aquisição digital de dados, possibilitando medições em intervalos de tempo inferiores a 1s. A tensão de ensaio empregada foi de 0,3MPa, abaixo das pressões comuns de enchimento de pneus para ensaios de trilha de roda, de forma a submeter a mistura aos limites de comportamento linear. Os corpos-de-prova foram ensaiados à temperatura de 27°C. Os resultados desses ensaios não mostraram diferença significativa entre os vários tempos de envelhecimento estudados, optando-se então por trabalhar com tempos mais espaçados entre si, sendo adotados os tempos de 0h, 8h e 24h. A perda de material volátil tende a levar a mistura para o comportamento mais rígido, uma vez que os componentes químicos da sua fração viscosa estão sendo perdidos. Um outro ponto que evidencia tal comportamento é o patamar onde o *creep* se torna mais próximo de valores constantes ser obtido para valores menores de deformação. O aumento da rigidez provocado pelo envelhecimento do ligante nas misturas torna o revestimento mais susceptível a microtrincas quando solicitado pelo tráfego. Tal fato leva a uma sensível diminuição na vida de fadiga deste material.

Segundo Frota et al. (2005), a observância do comportamento dos três grupos de misturas, dosadas conforme a zona de restrição da Superpave, à solicitação de um ensaio estático em função do tempo levou às seguintes conclusões: o envelhecimento provoca um aumento de rigidez da microestrutura da mistura por conta da perda de componentes voláteis

do ligante. Fato este observado por conta do comportamento assintótico mais pronunciado durante a fase inicial de carregamento, bem como por conta de uma estabilização na taxa de deformações ao longo do tempo (segunda fase de carregamento), ocorrendo a menores deformações. Este fenômeno torna o revestimento mais frágil e susceptível a formação de microtrincas, diminuindo sua vida útil; O Grupo C, que passa ao longo da zona de restrição, possui finos distribuídos de maneira mais irregular ao longo dos vazios existentes entre os agregados graúdos. Vindo a colaborar para uma iteração menos eficiente quando de uma solicitação do pavimento. As misturas dos Grupos A e B demonstraram melhores resultados por conta de um melhor envolvimento dos finos ao longo dos vazios.

Segundo Moreira et al. (2006), na cidade de Uberlândia, a primeira aplicação de agregados reciclados de resíduos sólidos foi feita em 1600 m da via de acesso à estação de tratamento de esgoto ETE – Uberabinha, do Departamento de Águas e Esgoto de Uberlândia, em junho de 2003, estando esta pista em observação permanente, com resultados satisfatórios. Os estudos dos materiais foram desenvolvidos no laboratório da empresa Araguaia, contratada para a execução da capa asfáltica, sendo feitos os ensaios de compactação, ISC, expansão e granulometria de diversas misturas, conforme proporções definidas. Desta forma, utilizando-se o material britado e classificado, foram elaboradas as misturas com proporções em volume, de modo a facilitar o controle do traço e a execução com emprego de pá mecânica, simplificando o processo de confecção do material para a base, com uso de equipamentos convencionais.

A partir das misturas com variação proporcional do material miúdo passando na peneira de 4,8 mm, e do material graúdo definido pelas peneiras de 19,1 e 9,5 mm, verificou-se a correspondente variação da resistência mecânica do material, com base no ensaio de ISC, para a escolha da proporção mais adequada. A tendência de quebra da parcela do material reciclado correspondente aos resíduos de argamassa, tijolos e telhas, com a energia de compactação, foi notada durante a execução dos ensaios, principalmente nas misturas com 30 e 40% de material fino. Na continuidade dos ensaios, com o aumento da proporção de finos, observou-se não só a redução daquela tendência, como também o aumento do valor do ISC de forma significativa, o que ensejou a opção pela mistura cuja granulometria se enquadrava na faixa C da especificação de serviço ES 303 (DNER, 1997). Foram realizados ensaios com as energias intermediária e modificada e, em função dos resultados, feita a opção pela energia modificada. Para a execução do pavimento, numa pista com largura de 8,00 m, sem acostamento, foi feita uma regularização no revestimento primário existente, adotado como

subleito, e executada a camada de RCD com 20,0 cm de espessura. O revestimento foi executado com 3,0 cm de espessura de CBUQ, usando como ligante o asfalto-borracha. Esta pista é utilizada diariamente pelos caminhões que transportam o lixo doméstico da cidade de Uberlândia e ainda o tráfego de três usinas de asfalto e dois britadores. O trecho foi concluído em Setembro de 2003 e o acompanhamento até fevereiro de 2006 não registrou defeitos relacionados com a estrutura do pavimento.

Após se estabelecer a proporção mais adequada para a mistura a partir do material classificado, e verificando o seu enquadramento granulométrico, segundo Moreira et al. (2006), o passo seguinte foi a realização de uma experiência com a operação de britagem sem a classificação granulométrica, optando-se pela conhecida bica corrida. Segundo os autores, o resultado foi tão satisfatório quanto o do material classificado, e com esse material executou-se 300 m de uma pista na duplicação da Alameda Arnolde Afonso de Castro, antiga Alameda Uberaba, importante via de acesso ao bairro S. Jorge, e com um significativo fluxo de veículos, inclusive ônibus. Mais recentemente os autores relatam a execução do prolongamento da Av. Nicomedes Alves dos Santos até o Anel Viário de Uberlândia, numa extensão de 880 m em pista dupla; uma das pistas foi executada com base de RCD e a outra utilizou-se material de base proveniente de jazida. Esta aplicação, por se basear em solicitações semelhantes, vai permitir um acompanhamento comparativo de desempenho, com os procedimentos de ensaios e investigações periódicas, ao longo do período necessário para conclusões mais precisas que permitam inteira segurança na utilização dos resíduos de construção e demolição nos pavimentos da cidade. O relativo sucesso nas experiências levadas a efeito, num período de quase três anos, em pistas com volume de tráfego representativo das maiores solicitações em vias urbanas da cidade, aliadas ao desenvolvimento de pesquisas pela FECIV – Faculdade de Engenharia Civil da UFU – Universidade Federal de Uberlândia e com base nas especificações técnicas da Prefeitura Municipal de São Paulo ETS 001 (PMSP, 2003), a Secretaria de Obras passou a incluir em seus editais de concorrência a opção de utilização de materiais reciclados de RCD em camadas de base de pavimentos em vias locais, consolidando o modelo de gestão de resíduos sólidos, através do incentivo ao reaproveitamento de materiais e tratamento dos resíduos de construção e demolição, para execução de bases ou sub-bases de pavimentos urbanos.

Estudos realizados por Dias et al. (2001, 2005a, 2005b, 2006) tiveram como objetivo verificar a viabilidade da aplicação de agregados reciclados de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas em pavimentação. De acordo com Dias et al. (2006), os resíduos originados

da fabricação de telhas de cerâmica vermelha perfazem 32 mil toneladas ao ano, apenas na região dos pólos industriais de Ituiutaba Monte Carmelo, no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. Para estudo das propriedades de deformabilidade desses materiais, determinou-se o módulo de resiliência em laboratório por meio de ensaios triaxiais cíclicos. Foram avaliadas três distribuições granulométricas distintas, para o mesmo agregado reciclado, as quais resultaram em três diferentes porosidades do esqueleto granular. O valor do módulo de resiliência do agregado reciclado variou com a porosidade do esqueleto granular, nos diversos níveis de tensões ensaiadas e observou-se que o agregado reciclado se quebra com a aplicação de tensões. Para reduzir os problemas decorrentes da alta porosidade granular dos agregados reciclados, foram realizadas misturas desses agregados com dois tipos de solos lateríticos, de ocorrência abundante na mesma região. As proporções de agregado reciclado e solo nas misturas foram calculadas levando-se em consideração a porosidade granular do agregado. Foram determinado os módulos de resiliência dessas misturas e verificou-se que o valor do módulo aumenta em relação ao do agregado sem adição de solo, e o agregado não mais se quebra, graças à nova configuração do esqueleto granular obtida na mistura com o solo. Os resultados dos ensaios mostram a possibilidade de emprego destas misturas como material de base de pavimentos para vias de baixo volume de tráfego, viabilizando assim sua aplicação.

Leite et al. (2006a) realizaram uma comparação de valores de índice de suporte Califórnia (ISC) de agregados reciclados de diferentes origens: usina recicladora do município de São Paulo e usina na cidade de Santo André, região metropolitana de São Paulo. Para efeito comparativo, também foi ensaiada uma amostra de brita graduada simples. Todas as amostras foram compactadas com a energia intermediária. As amostras de agregados reciclados compactadas apresentaram valores de ISC da ordem de grandeza da brita graduada simples. O ensaio de ISC realizado após 28 dias de cura apresentou um aumento de 20% no valor do índice sem cura. Segundo os autores, este fato deve-se possivelmente à reação pozolânica de partículas não inertes contidas no material.

Leite et al. (2006b) relataram que durante o projeto e implantação do novo campus da Universidade de São Paulo, USP Leste, o grupo do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica sugeriu para o sistema viário uma alternativa inovadora e ambientalmente correta, uma vez que o novo campus encontra-se no Parque Ecológico do Tietê, na zona leste da capital paulista. Foi proposto um pavimento que utilizasse apenas materiais alternativos. Nas camadas de base e sub-base o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil e na camada de rolamento um concreto asfáltico usinado

à quente com asfalto-borracha. Por se tratar de um subleito altamente deformável e de baixa resistência, fez-se necessária a execução de uma camada de reforço com 20cm de espessura, utilizando um solo com ISC igual a 10%, para dar suporte a outras camadas, viabilizando a compactação do agregado reciclado e melhor distribuição dos esforços. Logo a seção transversal do pavimento ficou da seguinte forma: uma camada de 20 cm de reforço do subleito, uma camada de 15 cm de sub-base de agregado reciclado, uma camada de 10 cm de base de agregado reciclado e uma camada de 8 cm de asfalto borracha.

Segundo os autores, o sistema viário da USP Leste apresenta cerca de três quilômetros de extensão e parte expressiva da obra já foi executada até fevereiro de 2006. Estima-se que na construção do trecho tenham sido utilizados aproximadamente 20 mil toneladas de agregado reciclado. Foi feito o monitoramento de um segmento de 270 m onde, a título de comparação, construíram-se dois trechos consecutivos, sendo que em um deles foi substituído o material reciclado da base por brita graduada simples, mantendo-se a espessura projetada. O agregado reciclado utilizado no segmento em análise do trecho experimental foi proveniente da usina recicladora de Santo André, região metropolitana de São Paulo. O agregado reciclado utilizado foi 100% passante na peneira de 50 mm e a energia de compactação empregada equivalente a pelo menos 95% do Proctor modificado. Além do controle tecnológico previsto em norma, realizou-se o controle através de determinação das deflexões em campo, feito com o equipamento FWD (Falling Weight Deflectometer). O FWD é um deflectômetro de impacto, que determina as deflexões recuperáveis na superficial do pavimento para avaliar a sua condição estrutural. Foram observadas bacias de deflexão semelhantes nos trechos com base de agregados reciclados e brita graduada simples.

Após determinadas as bacias de deflexão no trecho experimental, partiu-se para a realização de retroanálises. A retroanálise das bacias de deflexão consiste num sistema iterativo onde, tendo-se os dados do pavimento referentes às deflexões em campo, espessuras das camadas e respectivos coeficientes de Poisson, faz-se o cálculo através da teoria da elasticidade de um sistema de módulos para as diversas camadas constituintes da estrutura do pavimento, de forma a se obter, por meio de tentativas, uma boa comparação entre a bacia de deflexões teórica (calculada) com aquela obtida em campo. Para a realização das retroanálises do estudo foi utilizado o software ELMOD 4, que é um software específico para cálculos mecânicos e avaliações estruturais, cujos dados de entrada são os arquivos de leitura do FWD, a estrutura do pavimento e os módulos de resiliência de cada camada. Com a retroanálise foi possível verificar que os valores de módulo de resiliência obtidos para o

agregado reciclado de resíduos sólidos de construção civil foram de 180 MPa para a camada de sub-base e de 200 MPa para a base. A diferença de valores pode ser em parte atribuída à deficiência de compactação na camada de sub-base. A ocorrência de chuvas intensas nos meses de execução da obra deixou os solos com umidade muito elevada, dificultando assim a compactação. A retroanálise mostrou que o módulo de resiliência da brita graduada simples e do agregado reciclado utilizados como camada de base foram similares, com valor de 200 MPa. Finalmente, comparando estes valores de módulo de resiliência com estudos previamente realizados em laboratório, conclui-se que os resultados obtidos em campo foram satisfatórios.

2.3.3.1 O CASO EM ESTUDO: PISTA EXPERIMENTAL DE GOIÂNIA

Em 2003, a Prefeitura Municipal de Goiânia em parceria com a Universidade de Brasília - UnB, o Sindicato da Indústria da Construção Civil de Goiás – SINDUSCON – GO, FURNAS Centrais Elétricas S. A., a Universidade Federal de Goiás - UFG e com empresários locais (construção, coleta e reciclagem), constituiu um grupo para a elaboração do Plano Integrado de Gerenciamento dos Resíduos Sólidos da Construção Civil do município. O grupo, denominado de gestor e estratégico, elaborou um relatório com um diagnóstico preliminar, onde foram indicados os principais problemas relacionados à gestão dos resíduos sólidos da construção civil no município e seus impactos (PMGRSIC, 2004). A metodologia utilizada foi desenvolvida e coordenada pela Universidade de Brasília, em parceria com o Sindicato da Indústria da Construção Civil do Distrito Federal – SINDUSCON – DF, com base no trabalho de pesquisa da professora Raquel Naves Blumenschein, no âmbito de seu doutorado junto ao Centro de Desenvolvimento Sustentável da UnB e fundamenta-se no compartilhamento de responsabilidades, riscos e benefícios (Blumenschein, 2004).

Segundo este relatório, os resíduos sólidos da construção civil gerados no município de Goiânia correspondem à metade dos resíduos urbanos coletados pelo serviço de limpeza pública, sendo que somente 50% da parcela dos resíduos sólidos da construção civil gerados são recolhidos. O restante é depositado irregularmente em áreas impróprias e sensíveis como bueiros e cursos d'água. Foi constatado que o município gastava, em 2004, em torno de R\$ 2.000.000,00/mês (dólar de referência: US\$ 2,86, no dia 30 de outubro de 2004) na coleta de resíduos de construção dispostos irregularmente e que a produção de construções informais e auto-construções responde por 75 a 80% dos resíduos sólidos produzidos. Em 2002, segundo a Companhia de Urbanização de Goiânia - COMURG, dados obtidos das diversas regiões do

município mostraram que o volume mensal de resíduos sólidos de construção civil gerado foi da ordem de 60000 toneladas por mês. Na época, haviam quatro pontos de descarga de resíduos sólidos (aterros e erosões) licenciados pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SEMMA). Nestes locais era feita a catação dos materiais não inertes por funcionários da COMURG. No relatório estão relacionadas 39 empresas coletoras de resíduos sólidos da construção civil em Goiânia, a grande maioria em situação irregular quanto ao licenciamento junto à SEMMA. Também fez parte do relatório um estudo para aquisição de uma usina para reciclagem de resíduos sólidos para o município.

Para verificar a viabilidade técnica da utilização dos agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil foram realizados estudos de laboratório e de campo para a construção de uma pista experimental, no final de 2003, utilizando os agregados reciclados nas camadas de base e sub-base, sob um revestimento de concreto asfáltico. A Figura 2.8 apresenta o local onde os resíduos sólidos foram depositados, dentro da área da pedreira do DERMU-COMPAV. O processamento dos resíduos sólidos armazenados foi realizado utilizando o britador de mandíbulas da pedreira, conforme ilustrado nas Figuras 2.9 e 2.10.

Os resíduos sólidos, classe A, utilizados na produção de agregados reciclados e construção da pista experimental, com 56 m de extensão, foram selecionados e transportados por diversas empresas do ramo de construção participantes de um projeto piloto, para a pedreira da prefeitura. As amostras foram armazenadas e gerenciadas pelo DERMU-COMPAV – Departamento de Estradas de Rodagem do Município de Goiânia – Companhia Municipal de Pavimentação. Os resíduos sólidos processados (aproximadamente 325 m³) foram divididos em três frações granulométricas denominadas de brita de 19 mm, brita de 9,5 mm e areia. Durante a caracterização verificou-se que os agregados reciclados produzidos eram constituídos de 55,4% de concreto, 30,0% de argamassa, 11,7% de materiais cerâmicos e 2,9% de concreto celular.

Os estudos de dosagem realizados por Silva (2004) para a construção da pista experimental, foram feitos combinando as três frações granulométricas dos resíduos sólidos processados e uma argila do local da pista experimental. Em todas as frações dos resíduos sólidos reciclados e na argila, bem como nas misturas realizadas com as quatro frações, foram feitos os seguintes ensaios: caracterização completa (massa específica dos grãos, granulometria e limites de consistência), compactação, ISC, equivalente de areia e índice de forma.



Figura 2.8 - Armazenamento de resíduos sólidos no município de Goiânia (Silva, 2004).



Figura 2.9 - Produção de agregados reciclados no britador da prefeitura municipal de Goiânia (Silva, 2004).



Figura 2.10 - Detalhe do britador da prefeitura municipal de Goiânia: correia transportadora com os resíduos sólidos britados e sistema de peneiras (Silva, 2004).

As dosagens foram feitas com a finalidade de enquadrar o material resultante nas faixas granulométrica do DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (atualmente DNIT), para utilização em camadas de sub-base e base de pavimentos flexíveis. As misturas utilizadas tanto para a confecção da sub-base como da base enquadraram-se, com pequenas restrições, na faixa B. As Tabelas 2.4 e 2.5 apresentam a caracterização das três frações de agregados reciclados utilizadas e do solo argiloso e as Tabelas 2.6 e 2.7, a caracterização das dosagens utilizadas nas camadas de sub-base e base da pista experimental.

Tabela 2.4 - Caracterização das frações de agregados reciclados de resíduos sólidos utilizados na construção da pista experimental de Goiânia – brita 19 mm e brita 9,5 mm.

Amostra	γ_s (kN/m ³)	Limites			Granulometria Simples (% Passa)							
		w _L (%)	w _P (%)	IP (%)	# 1"	# 3/4"	# 3/8"	N° 4	N° 10	N° 40	N° 100	N° 200
Brita 19 mm	22,07	NL	NP	NP	100,0	98,2	1,0	0,4	0,4	0,3	0,2	0,1
Brita 9,5 mm	26,09	NL	NP	NP		100,0	60,0	11,9	7,0	3,9	1,8	0,6

Tabela 2.5 - Caracterização da fração areia de agregados reciclados e da argila do local da pista experimental do município de Goiânia.

Amostra	γ_s (kN/m ³)	Limites			Granulometria Simples (% Passa)						Sedimentação				
		w _L (%)	w _P (%)	IP (%)	# 3/8"	N° 4	N° 10	N° 40	N° 100	N° 200	0,037	0,019	0,009	0,005	0,002
Areia	26,38	29	22	7	100	91,7	75,1	52,2	30,4	21,2	17,0	14,0	11,0	9,0	7,0
Argila	26,87	42	26	16		100,0	99,9	95,7	78,9	65,5	55,0	52,0	50,0	43,0	39,0

Tabela 2.6 - Caracterização das misturas empregadas nas camadas de sub-base e base da pista experimental de Goiânia.

Amostra	γ_s (kN/m ³)	Limites			Granulometria Simples (% Passa)							Sedimentação					
		w _L (%)	w _P (%)	IP (%)	# 1"	# 3/4"	# 3/8"	N° 4	N° 10	N° 40	N° 100	N° 200	0,037	0,019	0,009	0,005	0,002
Sub-base	26,97	NL	NL	NP		100,0	82,9	59,6	49,7	42,0	28,0	22,5	17,0	16,0	14,0	11,0	8,0
Base	27,26	35	25	10	100,0	99,8	79,8	66,6	59,5	50,6	36,3	28,0	22,0	19,0	18,0	15,0	12,0

Tabela 2.7 - Percentuais de pedregulho, areia, silte e argila das misturas das camadas de sub-base e base da pista experimental de Goiânia.

Camada	Granulometria de acordo com a NBR 7181/1984			
	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
Sub-base	50,3	29,4	12,3	8
Base	40,5	33,9	13,6	12

Sub-base: 33% brita 19mm, 33% brita 9,5 mm, 17% de areia e 17% de argila
Base: 25% brita 19 mm, 25% brita 9,5 mm, 25% areia e 25% argila

Em 2004, a Prefeitura Municipal de Goiânia, executou um segundo trecho, com extensão de 140 m, utilizando base e sub-base com agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil, com características semelhantes à pista da CEASA. O trecho fica situado no Setor Recanto das Minas Gerais, Rua SR-68, em frente à quadra 93 e trata-se de uma via urbana de baixo volume de tráfego (tráfego local). Pesquisadores da Universidade Federal de Goiás estão realizando o monitoramento deste segundo trecho também tendo em vista avaliar o desempenho do pavimento e consolidar a viabilidade técnica da aplicação de dosagens de agregados reciclados em pavimentos.

A Tabela 2.8 apresenta os dados referentes à compactação e ISC da amostra de argila e das misturas utilizadas nas camadas de sub-base e base da pista experimental. Embora a dosagem inicialmente escolhida para construção das camadas de sub-base e base (83% de agregados reciclados e 17% de solo argiloso) tenha apresentado boa trabalhabilidade em laboratório, verificou-se no campo que após a compactação da sub-base, a mesma apresentou uma grande quantidade de material solto na superfície (Figura 2.11 (a)). Segundo Silva (2004), esse fato ocorreu devido à baixa coesão do material e ao tipo de rolo compactador utilizado (pé de carneiro vibratório), comumente utilizado pela Prefeitura Municipal de Goiânia. Optou-se então, por aumentar a quantidade de argila da camada de base, de 17% para 25%. Essa mudança fez com que fosse diminuída a quantidade de material solto (Figura 2.11 (b)), entretanto o valor do ISC da base ficou um pouco menor que o da sub-base.

Tabela 2.8 - Parâmetros de compactação e ISC das camadas do pavimento da pista experimental de Goiânia.

Amostra	Compactação		CBR (%)	Expansão (%)
	γ_d máx (kN/m ³)	w _{ot} (%)		
Argila	16,40	20,6	13	0,08
Sub-base	18,77	11,8	90	0,04
Base	17,70	14,5	83	0,00

Obs.: - Argila do sub-leito e das dosagens com os resíduos;

- Amostras sem reuso;

- A argila foi compactada com a energia do proctor normal;

- A sub-base e a base foram compactadas com a energia do proctor intermediário.



Figura 2.11 - Vista superior das camadas da pista experimental de Goiânia após a compactação: (a) sub-base; (b) base (Silva, 2004).

No processo de homogeneização das dosagens compostas pelas três frações de agregado reciclado e argila foram utilizados três processos: colocação de pilhas alternadas dos materiais na pista e mistura com patrol, seguida de passagem de grade de disco; colocação de cada material na pista, espalhamento com patrol e homogeneização com grade de disco e por fim mistura de pilhas dos materiais com uma pá carregadeira fora da pista, posterior lançamento na pista e passagem de grade de disco. Constatou-se que, para a pista experimental, a terceira opção apresentou melhor resultado. A compactação das camadas foi realizada utilizando dois rolos compressores: um rolo vibratório CA-25 e um rolo liso tipo RC-5, na última passada, para fazer a selagem das camadas de agregado reciclado.

A mistura de duas ou mais frações granulométricas de agregados reciclados para obtenção de uma dosagem a ser aplicada nas camadas de base e sub-base de pavimentos, como foi o caso da pista experimental de Goiânia, onde foram misturadas três frações granulométricas de agregados reciclados juntamente com um solo argiloso, ou mesmo a simples mistura de dois ou mais tipos diferentes de agregados reciclados, requer um processo de mistura eficiente que garanta a homogeneidade do produto final. Os processos utilizados na pista experimental (mistura na pista ou nas pilhas) não se mostraram totalmente eficientes. É importante equipar as usinas de reciclagem, onde se pretende realizar misturas de duas ou mais frações de agregados reciclados, com centrais de mistura, do tipo usina de solos, que garantam a homogeneidade das dosagens pretendidas.

Segundo Silva (2004), após a execução da pista experimental com base e sub-base de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil, fez-se a opção de executar os meio-fios utilizando concreto de cimento Portland com agregados reciclados. Então foi feito

um estudo laboratorial para dosar um concreto que atendesse às prescrições da especificação de serviço ES 290 (DNER, 1997b), que estabelece que o concreto a ser utilizado nos dispositivos de drenagem deve ser dosado experimentalmente, para uma resistência característica mínima de 11 MPa aos 28 dias de idade. O traço adotado foi definido utilizando as duas frações mais finas dos agregados reciclados, ou seja, a fração areia e a fração brita 9,5 mm; a fração brita 19 mm não foi utilizada. O traço em massa seca adotado na pista experimental foi o seguinte: 1:2,6:4,0:1,5 (cimento: fração areia do agregado reciclado: fração brita 9,5 mm do agregado reciclado: fator água cimento). Na pista experimental foram executados meio-fios simples, no bordo esquerdo e meio-fios com sarjeta no bordo direito. O concreto utilizado foi dosado com um slump nulo, e foi aplicado utilizando uma máquina de execução de meio-fios “in loco” (sistema de formas deslizantes). A Figura 2.12 apresenta detalhes do meio-fio com sarjeta executado com agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil na pista experimental.



Figura 2.12 - Meio-fio com sarjeta de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: (a) vista geral - bordo direito; (b) detalhe da superfície do concreto (Silva, 2004).

Resplandes (2007) realizou ensaios de solubilização e lixiviação com os agregados reciclados das duas pistas experimentais construídas no município de Goiânia, a da CEASA e a do Setor Recanto do Bosque. O ensaio de solubilização foi realizado de acordo com a norma NBR 10.006 (ABNT, 1987) e consistiu em identificar a concentração de substâncias do material solúveis em água. O ensaio de lixiviação foi realizado de acordo com a norma NBR 10.005 (ABNT, 1987) e teve como objetivo identificar concentração de substâncias que se separam do material por meio de lavagem e percolação. Para a análise do extrato lixiviado, os resultados dos parâmetros inorgânicos das amostras da base dos trechos analisados encontraram-se dentro dos limites da especificação brasileira para materiais não inertes. Para

a análise do extrato solubilizado, a amostra da base do trecho da CEASA apresentou concentração de alumínio acima dos especificados pela norma. Já a amostra da base do trecho do Setor Recanto do Bosque apresentou concentração dos teores de alumínio e surfactantes do extrato solubilizado acima da concentração especificada pela norma brasileira. A partir dos resultados dos ensaios, por apresentarem parâmetros solubilizados em concentração superiores aos padrões de potabilidade da água, ambos os resíduos foram classificados como não inertes, não perigosos e classe II-A, de acordo com a norma NBR 1004 (ABNT, 2004).

2.4 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Segundo Pinto e Preussler (2002), a ação das cargas do tráfego sobre os pavimentos flexíveis e semi-rígidos provoca deformações permanentes e recuperáveis. As deformações permanentes são aquelas que permanecem mesmo após cessar o efeito da atuação da carga, ou seja, têm caráter residual. São exemplos de deformações permanentes aquelas geradas nas trilhas de roda pela consolidação adicional do tráfego, bem como as rupturas de natureza plástica. As deformações ou deflexões recuperáveis representam um indicativo do comportamento elástico da estrutura, deixando de existir alguns momentos após a retirada da carga. Elas provocam o arqueamento das camadas do pavimento, e a sua repetição é a responsável pelo fenômeno de fadiga das misturas das camadas betuminosas e cimentadas. O estudo das deflexões ou das condições de deformabilidade dos pavimentos flexíveis e semi-rígidos é fundamental à compreensão de seu comportamento, já que estas refletem e caracterizam as condições estruturais das diversas camadas e do próprio subleito.

Segundo o procedimento PRO 011 B (DNER, 1979), no Brasil já existe uma considerável experiência sobre medidas de deflexão, e é comum a auscultação de um pavimento por intermédio de suas medidas, pelo menos como uma primeira fase, que pode ser também a única, de avaliação estrutural. Assim, se for considerado o comportamento de um pavimento bem construído que ao longo de sua vida útil é solicitado não só pelo tráfego, que o submete a esforços de compressão, cisalhamento e flexão, como também pelos fatores climáticos, como precipitações pluviométricas e mudanças de temperatura, que causam a fadiga da estrutura, pode-se distinguir, com respeito à deflexão, as seguintes fases da vida do pavimento:

- Fase de Consolidação – fase que sucede imediatamente à construção, sendo caracterizada por um decréscimo do valor da deflexão, decorrente da consolidação adicional proporcionada pelo tráfego nas diversas camadas do pavimento. O valor da deflexão tende a

se estabilizar ao fim desta primeira fase;

- Fase Elástica – fase que sucede à de consolidação, e ao logo da qual o valor da deflexão do pavimento, a menos das variações sazonais, se mantém aproximadamente constante ou cresce ligeiramente. Essa fase define a vida útil do pavimento;

- Fase de Fadiga – Fase que sucede à elástica, caracterizando-se por um crescimento acelerado do valor de deflexão do pavimento, na medida em que a estrutura começa a exteriorizar os efeitos da fadiga representados por fissuras, trincas e acúmulo de deformações permanentes sob cargas repetidas. Caso não sejam tomadas medidas para reforço e recuperação do pavimento observa-se, geralmente nesta fase, um processo acelerado de degradação do pavimento.

Evidentemente, um pavimento flexível bem projetado será tanto melhor, técnica e economicamente, quanto maior for a sua fase elástica que está limitada, de uma maneira geral, pelo número de solicitações das cargas de roda e por diversos fatores que causem deficiências no revestimento e na estrutura do pavimento, dos quais pode-se destacar: falhas da fundação, na qual estão incluídas as deficiências do subleito e do próprio corpo dos aterros, deficiências de drenagem, deficiências de projeto e falhas construtivas em uma ou mais camadas do pavimento (DNER, 1979).

2.4.1 DEFORMAÇÃO RESILIENTE

A deformação resiliente está relacionada com a deformação recuperável ou elástica dos solos ou estruturas de um pavimento devido à ação de carregamentos repetidos, sendo que esta não varia necessariamente de modo linear com a tensão aplicada. Este conceito foi introduzido no dimensionamento de pavimentos quando observou-se que a maioria da malha rodoviária projetada com base no ISC estava apresentando degradação prematura. Assim, torna-se possível efetuar uma abordagem mais real sobre o comportamento dos pavimentos.

Quando um veículo passa sobre o pavimento, um pulso dinâmico de tensão é transmitido para o solo e isto gera as deflexões. As tensões e deformações geradas dentro do pavimento como resultado das deflexões são os fatores que controlam a performance do pavimento. Logo, esse comportamento é diretamente influenciado pela relação tensão-deformação do solo (Elliot, 1992).

A determinação do módulo de resiliência de solos é feita em laboratório por meio do ensaio triaxial de carga repetida de curta duração (DNER, 1994c). Neste ensaio, busca-se

simular o carregamento que ocorre no campo e quantificar a relação tensão-deformação do material. O procedimento geral consiste em colocar um corpo-de-prova numa célula triaxial e submetê-lo a uma tensão de confinamento que representa a condição que o solo está submetido no pavimento. Os pulsos de carregamento dinâmico são aplicados no solo para simular a passagem do veículo e a deformação resultante é medida. Para os solos granulares os fatores que afetam o valor do módulo são: número de repetições da tensão desvio, história de tensões, duração e frequência do carregamento e nível de tensões aplicado. Já para os solos finos coesivos, além dos fatores citados para os solos granulares, é importante considerar a condição de compactação. Com base na deformação resiliente, foi definido o módulo de resiliência que é calculado pela relação entre a tensão de desvio (σ_d) e a correspondente deformação específica vertical recuperável ou resiliente, conforme apresentado na Equação 2.3.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_R} \quad (2.3)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência;

σ_d = tensão de desvio;

ε_R = deformação específica vertical recuperável ou resiliente.

O ensaio é realizado com corpos de prova compactados na energia normal e na umidade ótima para materiais de subleito e com outras energias para materiais utilizados na base. Geralmente, tem-se utilizado o equipamento com aplicação de um ciclo por segundo, pulso de carregamento de 0,1 segundo e repetição na faixa de algumas centenas de vezes, sendo que as deformações são medidas com transdutores do tipo LVDT (“Linear Variable Differential Transformer”). O processo de seleção do MR de projeto torna-se complexo, pois este parâmetro deve ser determinado para condições consistentes com o solo na sua situação final, analisando a condição sob o pavimento, os níveis de tensão e o carregamento aplicado.

Medina & Preussler (1980) relataram os resultados de ensaios triaxiais dinâmicos de vários solos de subleitos e camadas de pavimentos flexíveis. Como tentativa de classificação dos solos segundo o comportamento resiliente eles foram agrupados em função da granulometria, plasticidade e valor de ISC. Inicialmente foram identificados dois tipos de comportamento: o granular e o argiloso. Continuando o estudo de solos lateríticos utilizados

em pavimentos de baixo custo, Motta et al. (1985) e Medina & Motta (1988) observaram um outro tipo de comportamento dos solos, chamado de combinado. Observou-se que os materiais não se enquadravam nas especificações tradicionais e que apresentavam comportamento resiliente intermediário variando entre o granular e o argiloso. O módulo variava tanto em função da tensão principal (σ_3) como da tensão desvio (σ_d). Neste caso, o modelo utilizava cinco parâmetros k para a determinação do módulo. Como se tratava de pavimento de baixo custo e na maioria dos casos o revestimento era em tratamento superficial duplo, os níveis de tensões aplicados foram maiores do que o normalmente vinha sendo utilizado, pois o solo estava sujeito a maiores carregamentos. O teor de umidade das amostras foi adotado abaixo da umidade ótima. Posteriormente, o modelo bilinear clássico foi estendido para solos coesivos, utilizando-se σ_d e valores negativos para k_2 . Medina (1997a) agrupou modelos de comportamento resiliente observados no Brasil, sendo estes apresentados na Figura 2.13. Sobre cada modelo podem-se tecer os seguintes comentários:

- o modelo granular ocorre nos solos que têm menos de 50% de material passando na peneira n° 200, sendo que as areias uniformes apresentam módulos maiores que as bem graduadas. Neste caso, o módulo depende principalmente da tensão confinante;

- o modelo argiloso se refere aos solos finos (mais de 50% de material passando na peneira n° 200), sendo que a natureza da fração fina determina o comportamento quanto à resiliência. Geralmente, quando a razão de silte é inferior a 50% o solo é menos resiliente. Para estes solos, o módulo é função da tensão desvio e apresenta uma relação bilinear onde o valor de M_R é elevado para baixas tensões desvio. É possível observar ainda que as constantes k_2 e k_3 determinadas para as argilas lateríticas são maiores do que aquelas encontradas para as demais argilas. Como na prática é difícil definir o ponto de transição (k_1 , k_2) do modelo bilinear, é comum adotar o modelo simplificado do solo areno argiloso (Figura 2.13c);

- o modelo combinado foi desenvolvido para pavimentos não convencionais utilizando-se solos finos lateríticos;

- o modelo constante pode ser observado em solos lateríticos fortemente cimentados de módulos altos.

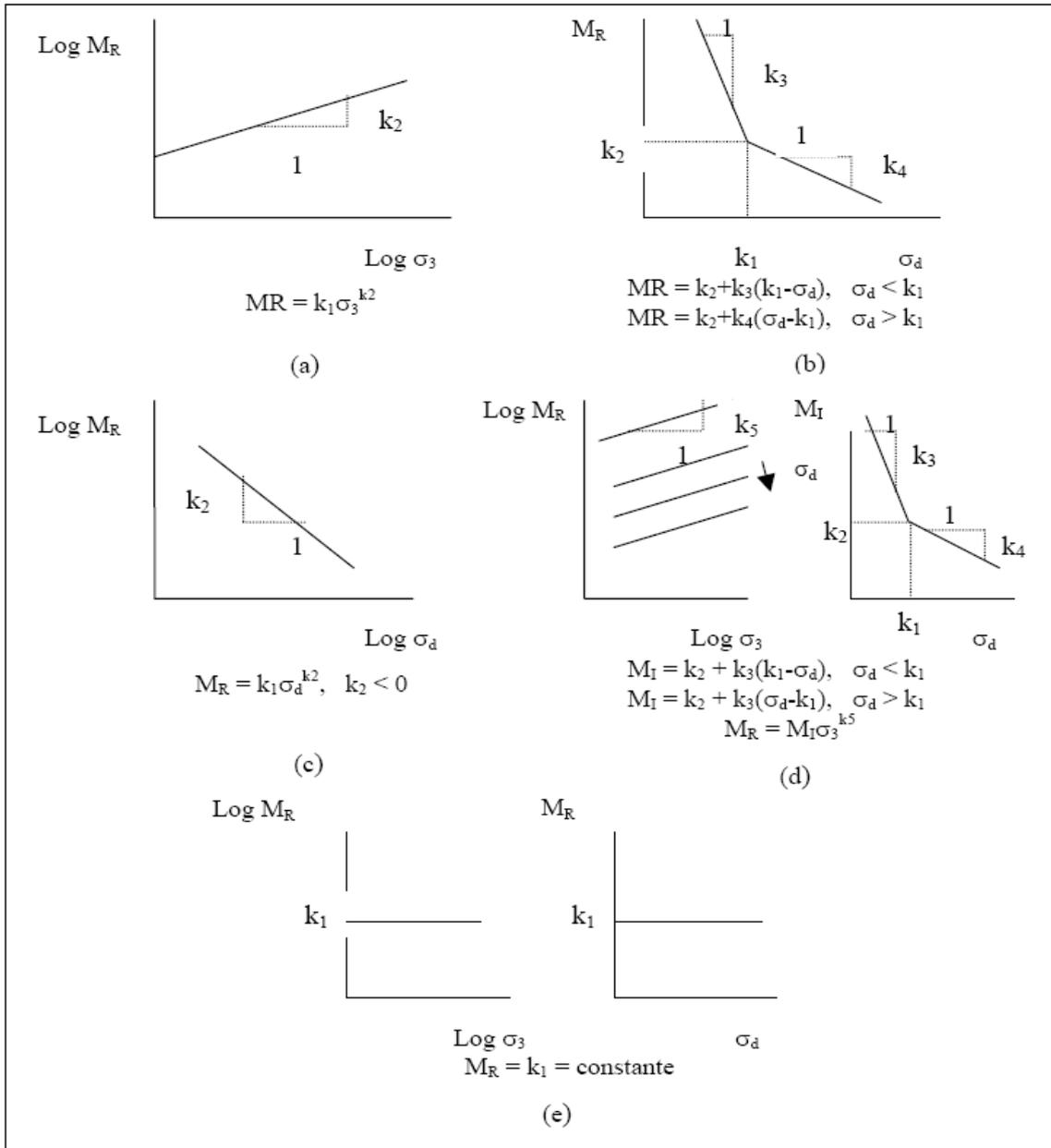


Figura 2.13 – Primeiros modelos de comportamento tensão-deformação de solos, observados no Brasil: (a) granular, (b) argiloso, (c) areno argiloso, (d) combinado, (e) constante (modificado – Medina, 1997a).

2.4.2 PARÂMETROS DETERMINADOS EM CAMPO

2.4.2.1 MEDIDAS DE DEFLEXÕES

Os ensaios não destrutivos avaliam a deflexão recuperável máxima na superfície do revestimento e são bastante apropriados para avaliação da capacidade estrutural. Os equipamentos mais utilizados podem ser divididos em vigas de deflexão, equipamentos

dinâmicos de vibração e equipamentos dinâmicos de impacto (Pinto & Preussler, 2002).

O emprego de equipamentos deflectométricos 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.

O ensaio de viga Benkelman é normalizado pelo método de ensaio ME 024 (DNER, 1994), onde é prescrita uma viga com relação de distâncias (distância entre a articulação e a ponta de prova (a) e a distância entre o extensômetro e a articulação(b)) igual a 2:1, 3:1 ou 4:1, um caminhão com 8,2 t de carga no eixo traseiro e pneus calibrados com 560 kPa (80 lb/pol²). São feitas leituras do extensômetro no ponto inicial e em distâncias intermediárias. Com esses valores determina-se as deflexões, que são expressas em centésimos de milímetros, para cada distância e faz-se o traçado da bacia de deflexão. O cálculo da deflexão real ou verdadeira no ponto de prova (D_0) e do raio de curvatura (R), que também utiliza a deflexão a 25 cm do ponto de prova (D_{25}) estão representados nas Equações 2.4 e 2.5.

$$D_0 = (L_0 - L_f) \times \frac{a}{b} \quad (2.4)$$

Onde:

D_0 = deflexão real ou verdadeira no ponto de ensaio ($\times 10^{-2}$ mm);

L_0 = leitura inicial ($\times 10^{-2}$ mm);

L_f = leitura final ($\times 10^{-2}$ mm);

a, b = dimensões da viga Benkelman.

$$R = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})} \quad (2.5)$$

Onde:

R = raio de curvatura (m);

D_0 = deflexão real ou verdadeira no ponto de ensaio ($\times 10^{-2}$ mm);

D_{25} = deflexão a 25 cm do ponto de ensaio ($\times 10^{-2}$ mm).

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).

O defletômetro de impacto FWD – *Falling Weight Deflectometer* também é um ensaio não destrutivo e que é utilizado para a medida das deflexões recuperáveis dos pavimentos. O equipamento difere da viga Benkelman principalmente pela forma de aplicação do carregamento. As principais vantagens do FWD são a rapidez e a precisão na realização das medidas. O procedimento PRO 273 (DNER, 1996) normaliza a realização do ensaio com o FWD.

2.4.2.2 DESLOCAMENTOS - PROVA DE CARGA SOBRE PLACA

A prova de carga direta sobre terreno de fundação (ABNT, 1984a), também denominada ensaio de placa, é considerada um dos mais antigos ensaios de campo realizado em obras de engenharia geotécnica. Foi utilizado por Mc Leod em 1948 para avaliar o desempenho de pavimentos flexíveis em aeroportos do Canadá. No Brasil, o ensaio vem sendo usado em algumas pesquisas na área de pavimentação e seus resultados comparados com outros ensaios de campo. O ensaio objetiva simular as condições de carregamento e solicitações que ocorrem no pavimento. As cargas aplicadas produzem recalques pequenos que são parte devido ao recalque elástico e parte 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.

O ensaio consiste na determinação da curva tensão versus deslocamento, através da aplicação de um determinado carregamento. Geralmente, esta carga é aplicada em campo pela reação de um caminhão carregado ou pela colocação de uma cargueira. Sobre a superfície do pavimento coloca-se uma placa ou um conjunto de placas com diâmetros conhecidos, que irão distribuir o carregamento. Entre as placas e o sistema de carregamento coloca-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 alternativa mais precisa para a leitura da carga 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 sobre a placa.

2.4.2.3 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO – PENETRÔMETRO DINÂMICO DE CONE (DCP)

O Penetrômetro Dinâmico de Cone (“Dynamic Cone Penetration”) – DCP é um equipamento muito estudado e utilizado por vários órgãos do mundo, devido suas vantagens de ser um ensaio rápido, fácil, de baixo custo e não destruir a estrutura do pavimento (Cardoso & Trichês, 1998).

Existem diversos tipos de equipamentos que se diferenciam pela energia imposta durante a cravação. O mais utilizado no Brasil é formado por uma haste de 195,0 cm de comprimento, 16 mm de diâmetro e com uma extremidade pontiaguda em forma de cone a 60° com 20 mm de diâmetro. A penetração no solo ocorre por meio de golpes sucessivos através da queda de um peso de 8 kg deslizando ao longo da haste a partir de uma altura constante de 57,5 cm. Durante o ensaio, é medido o comprimento que a barra penetra no solo para um determinado número de golpes e obtém-se um gráfico que relaciona a profundidade com o número de golpes acumulados conhecido como curva DCP. Através desta curva, determina-se o chamado índice de penetração (DN) que corresponde à declividade das retas existentes no gráfico; a declividade das retas representa o índice de penetração DN em mm/golpe, o qual é obtido por meio da razão entre a profundidade e o número de golpes necessários para penetrar até a respectiva profundidade.

Vertamatti & Oliveira (1997) ressaltaram que a heterogeneidade de um pavimento pode ser grande e isto gera dispersões em retroanálises e previsões da vida útil. Neste caso, a utilização do DCP torna-se importante para melhor discretizar o meio, pois revela a estrutura real.

Cardoso & Trichês (2000) propuseram uma 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 aferição do solo que corresponde à relação DN x ISC. Com o valor do ISC de projeto, define-se o valor de DN que deve ser obtido no campo. Os ensaios devem ser feitos em cada estaca e nos bordos externos das futuras faixas, sendo que onde o DN for maior que o pré-definido tem-se uma deficiência na compactação do material.

2.4.2.4 MÓDULOS ELÁSTICOS – PRESSIÔMETRO PENCEL

O ensaio pressiométrico foi desenvolvido por Louis Ménard na década de 50. O ensaio consiste, basicamente, na expansão de uma cavidade cilíndrica no maciço do solo, com o objetivo de medir as propriedades de deformação e a tensão de ruptura do material.

Segundo Rodrigues et al. (1996), o pressiômetro Pencil (PBP – *Pre-boring Pressuremeter*) constitui um modelo aprimorado do pressiômetro desenvolvido por Briaud & Shields, para uso em pavimentação. O comprimento expansível da sonda (230 mm) é curto para ensaiar separadamente as camadas do pavimento e o diâmetro é pequeno (33 mm) para minimizar o efeito destrutivo do furo feito no pavimento. O conjunto do sistema (unidade de controle) foi adaptado em uma pequena mala para tornar o equipamento versátil. O equipamento básico é constituído de uma sonda monocelular que expande com água, uma unidade de controle de pressão/volume e um tubo que interliga a sonda e a unidade de controle. Para realizar o ensaio deve-se executar um furo no solo até a profundidade desejada, inserir a sonda pressiométrica que é inflada para expandir a cavidade. Assim, são tomadas as variações volumétricas e pressões ocorridas, sendo que tais variações correspondem somente a variações radiais da cavidade. Com os dados obtidos de volume versus pressão e suas respectivas correções, traçam-se as curvas pressiométricas dos ensaios. A seguir, determinam-se os valores dos módulos pressiométricos (E_p) e de recompressão (E_r), nas fases pseudo-elásticas de cada curva e a pressão limite do solo.

Os ensaios pressiométricos podem ser realizados antes, durante e depois da construção do pavimento. Pode ser utilizado tanto para a avaliação de pavimentos existentes, em projetos de reforços, como também no projeto de controle de pavimentos em execução. Tem-se que o modelo hiperbólico de tensão-deformação representa, de forma satisfatória os ciclos de carregamento e descarregamento de um ensaio pressiométrico. Logo, pode-se obter o módulo a partir de um ensaio com apenas um ciclo de carregamento e descarregamento (Rezende et al., 2003).

2.4.2.5 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO - PENETRÔMETRO DINÂMICO PANDA

O ensaio de penetração dinâmica de cone tipo PANDA desenvolvido pelo laboratório LERMES-CUST (Gouves, 1991), apresenta peculiaridades que o distingue dos penetrômetros dinâmicos convencionais. É um equipamento portátil, leve, com aquisição automática dos dados da energia e profundidade de cravação, informações estas facilmente transportadas para

um computador, sem necessidade de tratamentos adicionais de sinal (Figura 2.14). O equipamento fornece a resistência de ponta designada como q_d e expressa em MPa. Ela é obtida pela fórmula dos holandeses adaptada ao penetrômetro dinâmico à energia variável, ou seja, exprimindo-se a energia de golpes pela energia cinética e não pela energia potencial utilizada nos penetrômetros dinâmicos a energia constante.

No ensaio, a velocidade do martelo é medida logo em seguida ao impacto, por meio de um sensor de deformação situado no capacete colocado sobre a haste e que recebe diretamente os golpes. Uma correia ligando este capacete com um sistema de controle de altura que repousa sobre a superfície do terreno e é atravessado pela haste de cravação, faz o controle da profundidade ensaiada. Os dados tanto da energia de cravação como de profundidade de cravação são registrados em um pequeno sistema de aquisição, que por sua vez calcula a resistência de ponta q_d . Este cálculo da resistência de ponta é feito em função do diâmetro da ponta e do número de hastes utilizadas, cuja massa unitária é conhecida. Em estruturas de pavimento geralmente se utiliza ponta com 2 cm^2 de área de ponta. Concluído o ensaio, os resultados podem ser transferidos do sistema de aquisição para um computador. O sistema de aquisição permite acumular vários ensaios de modo contínuo.

No ensaio busca-se limitar a penetração de 2 a 20 mm por golpe com o intuito de evitar ou limitar o repique elástico e a geração de pressão neutra no caso de solos saturados ou quase saturados como é o caso de solos compactados acima da linha ótima. Obtém-se assim, em média, um ponto de leitura a cada 5mm, o que permite acompanhar de modo relativamente contínuo o comportamento do solo ao longo da profundidade de cravação, detectando-se eventuais gradientes de comportamento, e portanto de peso específico ou teor de umidade, bem como a passagem de uma camada para outra.

No caso específico de estruturas de pavimento o ensaio PANDA pode ser usado na determinação do comportamento do solo, no controle de compactação e no reconhecimento do solo de fundação. Para as duas últimas aplicações é importante dispor-se de uma base de dados que permita verificar os resultados obtidos em relação às especificações de projeto ou aos dados regionais. Nos solos compactados a avaliação da qualidade da execução depende dos objetivos da compactação e está ligada à textura do solo, ao teor de umidade e ao índice de vazios (e) sendo freqüente considerar no lugar deste o peso específico aparente seco (γ_d).

A resistência a penetração (q_d) no ensaio PANDA é determinada de acordo com a Equação 2.6, apresentada a seguir:

$$q_d = \frac{1}{A} \times \frac{\frac{1}{2} \times m \times v^2}{e} \times \frac{1}{1 + \frac{P}{m}} \quad (2.6)$$

Onde:

q_d = resistência de ponta;

A = área da ponta (m^2);

m = massa do martelo (kg);

v = velocidade do impacto (m/s);

e = índice de vazios;

P = Profundidade (m).

e = penetração da ponta (m);

P = massa das hastes e ponta (kg).

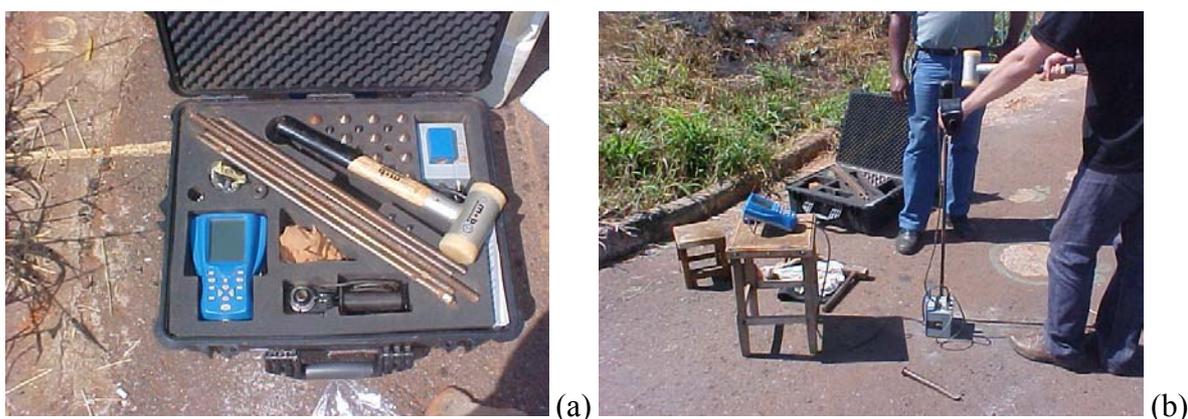


Figura 2.14 – Penetrômetro dinâmico tipo PANDA: (a) detalhe do equipamento; (b) realização do ensaio.

2.4.2.6 MÓDULO DE YOUNG E RIGIDEZ - GEOGAUGE

O geogauge é um equipamento portátil fabricado pela empresa americana Humboldt Mfg. Co., por meio do qual podem ser feitas as medidas de rigidez, da estrutura do pavimento e módulo de Young, de camadas de solo compactado. Em pavimentos a rigidez é uma propriedade utilizada para determinar a resistência à curvatura ou deflexão que é utilizada para assegurar uma transferência de carga uniforme e efetiva do pavimento para as camadas de base, sub-base e subleito. Já o módulo de Young é uma propriedade dos materiais utilizada para determinar sua resistência para mudar de forma quando uma carga é aplicada.

O geogauge mede a impedância na superfície do solo. Em outras palavras, ele mede a tensão comunicada na superfície e a velocidade da superfície resultante como uma função do tempo. A rigidez, razão entre a força sobre a deflexão é dada pela impedância. O geogauge comunica deslocamentos muito pequenos ao solo ($<1,27 \times 10^{-6}$ mm) em 25 estágios constantes de frequência entre 100 e 196 Hz. A rigidez é determinada para cada frequência e a média é mostrada no visor do aparelho. O processo todo tem uma duração de cerca de um minuto a um minuto e meio. Para essas baixas frequências, a impedância na superfície é rigidamente controlada e é proporcional ao módulo cisalhante do solo. Com o coeficiente de Poisson e as dimensões da base do geogauge, os módulos de Young e cisalhante podem ser determinados.

O Geogauge pesa cerca de 10 kgf, tem 28 cm de diâmetro, 25,4 cm de altura e se apoia sobre a superfície do solo por meio de uma base em forma de anel. O pé apoia diretamente no solo e suporta o peso do geogauge por meio de isoladores de borracha. Também preso ao pé estão o vibrador e os sensores que medem a força e o histórico deslocamento - tempo do pé. A conexão entre o vibrador e o sensor de força é feita por meio de uma coluna rígida. Para realizar uma medida o geogauge é colocado sobre o solo mediante a realização ou não de uma pequena preparação da superfície. Normalmente, uma leve pressão ou rotação do equipamento sobre o solo é necessário para se obter uma área de contato mínima de 60% entre o pé do equipamento e o solo. Sobre superfícies duras ou rugosas o apoio do pé do equipamento pode ser auxiliado com a colocação de areia fina ou solo local.

Muitos métodos correntes de determinação de módulos e rigidez de solos no campo requerem grandes forças para produzir deflexões mensuráveis. O geogauge utiliza uma tecnologia primeiramente utilizada militarmente, para medir deflexões muito pequenas, devido a cargas muito menores. O geogauge não mede a deflexão resultante do peso do geogauge. Particularmente, o geogauge vibra produzindo forças cíclicas pequenas na superfície do solo. Então, ele acuradamente mede as deflexões muito pequenas resultantes. O solo deflete um valor δ , o qual é proporcional ao raio externo do anel da base do aparelho (R), ao módulo de Young (E), ao módulo cisalhante (G) e ao coeficiente de Poisson (ν) do solo. A rigidez é a razão entre a força e o deslocamento: $K=P/\delta$. O geogauge produz níveis de tensões e deformações nos solos comuns para aplicação em pavimentos, aterros e fundações (192 kPa). Como é mostrado nas Equações 2.7 e 2.8 (Humboldt, 2000), os módulos de Young e cisalhante podem ser determinados pelas medidas do geogauge, se o coeficiente de Poisson for adotado.

$$P \approx \frac{1.77RE}{(1-\nu^2)} \delta \approx \frac{3.54RG}{(1-\nu)} \delta \quad (2.7)$$

$$K = \frac{P}{\delta} \approx \frac{1.77RE}{(1-\nu^2)} \quad (2.8)$$

Onde:

P = força aplicada no ensaio;

R = raio externo do anel da base do aparelho;

E = módulo de Young;

δ = deslocamento;

ν = coeficiente de Poisson;

G = módulo cisalhante;

K = rigidez.

3 METODOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO

O programa experimental da pesquisa foi dividido em três etapas: a) realização de ensaios de laboratório para avaliar potencialidades de aplicação de agregados reciclados em pavimentos flexíveis; b) participação na construção de uma pista experimental no município de Goiânia – Goiás, com base e sub-base de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil (AR) e solo argiloso local; c) monitoramento do desempenho da pista experimental em função da solicitação do tráfego, por meio da realização de ensaios de campo.

3.2 FASE DE ESTUDOS DE LABORATÓRIO

A fase de estudos de laboratório teve como objetivo caracterizar e determinar potencialidades de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil para emprego em pavimentos flexíveis.

Conforme mencionado no Capítulo 2, os estudos de laboratório realizados com os agregados reciclados para a construção da pista experimental foram feitos na pesquisa desenvolvida por Silva (2004). No desenvolvimento da presente pesquisa, os agregados reciclados da pista experimental foram utilizados nos estudos de laboratório apenas para a realização dos ensaios de módulo de resiliência, variação do índice de suporte Califórnia com o tempo e medidas de pH.

As amostras de agregados reciclados utilizadas nos ensaios de laboratório da presente pesquisa foram obtidas a partir da seleção e britagem, realizada em duas etapas distintas, de resíduos sólidos de concreto e de resíduos sólidos cerâmicos. Adotando a nomenclatura da norma NBR 15.116 (ABNT, 2004e), os agregados reciclados obtidos a partir dos resíduos sólidos de concreto serão denominados de ARC e os obtidos a partir dos resíduos cerâmicos, por possuírem argamassa impregnando os mesmos, serão denominados de ARM (agregados reciclados mistos). O motivo da seleção e britagem dos resíduos sólidos para obtenção das amostras de ARC e ARM terem sido feitas separadamente, foi para que fosse possível variar o percentual de grãos cimentícios e cerâmicos das dosagens provenientes da mistura desses dois tipos de agregados reciclados.

3.2.1 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras de resíduos sólidos da construção civil que foram britadas e utilizadas na fase de ensaios de laboratório da pesquisa foram obtidas da seguinte forma: a) as de resíduos de concreto foram provenientes dos laboratórios de FURNAS S. A., da demolição de pisos de concreto (cerca de 70%) e de corpos-de-prova de concreto rompidos (cerca de 30%), conforme mostrado na Figura 3.1; b) as amostras de resíduos cerâmicos foram obtidas, na sua maior parte, junto ao depósito do Departamento de Estradas de Rodagem Municipal - Companhia Municipal de Pavimentação de Goiânia - DERMU-COMPAV, sendo provenientes da demolição de alvenarias de tijolos cerâmicos furados e maciços; outra parte dos resíduos cerâmicos veio de uma obra local de demolição em alvenaria de tijolo aparente e ainda uma terceira parte, de telhas cerâmicas quebradas doadas por uma loja de demolição (Figura 3.2).

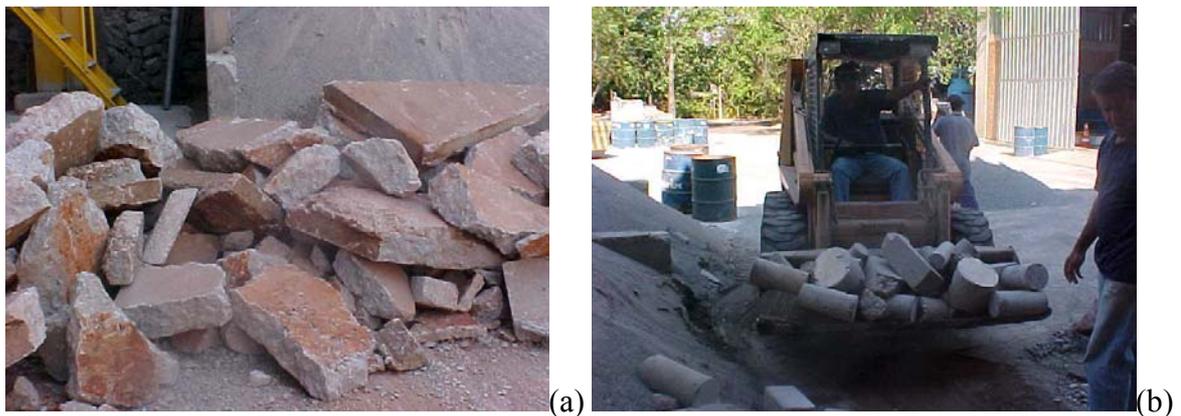


Figura 3.1 - Resíduos sólidos de concreto antes da britagem: (a) demolição de pisos de concreto; (b) corpos-de-prova rompidos.



Figura 3.2 - Resíduos sólidos cerâmicos antes da britagem: (a) vista geral da pilha; (b) detalhe dos elementos constituintes da amostra.

As amostras de resíduos sólidos foram processadas separadamente em um britador de mandíbulas: em uma etapa só os resíduos de concreto e na outra só os resíduos cerâmicos. Após a britagem, cada uma das amostras foi separada em três frações: passante na peneira 19,1 mm (3/4") e retida na peneira 9,5 mm (3/8"), passante na peneira 9,5 mm e retida na peneira 4,8 mm (Nº 4) e passante na peneira 4,8 mm. Portanto, na fase laboratorial da pesquisa trabalhou-se com três frações de agregados reciclados de concreto, denominadas de ARC 19,1 (fração grossa) ARC 9,5 (fração média) e ARC 4,8 (fração fina) e três frações de agregados reciclados mistos, denominadas de ARM 19,1 (fração grossa), ARM 9,5 (fração média) e ARM 4,8 (fração fina). A Figura 3.3 apresenta o britador utilizado no processamento das amostras e a Figura 3.4 algumas das frações dos agregados reciclados obtidas por britagem. Após a britagem, as amostras foram colocadas em tambores metálicos de 200 litros e armazenadas no pátio do laboratório de solos de FURNAS. Previamente à realização dos ensaios as frações de agregados reciclados foram espalhadas sobre um piso cimentado e deixadas secar ao ar.



Figura 3.3 - Britador de mandíbulas - processamento dos resíduos sólidos: (a) caçamba de alimentação; (b) britador e correia transportadora; (c) vista geral do sistema de britagem; (d) peneiramento e descarga do material.

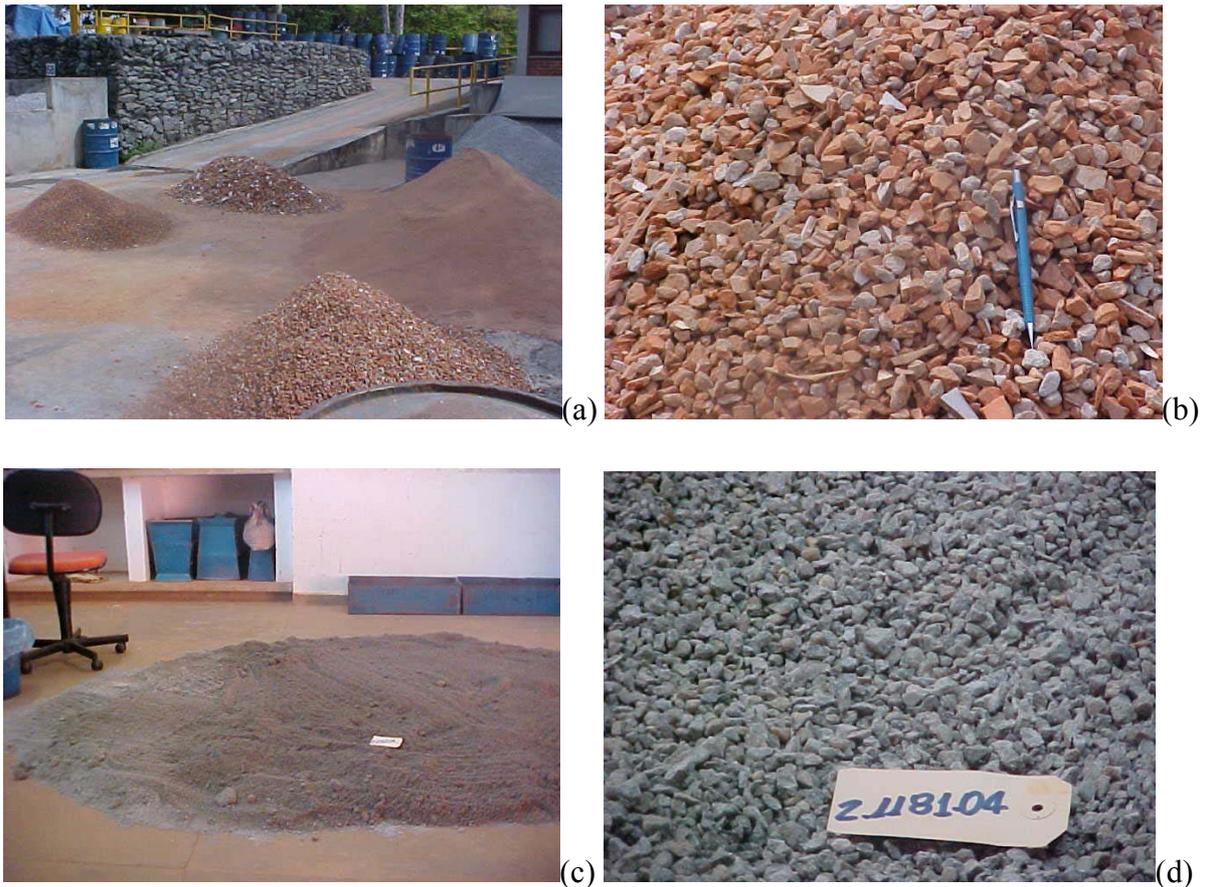


Figura 3.4 - Agregados reciclados obtidos da britagem de resíduos sólidos: (a) pilhas de ARM; (b) detalhe do ARM 19,1; (c) secagem do ARC 4,8; (d) detalhe do ARC 19,1.

Para a seleção da amostra de solo argiloso usada nas dosagens com os agregados reciclados foram realizadas amostragens em seis pontos distintos da cidade de Goiânia, em bairros sem pavimentação, e executados os ensaios de caracterização. Os dados desses seis solos foram agrupados com os dados dos dois solos utilizados por Silva (2004) e em seguida, das oito amostras, foram escolhidas duas representativas do grupo estudado, em termos de textura e plasticidade. Em cada um dos dois locais das amostras representativas, foi realizado um furo de sondagem à trado com profundidade em torno de quatro metros e retiradas amostras de metro em metro. Com essas amostras da sondagem a trado foram realizadas análises químicas em um laboratório de solos, no Município de Goiânia, credenciado pela EMBRAPA.

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A análise granulométrica dos agregados reciclados ARC 19,1, ARC 9,5, ARM 19,1 e ARM 9,5 foi realizada utilizando dois processos: um de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), para agregados, portanto, sem lavagem e com secagem prévia em estufa e o outro de

acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984b), para solos, entretanto, sem realizar o destorroamento e com cuidado na fase de lavagem dos grãos. Com as amostras de ARC 4,8, ARM 4,8 e com o solo argiloso, a análise granulométrica foi realizada por peneiramento e sedimentação, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984b), para solos. A massa específica dos grãos menores que 4,8 mm foi determinada de acordo com a NBR 6508 (ABNT, 1984c); a massa específica dos grãos maiores que 4,8 mm, a absorção d'água, a massa específica aparente e porosidade dos grãos, foi realizada de acordo com a NBR 6458 (ABNT, 1984d) e de forma alternativa, adicionando-se água lentamente à amostra, durante um período de quatro horas, até a sua imersão completa. Esse procedimento alternativo objetivou verificar se ocorreria uma maior expulsão do ar interno dos agregados. A determinação da plasticidade dos agregados reciclados ARC 4,8, ARM 4,8 e do solo argiloso foi realizada de acordo com as normas NBR 6459 (ABNT, 1984e) e NBR 7180 (ABNT, 1984f). Para complementar a caracterização dos agregados reciclados e auxiliar na realização das análises, foram realizados os ensaios de Abrasão *Los Angeles* e índice de forma, de acordo com os métodos de ensaio ME 035/98 (DNER, 1998) e ME 086/94 (DNER, 1994d), respectivamente. Também foram realizadas determinações do pH das frações finas dos agregados reciclados com base nas orientações do LNEC (1967).

3.2.3 PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC)

Com o intuito de verificar a variação dos parâmetros de compactação e índice de suporte Califórnia (ISC) dos agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em função do percentual de grãos cerâmicos, de concreto e argamassa constituintes dos mesmos e também em função da adição de um determinado percentual de solo argiloso, foram realizados vários ensaios variando-se esses percentuais. Os ensaios foram realizados de acordo com as recomendações da norma NBR 9895 (ABNT, 1987).

Como os agregados reciclados mistos (ARM) obtidos a partir da amostra de resíduos sólidos essencialmente cerâmicos apresentaram uma determinada quantidade de grãos de argamassa impregnada, após feita a caracterização e utilizando as frações resultantes do peneiramento do ARM 19,1 e ARM 9,5, foi determinado o percentual de grãos de argamassa contido nas amostras. Para tanto, foi realizada, em porções aleatórias, uma contagem dos grãos cerâmicos e de argamassa existentes nas frações retidas nas peneiras do ensaio de granulometria e feita uma média ponderada dos valores em relação aos percentuais do

peneiramento. Os valores médios encontrados de percentual de grãos de argamassa, em massa, em duas amostras de cada fração, foram respectivamente de 28,0% para o ARM 19,1 e 35,7% para o ARM 9,5. Para efeito de cálculo, na definição da quantidade de cada fração a ser utilizada para enquadrar as dosagens em uma determinada faixa granulométrica, de forma aproximada adotou-se o valor médio desses percentuais, ou seja, que 31,8% dos grãos do ARM estudado são de argamassa e 68,2% dos grãos são de materiais cerâmicos, para as três frações de agregados reciclados mistos (ARM 19,1, ARM 9,5 e ARM 4,8).

Para realizar os ensaios de compactação e ISC, em função da granulometria dos agregados reciclados obtidos na britagem e das faixas granulométricas recomendadas pela especificação de serviço ES-303 (DNER,1997a) - Pavimentação - Base Estabilizada Granulometricamente, optou-se por enquadrar as dosagens na faixa C, a fim de realizar uma comparação entre os resultados. Complementarmente, para verificar a influência da granulometria nos parâmetros de compactação e ISC, também foram realizadas duas dosagens com granulometrias distintas, uma mais fina (faixa F) outra mais grossa (faixa A).

Para determinação do percentual de cada fração de agregado reciclado que deveria ser misturado para obter uma curva granulométrica correspondente à média da Faixa C, da especificação de serviço ES 303 (DNER, 1997a), foram combinadas de três a sete frações, onde três são as frações de um agregado reciclado puro (concreto ou cerâmico) e sete são as três frações de cada um dos agregados (concreto e cerâmico), mais a fração do solo argiloso. Os valores dos coeficientes de não uniformidade (C_U) e de curvatura (C_C) da curva média da faixa C são iguais a 100 e 2, respectivamente, o que corresponde a uma distribuição granulométrica bem graduada.

De posse dos percentuais de cada fração e da massa de amostra a ser compactada para cada corpo-de-prova, determinou-se a quantidade de cada fração necessária para compor as amostras. Feito isso, cada uma das frações de agregado reciclado foi homogeneizada e pesada. Todos os ensaios foram realizados sem reuso das amostras. Na composição das dosagens, procurou-se enquadrar as amostras o mais próximo possível da média granulométrica da Faixa C, já mencionada. Os teores de solo argiloso adicionados foram de 10, 20, 30 e 40%. As dosagens com 30 e 40% de solo argiloso, em função do elevado percentual de finos, só ficaram parcialmente enquadradas na Faixa C.

Inicialmente, foram realizados quatro ensaios com as amostras de agregados reciclados puros: somente agregado reciclado de concreto - ARC, somente agregado reciclado misto - ARM, 50% de grãos cerâmicos + 50% de grãos cimentícios (ARM 50/50) e 25% de

grãos cerâmicos + 75% de grãos cimentícios (ARM 25/75). Como o agregado reciclado cerâmico estudado, conforme já mencionado, possui um teor de 31,8% de grãos de argamassa, optou-se por fazer uma correção na hora de compor essa amostra com a de concreto, de forma que os percentuais de grãos cerâmicos e cimentícios das dosagens ficassem mais precisamente definidos. Por exemplo, os 50% de grãos cimentícios da dosagem de ARM 50/50, são formados pela parcela dos 31,8% de argamassa impregnada no ARM, mais a parcela dos grãos do concreto britado. A Figura 3.5 apresenta a execução de um dos ensaios de compactação, expansão e ISC realizados.

Ao todo foram realizados dezessete ensaios de compactação e ISC com as dosagens de agregados reciclados sendo, quinze enquadrados na faixa C, um na faixa A e um na faixa F. Em dezesseis dos ensaios foi utilizada a energia de compactação do Proctor intermediário e em um a energia de compactação do Proctor modificado, visando verificar a influência da variação de energia aplicada no valor do ISC. Com o solo argiloso do subleito foram realizados dois ensaios a fim de verificar a variação dos parâmetros obtidos, sendo um com a energia do Proctor Normal e o outro com a energia do Proctor Intermediário.

Para validar os valores dos parâmetros de w_{ot} , $\gamma_d \text{ máx}$ e ISC obtidos nos ensaios de compactação e ISC completos, foram moldados e ensaiados dois corpos-de-prova nas condições de umidade ótima obtida na curva de compactação e feita uma análise estatística dos três valores determinados, ou seja, o do ensaio completo e os dos dois corpos-de-prova moldados na w_{ot} . Uma determinação adicional feita nos ensaios de ISC com as dosagens de agregados reciclados foi a ruptura dos corpos-de-prova dos dois lados, o lado convencional e o lado contrário, para analisar o gradiente de compactação do corpo-de-prova e verificar a sua influência nas correlações dos ensaios.

Complementarmente, com o objetivo de verificar o possível ganho de resistência com o tempo em termos de ISC e sua possível relação com variações de pH, foram selecionadas três das dosagens estudadas e compactados quatro corpos-de-prova cada uma para romper após 30 e 60 dias de cura. A cura foi realizada em câmara úmida, para evitar a perda de umidade. Após esses períodos os corpos-de-prova foram imersos em água durante 4 dias e realizados os ensaios de penetração (ISC). Após as determinações do ISC foram feitas as medidas do pH das amostras dos corpos-de-prova, utilizando tanto a fração fina quanto a grossa.



Figura 3.5 - Execução dos ensaios de compactação, expansão e ISC: (a) homogeneização da amostra (b) compactação; (c) medida da expansão; (d) ensaio de penetração (ISC);

3.2.4 ANÁLISE DA ABSORÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS NA UMIDADE ÓTIMA DE COMPACTAÇÃO

Visando estabelecer correlações entre os dados obtidos nos ensaios de compactação e ISC, procurou-se fazer uma medida da absorção dos agregados reciclados na umidade ótima de compactação. Para tanto, adicionou-se água em 1000 g de cinco das dosagens de agregados reciclados até a umidade ótima, fez-se o peneiramento das amostras úmidas nas peneiras de 9,5, 4,8 e 2,0 mm e colocou-se as mesmas para secar em estufa. Depois de realizada a secagem e determinação da umidade, lavou-se cada amostra para retirar os finos aderentes e colocou-se novamente as mesmas na estufa para a determinação da massa seca sem finos.

Após essa segunda secagem fez-se uma nova pesagem e procedeu-se à determinação da umidade correspondente à absorção. O ensaio foi realizado com três amostras de ARC, três de ARM, duas de ARM 50/50, duas de ARM 25/75 e uma de ARM 25/75 com 20% de solo argiloso.

3.2.5 ÍNDICE DE DEGRADAÇÃO OU QUEBRA DOS GRÃOS DEVIDO À COMPACTAÇÃO

O índice de degradação tem como objetivo analisar o comportamento do material em função do desgaste sofrido durante a compactação. Como os grãos dos agregados reciclados apresentaram baixa resistência à abrasão, além desses ensaios, foram realizados ensaios de granulometria com as dosagens antes e depois do ensaio de compactação, a fim de verificar a variação da textura. Para realizar essa análise determinou-se o índice de degradação após o ensaio de compactação Proctor (ID_p) (IPR, 1998), que é estabelecido para agregados de rochas naturais e consiste em determinar o deslocamento médio da curva granulométrica da amostra degradada pelo ensaio de compactação, em relação à amostra inicial, e apresenta-se como um parâmetro para avaliação, em laboratório, do desempenho de materiais compactados. O índice é calculado pela apuração da média das diferenças das porcentagens passantes da situação inicial pelas passantes no final, após a compactação com 26 golpes. Segundo Macedo et al., citados por Carneiro et al. (2001), 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. Complementarmente a essa análise, foi extraída uma amostra da pista experimental, em maio de 2006, para verificar uma possível redução da textura em função da ação do tráfego.

3.2.6 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Em seis das dosagens com agregados reciclados estudadas, sendo duas das camadas de base e sub-base da pista experimental, e com o solo argiloso do subleito da pista, foram realizados ensaios triaxiais de cargas repetidas para determinação dos módulos de resiliência. As dosagens da pista experimental, da base e da sub-base, foram obtidas misturando-se amostras dos agregados reciclados utilizados na época da construção e se encontravam armazenadas no laboratório de FURNAS. A Figura 3.6 mostra a realização de um dos ensaios triaxiais de carga repetida para determinação do módulo de resiliência, utilizando o

equipamento triaxial do laboratório de tecnologia de pavimentos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - LTP-EPUSP. Os ensaios foram realizados de acordo com o método de ensaio DNER-ME 131/94 (DNER, 1994e), para solos. Como os materiais de todas as dosagens eram passantes na peneira de 3/4", (19,1 mm) os corpos-de-prova foram moldados com as dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, nas condições de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo do ensaio de compactação. As amostras de agregados reciclados foram compactadas com a energia do Proctor intermediário e a amostra de solo argiloso com as energias do Proctor normal e intermediário. Para três das dosagens com agregados reciclados ensaiadas foram moldados dois corpos-de-prova, um para ser ensaiado logo após a moldagem e o outro após 90 dias de cura. O processo de cura (câmara úmida) foi realizado mantendo-se os teores de umidade de moldagem dos corpos-de-prova. Tanto as dosagens com agregados reciclados, quanto as amostras de solo argiloso, foram submetidas à fase de condicionamento, a fim de permitir a acomodação das partículas do corpo-de-prova e reduzir a influência das deformações permanentes (Medina, 1997). A fase de carregamento foi realizada com a aplicação de tensões de confinamento (σ_3) e de desvio (σ_d), de acordo com os valores prescritos na norma. As tensões de desvio foram aplicadas 200 vezes, com uma frequência de 20 ciclos por minuto e duração de 0,10 segundo. As etapas seguidas na realização dos ensaios serão descritas a seguir.

- Fase de condicionamento dos corpos-de-prova de agregados reciclados - inicialmente aplicou-se uma tensão σ_3 de 70 kPa e tensões σ_d de 70 e 210 kPa; em seguida, σ_3 de 105 kPa e σ_d de 315 kPa.

- Fase de condicionamento dos corpos-de-prova de solo argiloso - aplicação de σ_3 igual a 21 kPa e σ_d igual a 70 kPa.

- Fase de carregamento dos corpos-de-prova de agregados reciclados – Em seis estágios, conforme a recomendação da norma para solos arenosos;

- Fase de carregamento dos corpos-de-prova de solo argiloso - Aplicou-se uma tensão σ_3 de 21 kPa e tensões σ_d de 21; 35; 52,5; 70; 105; 140 e 210 kPa.



Figura 3.6 – Realização de um dos ensaios triaxiais de cargas repetidas para determinação do módulo de resiliência.

3.2.7 MEDIDA DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO SOLO ARGILOSO DO SUBLEITO DEVIDO AO RESSECAMENTO

Em função do elevado grau de trincamento do subleito da pista experimental verificado durante a fase de construção e do aumento da resistência superficial medida pelo penetrômetro dinâmico de cone - DCP, para mensurar o ganho de resistência do subleito em função do ressecamento superficial foram compactados três corpos-de-prova com o mesmo, com a energia do Proctor normal, na umidade ótima e peso específico seco máximo e, em seguida os mesmos foram deixados em cura ao ar por um período de 28 dias. A cura ao ar foi realizada em ambiente de laboratório, sendo que o contato do corpo-de-prova com o ar se deu pela base e pelo topo. Após esse período de cura, durante o qual os corpos-de-prova passaram por um processo de ressecamento, os mesmos foram imersos em água durante quatro dias e realizados os ensaios de penetração (ISC).

3.2.8 DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO ARGILOSO DO SUBLEITO

A sucção corresponde à energia livre da água dentro do solo e é dividida em duas componentes como apresentado na equação 3.1. A sucção matricial ou mátrica está relacionada com as forças capilares e de adsorção e a sucção osmótica com a concentração de sais dissolvidos presentes na água intersticial.

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (3.1)$$

Onde:

ψ = sucção total;

$(u_a - u_w)$ = sucção mátrica;

u_a = pressão de ar;

u_w = pressão de água;

π = sucção osmótica.

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), alterações ambientais e mudanças nos carregamentos aplicados podem produzir variações no teor de umidade do solo. Nos solos compactados, o teor de umidade inicial parece ter uma relação direta com a sucção matricial. Já a sucção osmótica não apresenta sensibilidade quanto às alterações no teor de umidade. Assim, geralmente, a mudança na sucção total se compara à variação da sucção matricial.

A sucção pode ser determinada por meio de vários métodos, tanto em laboratório como no campo. Em laboratório, o método do papel filtro e a célula de pressão de Richards têm sido os mais utilizados no Brasil. No campo, podem ser instalados tensiômetros para medida direta da sucção. A representação comum dos resultados consiste nas chamadas curvas características ou de retenção de água que relacionam os valores de sucção determinados com teores de umidade, grau de saturação ou teor volumétrico.

Para mensurar a sucção do solo argiloso do subleito da pista experimental foi realizado o ensaio pelo método do papel filtro, seguindo as recomendações de Marinho (1995). As amostras utilizadas foram obtidas pela cravação de anéis de pvc, com 50 mm de diâmetro e 20

mm de altura, em corpos-de-prova compactados na energia do Proctor intermediário, na umidade ótima de compactação. A energia intermediária foi adotada em função das massas específicas secas determinadas em campo, para a camada superficial do subleito, terem correspondido à massa específica seca máxima do ensaio de compactação realizado com essa energia.

Após a moldagem, os anéis com as amostras ficaram expostos ao ar até atingirem a umidade higroscópica. Com isso obteve-se pastilhas com índices de vazios menores que os de compactação, porém semelhantes àqueles obtidos para a camada superficial do subleito da pista experimental (0,51 a 0,54). Em seguida, já com as amostras colocadas sobre os papéis filtro (três), foram adicionados oito teores de umidade crescentes, sendo cada um adicionado em três amostras distintas. Como se pretendia determinar no ensaio a sucção matricial do solo, os papéis filtro ficaram em contato direto com o mesmo. Após a adição de água as amostras foram embaladas com um filme de PVC e colocadas em uma caixa de isopor, hermeticamente fechada, por um período de quinze dias. Depois desse período, de equilíbrio, as amostras foram retiradas uma a uma e feitas determinações das massas dos papéis filtros intermediários, com precisão de 0,0001g. Em seguida os papéis filtro foram colocados em uma estufa para secagem, durante um período de duas horas, e determinado o seu teor de umidade. Após a realização desse procedimento foram feitas as determinações das massas específicas das pastilhas de solo com o emprego da balança hidrostática e as determinações dos seus teores de umidade pelo método da estufa. Para o cálculo das sucções matriciais foram utilizadas as curvas de calibração de Chandler et. al., recomendadas por Marinho (1995), representadas pelas Equações 3.1 e 3.2.

Para umidade do papel filtro $> 47\%$:

$$Sucção(kPa) = 10^{(6,05 - 2,48 \times \log w)} \quad (3.1)$$

Para umidade do papel filtro $\leq 47\%$:

$$Sucção(kPa) = 10^{(4,84 - 0,0622 \times w)} \quad (3.2)$$

Onde:

- S = sucção em kPa;
- w = umidade do papel filtro em %.

3.3 FASE DE CONSTRUÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL

A pista experimental foi executada na Rua dos Ciprestes, Setor de Mansões Bernardo Sayão, Goiânia – Goiás e consiste no acesso de compradores a CEASA – Centrais de Abastecimento de Goiás S. A. A construção da pista foi realizada nos meses de Novembro e Dezembro de 2003, como parte integrante de um programa municipal de gerenciamento de resíduos sólidos da construção civil. A viabilização da construção foi realizada a partir de uma parceria estabelecida entre a Prefeitura Municipal de Goiânia, FURNAS Centrais Elétricas S. A., a Universidade de Brasília e a Universidade Federal de Goiás.

Os agregados reciclados utilizados na construção da pista experimental foram produzidos a partir da britagem, em conjunto, de resíduos sólidos compostos de concretos, materiais cerâmicos e argamassas, pela prefeitura municipal. Os estudos de caracterização e dosagem realizados para a construção da pista experimental, conforme já mencionado, foram realizados no Laboratório de FURNAS, em Aparecida de Goiânia, como parte integrante do trabalho desenvolvido por Silva (2004). Detalhes desse estudo constam no Capítulo 2 da presente tese. A Figura 3.7 apresenta uma imagem de satélite com a localização da pista experimental, a Figura 3.8 apresenta um desenho esquemático da seção transversal da pista experimental e a Figura 3.9 ilustra alguns aspectos construtivos.



Figura 3.7 - Imagem de satélite com a localização da pista experimental (Google, 2006).

As características de projeto da pista experimental são as seguintes:

- Extensão total: 56,00 m;
- Largura da pista de rolamento: 9,00 metros;
- Inclinação transversal da pista = 3% ;
- Seção transversal: Mista (corte de 0,40 m no bordo esquerdo e aterro de 1,40 m no bordo direito);
- Espessura das camadas: Sub-base = 15 cm (83% de agregados reciclados e 17% de solo argiloso) e Base = 15 cm (75% de agregados reciclados e 25% de solo argiloso);
- Revestimento: CBUQ - concreto betuminoso usinado a quente, com espessura de 5 cm;
- O dimensionamento do pavimento foi realizado de acordo com o método do DNER, considerando a execução das camadas de base e sub-base com materiais granulares naturais.

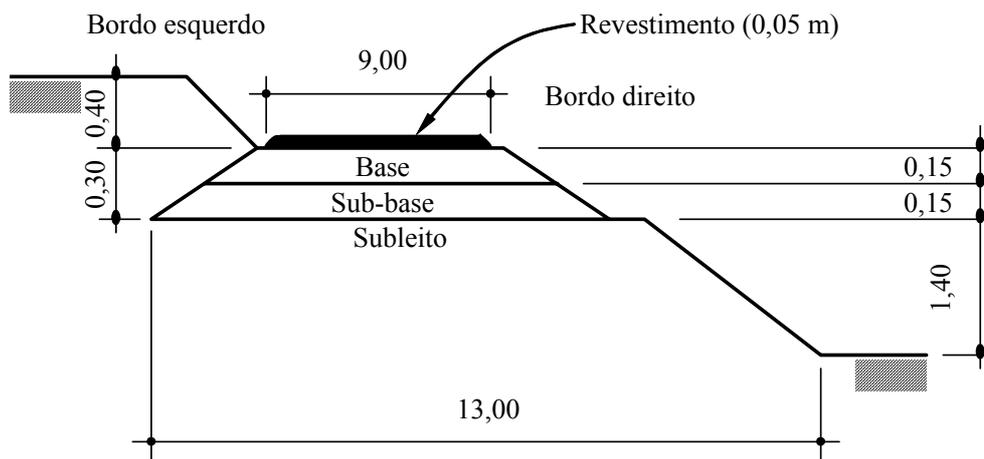


Figura 3.8 - Desenho esquemático da seção transversal da pista experimental.

Com a finalidade de avaliar o comportamento do pavimento após a construção e obter dados para avaliação ao longo da vida útil, foram realizadas medidas de deflexões com a viga Benkelman, prova de carga rápida, ensaios com o penetrômetro dinâmico de cone (DCP) e o pressiômetro Pencil, nas camadas de subleito, sub-base, base e revestimento. Os equipamentos e procedimentos utilizados serão descritos a seguir.

Com exceção das medidas de deflexão utilizando a viga Benkelman, os ensaios realizados durante o monitoramento da pista experimental, inclusive na fase de construção, foram executados nas estacas 3 (eixo), 4 (bordo direito) e 4+15 (bordo esquerdo), lado a lado uns dos outros.



Figura 3.9 - Execução da pista experimental: (a) subleito compactado; (b) pilhas de agregados reciclados; (c) processo de homogeneização na pista; (d) compactação da sub-base.

3.3.1 ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DE DEFLEXÕES COM EMPREGO DA VIGA BENKELMAN

Para a medida das deflexões foi utilizada uma viga Benkelman com relação entre os braços (a/b) de 2:1, sendo $a = 2,44$ m e $b = 1,22$ m. Anteriormente à realização dos ensaios, a viga foi calibrada de acordo com as recomendações do procedimento PRO 175 (DNER, 1994a), no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Goiás. Foram realizados ensaios nos bordos direito - BD (quatro pontos) e esquerdo - BE (quatro pontos), nas trilhas de roda externas, distanciados de 10 em 10 metros (Figura 3.10), de acordo com as orientações do método de ensaio ME 024 (DNER, 1994b). A análise das deflexões medidas foi realizada de acordo com o procedimento PRO 011 (DNER, 1979), sendo feitas as determinações da média aritmética, desvio padrão e, em função do número de determinações unitárias, o intervalo de aceitação dos valores. Além das deflexões nos pontos de prova (D_0), também foram determinadas as bacias deflectométricas. A Figura 3.11 ilustra a execução de ensaios de viga Benkelman sobre o subleito compactado e sobre o revestimento asfáltico.

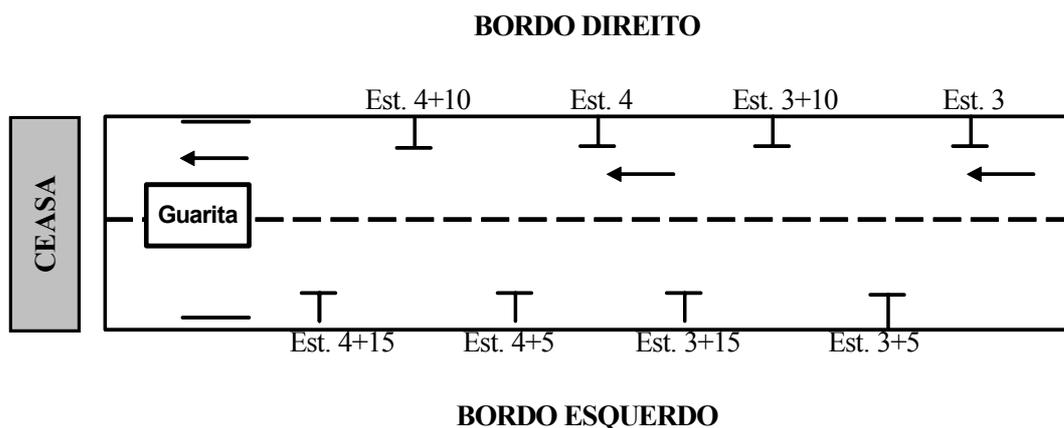


Figura 3.10 - Desenho esquemático dos pontos de medidas de deflexão com a viga Benkelman na pista experimental.



Figura 3.11 – Medidas de deflexões com a viga Benkelman: (a) sobre o subleito; (b) sobre o revestimento

3.3.2 ENSAIOS DE PROVA DE CARGA SOBRE PLACA

Os ensaios foram realizados levando em conta as orientações da NBR 6489 (ABNT,1984a), utilizando uma placa circular de 25 cm de diâmetro como padrão, uma célula de carga, um macaco hidráulico, uma leitora eletrônica e demais acessórios. Em um dos locais ensaiados também foi realizado um ensaio com uma placa de diâmetro menor (15 cm). A Figura 3.12 ilustra a execução de um dos ensaios de prova de carga. A carga máxima aplicada nos ensaios foi de 40 kN, sendo aplicada em incrementos de 2 kN.

3.3.3 ENSAIOS COM O PENETRÔMETRO DINÂMICO DE CONE (DCP)

Durante a fase de construção da pista experimental foram realizados ensaios com o DCP sobre o subleito compactado e sobre a camada de base de agregados reciclados. O DCP

utilizado é formado por uma haste de 195,0 cm de comprimento, 16 mm de diâmetro e com uma extremidade pontiaguda em forma de cone a 60° com 20 mm de diâmetro. A penetração no solo ocorre por meio de golpes sucessivos através da queda de uma massa de 8 kg deslizando ao longo da haste a partir de uma altura constante de 57,5 cm. A partir do ensaio é possível determinar o índice de penetração (DN), em mm/golpe, a espessura das camadas em função da resistência e, utilizando correlações, o valor do ISC “*in loco*”. A Figura 3.13 ilustra a execução do ensaio com o penetrômetro dinâmico de cone.

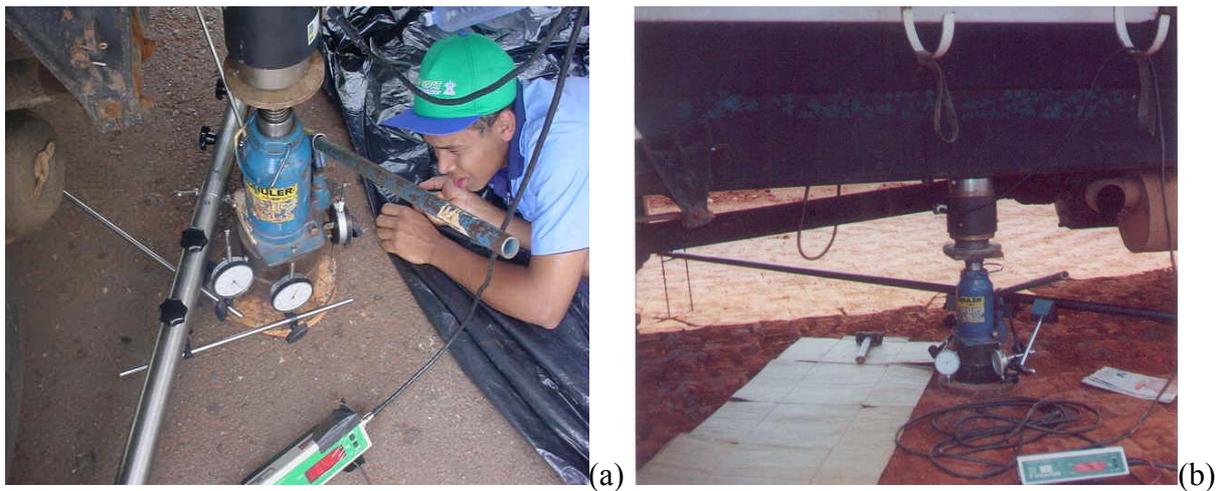


Figura 3.12 - Ensaio de prova de carga: (a) sobre o revestimento.; (b) sobre o subleito.



Figura 3.13 - Execução do ensaio com o penetrômetro dinâmico de cone (DCP).

3.3.4 ENSAIOS COM O PRESSIÔMETRO PENCEL

Os ensaios pressiométricos realizados na pesquisa foram feitos utilizando um pressiômetro Pencil com capacidade de 2500 kPa fabricado pela empresa canadense Rocctest. Os ensaios foram realizados nos bordos e no eixo da pista experimental, de forma semelhante ao realizado por Rezende (2003). No bordo direito (aterro) também foram executados furos horizontais. Com a realização do ensaio determina-se o módulo pressiométrico dos materiais no campo. A Figura 3.14 ilustra a execução de ensaios pressiométricos.

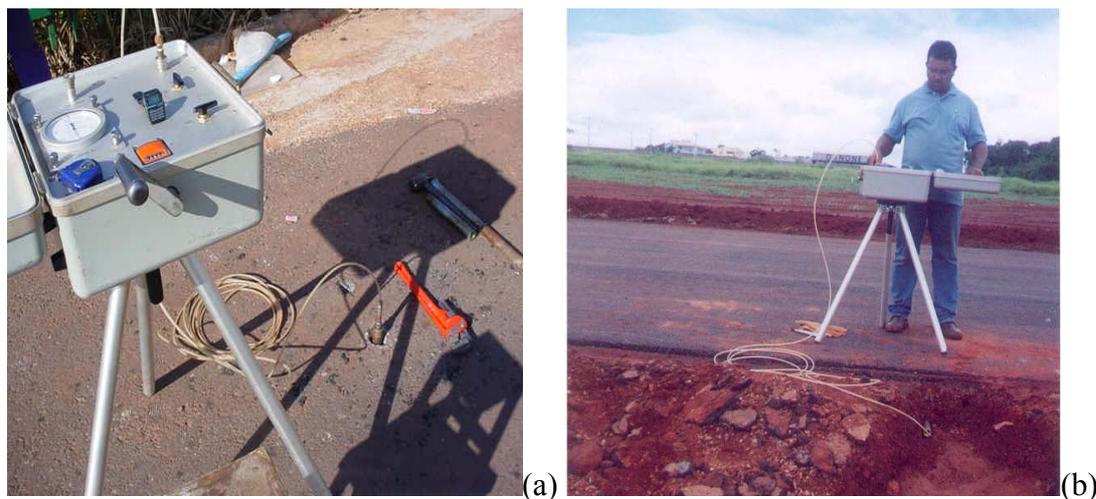


Figura 3.14 - Ensaio pressiométrico: (a) detalhe da unidade de controle e execução de furo vertical no subleito; (b) furo horizontal no subleito.

3.4 FASE DE MONITORAMENTO DA PISTA EXPERIMENTAL

A pista experimental somente foi liberada para o tráfego em novembro de 2004, em função da construção da nova portaria e da implantação do sistema de acesso local. O monitoramento da pista experimental, após o início da sua operação, foi realizado mediante a realização de três novas etapas de ensaios de campo onde foram realizados os ensaios de medidas de deflexão com a viga Benkelman, prova de carga sobre placa, medidas de penetração com o penetrômetro dinâmico de cone e ensaios pressiométricos, com o pressiômetro Pencil. Essas etapas foram realizadas em Maio de 2005, Novembro de 2005 e Maio de 2006, ou seja, após seis, doze e dezoito meses do início de operação da pista. Complementarmente a esses ensaios realizados nas três etapas, também foram realizados ensaios de determinação da massa específica “*in situ*”, com o frasco de areia e o densímetro nuclear e retiradas amostras para análise granulométrica. Em Novembro/2005 e Maio/2006 também foram realizados ensaios com o equipamento denominado de Geogauge e em

Maio/2006 com o equipamento denominado de Penetrômetro Panda. Detalhes desses equipamentos e ensaios estão descritos no Capítulo 2 do presente trabalho.

Em Setembro de 2004, portanto, nove meses após a construção da pista experimental e anteriormente à liberação para o tráfego, foi executado o ensaio de viga Benkelman sobre o pavimento estudado (Assis et al., 2004). Esse ensaio buscou mostrar, por comparação, a variação nas características deflectométricas do pavimento em função do tempo de construção e da variação das condições climáticas.

Em Agosto de 2005, durante o período de uma semana, foi realizada uma contagem de tráfego na pista experimental com o intuito de verificar o volume diário médio de veículos (VDM) e o carregamento suportado pelo pavimento em termos de número de repetições do eixo padrão de 82 kN (número N).

O cálculo do número N foi realizado de acordo com o Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis do DNER, descrito no Manual de Pavimentação (DNER, 1996) e constante em um projeto final de engenharia do extinto Departamento de Estradas de Rodagem de Goiás (DER-GO, 1997), para os períodos de projeto de 6 meses, 12 meses, 18 meses, 5 anos e 10 anos. Os períodos de 6, 12 e 18 meses correspondem às datas de realização das baterias de ensaios de monitoramento da pista experimental e os períodos de 5 e 10 anos foram adotados para se ter uma ordem de grandeza do volume de tráfego ao longo desses períodos de projeto do pavimento. Em função da pequena variação quantitativa, não foram consideradas taxas de variação de tráfego ao longo do tempo.

3.4.1 ENSAIOS COM O PENETRÔMETRO DINÂMICO PANDA

Utilizando-se um penetrômetro dinâmico Panda, do tipo descrito no capítulo 2, foram realizados ensaios nas estacas 3 (eixo), 4 (bordo direito) e 4+15 m (bordo esquerdo). Visando estabelecer uma correlação desse ensaio com o ensaio pressiométrico, adotou-se o seguinte procedimento:

- primeiramente foi feito o ensaio de penetração dinâmica tipo Panda em cada uma das estacas até a profundidade de 2 m e coletadas, ao longo da profundidade, cinco amostras para a determinação do teor de umidade;

- em seguida, nos mesmos locais onde foram realizados os ensaios com o Panda, também foram realizados, em um mesmo furo, cinco ensaios pressiométricos em profundidades diferentes e coletadas amostras para determinação da umidade.

3.4.2 ENSAIOS COM O GEOGAUGE

Utilizando-se um geogauge da marca Humboldt, do tipo descrito no capítulo 2, foram realizados ensaios nas mesmas estacas onde foram concentrados os demais ensaios (3 EX, 4 BD e 4+15 BE). Os ensaios foram realizados sobre o revestimento asfáltico e sobre a base de agregados reciclados. Sobre o revestimento foram realizados quatro ensaios, próximos uns dos outros, para cada estaca e sobre a base, após a retirada do revestimento utilizando marreta e talhadeira, foi realizado um ensaio para cada estaca. A Figura 3.15 ilustra o equipamento utilizado e a realização de um dos ensaios.



Figura 3.15 - Geogauge: detalhe do equipamento e ensaio sobre a base de agregados reciclados.

3.4.3 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DOS PESOS ESPECÍFICOS DE CAMPO

Durante a fase de construção da pista experimental o controle do grau de compactação foi realizado utilizando-se o método do frasco de areia (ABNT, 1986) e o densímetro nuclear, pertencente ao laboratório de FURNAS S. A. Nas fases de monitoramento, com intuito de verificar o peso específico das camadas de base e sub-base, também foram utilizados os dois processos, com exceção de Maio de 2005, onde foi utilizado somente o densímetro nuclear. O densímetro nuclear utilizado, modelo 3440 da Troxler, de posse do laboratório de FURNAS S. A. possui uma haste de 20 cm de comprimento e permite fazer leituras a 5, 10, 15 e 20 cm de profundidade, em relação à superfície. O posicionamento da haste é feito em um furo já executado com ferramentas que acompanham o equipamento. A determinação das massas específicas é feita pela emissão de raios gama a partir do elemento Césio-137 localizado na extremidade da haste; para as medições de umidade são utilizadas fontes de radiação de

Americio-241 Berilo, onde são emitidos nêutrons. A Figura 3.16 ilustra um dos ensaios realizados utilizando o densímetro nuclear.



Figura 3.16 - Determinação do peso específico de campo utilizando o densímetro nuclear.

3.4.4 ENSAIOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DO REVESTIMENTO ASFÁLTICO DA PISTA EXPERIMENTAL

Visando identificar e quantificar as características do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), aplicado como revestimento do pavimento da pista experimental, foi extraída uma amostra do mesmo, em Janeiro de 2004, e realizados os ensaios de extração de betume, de acordo com o método de ensaio ME 053 (DNER, 1994c) e granulometria após a extração, de acordo com a norma DNIT 031/2006 – ES (DNIT, 2006).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos nos estudos de laboratório, realizados com agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil, com o solo argiloso e com a mistura destes, e os resultados dos ensaios de campo, realizados na pista experimental. Conforme mencionado no início do capítulo 3, os resultados dos ensaios de laboratório aqui apresentados foram obtidos, na sua quase totalidade, utilizando agregados reciclados de origem diferente dos utilizados na pista experimental. O solo utilizado nos ensaios de laboratório, entretanto, é o mesmo da pista experimental.

4.2 FASE DE ESTUDOS DE LABORATÓRIO

4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

A Figura 4.1 apresenta as curvas granulométricas dos agregados reciclados de concreto, ARC 19,1 e ARC 9,5 e a Figura 4.2 as curvas granulométricas dos agregados reciclados mistos, ARM 19,1 e ARM 9,5, obtidas de ensaios realizados com e sem lavagem dos grãos. Observa-se pelas figuras que o processo de lavagem realizado para retirar os finos aderidos aos grãos maiores causa uma pequena alteração na textura. A realização dos ensaios com e sem lavagem mostrou-se interessante na caracterização dos agregados reciclados, que podem conter quantidades significantes de grãos resistentes ou não a esse processo. Para efeito de realização das dosagens, optou-se pela utilização dos resultados da granulometria sem lavagem.

A Tabela 4.1 e a Figura 4.3 apresentam os resultados das análises granulométricas de todos os agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil (AR) utilizados na fase de análises de laboratório. Com relação à granulometria, as frações de AR 19,1 e AR 9,5, de concreto e mistas (essencialmente cerâmicas), apresentaram curvas granulométricas uniformes e bem semelhantes. Nas frações de AR 4,8, entretanto, as curvas granulométricas apresentaram-se melhor graduadas e um pouco distintas, sendo a amostra de agregado reciclado cerâmico mais fina que a de concreto.

As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os valores de peso específico dos grãos (γ_s), peso específico aparente seco dos grãos (γ_d), absorção (A), porosidade (n) e índice de vazios dos

grãos (e) retidos na peneira de 4,8 mm. Para realização das conversões de massa específica para peso específico, adotou-se a aceleração da gravidade $g = 9,807 \text{ m/s}^2$. Na forma alternativa, com o umedecimento lento, foram obtidos valores um pouco maiores de peso específico dos grãos e absorção e então esses valores foram os adotados.

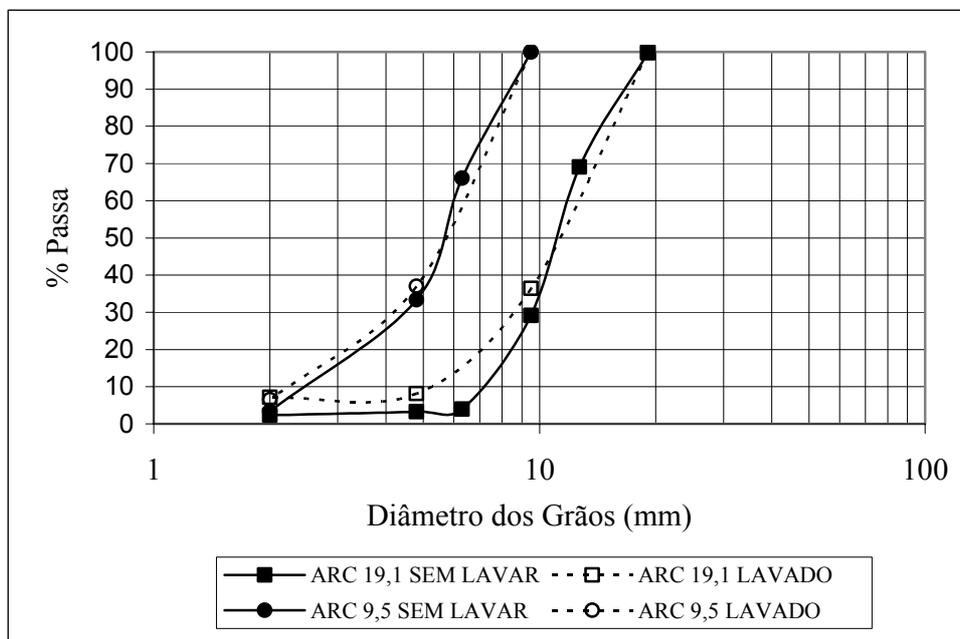


Figura 4.1 – Curvas granulométricas dos agregados reciclados de concreto – ARC, com e sem lavagem.

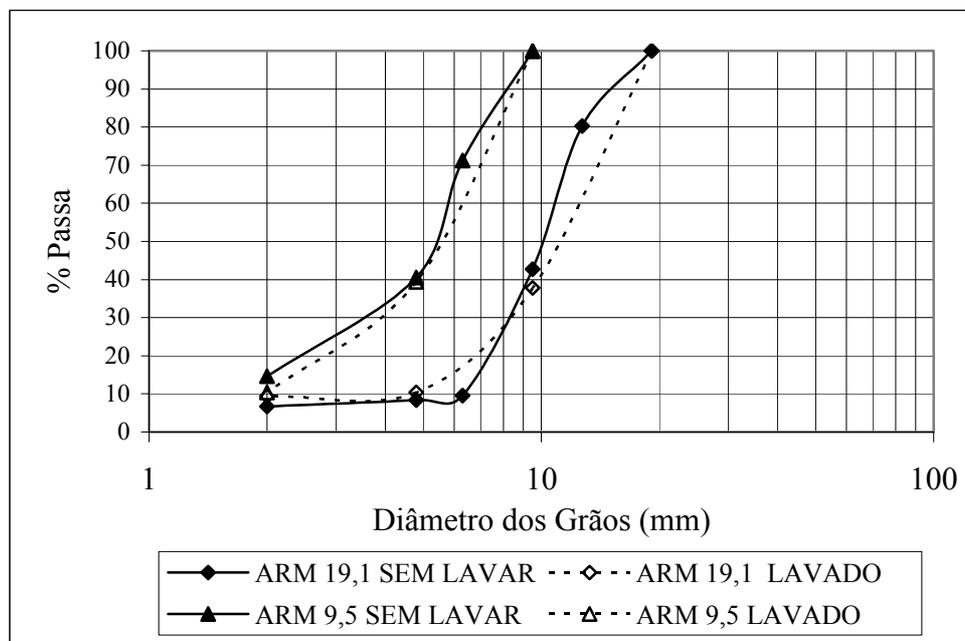


Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos agregados reciclados mistos – ARM, com e sem lavagem.

Tabela 4.1- Caracterização textural dos agregados reciclados estudados em laboratório.

Peneira	Abertura (mm)	% Passa					
		ARC 19,1	ARM 19,1	ARC 9,5	ARM 9,5	ARC 4,8	ARM 4,8
3/4"	19,1	99,8	100,0				
1/2"	12,7	69,0	80,2				
3/8"	9,5	29,2	42,7	100,0	99,9		
1/4"	6,3	4,0	9,5	66,1	71,3		
Nº 4	4,8	3,3	8,4	33,3	40,6	100,0	100,0
Nº 10	2,0	2,3	6,7	3,4	14,7	77,6	89,2
16	1,2						
30	0,6						
40	0,42					41,8	65,2
50	0,3						
100	0,15					26,4	36,4
200	0,075					18,4	22,8
SEDIMENTAÇÃO	0,037					12,0	14,7
	0,019					8,9	11,2
	0,009					5,9	8,7
	0,005					4,2	4,1
	0,002					2,7	3,3
C _U		2	2	2	4	49	27
C _C		0	0	0	0	7	22

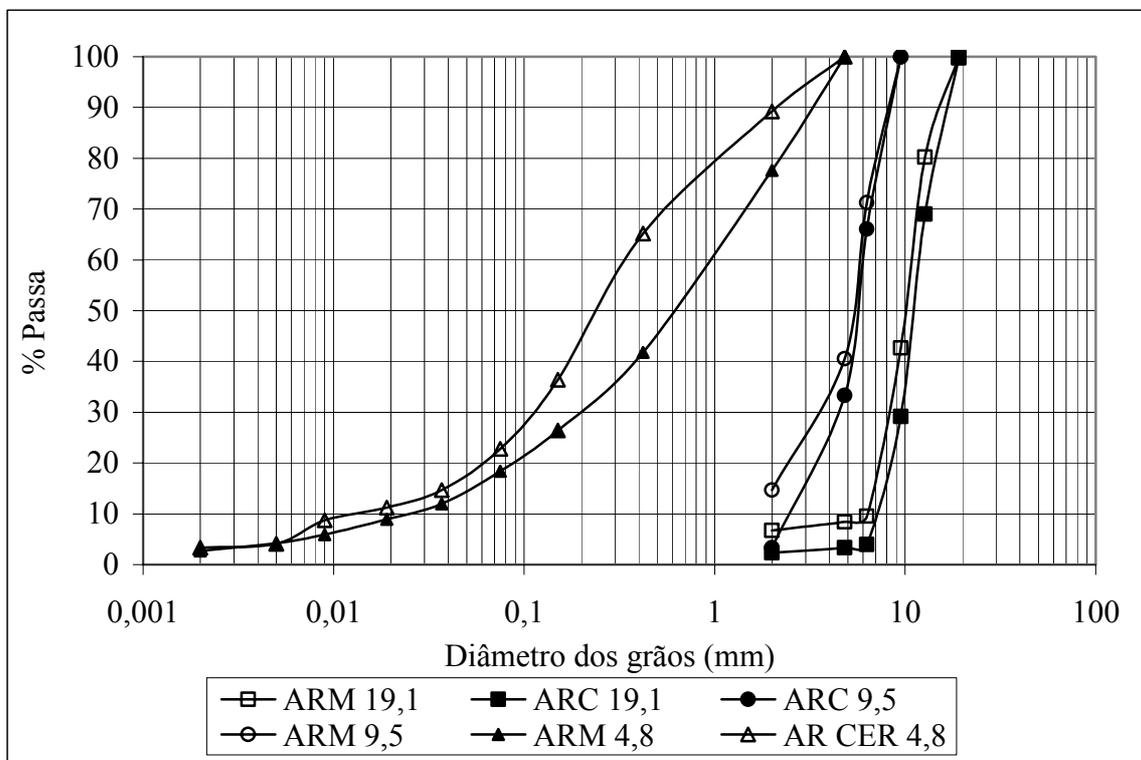


Figura 4.3 - Curvas granulométricas de todos os agregados reciclados estudados em laboratório.

A Tabela 4.4 apresenta os valores de peso específico dos grãos maiores e menores que 4,8 mm, separadamente e considerando as duas frações juntas, de acordo com a NBR 6508 (ABNT,1984d). Para a realização das análises das dosagens foram adotados os pesos específicos considerando as duas frações.

Tabela 4.2 – Peso específico, absorção e porosidade dos grãos > 4,8 mm dos agregados reciclados estudados em laboratório – NBR 6508 (ABNT, 1984d).

Índices Físicos dos grãos > 4,8 mm		ARC 19,1	ARC 9,5	ARM 19,1	ARM 9,5
γ_s	kN/m ³	26,1	26,0	25,2	25,6
γ_d	kN/m ³	22,9	22,4	17,9	17,9
A	%	5,2	6,3	16,0	16,5
n	%	12,3	14,4	29,2	30,1
e	ad	0,14	0,17	0,41	0,43

Tabela 4.3 – Peso específico, absorção e porosidade dos grãos > 4,8 mm dos agregados reciclados estudados em laboratório – NBR 6508 (ABNT, 1984d), com imersão lenta.

Índices Físicos dos grãos > 4,8 mm		ARC 19,1	ARC 9,5	ARM 19,1	ARM 9,5
γ_s	kN/m ³	26,2	26,3	25,4	25,9
γ_d	kN/m ³	22,6	21,7	17,7	17,6
A	%	6,0	7,8	16,8	17,9
n	%	13,8	17,4	30,3	32,1
e	ad	0,16	0,21	0,44	0,47

Os altos valores de absorção das amostras de ARC se devem à elevada porosidade da fração argamassa constituinte dos mesmos e os das amostras de ARM à porosidade elevada dos grãos cerâmicos e de argamassa. Com relação aos pesos específicos dos grãos menores que 4,8 mm, as amostras de agregado reciclado cerâmico e de concreto apresentaram valores semelhantes; para os grãos maiores que 4,8 mm, entretanto, os valores foram um pouco distintos, ficando os maiores valores para os agregados reciclados de concreto e os menores para os agregados reciclados cerâmicos. A alta absorção dos grãos cerâmicos influencia na homogeneização das dosagens e, conseqüentemente, no controle da umidade de compactação. Silva (2004) determinou a partir da realização de ensaios de absorção com tempos diferentes de imersão dos grãos, para um agregado reciclado misto, que com aproximadamente 30 minutos de imersão os valores máximos de absorção eram atingidos. Com relação à plasticidade, determinada pelos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade, as amostras de agregados reciclados < 4,8 apresentaram-se, como esperado, não plásticas (IP = NP).

Tabela 4.4 – Peso específico dos grãos dos agregados reciclados estudados em laboratório – frações maiores e menores que 4,8 mm – NBR 6508 (ABNT, 1984d).

Peso Específico dos Grãos		ARC 19,1	ARC 9,5	ARM 19,1	ARM 9,5
$\gamma_s (< 4,8 \text{ mm})$	kN/m ³	26,0	26,0	26,1	26,1
$\gamma_s (> 4,8 \text{ mm})$ - imersão lenta	kN/m ³	26,2	26,3	25,4	25,9
γ_s (frações $< 4,8 \text{ mm}$ e $> 4,8 \text{ mm}$)	kN/m ³	26,2	26,2	25,4	26,0
γ_s (Médio)	kN/m ³	26,2		25,7	

A Tabela 4.5 apresenta os resultados do ensaio de abrasão *Los Angeles* realizado com seis amostras de agregados reciclados, sendo três de ARC e três de ARM, enquadradas em três faixas de graduação do método de ensaio ME 035 (DNER, 1998). Especificamente no ensaio de abrasão, para avaliar a quebra dos grãos maiores que 19,1 mm, foi utilizada uma fração dos agregados reciclados ARC e ARM retida na peneira de 19,1 mm, obtida na britagem. O valor limite de abrasão Los Angeles admitido pela especificação de serviço ES 303 (DNER, 1997) para base estabilizada granulometricamente é de 55%, entretanto, admite-se valores maiores no caso de em utilização anterior o material ter apresentado desempenho satisfatório. As amostras de ARC apresentaram valores bastante inferiores a esse limite e duas das amostras de ARM, valores um pouco maiores. Os resultados sugerem que se ponderados os respectivos desgastes, em dosagens contendo mistura de ambos os tipos de agregados, até um determinado limite de percentual de grãos de ARM, os valores de abrasão podem atender à exigência da norma. Os maiores valores de abrasão verificados para as amostras de ARM em relação às amostras de ARC são atribuídos à maior porosidade dos agregados ARM e à sua própria constituição.

Tabela 4.5 – Perda de massa por abrasão Los Angeles - agregados reciclados estudados em laboratório.

Material	Graduação da Amostra	Massa Inicial (g)	Massa Retida # 1,7 mm (g)	Índice de Perda (%) Abrasão Los Angeles
ARC Ret. > 19,1	B	5000	3351,1	33
ARC 19,1	C	5000	3201,3	36
ARC 9,5	D	5000	3112,9	38
ARM > 19,1	B	5000	2123,2	58
ARM 19,1	C	5000	2046,6	59
ARM 9,5	D	5000	2281,8	54

A Tabela 4.6 apresenta os resultados dos ensaios de índice de forma realizados com as amostras de ARC 19,1 e ARM 19,1, utilizando crivos de abertura circular e crivos redutores (DNER, 1994d). Em função da textura, as amostras foram enquadradas na graduação C da

norma e divididas em três frações de 2000 g cada. Os valores de índice de forma obtidos foram satisfatórios para ambos os tipos de agregados reciclados, uma vez que o valor mínimo recomendado por normas do DNER para o índice de forma é de 0,50 e os valores obtidos ficaram acima desse limite.

Tabela 4.6 – Índice de forma dos agregados reciclados estudados em laboratório.

Amostra	Crivos Circulares (mm)	Massa da Amostra (g)	Crivos Redutores (mm)	IF
ARC 19,1	19,0 a 16,0	2000	I =9,5	0,86
			II = 6,3	
	16,0 a 12,7	2000	I =8	
			II =5,3	
	12,7 a 9,5	2000	I =6,3	
			II = 4,2	
Amostra	Crivos Circulares (mm)	Massa da Amostra (g)	Crivos Redutores (mm)	IF
ARM 19,1	19,0 a 16,0	2000	I =9,5	0,69
			II = 6,3	
	16,0 a 12,7	2000	I =8	
			II =5,3	
	12,7 a 9,5	2000	I =6,3	
			II = 4,2	

A fim de visualizar os grãos e os elementos constituintes do ARM 4,8 as Figuras 4.4 e 4.5 apresentam imagens feitas com uma lupa binocular de frações compreendidas entre as malhas de abertura 1,2 e 0,59 mm e entre 0,59 e 0,42 mm. Observando as figuras, identifica-se a presença de grãos cerâmicos, de argamassa e de quartzo, esse último presente em grande quantidade nas frações mais finas. Os grãos cerâmicos apresentam superfície porosa, baixa esfericidade e arestas sub-angulosas; os grãos de argamassa são bastante porosos, possuem média esfericidade e arestas sub-angulosas; por sua vez, os grãos de quartzo apresentam brilho vítreo, esfericidade média e são angulosos. As estimativas visuais de esfericidade e angularidade foram feitas com base na carta de Powers (1953).

A Figura 4.6 ilustra a realização do ensaio de pH em uma das frações finas dos agregados reciclados e a Figura 4.7 apresenta os resultados obtidos. Os valores de pH medidos ficaram entre 12,0 (ARC) e 11,1 (ARM). O alto valor de pH do ARM se deve à impregnação do mesmo com argamassa, conforme pode ser observado nas Figuras 4.4 e 4.5. Os resultados mostraram que quanto maior o percentual de agregados contendo cimento na amostra, maior o valor do pH.

A Tabela 4.7 apresenta o resumo da caracterização feita com oito amostras de solos argilosos de diversas regiões do município de Goiânia que não possuíam as ruas pavimentadas. Como representativas das amostras caracterizadas, em termos de textura, plasticidade e massa específica dos grãos, foram escolhidas as amostras do local da pista

experimental da CEASA (Amostra 2), da região nordeste da cidade, e a do Setor Recanto do Bosque - RB (Amostra 4), da região noroeste, para a realização de uma caracterização química.



Figura 4.4 - Imagem em lupa binocular do agregado reciclado ARM 4,8 - fração passante na peneira de 1,2 mm de abertura e retida na peneira 0,59 mm.



Figura 4.5 – Imagem em lupa binocular do agregado reciclado ARM 4,8 - fração passante na peneira de 0,59 mm de abertura e retida na peneira 0,42 mm.

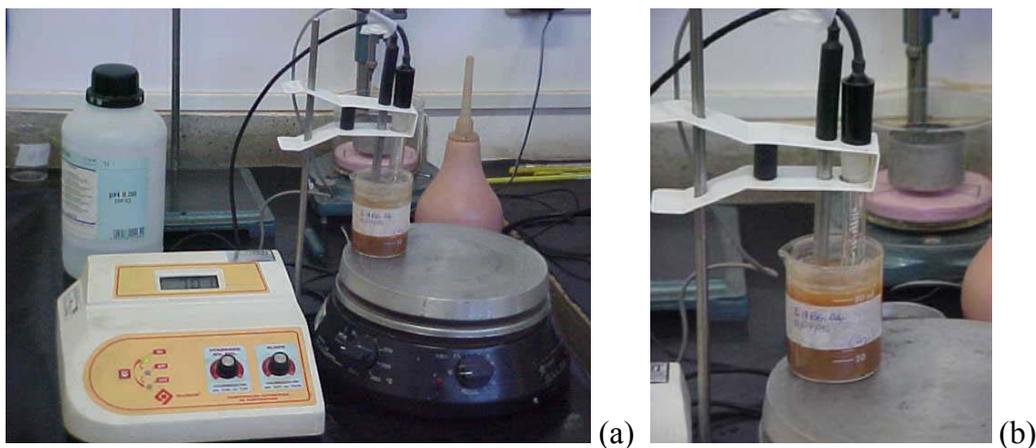


Figura 4.6 – Determinação do pH da fração fina dos agregados reciclados estudados em laboratório: (a) Vista geral do equipamento; (b) Detalhe do eletrodo imerso na amostra.

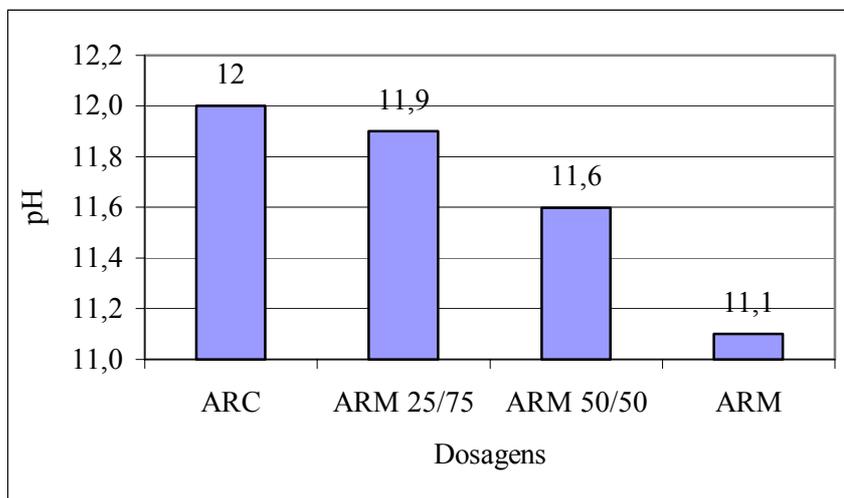


Figura 4.7 – Valores de pH dos agregados reciclados estudados em laboratório.

A Tabela 4.8 apresenta os resultados da análise química realizada com as duas amostras de solo argiloso escolhidas. Verifica-se que os dois solos apresentaram pH ácido, tanto em água quanto em kCl; a diferença ΔpH (kCl-água) positiva indica a predominância de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e a negativa uma predominância de argilas silicatadas. Quanto à capacidade de troca catiônica (CTC) o solo da CEASA apresentou valores pouco maiores que o do Recanto do Bosque. Valores de saturação de bases menores que 50% indicam solos intemperizados. Observa-se que para os dois perfis estudados apenas os solos mais superficiais enquadram-se como intemperizados. Apenas a amostra da CEASA apresentou um pequeno teor de alumínio na camada mais superficial. Em função da caracterização física e das análises químicas e por ser bem representativa das amostras de solo

argiloso estudadas, optou-se por utilizar a amostra do local da pista experimental (CEASA) nos estudos de dosagens com os agregados reciclados. As amostras de solo da pesquisa foram então coletada na CEASA, no local do perfil de solo estudado, a uma profundidade inferior a um metro.

Tabela 4.7 - Caracterização de oito solos argilosos do município de Goiânia.

Solo Argiloso	gs kN/m ³	Limites			Granulometria				
		W _L	W _P	IP	Pedregulho	Areia	Silte	Argila	P ₂₀₀
Amostra 1	27,7	53	34	19	0,5	33,5	14,0	52,0	72,8
Amostra 2	26,9	42	26	16	0,2	40,1	22,2	37,5	65,5
Amostra 3	27,1	42	25	17	0,1	47,7	19,0	33,2	55,6
Amostra 4	27,9	47	27	20	1,8	38,3	24,2	35,7	65,0
Amostra 5	26,9	44	26	18	0,0	46,4	23,7	29,9	56,8
Amostra 6	26,5	43	25	18	0,9	46,1	19,1	33,9	56,8
Amostra 7	28,0	62	35	27	0,5	28,4	25,2	45,9	76,5
Amostra 8	25,7	44	24	20	0,1	37,9	30,2	31,8	67,8
Média	27,1	47	28	19	0,5	39,8	22,2	37,5	64,6

Amostra 1 Labo/mini-pista (Av. Perimetral) - Silva (2004)

Amostra 2 Pista experimental CEASA - Silva (2004)

Amostra 3 Recanto do Bosque - Rua Tropical - Praça

Amostra 4 Recanto do Bosque - Rua Tropical - Campo

Amostra 5 Estrela Dalva 1 - Rua 15 de Novembro

Amostra 6 Residencial Eli Forte - Rua EF 28

Amostra 7 Residencial Vale dos Sonhos - Qd 15 L-34

Amostra 8 Jardim da Luz - R. José L. Cruz - Qd 47

A Tabela 4.9 apresenta os dados de caracterização da amostra do solo argiloso coletado na CEASA para a realização das dosagens e a Figura 4.8 suas curvas granulométricas obtidas de ensaios realizados com e sem defloculante. Observando a Figura 4.8 percebe-se um elevado teor de micro agregações, característico de solos lateríticos. De acordo com os dados de caracterização o solo argiloso da pesquisa foi classificado no Sistema Unificado de Classificação dos Solos, como CL - Argila arenosa de baixa plasticidade e como A-7-6 (IG = 11) - Solos Argilosos, na Classificação TRB -*Transportation Research Board*, esta última bastante utilizada na área de pavimentação. Também foram realizados os ensaios da classificação MCT, para solos tropicais e, segundo essa classificação o solo foi enquadrado no grupo LG' - Solo Argiloso de Comportamento Laterítico ($c' = 1,80$; $d' = 74,40$; $e' = 0,80$ e $P_i = 44,4\%$).

Tabela 4.8 - Análise química de dois solos argilosos do município de Goiânia.

CARACTERÍSTICAS	CEASA	CEASA	CEASA	CEASA	RB	RB	RB	RB
	0,50 m	1,50 m	2,50 m	3,50 m	0,50 m	1,50 m	2,50 m	3,00 m
pH H ₂ O	5,2	5,4	5,4	5,5	5,2	5,4	5,5	5,2
pH kCl	4,7	5,6	6,1	6,2	5,3	6	6,1	6
DpH	-0,5	0,2	0,7	0,7	0,1	0,6	0,6	0,8
Ca (mEq/100 cm ³)	0,8	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6
Mg (mEq/100 cm ³)	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5
Ca+Mg (mEq/100 cm ³)	1,4	1,1	1,1	1,1	0,9	0,9	0,9	1,1
Al (mEq/100 cm ³)	0,1	0	0	0	0	0	0	0
H+Al (mEq/100 cm ³)	3,7	1,7	0,9	0,9	1,6	1,1	0,5	0,8
CTC (mEq/100 cm ³)	5,2	2,9	2,1	2	2,5	2	1,4	1,9
P (Melich) mg/dm ³	1	1	1	1	1	1	1	1
K (mEq/100 cm ³)	0,05	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03
K mg/dm ³	20	24	20	12	12	8	12	12
Matéria Orgânica (%)	1,6	1	0,7	0,4	1	0,7	0,4	0,4
Saturação de Alumínio (%)	7	0	0	0	0	0	0	0
Saturação de Bases (%)	28	41	56	56	37	46	65	59
Ca/Mg	1,3	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,2
Ca/CTC (%)	16	21	29	30	20	25	35	31
Mg/CTC (%)	12	17	24	25	16	20	28	26
K/CTC (%)	1	2	2	2	1	1	2	2
H+Al/CTC (%)	72	59	44	44	63	54	35	41

Tabela 4.9 - Caracterização do solo argiloso do município de Goiânia (CEASA), utilizado nas dosagens com agregados reciclados.

ENSAIO	γ_s (kN/m ³)	Limites			Granulometria (% Passa)									
		W _L	W _P	IP	Peneiramento					Sedimentação				
	(%)	(%)	(%)	4,8	2,0	0,42	0,15	0,08	0,04	0,02	0,009	0,005	0,002	
AM1	27,36	48	27	21	100,0	99,1	92,9	77,2	62,6	49,5	46,7	45,5	41,5	37,0
AM2					100,0	99,1	92,5	75,4	60,6	37,0	28,0	5,0	2,0	0,0

AM1: Com defloculante

AM2: Sem defloculante

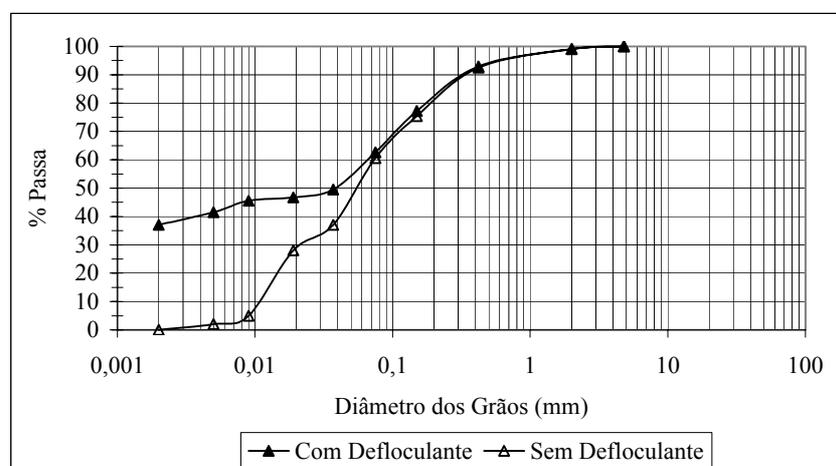


Figura 4.8 - Curvas granulométricas, com e sem defloculante, do solo argiloso do município de Goiânia (CEASA) utilizado na pesquisa.

4.2.2 DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS

A Tabela 4.10 apresenta os percentuais de cada fração de agregado reciclado e de solo argiloso utilizados nas dosagens dos ensaios de compactação e ISC. As dosagens N° 1 e 2, ARM e ARC, correspondem aos agregados reciclados puros, obtidos da britagem de resíduos sólidos mistos (essencialmente cerâmicos) e de concreto, respectivamente, onde as três frações granulométricas de cada um foram estipuladas para que a dosagem ficasse enquadrada na faixa granulométrica desejada. As demais dosagens, todas denominadas de ARM, seguidas das nomenclaturas 50/50 ou 25/75 correspondem à mistura dos dois tipos de agregados reciclados em diferentes percentagens. O primeiro número da nomenclatura indica o percentual de grãos ou agregados cerâmicos presente na dosagem e o segundo número o percentual de grãos cimentícios, ou seja, o percentual de grãos de argamassa, provenientes do próprio ARM puro, mais o percentual de grãos ou agregados de concreto do ARC puro. Como o agregado reciclado essencialmente cerâmico (ARM), conforme descrito no capítulo 3, possuía 31,8% dos seus grãos compostos por argamassa impregnada e 68,2% de grãos realmente cerâmicos, foi feito um ajuste do percentual de grãos cimentícios na composição das dosagens. Por exemplo, na Tabela 4.10, a dosagem ARM 50/50 possui, em massa, 50% de grãos ou agregados cerâmicos e 50% de grãos ou agregados cimentícios. Os 50% de grãos ou agregados cimentícios correspondem a 26,7% de grãos ou agregados de concreto e 23,3% de grãos ou agregados de argamassa, provenientes do ARM puro. As dosagens da Tabela 4.10, com exceção da N° 17 (ARM 50/50 PM) que foi compactada com a energia modificada, foram compactadas utilizando a energia de compactação do Proctor intermediário. Todas as dosagens, com exceção das de N° 15, que foi enquadrada na faixa F e N° 16, que foi enquadrada na faixa A, foram enquadradas na faixa C da especificação de serviço ES 303 (DNER, 1997a). A Tabela 4.11 apresenta a distribuição granulométrica de cada dosagem em relação às peneiras da Faixa C, adotada. A Figura 4.9 ilustra as curvas granulométricas de algumas das dosagens, juntamente com a faixa adotada.

4.2.3 PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO E ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

A Tabela 4.12 e as Figuras 4.10 e 4.11 apresentam os parâmetros de compactação e ISC obtidos para as dezessete dosagens com agregados reciclados ensaiadas. O ensaio de ISC foi realizado após a imersão dos corpos de prova por 96 horas, conforme prescrito na NBR 9895 (ABNT, 1987). Para estabelecer correlações dos parâmetros dos ensaios com o índice de

vazios, levando em conta a alta porosidade dos grãos de agregados reciclados, na Tabela 4.12 estão apresentados o índice de vazios total, obtido utilizando-se o peso específico dos grãos (γ_s), e o índice de vazios interagregados, obtido utilizando-se o peso específico aparente dos grãos (γ_d). Faz-se necessário destacar a importância de se considerar a porosidade dos agregados reciclados de modo isolado dos vazios existentes em um determinado volume de solo, como por exemplo, um corpo de prova. Neste caso o índice de vazios corresponde aos existentes no interior e entre os agregados. Os vazios existentes no interior dos agregados reciclados, principalmente nos cerâmicos, geralmente são bem maiores que os existentes na maioria dos agregados pétreos. Como quem comanda o comportamento hidráulico e mecânico da massa de material são os vazios entre os agregados e não os que estão no seu interior, quanto a esse aspecto eles não têm importância relevante. Por outro lado, eles serão importantes quando se avalia a resistência dos próprios agregados ou a aderência ao betume, ou ainda o grau de absorção. Por isso torna-se fundamental conhecer, além do índice de vazios total, o índice de vazios interno dos agregados.

Tabela 4.10 - Composição das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.

DOSAGENS		PERCENTUAL DOS COMPONENTES NAS DOSAGENS									
		ARM 19,1	ARM 9,5	ARM 4,8	ARM TOTAL	ARC 19,1	ARC 9,5	ARC 4,8	ARC TOTAL	ARM TOTAL	SOLO ARGILOSO
1	ARM	33,3	33,3	33,4	100,0	-	-	-	-	100,0	-
2	ARC	-	-	-	-	27,5	27,5	45,0	100,0	100,0	-
3	ARM 50/50	22,9	22,9	27,5	73,3	7,4	7,4	11,9	26,7	100,0	-
4	ARM 25/75	10,7	10,7	15,3	36,7	19,6	19,6	24,1	63,3	100,0	-
5	ARM 20% AS	30,0	40,0	10,0	80,0	-	-	-	-	80,0	20,0
6	ARC 20% AS	-	-	-	-	30,0	35,0	15,0	80,0	80,0	20,0
7	ARM 50/50 10% SA	22,0	22,0	22,0	66,0	10,0	7,0	7,0	24,0	90,0	10,0
8	ARM 50/50 20% SA	28,0	20,6	10,0	58,6	7,0	9,4	5,0	21,4	80,0	20,0
9	ARM 50/50 30% SA	26,0	25,3	0,0	51,3	9,7	9,0	0,0	18,7	70,0	30,0
10	ARM 50/50 40% SA	22,0	22,0	0,0	44,0	8,0	8,0	0,0	16,0	60,0	40,0
11	ARM 25/75 10% SA	11,0	11,0	11,0	33,0	19,0	19,0	19,0	57,0	90,0	10,0
12	ARM 25/75 20% SA	12,2	12,2	4,9	29,3	21,1	21,1	8,5	50,7	80,0	20,0
13	ARM 25/75 30% SA	22,2	22,2	0,0	44,4	12,8	12,8	0,0	25,6	70,0	30,0
14	ARM 25/75 40% SA	11,0	11,0	0,0	22,0	19,0	19,0	0,0	38,0	60,0	40,0
15	ARM 25/75 20% SA - Finos	-	-	29,3	29,3	-	-	50,7	50,7	80,0	20,0
16	ARM 25/75 20% SA FX A	20,7	8,7	-	29,4	15,3	35,3	-	50,6	80,0	20,0
17	ARM 50/50 PM	22,9	22,9	27,5	73,3	7,4	7,4	11,9	26,7	100,0	-

Tabela 4.11 - Distribuição granulométrica das dosagens de agregados reciclados e solo argiloso estudadas em laboratório.

PENEIRA	FAIXA C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
1"	25,4	100	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	100,0	100,0		
3/8"	9,5	50	85	77,6	80,9	77,6	79,5	81,1	76,4	78,7	74,9	74,1	79,5	80,8	77,1	77,1	81,0	-	77,6	77,6
4	4,8	35	65	50,6	59,2	52,5	52,5	51,8	47,6	52,6	51,2	47,2	54,3	52,8	47,6	47,6	54,3	100,0	42,4	52,5
10	2,0	25	50	36,7	39,8	39,8	38,1	39,6	33,4	39,7	40,6	36,5	45,6	39,6	34,9	34,9	45,3	86,5	29,0	39,8
40	0,42	15	30	24,5	18,1	24,8	21,1	33,6	26,0	29,7	32,9	33,1	41,9	27,7	27,9	27,9	41,5	53,3	24,4	24,8
200	0,075	5	15	7,4	5,8	6,7	5,8	19,8	16,1	13,2	19,0	22,2	28,3	13,2	16,7	16,7	27,9	16,9	11,4	6,7

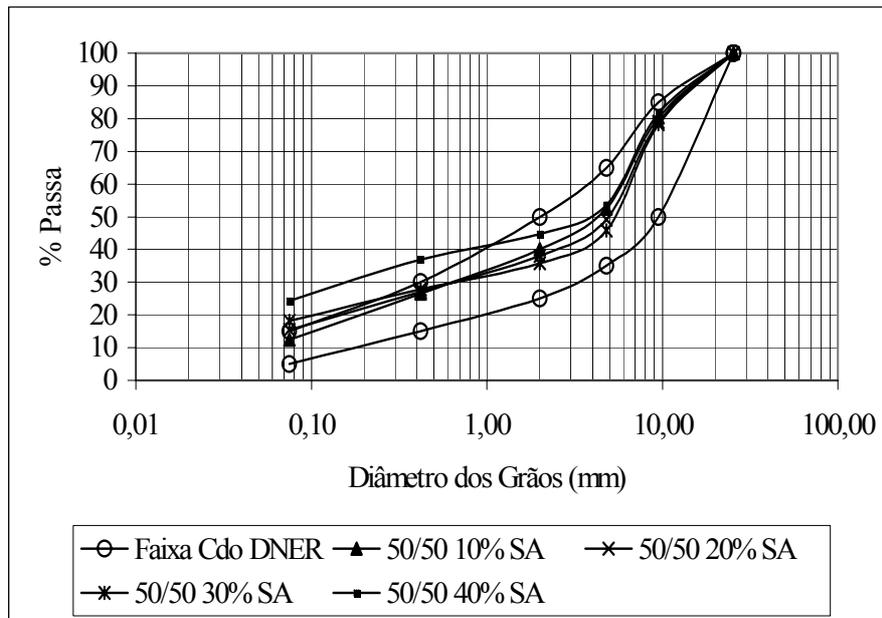


Figura 4.9 - Curvas granulométricas das dosagens de agregados reciclados ARM 50/50 com solo argiloso e faixa C da ES 303/97 do DNER.

Tabela 4.12 - Parâmetros de compactação e ISC das dosagens com agregados reciclados estudadas em laboratório.

Dosagem	γ_s (kN/m ³)	w _{ot} (%)	γ_d max (kN/m ³)	CBR (%)	γ_d grão (kN/m ³)	e ₁	e ₂	Sr (%)
1 ARM	25,7	21,1	15,39	73	17,7	0,147	0,670	80,9
2 ARC	26,2	14,5	17,85	104	22,2	0,241	0,468	81,2
3 ARM 50/50	26,0	19,7	16,24	104	19,9	0,225	0,598	85,5
4 ARM 25/75	26,1	17,4	17,09	104	21,0	0,230	0,526	86,3
5 ARM 20% SA	26,0	21,4	16,03	54	19,6	0,222	0,624	89,3
6 ARC 20% SA	26,4	12,3	18,71	70	23,2	0,240	0,413	78,8
7 ARM 50/50 10% SA	26,1	18,2	16,57	75	20,6	0,246	0,574	82,7
8 ARM 50/50 20% SA	26,2	18,0	16,75	74	21,4	0,277	0,566	83,4
9 ARM 50/50 30% SA	26,4	17,8	17,02	52	22,1	0,301	0,549	85,4
10 ARM 50/50 40% SA	26,5	17,6	17,16	41	22,9	0,334	0,545	85,6
11 ARM 25/75 10% SA	26,2	15,7	17,49	93	21,7	0,238	0,498	82,6
12 ARM 25/75 20% SA	26,3	15,6	17,82	91	22,3	0,251	0,478	86,0
13 ARM 25/75 30% SA	26,5	15,9	17,65	49	22,9	0,299	0,499	84,3
14 ARM 25/75 40% SA	26,6	15,6	17,69	49	23,6	0,332	0,503	82,4
15 ARM 25/75 20% SA FX F	26,3	18,5	16,51	40	22,3	0,350	0,595	81,9
16 ARM 25/75 20 SA FX A	26,3	14,4	17,64	74	22,3	0,264	0,493	77,0
17 ARM 50/50 PM	26,0	18,8	16,65	117	19,9	0,195	0,559	87,3

e₁ = Índice de vazios calculado utilizando o γ_d dos grãos - vazios entre os grãos

e₂ = Índice de vazios calculado utilizando o γ_s dos grãos - vazios externos e internos dos grãos

A Tabela 4.13 apresenta os parâmetros de compactação e ISC do solo argiloso nas energias normal e intermediária. Observando a tabela, verifica-se um aumento significativo no valor do ISC com o aumento da energia de compactação, e expansão nula para ambos os casos. A Figura 4.12 apresenta a relação entre o peso específico seco máximo e o ISC das dosagens estudadas e a Figura 4.13 a relação entre a umidade ótima o ISC.

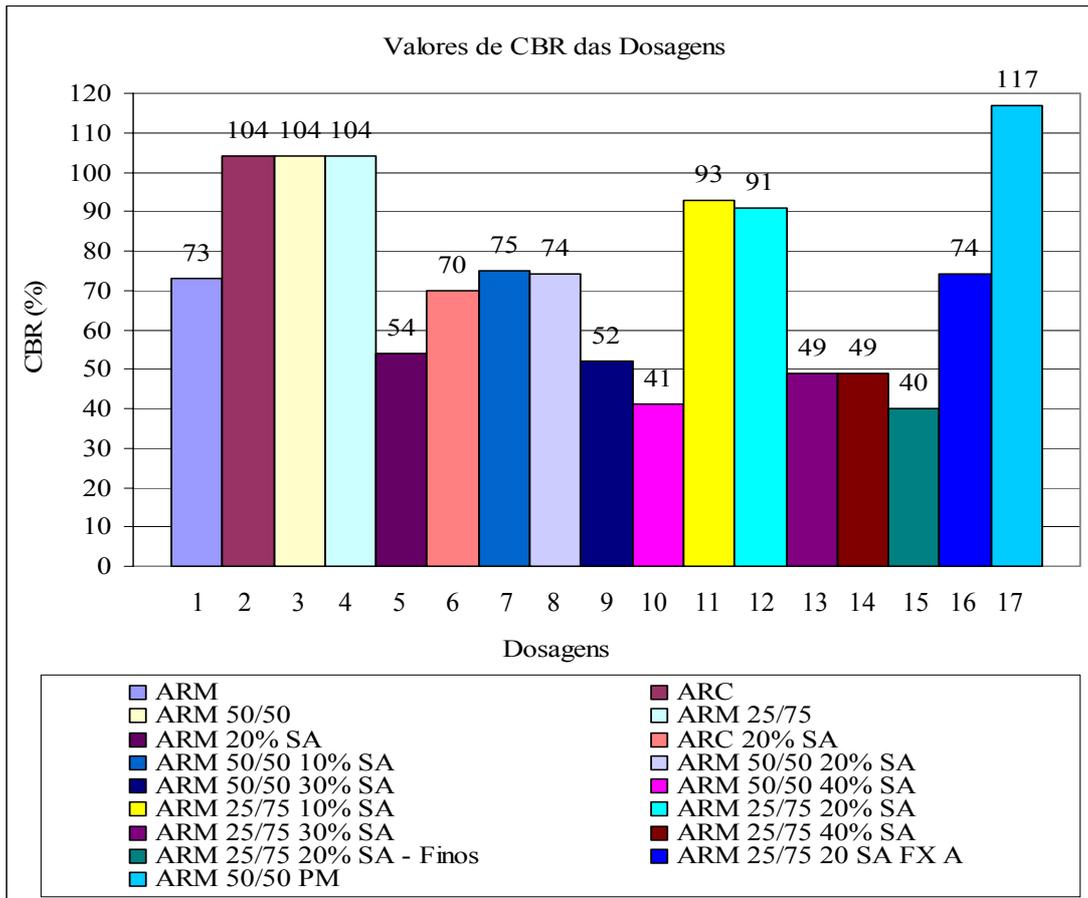


Figura 4.10 - Valores de ISC obtidos das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.

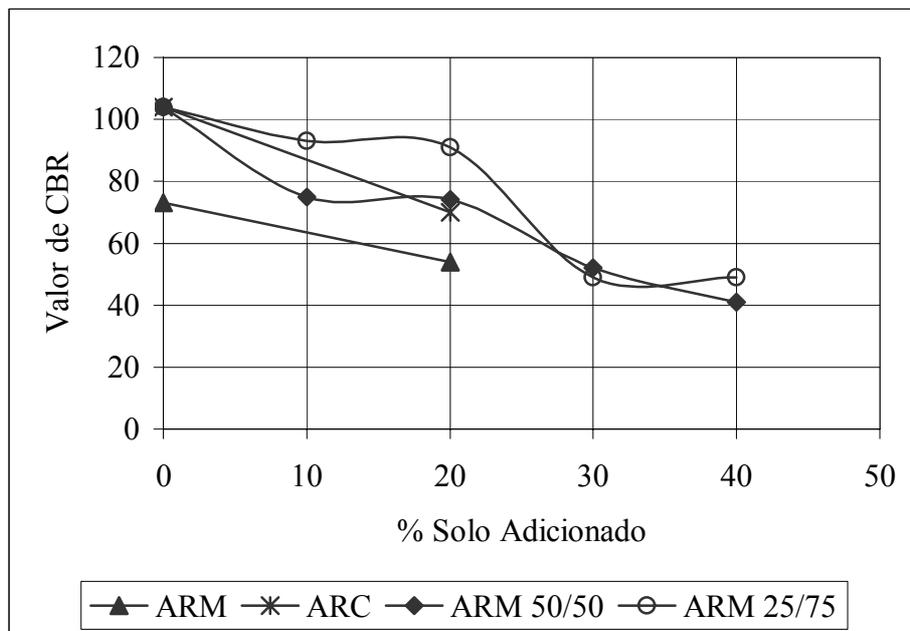


Figura 4.11 – Valores de ISC obtidos das dosagens de agregados reciclados estudados em laboratório - variações por grupo.

Tabela 4.13 - Parâmetros de compactação e ISC do solo argiloso do município de Goiânia (CEASA) utilizado nas dosagens com agregados reciclados.

Umidade Ótima Energia	(w _{ot}) (%)	Peso específico Seco Máximo (γ _{d max}) (kN/m ³)	Expansão E (%)	CBR (%)	Sr (%)
Próctor Normal	21,0	16,38	0	7	85,7
Prócto Intermediário	18,6	17,16	0	16	85,6

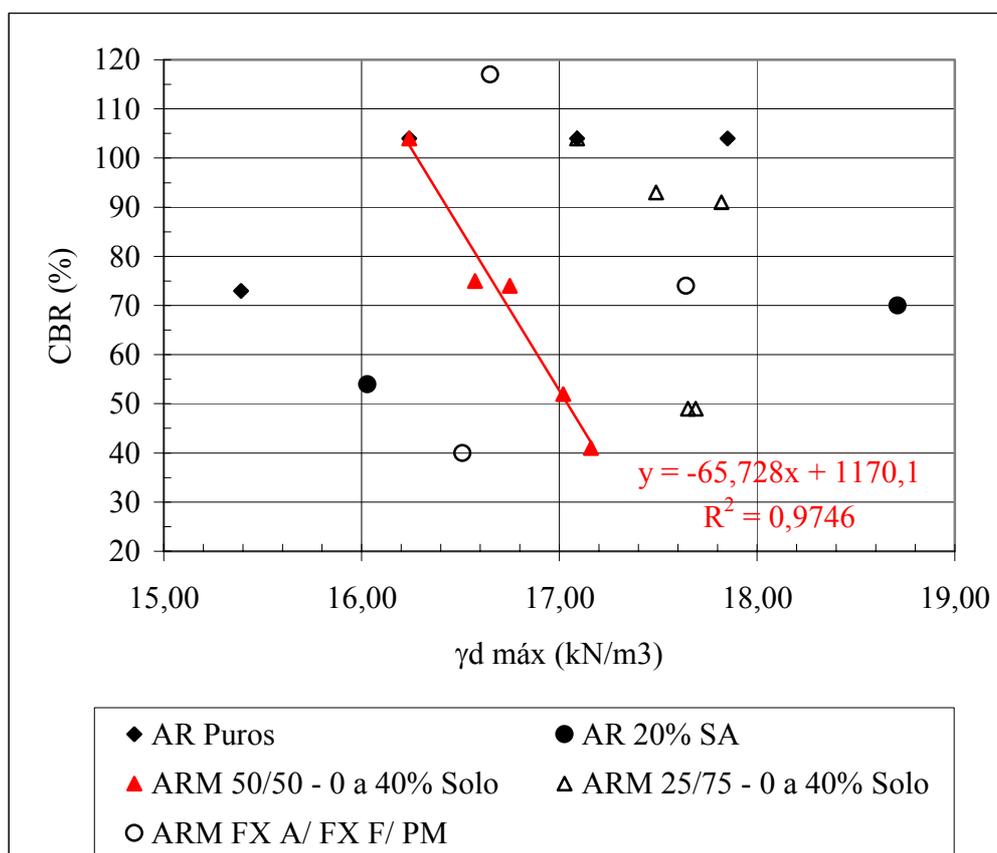


Figura 4.12 - Relação entre o peso específico seco máximo e o ISC das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.

Observando as Figuras 4.12 e 4.13 verifica-se que as dosagens ARM 50/50 com 0 a 40% de solo argiloso apresentaram boas correlações entre os parâmetros, enquanto que as dosagens ARM 25/75 com 0 a 40% de solo argiloso e as demais não. A boa correlação obtida nas dosagens de ARM 50/50 pode ser atribuída ao maior percentual de grãos cerâmicos constituintes das mesmas. Pela Tabela 4.12, anteriormente apresentada, verifica-se que para essas dosagens quanto maior o percentual de solo adicionado, menor a umidade ótima, maior o peso específico seco máximo e o valor de ISC tende a diminuir.

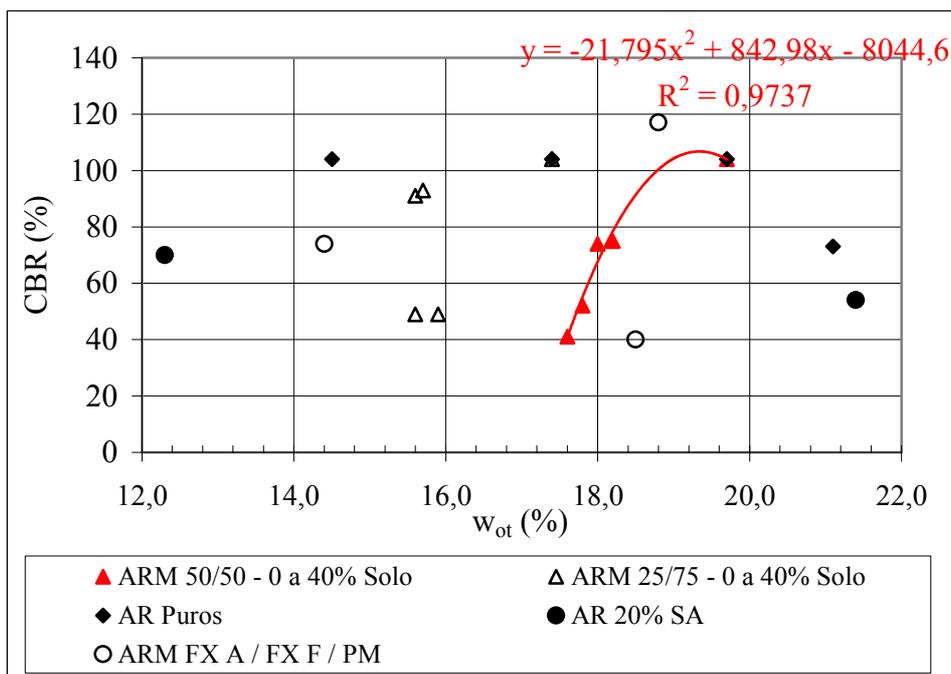


Figura 4.13 - Relação entre a umidade ótima e o ISC das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.

A Figura 4.14 apresenta a relação entre a umidade ótima interagregado e o ISC das dosagens com agregados reciclados estudadas em laboratório. Para efeito de comparação também é apresentada, na mesma figura, a relação entre a umidade ótima e o ISC das mesmas dosagens. A umidade interagregado foi determinada a partir do índice de vazios interagregado, admitindo-se o grau de saturação dos agregados como sendo igual a 100% e adotando-se a massa específica ponderada dos grãos das dosagens. Observando-se a Figura 4.14, verifica-se que os valores de ISC apresentam uma boa correlação com a umidade interagregado, com tendência de redução do ISC a medida em que ela aumenta. Observa-se que ao se relacionar o ISC com a umidade ótima das misturas não se obtém qualquer tendência de correlação. Esse comportamento confirma mais uma vez a necessidade de se considerar o comportamento desse tipo de material como uma função das condições que caracterizam o espaço interagregado (índice de vazios e umidade).

A Figura 4.15, obtida a partir dos dados da Tabela 4.12, apresenta a relação entre o ISC e o índice de vazios das dosagens realizadas. Na figura o ISC é relacionado com o índice de vazios total, obtido utilizando-se o peso específico dos grãos, e com o índice de vazios interagregados, obtido utilizando-se o peso específico aparente dos grãos. Devido à alta porosidade dos agregados reciclados os valores de ISC apresentaram-se dispersos em relação ao índice de vazios total, porém, em relação ao índice de vazios interagregados o mesmo

apresentou boa correlação e a tendência esperada, ou seja, quanto maior o índice de vazios (interagregados), menor o valor de ISC. As dosagens compostas apenas por ARM (ARM e ARM 20% SA), destacadas no gráfico mantiveram-se dispersas em relação às demais, mesmo quando relacionadas com o índice de vazios interagregados e por isso não foram incluídas na correlação. As considerações realizadas a partir da Figura 4.15 mostram a importância da análise em termos de índice de vazios, em especial do índice de vazios interagregados, quando se utilizar agregados reciclados porosos.

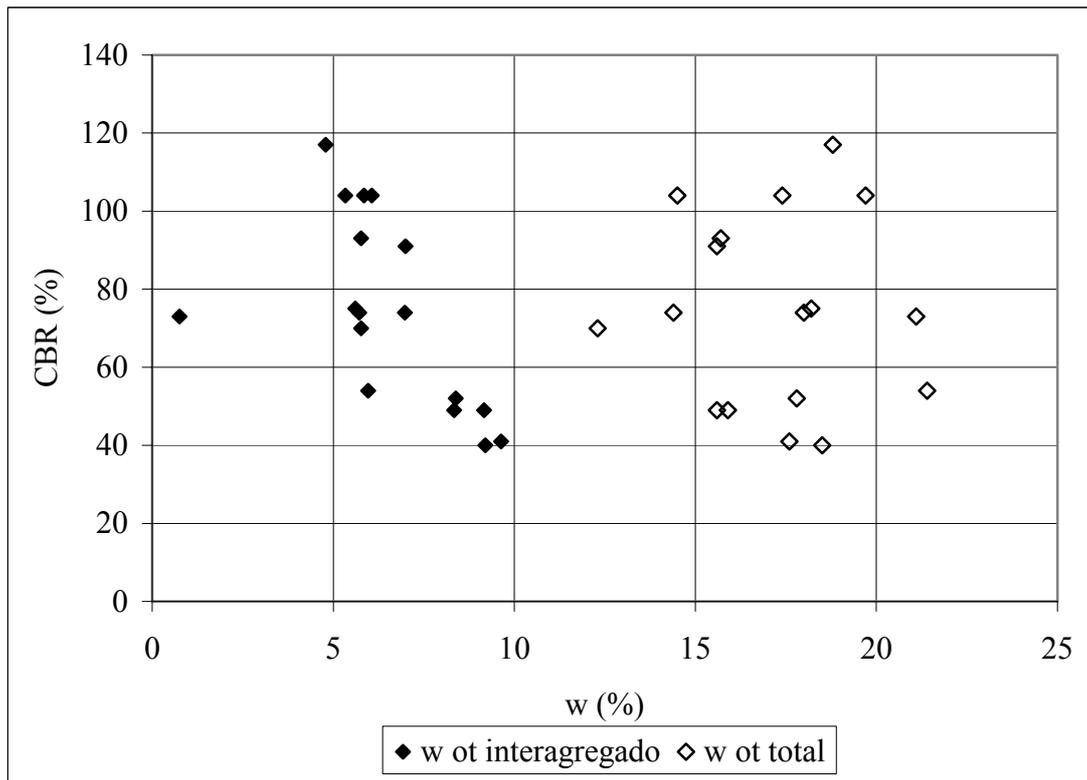


Figura 4.14 – Relação entre a umidade ótima interagregado e total e o ISC das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.

A Figura 4.16 apresenta a relação entre a umidade ótima e o peso específico seco máximo para todas as dosagens estudadas. Pela figura verifica-se a tendência de que quanto maior a umidade ótima, menor o peso específico seco máximo, para as dosagens ajustadas a uma linha ótima única. Na figura também estão representadas a curva de saturação ($S_r = 100\%$) e a curva para um grau de saturação igual a 75% ($S_r = 75\%$).

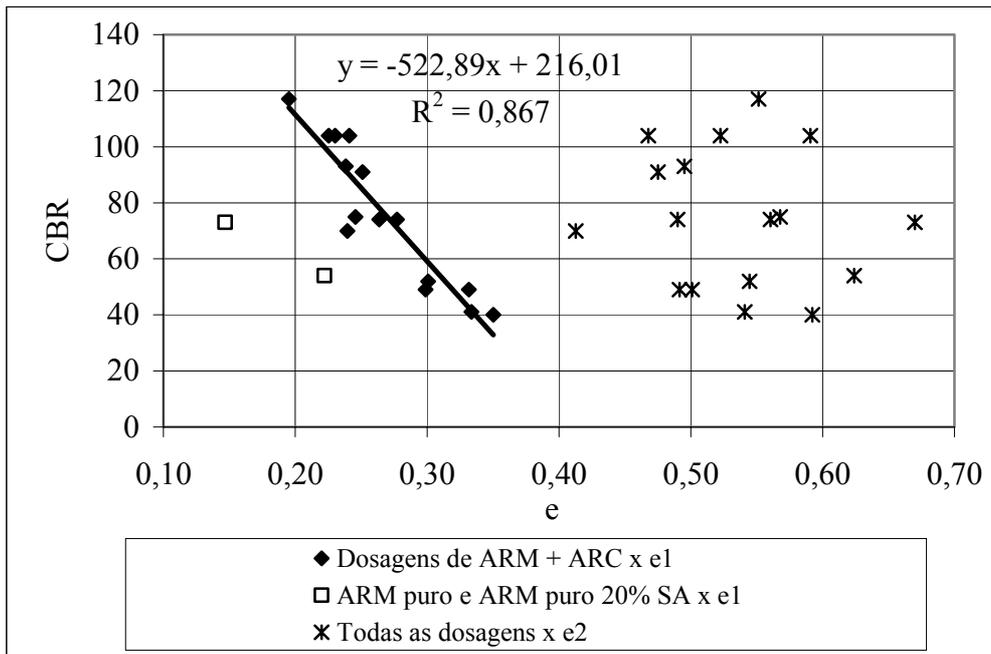


Figura 4.15 - Relação entre índice de vazios total e interagregados e o ISC das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.

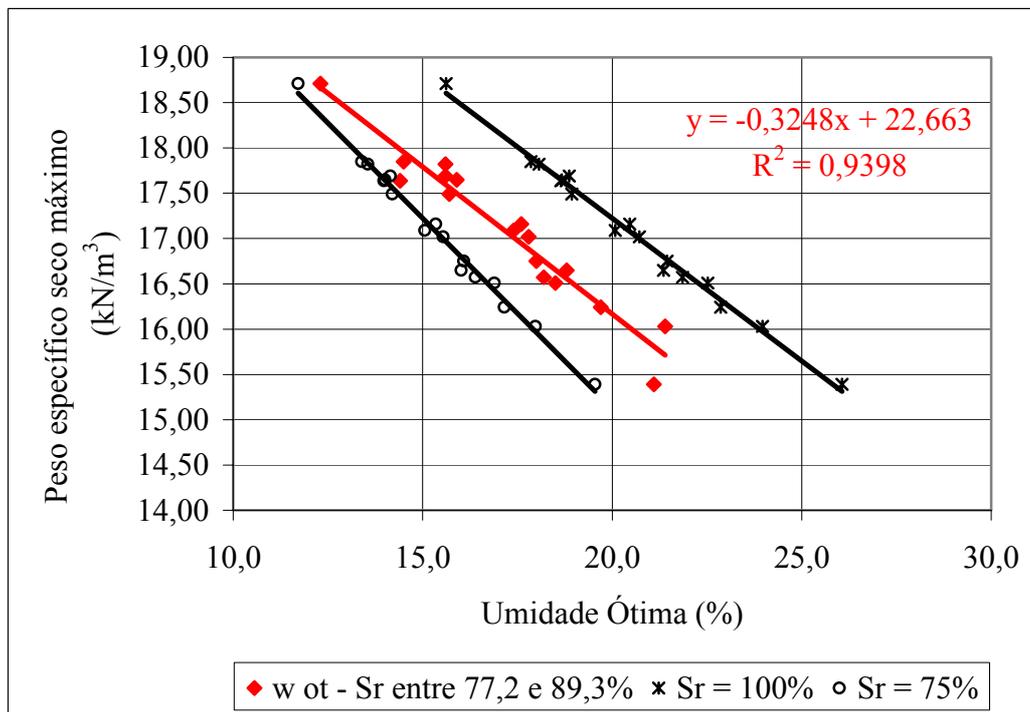


Figura 4.16 – Relação entre a umidade ótima e o peso específico seco máximo das dosagens com agregados reciclados estudadas em laboratório.

A Figura 4.17 apresenta curvas de compactação das dosagens dos agregados reciclados ARC e ARM, separadamente, nas proporções entre grãos cerâmicos/cimentícios de

50/50 e 25/75 e com a adição de 20% de solo. Observando a Figura 4.17 e a Tabela 4.12, anteriormente apresentada, verifica-se que o peso específico seco máximo da dosagem de ARC é bem maior que a da dosagem de ARM; em contrapartida a umidade ótima (w_{ot}) do ARC é bem menor que a w_{ot} do ARM, que tem um elevado valor de absorção. O valor do ISC obtido na dosagem de ARC apresentou uma diferença de 31% a mais em relação ao valor obtido na dosagem de ARM. As dosagens ARM 50/50 e ARM 25/75 apresentaram valores de ISC bastante próximos, embora haja variação nos valores de $\gamma_{d\ max}$ e w_{ot} . O acréscimo de 20% de solo nas dosagens com um só tipo de agregado provocou aumento no $\gamma_{d\ max}$ e redução da w_{ot} , gerando, entretanto, uma sensível redução no valor do ISC.

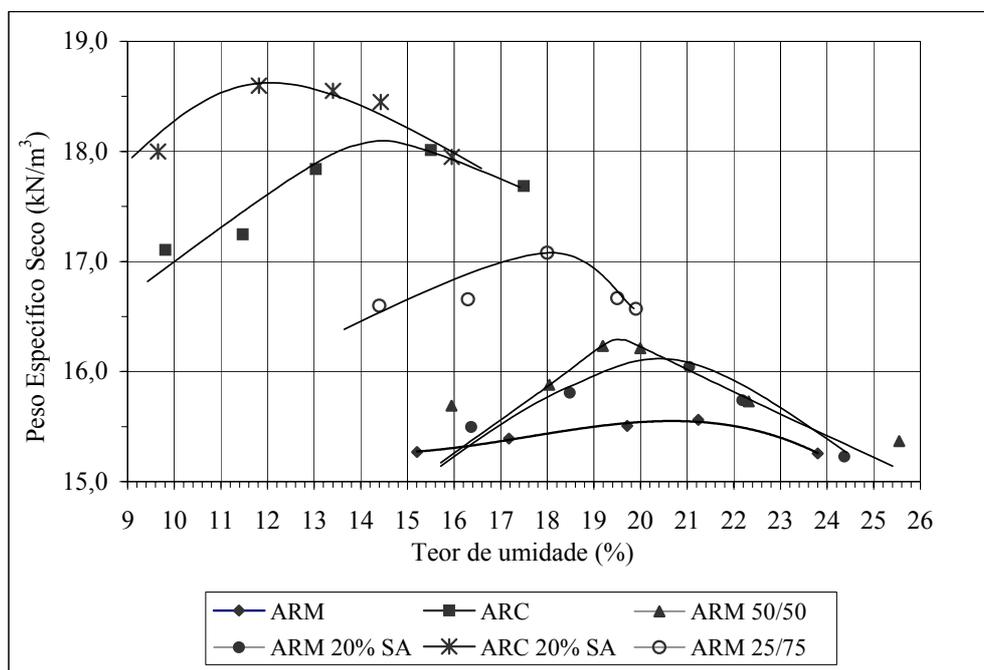


Figura 4.17 - Curvas de compactação de algumas das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.

Com relação às dosagens realizadas com a proporção de grãos cerâmicos e cimentícios igual (ARM 50/50), puros e com adição de solo argiloso nas proporções de 10, 20, 30 e 40%, observa-se na Tabela 4.12 e nas Figuras 4.10 e 4.11, anteriormente apresentadas, que o aumento do percentual de solo provoca um aumento nos valores de $\gamma_{d\ max}$; a w_{ot} apresenta uma faixa de variação de 2,1% e o ISC apresenta uma tendência de redução acentuada. Entretanto, mesmo com a adição de até 40% de solo a mistura ainda apresenta valores de ISC acima de 40%. Nas dosagens realizadas com a proporção de grãos cerâmicos igual a um terço dos grãos cimentícios (ARM 25/75), tanto sem mistura como com a adição de solo argiloso nas proporções de 10, 20, 30 e 40%, verifica-se que o aumento do percentual de solo tendeu a

provocar aumento nos valores de $\gamma_{d \max}$, sendo que a w_{ot} apresentou uma faixa de variação de 1,8% e o ISC apresentou uma variação pequena para o acréscimo de até 20% de solo.

A Figura 4.18 apresenta os valores de ISC para três texturas diferentes da dosagem ARM 25/75 20% SA. As dosagens foram enquadradas nas faixas granulométricas A (grossa), C (média) e F (fina) da especificação de serviço ES 303 (DNER,1997). A amostra enquadrada na faixa A apresentou desempenho inferior à enquadrada na faixa C, provavelmente em função da pequena quantidade de finos para promover a agregação do esqueleto granular. A amostra enquadrada na faixa F apresentou ISC igual a 40%, o que lhe confere qualidade, em termos de ISC, para ser utilizada em camadas de sub-base. Os resultados de ISC mostram coerência com os valores de índices de vazios apresentados na Tabela 4.12, ou seja, são inversamente proporcionais àqueles.

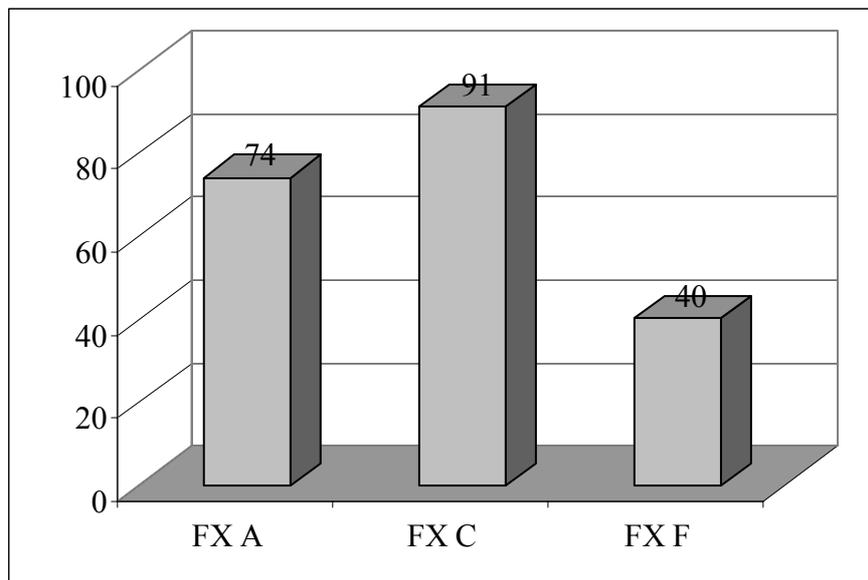


Figura 4.18 – Variação do ISC com a textura para a dosagem de agregado reciclado ARM 25/75 20% SA.

A Figura 4.19 apresenta os valores de ISC da dosagem ARM 50/50, obtidos empregando-se as energias de compactação intermediária e modificada. O elevado valor de ISC obtido com a energia intermediária (104%) associado aos fatores de que o aumento de energia implica em um aumento de custo e leva a uma maior quebra dos grãos, indica não ser vantajoso o emprego da energia modificada para a dosagem em questão. Leite et al. (2006a) concluíram, estudando agregados reciclados de São Paulo, que a resistência do material obtida pelo ensaio de ISC mostra alteração significativa com a energia de compactação, ressaltando a importância de uso da maior energia de compactação possível em campo de forma a

promover uma maior quebra durante a obra, evitando quebras significativas pelo tráfego usuário e o aparecimento de deformação permanente indesejável em trilhas de roda.

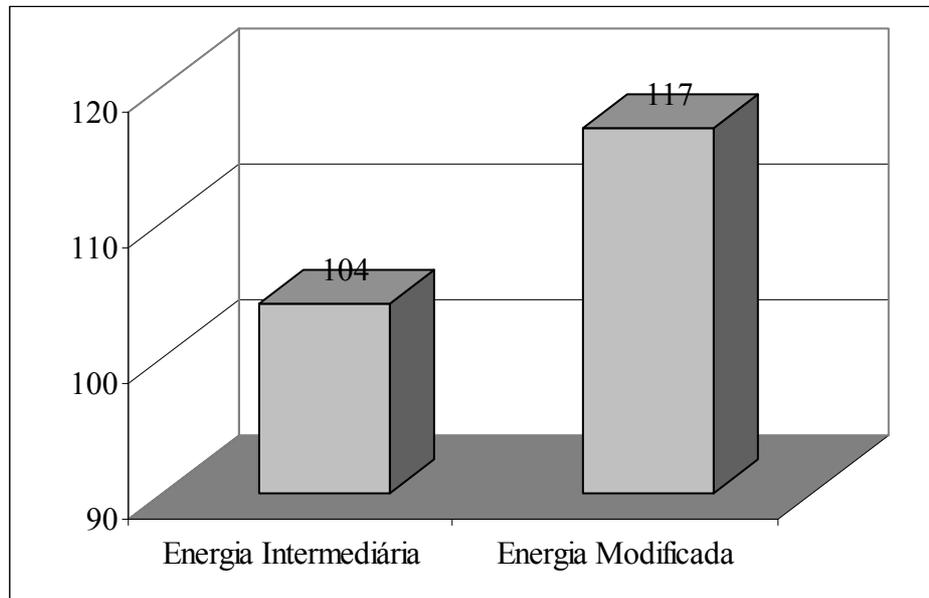


Figura 4.19 - Variação do ISC com a energia de compactação - dosagem com agregado reciclado ARM 50/50.

A Figura 4.20 apresenta os valores de ISC de três das dosagens de agregados reciclados estudadas, para três períodos de cura diferentes: o período normal, ou seja, os corpos de prova foram compactados, imersos em água por quatro dias e rompidos; com trinta dias de cura, ou seja, os corpos de prova foram compactados, embalados dentro dos cilindros contra a perda de umidade, colocados em uma câmara úmida por um período de trinta dias, imersos em água por quatro dias e rompidos e com sessenta dias de cura, seguindo o mesmo procedimento adotado para trinta dias. Em todos os três períodos de cura mediou-se o pH dos corpos de prova após a ruptura, utilizando-se todas as frações granulométricas dos mesmos. Embora todas as amostras tenham apresentado aumento no valor de pH após a cura (Figura 4.21), os comportamentos em termos de ISC foram distintos: a dosagem de ARC apresentou um alto ganho de ISC, nos primeiros 30 dias (60%) e depois manteve o valor constante até os 60 dias; a dosagem de ARM 50/50 30 SA não apresentou ganho de resistência com o tempo e a dosagem de ARM BASE, da camada de base da pista experimental, manteve estável o valor nos primeiros 30 dias e apresentou um ganho de 10% dos 30 para os 60 dias. Os resultados corroboram com os obtidos por Resplandes (2007), de que os agregados reciclados são não inertes e que o percentual de grãos cimentícios contidos nos mesmos, que pode ser mensurado pelo valor do pH das dosagens, é que aparentemente controla a intensidade e a velocidade do

ganho de resistência.

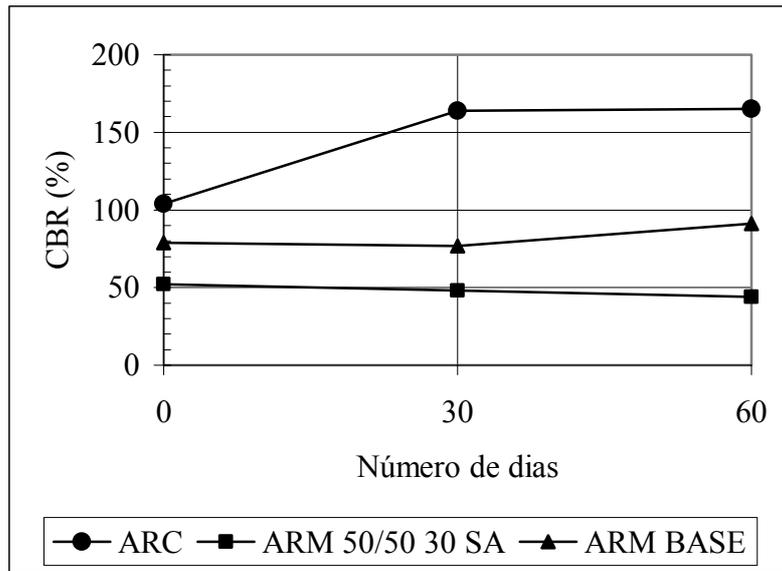


Figura 4.20 – Variação do ISC com o tempo de cura para três das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.

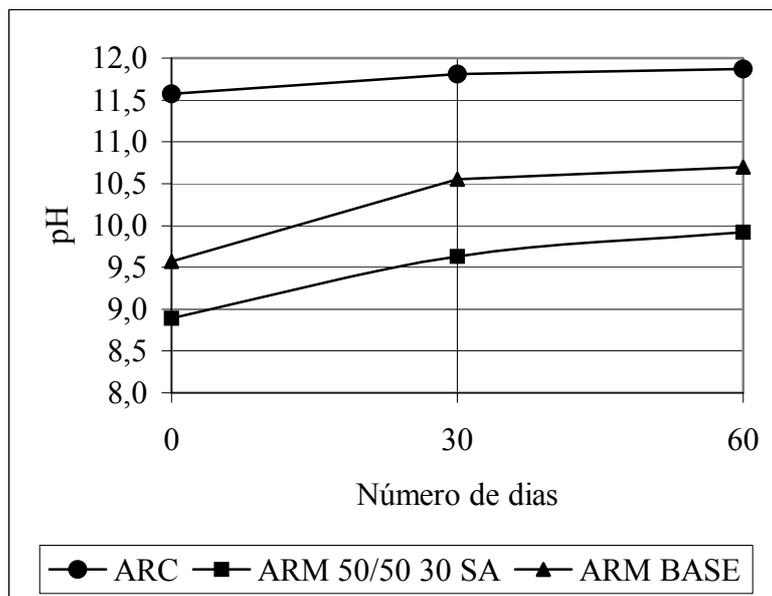


Figura 4.21 – Variação do pH com o tempo de três das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.

A Figura 4.22 apresenta a relação entre o pH e o ISC das três dosagens de agregados reciclados estudadas. Observa-se, pela figura, que para valores de pH acima de 10,5 as dosagens apresentaram ganho de resistência com o tempo, sendo o ganho mais acentuado para a dosagem de ARC que atingiu o valor máximo com 30 dias e, em seguida, para a dosagem de

ARM BASE, que apresentou ganho entre os 30 e 60 dias de cura; a amostra de ARM 50/50 30 SA, que apresentou valores de pH inferiores a 10,0 não obteve nenhum ganho de ISC com o tempo, sendo que a pequena redução mostrada certamente deve-se às variações de repetibilidade do ensaio. Ligando-se, com uma linha tracejada, os pontos correspondentes ao mesmo tempo de cura das três dosagens da Figura 4.22, verifica-se que o ganho de resistência, em termos de ISC, é proporcional ao valor do pH, sendo esta relação linear para 60 dias de cura. Essa observação, se confirmada para um número maior de dosagens terá grande importância prática, pois o pH é um ensaio simples, rápido e de baixo custo.

Em todos os ensaios de compactação e ISC realizados, inclusive com o solo argiloso, a expansão medida foi nula. Nas dezessete dosagens com uso de agregados reciclados realizadas em laboratório, seis apresentaram valores de ISC superiores a 80%, portanto satisfatórias para emprego em camadas de base de pavimentos com alto volume de tráfego ($N > 5 \times 10^6$), cinco apresentaram valores de ISC entre 60 e 80%, portanto satisfatórios para emprego em camadas de base de pavimentos com médio e baixo volume de tráfego ($N \leq 5 \times 10^6$) e os outros seis valores foram superiores a 40%, portanto satisfatórios para uso em sub-bases de pavimentos, cuja exigência é de no mínimo 20% de ISC. Em vias urbanas não raro é a admissão do limite mínimo de ISC igual a 40%.

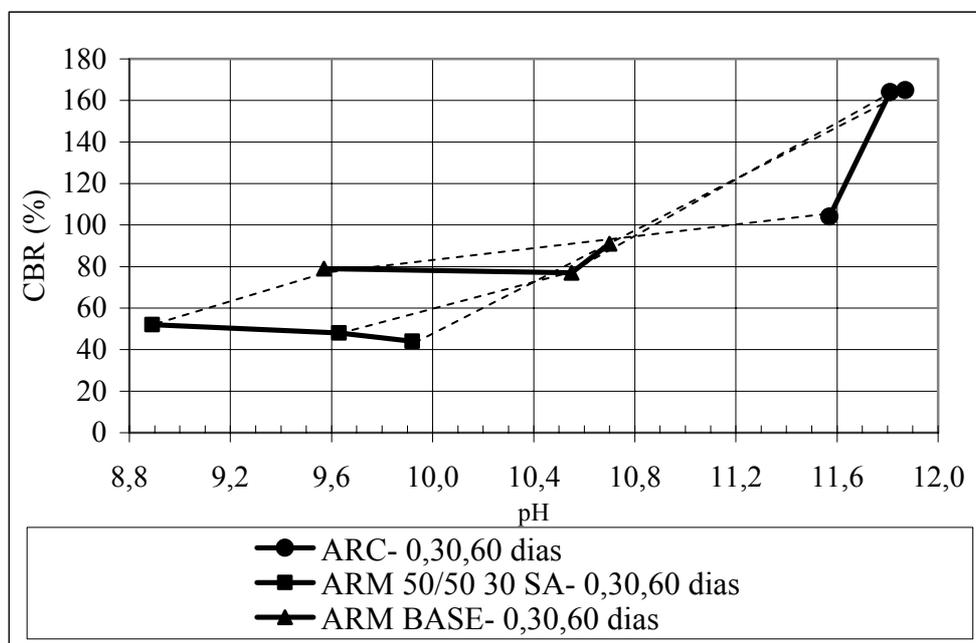


Figura 4.22 – Variação do ISC com o pH de três das dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório.

A fim de verificar a variação do ISC ao longo da altura dos corpos de prova, para

efeito de ajuste das correlações, o ensaio de penetração também foi realizado no lado contrário dos corpos de prova. A Tabela 4.14 apresenta os valores de ISC obtidos nos dois lados, a relação entre os dois e o valor médio. Observando a tabela verifica-se que nas dosagens de agregados reciclados sem adição de solo o ISC do lado invertido é da ordem de 50 a 60% do valor do ISC feito do lado convencional. Nas dosagens com a adição de solo os valores de ISC determinados nos dois lados do corpo de prova tendem a ser mais próximos. As correlações realizadas utilizando os valores médios de ISC não apresentaram melhor ajuste que as utilizando o ISC convencional. Por exemplo, ao relacionar os valores de ISC da Tabela 4.14, do lado convencional, do lado contrário e o médio, com o índice de vazios interagregados da Tabela 4.12, a ordem de valores que apresentam melhor grau de correlação é a seguinte: lado convencional (base), valor médio e por último, lado contrário do corpo de prova (topo).

Após o período de imersão (96 h) e antes da realização do ensaio de penetração, foram feitas pesagens dos corpos de prova, a fim de determinar os valores de saturação obtidos (Tabela 4.15). Observando esta tabela verifica-se que os valores obtidos ficaram compreendidos entre 87 e 98%, enquanto que os valores de saturação determinados na umidade ótima ficaram compreendidos entre 77,2 e 89,3% (Tabela 4.12).

Tabela 4.14 – Variação do ISC ao longo da altura dos corpos de prova das dosagens de agregados reciclados e do solo argiloso estudados em laboratório.

Dosagem		CBR 1 (%)	CBR 2 (%)	CBR 2 / CBR1	CBR MED (%)
1	ARM	73	41	0,56	57
2	ARC	104	57	0,55	81
3	ARM 50/50	104	60	0,58	82
4	ARM 25/75	104	57	0,55	81
5	ARM 20% SA	54	36	0,67	45
6	ARC 20% SA	70	44	0,63	57
7	ARM 50/50 10% SA	75	53	0,71	64
8	ARM 50/50 20% SA	74	42	0,57	58
9	ARM 50/50 30% SA	52	39	0,75	46
10	ARM 50/50 40% SA	41	35	0,85	38
11	ARM 25/75 10% SA	93	60	0,65	77
12	ARM 25/75 20% SA	91	58	0,64	75
13	ARM 25/75 30% SA	49	41	0,84	45
14	ARM 25/75 40% SA	49	40	0,82	45
15	ARM 25/75 20% SA - Finos	40	23	0,58	32
16	ARM 25/75 20 SA FX A	74	49	0,66	62
17	ARM 50/50 PM	117	59	0,50	88
Solo Argiloso					
	Solo Argiloso PN	7	6	0,86	7
	Solo Argiloso PI	16	13	0,81	15

Tabela 4.15 – Grau de saturação das dosagens de agregados reciclados após a imersão em água por 96 horas.

Dosagem		Sr (%)
1	ARM	93
2	ARC	87
3	ARM 50/50	92
4	ARM 25/75	90
5	ARM 20% SA	98
6	ARC 20% SA	85
7	ARM 50/50 10% SA	-
8	ARM 50/50 20% SA	93
9	ARM 50/50 30% SA	91
10	ARM 50/50 40% SA	95
11	ARM 25/75 10% SA	88
12	ARM 25/75 20% SA	95
13	ARM 25/75 30% SA	93
14	ARM 25/75 40% SA	98
15	ARM 25/75 20% SA - Finos	88
16	ARM 25/75 20 SA FX A	88
17	ARM 50/50 PM	94
	ARM BASE	87

4.2.4 ABSORÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS NA UMIDADE ÓTIMA DE COMPACTAÇÃO

De cinco amostras ensaiadas, os valores de umidades obtidas foram superiores aos valores de absorção determinados de acordo com a NBR 6458 (ABNT, 1984d). Tal fato pode ter ocorrido devido à formação de uma película de água adsorvida em torno dos grãos dos agregados úmidos e somando-se à água absorvida pelos mesmos. A Tabela 4.16 apresenta os valores médios determinados para as amostras ARC e ARM.

Tabela 4.16 – Absorção de água de duas dosagens de agregados reciclados, na umidade ótima de compactação.

Amostra	Umidade com finos (%)	Umidade final sem finos (%)	Umidade média > 4,8 mm (%)
ARC - Ret. 9,5 mm	8,6	7,6	
ARC - Ret. 4,8 mm	12,9	11,8	9,7
ARC - Ret. 2,0 mm	15,0	14,0	
ARC - Fundo	17,7		
ARM - Ret. 9,5 mm	17,6	17,4	
ARM - Ret. 4,8 mm	20,5	20,6	19,0
ARM - Ret. 2,0 mm	23,2	25,2	
ARM - Fundo	19,8		

4.2.5 ÍNDICE DE DEGRADAÇÃO OU QUEBRA DOS GRÃOS DEVIDO À COMPACTAÇÃO

A Tabela 4.17 apresenta os valores de índice de degradação após a compactação Proctor (ID_p) para as dezessete dosagens de agregados reciclados estudadas em laboratório e para a dosagem da pista experimental. A Figura 4.23 apresenta as curvas granulométricas das dosagens de ARC e ARM, antes e depois da compactação. A dosagem que sofreu menor degradação na energia intermediária (3,3%), foi a de ARC e a que sofreu maior degradação (8,9%), foi a de ARM. A amostra ARM 50/50 compactada com a energia modificada apresentou um ID_p de 13,0%. Como o valor limite de ID_p sugerido pelo IPR (1998) é de 6%, embora o índice faça referência a rochas naturais, boa parte das dosagens atendeu a esse requisito. A dosagem ARM 50/50 compactada na energia modificada teve seu ID_p aumentado de 4,4% em relação aos resultados obtidos quando da compactação na energia intermediária, ficando o índice com mais do dobro do valor sugerido pelo IPR.

Tabela 4.17 – Valores de índice de degradação (ID_p) de dosagens de agregados reciclados após a compactação na energia do Proctor intermediário.

Dosagem		ID_p (%)
1	ARM	8,9
2	ARC	3,3
3	ARM 50/50	8,6
4	ARM 25/75	5,1
5	ARM 20% SA	7,2
6	ARC 20% SA	6,3
7	ARM 50/50 10% SA	7,9
8	ARM 50/50 20% SA	6,2
9	ARM 50/50 30% SA	7,1
10	ARM 50/50 40% SA	3,4
11	ARM 25/75 10% SA	4,7
12	ARM 25/75 20% SA	6,4
13	ARM 25/75 30% SA	7,2
14	ARM 25/75 40% SA	4,2
15	ARM 25/75 20% SA - Finos	5,0
16	ARM 25/75 20 SA FX A	6,9
17	ARM 50/50 PM	13,0
18	ARM Base pista experimental	3,5

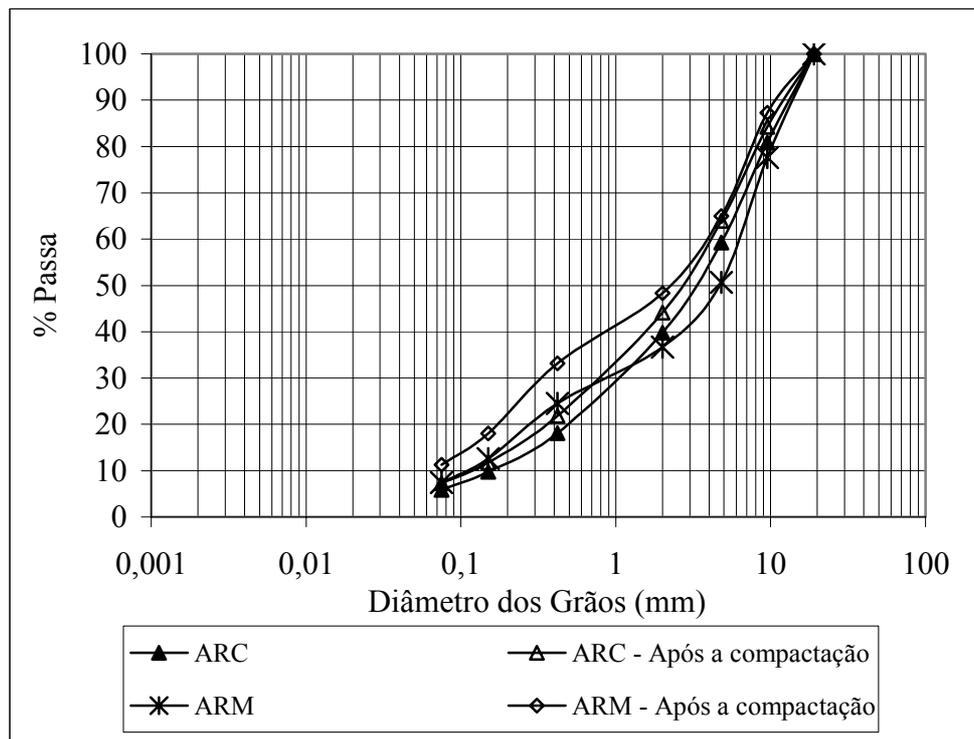


Figura 4.23 – Curvas granulométricas das dosagens de agregados reciclados ARC e ARM, antes e após a compactação.

A Figura 4.24 apresenta curvas granulométricas das dosagens de agregados reciclados das camadas de base e sub-base da pista experimental, antes e depois da compactação, sendo duas referentes a amostras retiradas do local em Maio/2006, duas referentes à dosagem feita em laboratório, antes e depois da compactação e duas obtidas por Silva (2004) em amostras retiradas da pista na época da construção (Novembro/2003). As curvas granulométricas de Maio/2006 foram obtidas pela média de três ensaios realizados com amostras de pontos diferentes; verificou-se uma certa variação de textura ponto a ponto e que a dosagem da sub-base apresentou uma textura um pouco mais fina em relação à da base. Em relação às dosagens da base feitas em laboratório, antes e depois da compactação, verifica-se que não ocorreu uma variação de textura acentuada ($ID_p = 3,5\%$, Tabela 4.49). As curvas granulométricas obtidas por Silva (2004), logo após a compactação das camadas expressaram texturas um pouco mais grossas em relação às demais, certamente em função da própria variabilidade do material ou ineficiência do processo de homogeneização. As curvas granulométricas da Figura 4.24, com a dosagem da pista experimental, alertam para a importância que deve ser dada ao processo de homogeneização quando da aplicação de agregados reciclados em camadas de pavimentos. A realização de estudos de custo-benefício referentes à utilização de centrais de mistura mecanizadas do tipo usina de solos ou de

agregados podem indicar a viabilidade da sua utilização a fim de melhorar a homogeneidade das dosagens e conseqüentemente um comportamento mais uniforme do material lançado na pista.

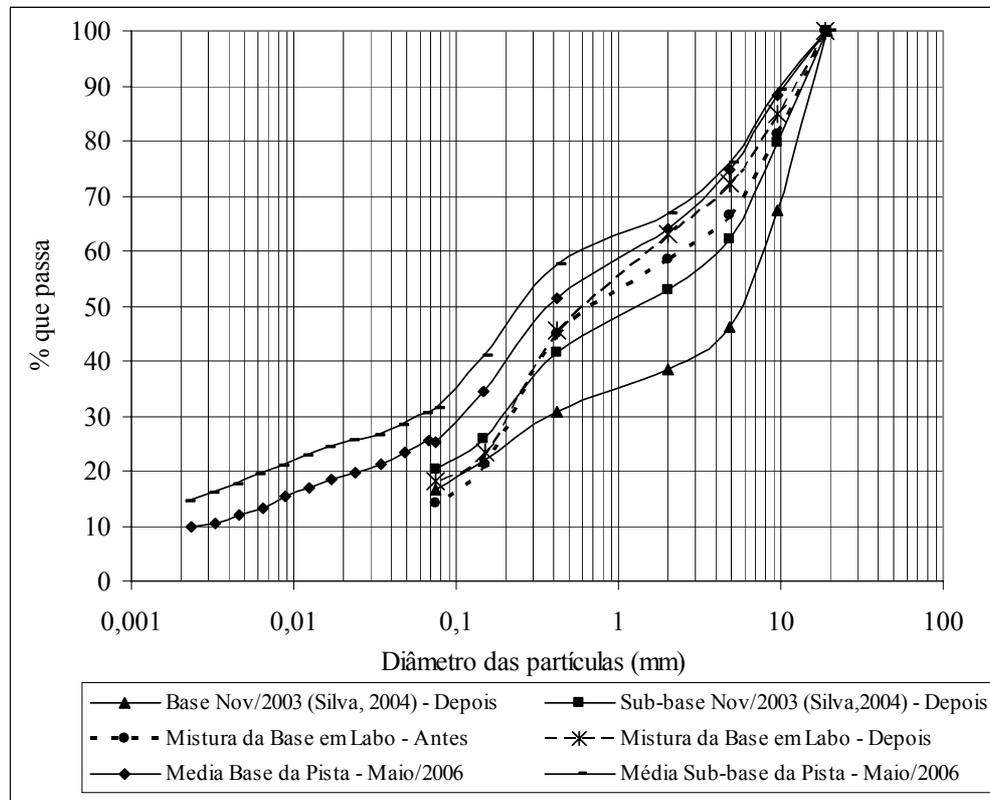


Figura 4.24– Curvas granulométricas das dosagens de agregados reciclados da pista experimental (CEASA), antes e depois da compactação, em diferentes épocas e condições.

4.2.6 RESULTADOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

As Figuras 4.25 a 4.30 apresentam graficamente os valores de módulo de resiliência (MR) determinados para cada par de tensões (σ_3 , σ_d) imposto aos corpos de prova de seis das dosagens de agregados reciclados estudadas, sendo quatro referentes aos estudos de laboratório e duas às camadas de base e sub-base da pista experimental. Os modelos representados pelas equações indicadas nas figuras expressam os valores de MR em função de k_1 , k_2 e σ_3 (Equação 4.1), de acordo com o modelo proposto pelo método de ensaio ME 131 (DNER, 1994c), para solos arenosos ou pedregulhosos, cujo comportamento é bastante dependente da tensão confinante aplicada e pouco influenciado pela tensão de desvio; tal comportamento pode ser verificado nas Figuras 4.31 e 4.32 que apresentam os valores de MR em função de σ_d , para as tensões confinantes de 0,070 e 0,140 MPa.

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \quad (4.1)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência;

k_1 e k_2 = parâmetros de resiliência de solos ou materiais arenosos;

σ_3 = tensão confinante.

Nas Figuras 4.25, 4.28 e 4.29, estão mostradas, em cada uma delas, duas curvas que correspondem à realização do ensaio sem cura e com 90 dias de cura. Os módulos de resiliência das dosagens das camadas de base e sub-base da pista experimental apresentaram valores bastante semelhantes, variando entre 150 e 400 MPa para o intervalo de tensões (σ_3 , σ_d) aplicado. Esses valores apresentaram-se maiores que os das dosagens de laboratório estudadas, entretanto, deve-se considerar que as amostras da pista experimental possuem texturas mais grossas e composição distinta das do estudo de laboratório. A amostra ARM puro, que é essencialmente constituída de grãos ou agregados cerâmicos e de argamassa, apresentou os menores valores de módulo, entre 40 e 200 MPa.

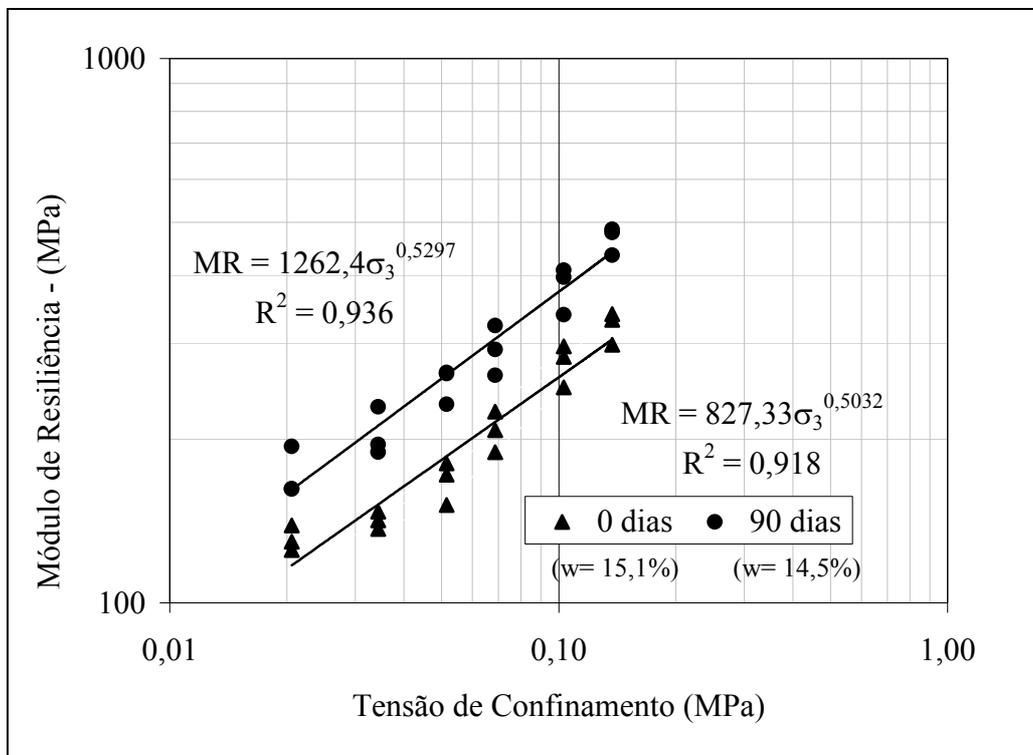


Figura 4.25 – Módulo de resiliência - dosagem ARC.

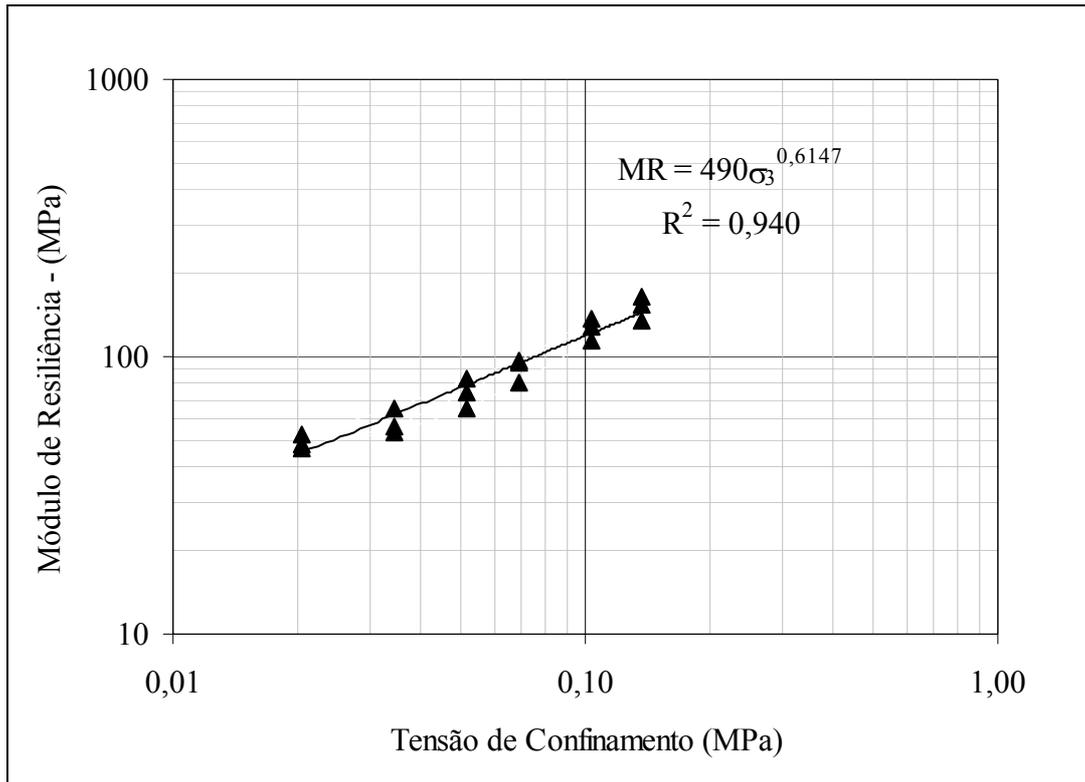


Figura 4.26 – Módulo de resiliência - dosagem ARM.

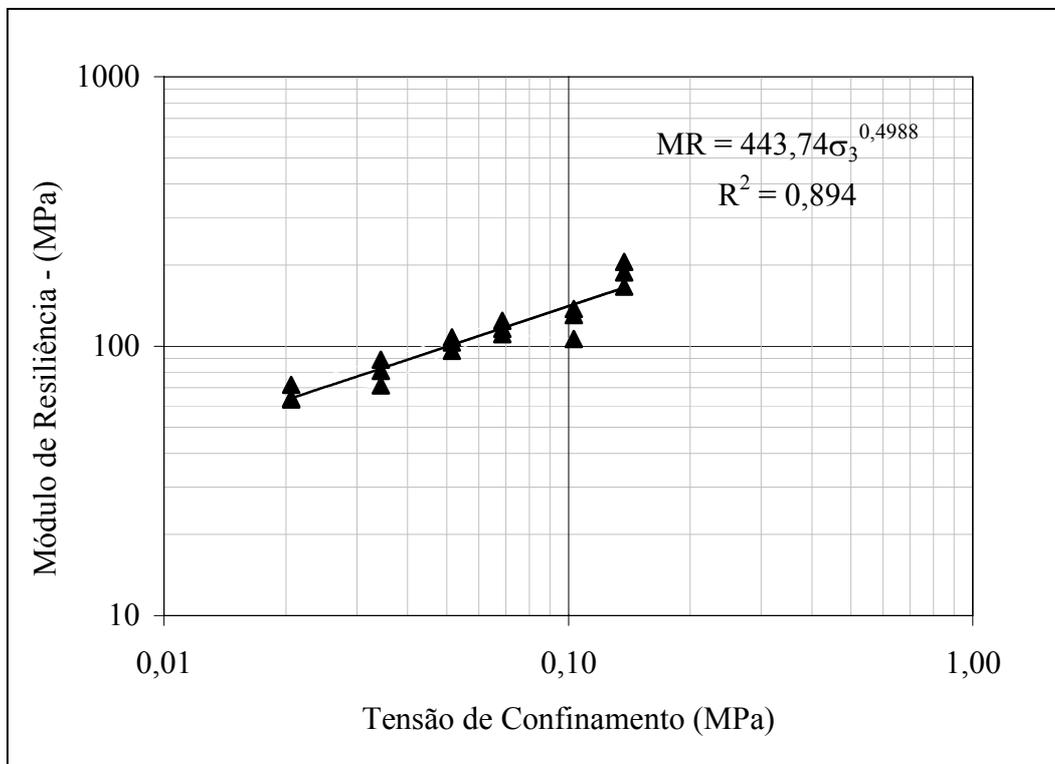


Figura 4.27 – Módulo de resiliência - dosagem ARM 50/50.

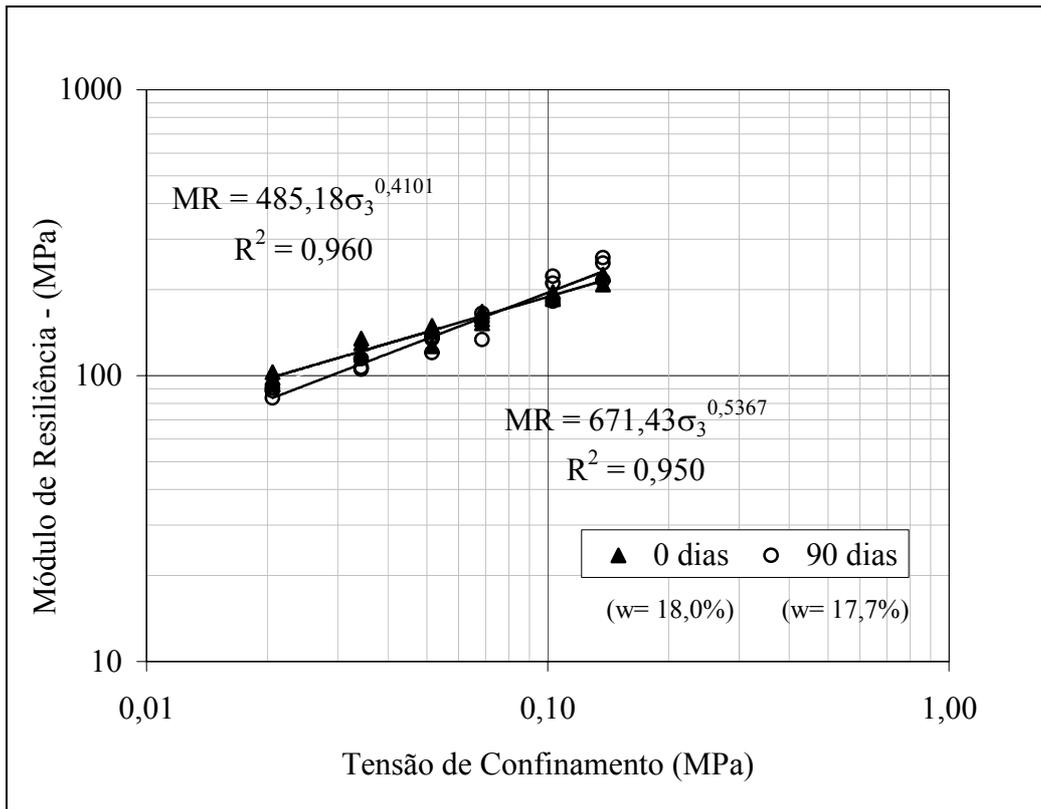


Figura 4.28 – Módulo de resiliência - dosagem ARM 50/50 30% SA.

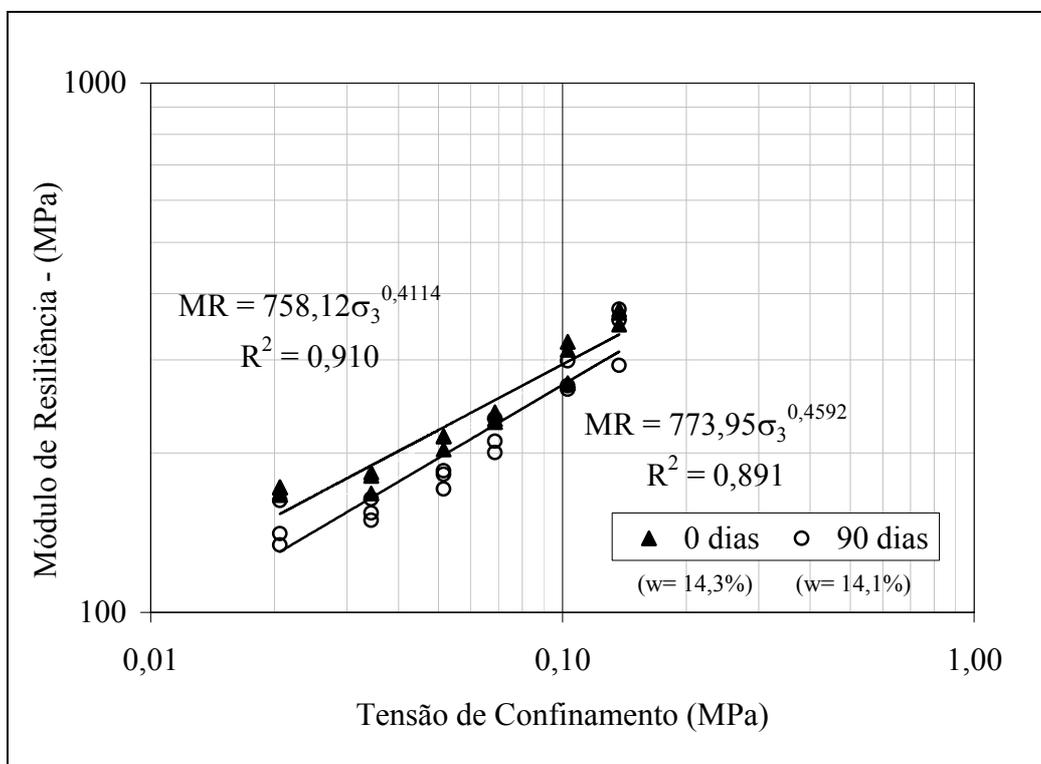


Figura 4.29 – Módulo de resiliência - dosagem da base da pista experimental (CEASA).

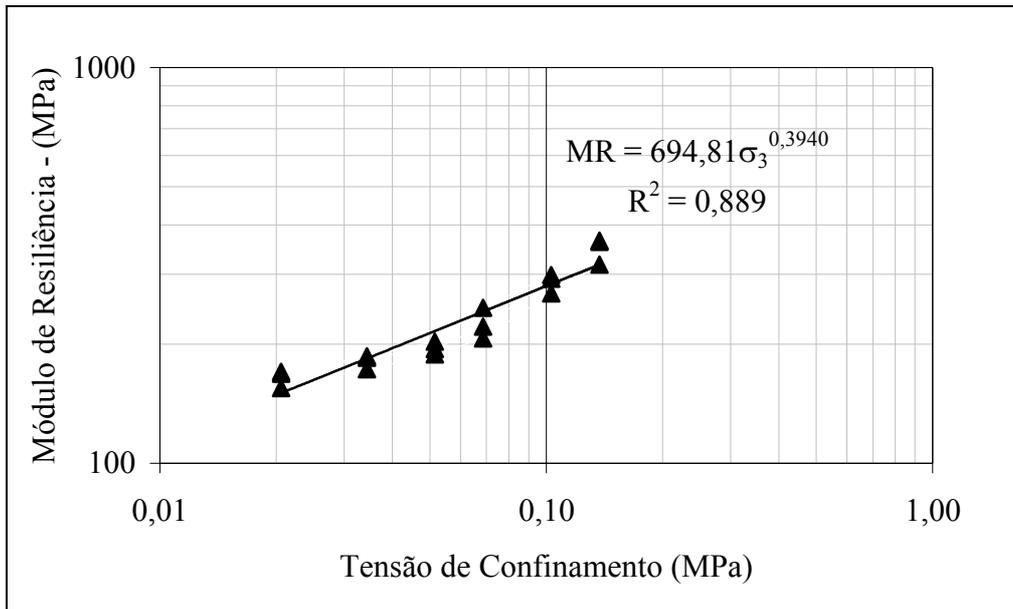


Figura 4.30 – Módulo de resiliência - dosagem da sub-base da pista experimental (CEASA).

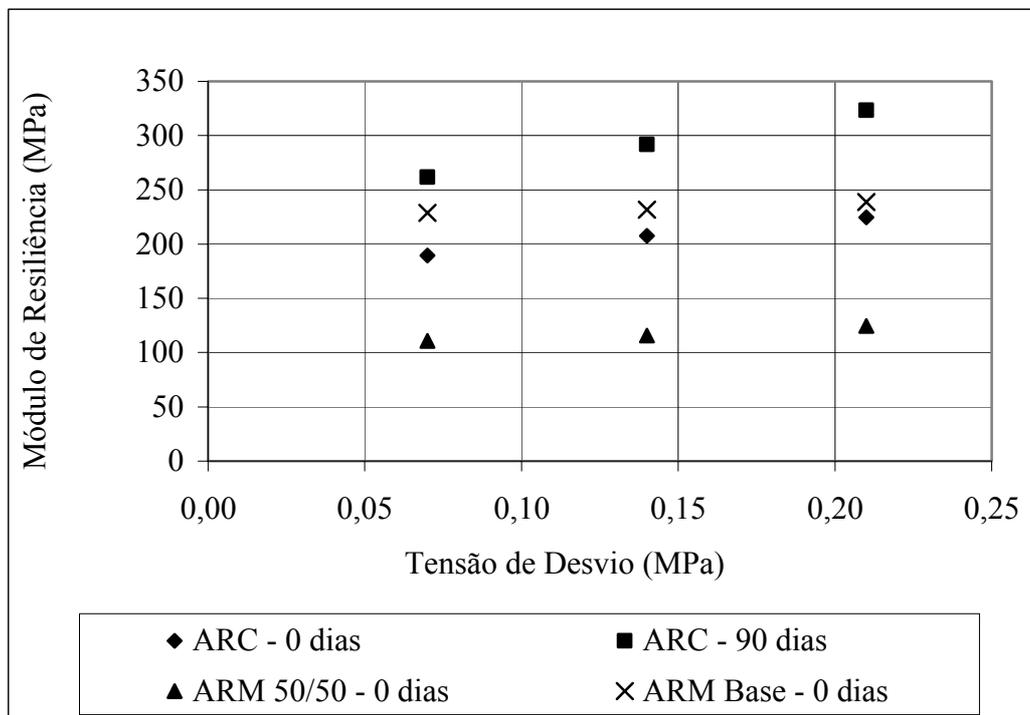


Figura 4.31 – Tensão de desvio versus módulo de resiliência para $\sigma_3 = 0,07$ MPa para algumas das dosagens de agregados reciclados estudadas.

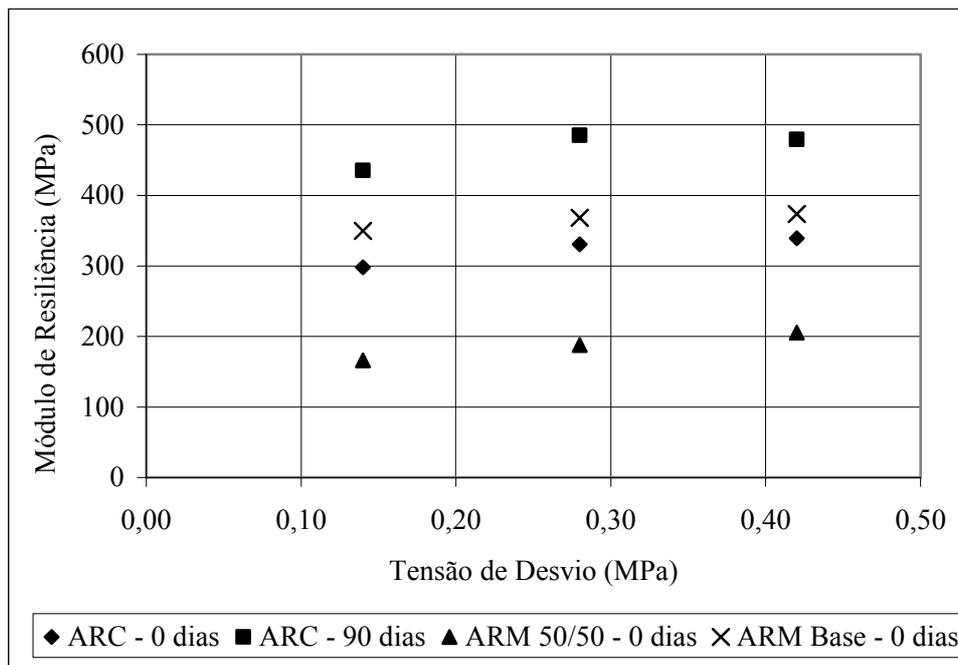


Figura 4.32 – Tensão desvio versus módulo de resiliência para $\sigma_3 = 0,14$ MPa para algumas das dosagens de agregados reciclados estudadas.

A dosagem composta apenas de resíduos de concreto (ARC) apresentou um ganho considerável de módulo de resiliência após os 90 dias de cura, o que não aconteceu com as outras duas dosagens também ensaiadas com o mesmo tempo de cura. A amostra ARM 50/50 30% SA apresentou o módulo praticamente semelhante nos ensaios realizados com e sem cura e a amostra ARM Base, da pista experimental, apresentou uma pequena redução no valor do módulo após 90 dias de cura, devido provavelmente a pequenas variações na composição (agregado/solo), no estado físico das amostras (γ_d e w) a algum problema de execução ou mesmo à variação de resultados do ensaio. O aumento do módulo com a cura, constatado apenas na amostra ARC pode ser explicado pela maior concentração de elementos cimentícios nessa dosagem que nas demais e também ao fato de que o tempo de cura possa ter sido insuficiente para as outras amostras. Infelizmente não foram realizadas as determinações dos pH dos corpos de prova ensaiados, pois certamente eles ajudariam a entender os resultados, haja vista os ganhos de ISC e o aumento do pH registrados para essas misturas, como já mostrado nas Figuras 4.20 e 4.21. Aliás, é bom que se destaque que os resultados aqui obtidos são compatíveis com aqueles. Segundo Motta (2005), a instrução de projeto da Prefeitura Municipal de São Paulo IP 08 (PMSP, 2002) apresenta estimativas de valores de módulo de resiliência para materiais granulares para que seus projetistas possam avaliar deformações, tensões e deflexões na estrutura do pavimento. Segundo a autora, de acordo com o documento

citado, a estimativa do módulo de resiliência (ou módulo de elasticidade) para uma camada de base granular situa-se entre 100 e 500 MPa.

É importante que se destaque ainda, que nessas misturas utilizando-se os resíduos sólidos da construção civil a linearidade admitida pelo modelo teórico e mostrada nas Figuras 4.25 a 4.30 não se ajusta completamente aos resultados experimentais. Observa-se que os dados experimentais mostrados nessas figuras apontam para uma inflexão que se situa em torno da tensão confinante 0,05 MPa. Tal comportamento pode eventualmente estar associado à característica bi-particulada das amostras, onde se tem aproximadamente 50% de material granular relativamente uniforme preenchido por uma matriz fina melhor graduada. Essa característica induziria à mobilização de matrizes estruturais distintas segundo o nível de tensão confinante aplicada. É evidente que esse é um ponto a ser mais pesquisado e analisado à luz da literatura existente.

A Tabela 4.18 apresenta os valores dos parâmetros de resiliência das dosagens com agregados reciclados ensaiadas, k_1 e k_2 , em função do modelo adotado. Os valores foram encontrados a partir das regressões lineares dos ensaios, representados nas Figuras 4.25 a 4.30.

Tabela 4.18 – Resumo dos parâmetros de resiliência de algumas das dosagens de agregados reciclados estudadas.

Dosagens	Parâmetros	k_1	k_2
ARC - 0 dias		827,33	0,5032
ARC - 90 dias		1262,40	0,5297
ARM - 0 dias		490,00	0,6147
ARM 50/50 - 0 dias		443,74	0,4988
ARM 50/50 30% SA - 0 dias		485,18	0,4101
ARM 50/50 30% SA - 90 dias		671,43	0,5367
ARM Base - 0 dias		758,12	0,4114
ARM Base - 90 dias		773,95	0,4592
ARM Sub-base		694,81	0,3940

A Figura 4.33 apresenta graficamente os valores de módulo de resiliência (MR) do solo argiloso do subleito da pista experimental, para as energias de compactação normal e intermediária. Verifica-se um aumento nos valores de módulo em função do aumento de energia. A análise das regressões fornece um modelo bi linear, representado pelas Equações 4.2 e 4.3, de acordo com o modelo proposto pelo método de ensaio ME 131 (DNER, 1994c), para solos argilosos. A Tabela 4.19 apresenta os parâmetros de resiliência do solo argiloso

obtidos das curvas $\sigma_d \times MR$, para as energias de compactação normal e intermediária.

$$MR = k_2 + k_3(k_1 - \sigma_d) \Rightarrow p/k_1 > \sigma_d \quad (4.2)$$

$$MR = k_2 + k_4(\sigma_d - k_1) \Rightarrow p/k_1 < \sigma_d \quad (4.3)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência;

k_1, k_2, k_3 e k_4 = parâmetros de resiliência para solos argilosos;

σ_d = tensão de desvio.

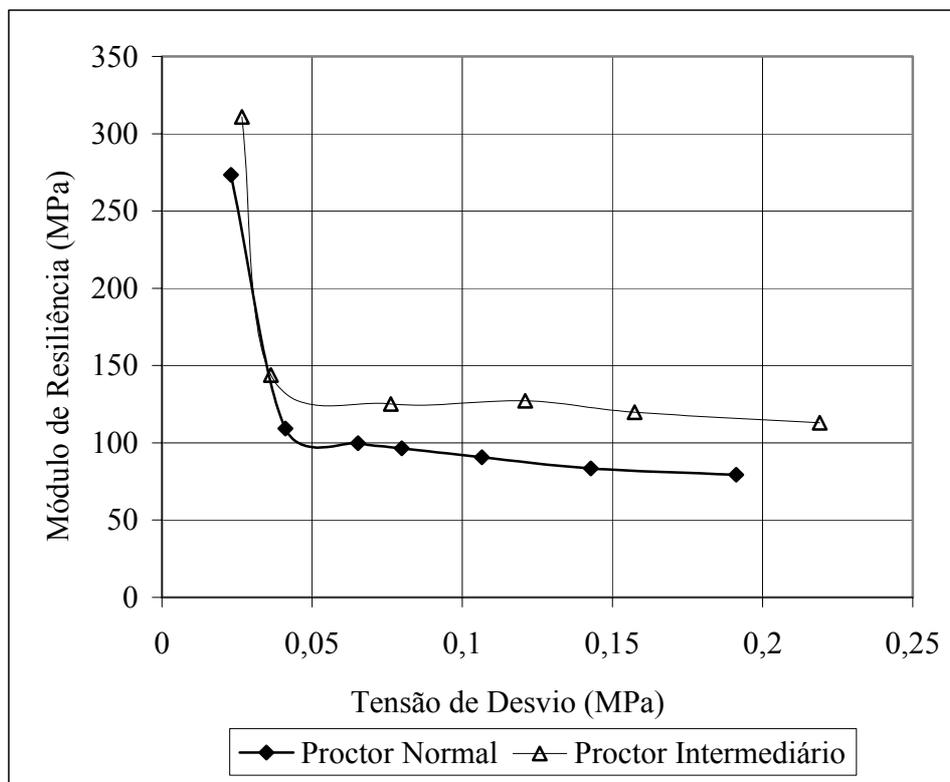


Figura 4.33 – Módulo de resiliência do solo argiloso das dosagens e do subleito da pista experimental (CEASA).

Tabela 4.19 – Parâmetros de resiliência do solo argiloso das dosagens e do subleito da pista experimental (CEASA).

ENERGIA	k1	k2	k3	k4
Normal	0,042	101,7	9090,9	183,4
Intermediária	0,037	124,2	16666,7	50,0

4.2.7 VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO SUBLEITO ARGILOSO DEVIDO AO RESSECAMENTO

Depois de realizada a cura ao ar durante 28 dias, em ambiente de laboratório, verificou-se que os corpos de prova de solo argiloso sofreram contrações devido ao ressecamento. O valor do ISC do solo argiloso do subleito, compactado na energia do Proctor normal, aumentou de 7 para 19%, em função do ressecamento, ou seja, teve o seu valor quase triplicado, ultrapassando até o valor alcançado com a aplicação da energia intermediária, que foi de 16%. Já com relação à expansão, cujo valor era igual a zero, passou a ser igual a 0,2%. Estudos relativos ao emprego de solos finos lateríticos em pavimentos econômicos (Villibor, 1981; Villibor et. al., 2000) sugerem que camadas de base de solo fino sejam expostas ao ar durante um período de 48h após a compactação para provocar a perda de umidade e desenvolvimento de trincas de contração, o que leva a uma melhoria de desempenho. Tal procedimento é evidentemente válido para os solos profundamente intemperizados, os solos lateríticos, uma vez que neles, a redução do índice de vazios que ocorre por efeito da retração é apenas parcialmente retomada pela expansão estrutural do solo, pois estes, via de regra, não apresentam expansão mineralógica. Já nos solos pouco intemperizados, solos saprolíticos, a conjugação das expansões estrutural e mineralógica quando da saturação, eliminará provavelmente todo o ganho de peso específico oriundo da retração por secagem.

4.2.8 DETERMINAÇÃO DA SUCCÃO DO SOLO DO SUBLEITO

A Figura 4.34 apresenta a curva característica ou de retenção de água do solo argiloso do subleito da pista experimental, compactado em laboratório na energia Proctor intermediária. Juntamente com a curva do ensaio estão apresentadas duas outras curvas ajustadas para as energias normal e intermediária a partir da curva $e.pF \times Sr$ determinada conforme modelo proposto por Camapum de Carvalho e Leroueil (2004). Nesse modelo, pF é o logaritmo da sucção em centímetros de coluna d'água e “ e ” o índice de vazios do solo correspondente a cada sucção medida. Esse índice de vazios geralmente difere daquele de compactação devido a contração ou a expansão que o solo sofre depois de compactado ao se ajustar a umidade para a qual se pretende determinar a sucção do solo. A Figura 4.34 mostra que tanto na curva experimental como nas estimadas para as energias Proctor normal e intermediária as pressões de entrada de ar são muito elevadas com variações de sucção importantes, ao se passar do ramo seco para o ramo úmido.

4.2.8.1 RELAÇÃO ENTRE A SUCCÃO ESTIMADA E O ISC DAS MISTURAS

Utilizando a consagrada metodologia de determinação da curva característica ou de retenção de água pela técnica do papel filtro, em que a sucção do solo é determinada por meio da sucção medida no papel filtro, por entender-se que a sucção nos dois materiais entra em equilíbrio, foi feita uma estimativa das sucções das dosagens de agregados reciclados com base na sucção da argila nelas adicionadas, cuja curva característica é apresentada na Figura 4.34.

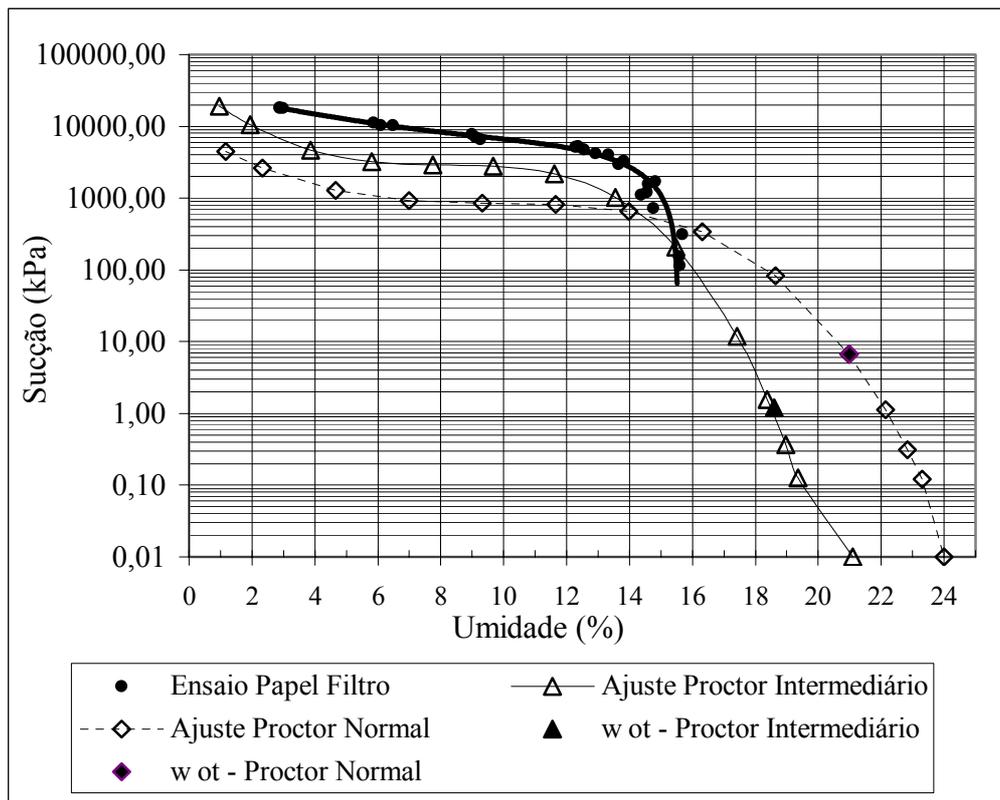


Figura 4.34 – Curvas características do solo argiloso do subleito da pista experimental (CEASA).

Buscando mostrar que as propriedades interagregado exercem grande influência sobre o comportamento desse tipo de mistura, em que os agregados apresentam alta porosidade, foi feita uma estimativa das sucções de compactação para cada uma das dosagens. Estima-se que para as misturas contendo argila a sucção seja, em grande, parte responsável pelo estado da mistura compactada, ou seja, a condição ótima corresponde a menor sucção que antecede a oclusão. Nesse caso acredita-se, que se há uma relação direta entre a sucção e o estado físico do solo (índice de vazios e umidade) e entre este e o ISC, haverá de existir uma relação entre o ISC e a sucção correspondente ao estado das misturas. Com base nesse pré-suposto, plotou-

se o gráfico ISC x sucção do solo correspondente às condições de compactação (Figura 4.35). Considerou-se na plotagem os índices de vazios total e interagregado, pois um dos objetivos dessa análise é dar destaque ao tratamento dos resultados em termos dos vazios e umidade interagregados. Os valores de sucção, nesses casos, também foram estimados em função do índice de vazios total e interagregado utilizando-se o modelo $e.pF \times S_r$ proposto por Camapum de Carvalho e Leroueil (2004).

A Figura 4.35 mostra que existe uma boa relação entre o ISC e a sucção estimada, cabendo lembrar que não se pode dessa relação pretender extrair valores de ISC, uma vez que estes foram obtidos para a condição inundada. O gráfico apenas mostra que a sucção é definidora do estado do solo na compactação e que o ISC a ele se relaciona diretamente. Os resultados apontam ainda para o provável acerto na transposição dos princípios que regem a definição da curva característica pela técnica do papel filtro para as misturas de agregado reciclado com solo argiloso.

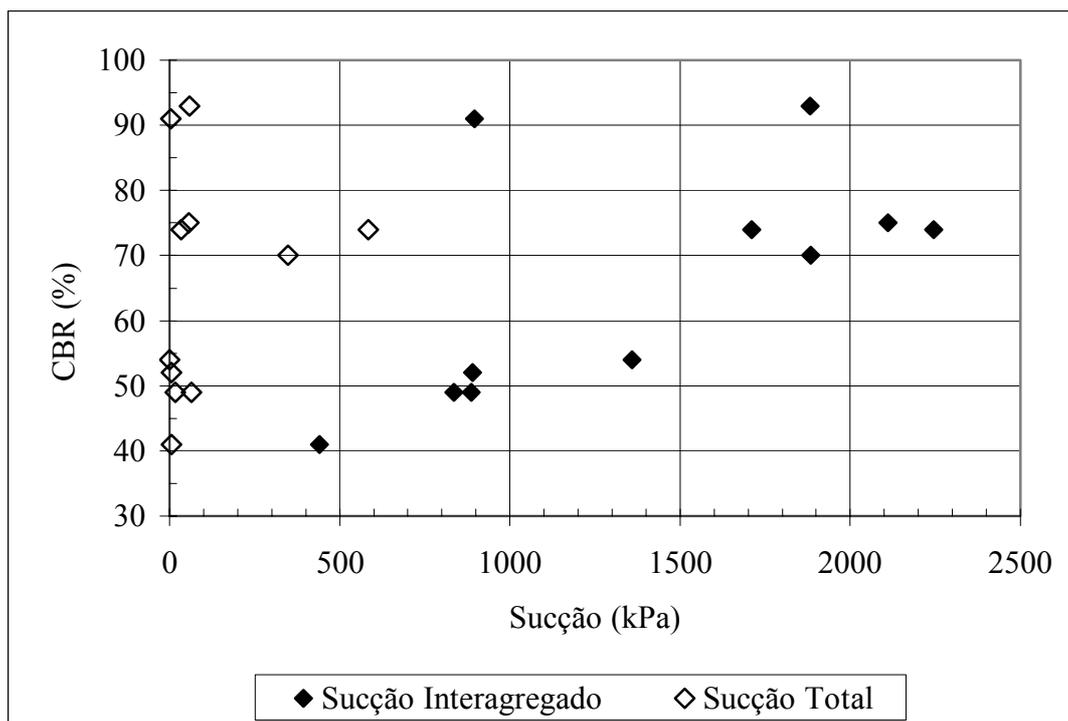


Figura 4.35 - Variação do ISC de dosagens de agregados reciclados e solo argiloso em função da sucção estimada - energia do Proctor intermediário.

4.2.8.2 RELAÇÃO ENTRE A SUCÇÃO ESTIMADA E O MÓDULO DE RESILIÊNCIA

A Figura 4.36 apresenta a variação do módulo de resiliência em função da sucção para três das dosagens de agregados reciclados e solo argiloso, sendo os valores de sucção obtidos

de forma semelhante aos da análise feita com o ISC e descrita anteriormente. Considerou-se para a elaboração do gráfico os valores de módulo correspondentes à tensão confinante de 52,5 kPa. Os resultados apresentados permitem colocar em evidência a importância da sucção, do tempo de cura e do tratamento dos resultados em termos de vazios e umidade interagregados. Cabe salientar que os valores de sucção foram estimados e objetivam apenas realçar a sua importância para o entendimento do comportamento de misturas de agregados reciclados com solos argilosos.

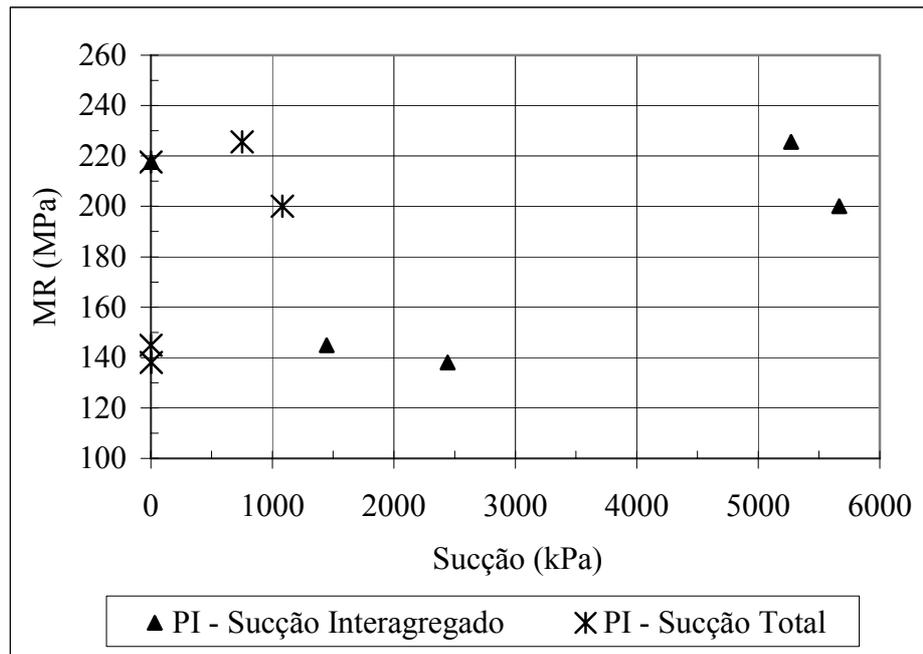


Figura 4.36 - Variação do módulo de resiliência de dosagens de agregados reciclados e solo argiloso em função da sucção estimada - energia do Proctor intermediário.

4.3 PISTA EXPERIMENTAL

Os resultados dos ensaios realizados sobre as camadas de subleito, sub-base, base e revestimento, após a construção e durante o monitoramento da pista experimental estão apresentados a seguir.

4.3.1 CONTAGEM DE TRÁFEGO E DETERMINAÇÃO DO NÚMERO N

A Tabela 4.20 apresenta o resumo da contagem de tráfego, volumétrica e classificatória de veículos, realizada no trecho experimental em Agosto de 2005, durante o período de duas semanas. Observou-se durante a contagem de tráfego que apenas 5% dos caminhões que trafegam pela pista experimental estão carregados. A Tabela 4.21 apresenta os

valores obtidos para o número de solicitações do eixo padrão de 82 kN (número N), segundo o critério descrito no Capítulo 3.

Tabela 4.20 - Contagem de tráfego na pista experimental (CEASA) - Agosto de 2005.

Veículo	Carro de passeio (Leve)	Caminhoneta (Leve)	Ônibus	Caminhão Simples	Caminhão Duplo	Semi-Reboque 2S2	Semi-Reboque 3S2	Total
								
VDM (UN)	947	292	1	242	63	3	1	1549
Percentual	61,1	18,8	0,1	15,6	4,1	0,2	0,1	99,9

Tabela 4.21 - Número equivalente de solicitações do eixo padrão de 82 kN na pista experimental (número N), calculado com os fatores de carga do USACE.

PERÍODO	Vt	N
6 Meses	278.820	9×10^3
12 Meses	557.640	$1,7 \times 10^4$
18 Meses	836.460	$2,6 \times 10^4$
5 Anos	2.826.925	9×10^4
10 Anos	5.635.850	2×10^5

FE = 2,0025 FC = 0,0158 FV = 0,03164

Os dados apresentados nas Tabelas 4.20 e 4.21 mostram que apesar do alto volume de tráfego (VDM) o número N é baixo, em função da maior parte dos veículos que trafegam sobre a pista experimental ser de veículos leves e em função de 95% dos caminhões trafegarem vazios. A utilização dos fatores de equivalência de carga propostos pelo corpo de engenheiros dos Estados Unidos da América (USACE) para determinação da solicitação do pavimento em termos de número N não é ideal para a realidade brasileira, sendo necessário que sejam realizados estudos de dimensionamento de frota, com base no peso máximo por eixo estabelecido na lei da balança e em dados obtidos do monitoramento dos veículos que trafegam pelas rodovias do país.

4.3.2 CARACTERÍSTICAS DO REVESTIMENTO ASFÁLTICO DA PISTA EXPERIMENTAL

A Figura 4.37 apresenta a curva granulométrica do concreto asfáltico do revestimento da pista experimental retirado logo após a sua aplicação e a faixa granulométrica C da norma DNIT 031/2006 – ES (DNIT, 2006) na qual a mesma se enquadra. O teor de ligante asfáltico determinado pelo ensaio de extração foi igual a 5,4%.

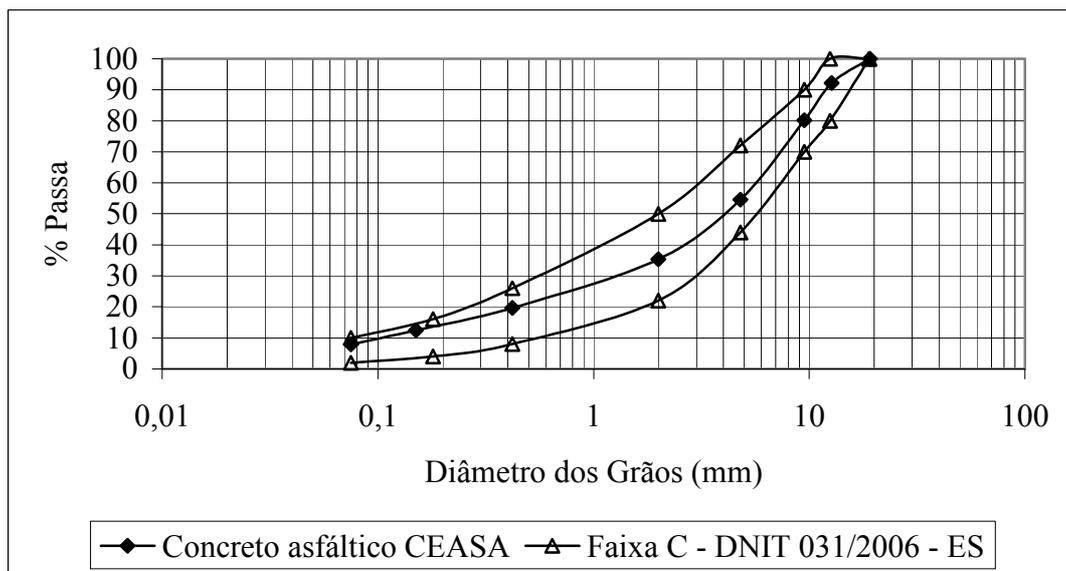


Figura 4.37 – Curva granulométrica do concreto asfáltico da pista experimental.

4.3.3 RESULTADOS DAS DETERMINAÇÕES DE PESO ESPECÍFICO DE CAMPO

A seguir estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados com o frasco de areia e com o densímetro nuclear nas etapas de monitoramento da pista experimental e feita a sua comparação com os dados determinados na fase de construção.

4.3.3.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O FRASCO DE AREIA

As Tabelas 4.22 a 4.24 apresentam os resultados dos ensaios com o frasco de areia, realizados em Novembro de 2005 e Maio de 2006. Em Novembro de 2005 as determinações foram feitas em apenas uma profundidade, na camada de base. Em Maio de 2006, os ensaios foram realizados em duas profundidades, uma correspondente à base e outra à sub-base, determinando-se, portanto, os pesos específicos de cada camada. A Tabela 4.25 apresenta os dados referentes ao peso específico de campo utilizando o frasco de areia, obtidos por Silva (2004) na época da construção da pista experimental. Comparando-se os resultados verifica-se

que existe uma certa diferença entre os valores iniciais e aqueles obtidos após a incidência de dezoito meses de tráfego sobre a pista experimental. Essa diferença pode, no entanto, ser atribuída à própria variabilidade do material nos pontos ensaiados.

Tabela 4.22 – Pesos específicos de campo utilizando o frasco de areia – camada de base - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Novembro/2005.

Estaca	γ (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)
3 EX	20,0	12,0	17,8
4 BD	19,5	12,2	17,4
4+10 BE	19,8	12,5	17,6
Média	19,8	12,2	17,6
Desvio Padrão	0,3	0,3	0,2

Tabela 4.23- Pesos específicos de campo utilizando o frasco de areia – camada de base - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.

Estaca	γ (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)
3 EX	20,5	12,1	18,3
4 BD	20,3	12,3	18,1
4+10 BE	20,2	13,3	17,8
Média	20,3	12,6	18,0
Desvio Padrão	0,1	0,6	0,2

Tabela 4.24 - Pesos específicos de campo utilizando o frasco de areia – camada de sub-base - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.

Estaca	γ (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)
3 EX	19,6	11,4	17,6
4 BD	19,5	12,1	17,4
4+10 BE	19,9	16,4	17,1
Média	19,7	13,3	17,4
Desvio Padrão	0,2	2,7	0,2

Tabela 4.25 - Pesos específicos de campo utilizando o frasco de areia – camadas de base e sub-base - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) na fase de construção (Silva, 2004).

Estaca	γ_d - Base (kN/m ³)	γ_d - Sub-base (kN/m ³)
3 EX	16,9	18,2
4 BD	17,9	18,2
4+15 BE	17,7	17,3
Média	17,5	17,9
Desvio Padrão	0,1	0,7

4.3.3.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O DENSÍMETRO NUCLEAR

As Tabelas 4.26 a 4.28 apresentam os valores obtidos nas determinações de peso específico de campo utilizando o densímetro nuclear. Os valores apresentados correspondem à média das determinações feitas a 10 e 15 cm de profundidade, para a base e a 20 cm de profundidade, para a sub-base. Silva (2004) verificou que as determinações de umidade feitas com o densímetro nuclear, para a base e sub-base de agregados reciclados, apresentaram variações significativas em relação ao método da estufa. Como os valores das umidades de campo determinados na época de construção da pista experimental utilizando densímetro foram menores, em torno de 3%, em relação aos valores determinados pela estufa, foram adotadas as umidades da estufa para a determinação dos pesos específicos secos de campo. Se for adotado esse mesmo critério para os dados das Tabelas 4.26 a 4.28, considerando-se as umidades obtidas pela estufa nos ensaios de frasco de areia realizados no mesmo dia e local, os pesos específicos secos obtidos pelo densímetro nuclear sofrem uma redução, entretanto continuam apresentando valores distintos daqueles obtidos pelo método do frasco de areia. Embora não seja muito comum a utilização do densímetro nuclear em obras de pavimentação no Brasil, uma vez feita a devida aferição o mesmo pode ser utilizado para a determinação de umidades, pesos específicos de campo e controle de compactação, inclusive de agregados reciclados. A Tabela 4.29 apresenta os dados obtidos por Silva (2004) referentes ao peso específico de campo da pista experimental utilizando o densímetro nuclear, logo após a compactação das camadas.

Tabela 4.26 - Pesos específicos de campo utilizando o densímetro nuclear – camadas de base e sub-base - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2005.

BASE				
Estaca	3 EX	4 BD	4+15 BE	Média
γ (kN/m ³)	21,3	20,8	20,5	20,9
γ_d (kN/m ³)	19,4	18,7	18,8	19,0
w (%)	9,7	11,5	8,7	10,0
SUB-BASE				
Estaca	3 EX	4 BD	4+15 BE	Média
γ (kN/m ³)	20,8	20,7	20,3	20,6
γ_d (kN/m ³)	18,9	18,5	18,6	18,7
w (%)	9,9	11,6	8,8	10,1

Tabela 4.27 - Pesos específicos de campo utilizando o densímetro nuclear – camadas de base e sub-base - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Novembro/2005.

BASE				
Estaca	3 EX	4 BD	4+15 BE	Média
γ (kN/m ³)	21,3	20,6	20,8	20,9
γ_d (kN/m ³)	19,5	18,7	19,2	19,2
w (%)	8,9	9,5	8,3	8,9
SUB-BASE				
Estaca	3 EX	4 BD	4+15 BE	Média
γ (kN/m ³)	20,8	20,4	20,8	20,7
γ_d (kN/m ³)	19,1	18,6	19,2	18,9
w (%)	9,0	9,8	8,6	9,2

Tabela 4.28 – Pesos específicos de campo utilizando o densímetro nuclear – camadas de base e sub-base - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.

BASE				
Estaca	3 EX	4 BD	4+15 BE	Média
γ (kN/m ³)	20,5	20,0	20,1	20,2
γ_d (kN/m ³)	18,7	18,1	18,4	18,4
W (%)	10,0	10,1	8,8	9,6
SUB-BASE				
Estaca	3 EX	4 BD	4+15 BE	Média
γ (kN/m ³)	19,8	19,8	20,2	19,9
γ_d (kN/m ³)	17,9	18,0	18,6	18,1
W (%)	10,3	10,3	8,5	9,7

Tabela 4.29 - Pesos específicos de campo utilizando o densímetro nuclear – camadas de base e sub-base - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) na fase de construção (Silva, 2004).

Estaca	γ_d - Base (kN/m³)	γ_d - Sub-base (kN/m³)
Bordo Direito - BD	17,7	17,9
Bordo Esquerdo - BE	17,1	17,3
Eixo - EX	16,6	16,6
Média	17,1	17,2
Desvio Padrão	0,5	0,6

4.3.4 RESULTADOS DAS MEDIDAS DE DEFLEXÃO UTILIZANDO A VIGA BENKELMAN

Embora o ensaio de medida de deflexões com a viga Benkelman seja normalmente executado apenas sobre o revestimento asfáltico, durante a fase de construção da pista experimental foram realizados ensaios sobre o subleito compactado (11/11/2003), sobre a sub-base e a base de agregados reciclados (18 e 19/12/2003). Os ensaios sobre o revestimento asfáltico foram realizados em 09/01/2004, 31/05/2005, 06/12/2005 e 22/05/2006. Assis et al. (2004) também realizaram uma bateria de ensaios com viga Benkelman na pista experimental em Setembro/2004 e os dados obtidos pelos mesmos estão incorporados nas análises aqui apresentadas.

As Tabelas 4.30 a 4.33 apresentam os resultados dos ensaios realizados sobre as camadas de subleito, sub-base, base e revestimento, após a construção. Os ensaios foram realizados nos bordos direito (BD) e esquerdo (BE) da pista, nas trilhas de roda externas. A Tabela 4.34 apresenta um resumo dos valores médios de deflexão máxima no ponto de ensaio (D_0), deflexão a 25 cm do ponto de ensaio (D_{25}), raio de curvatura (R) e o valor do produto $R.D_0$, para cada uma das camadas do pavimento. Conforme já mencionado no capítulo 2, o raio de curvatura (R) é um índice que indica o estado do pavimento em relação às deflexões. De acordo com o procedimento PRO 011 (DNER, 1979), valores de $R < 100$ m sugerem a existência de problemas no pavimento e devem ser feitas determinações adicionais. Segundo Paiva & Causim (2000), a avaliação da condição em que se encontra o pavimento a partir do levantamento da bacia de deflexão pode ser feita com base no produto $R.D_0$. Valores de $R.D_0 < 5500$ indicam uma possível existência de problemas estruturais no pavimento. Embora essa análise não sirva como critério único de avaliação ela pode auxiliar no entendimento do comportamento do pavimento. Observa-se na Tabela 4.34 que os valores médios de D_0 antes da execução do revestimento ficaram entre 75 e 82 x 10⁻² mm. Após a construção da camada de revestimento, o valor médio de D_0 reduziu para 48 x 10⁻² mm, ocorrendo também uma sensível redução no valor do D_{25} . A Figura 4.38 apresenta a relação entre D_0 e o produto $R.D_0$ para todos os pontos ensaiados nas camadas de subleito, sub-base, base e revestimento. A observação da figura permite identificar a variação dos valores desses índices dentro de cada camada do pavimento e entre uma camada e outra.

Apesar das análises em termos de raio de curvatura se aplicarem às medidas de deflexão realizadas sobre o revestimento asfáltico e expressarem o seu comportamento em

termos de trincamento, também foram feitas as determinações do mesmo nos ensaios realizados sobre as camadas de subleito, sub-base e base e estendida a análise para as mesmas. Em três determinações individuais na sub-base e em cinco na base (Tabelas 4.31 e 4.32), foram encontrados valores de $R < 100$, porém para esses pontos o produto $R \cdot D_0$ foi maior que 5500. Tal fato pode ter ocorrido devido à baixa coesão e descobertura das camadas durante a realização dos ensaios. Entretanto, o valor médio do raio de curvatura obtido para a camada de sub-base foi maior que 100 e praticamente 100 para a base (Tabela 4.34). A Figura 4.39 apresenta as bacias de deflexão médias das camadas do pavimento obtidas logo após a construção de cada uma.

Tabela 4.30 - Ensaio de viga Benkelman sobre o subleito da pista experimental (CEASA) - Novembro/2003.

ESTACA	LEITURAS ($\times 10^{-2}$ mm)									D_0	D_{25}	R	$R \times D_0$
	L_0	L_{25}	L_{50}	L_{75}	L_{100}	L_{125}	L_{150}	L_{175}	L_{200}	$\times 10^{-2}$ mm	m	$m \cdot 10^{-2}$ mm	
2+15 BE	500	488	476	467	465	461	460	460	460	80	56	130	10417
3 BD	500	493	486	478	478	478	478	478	478	44	30	223	9821
3+5 BE	500	488	475	471	467	466	465	465	464	72	48	130	9375
3+10 BD	500	487	475	467	465	464	463	463	462	76	50	120	9135
3+15 BE	500	494	475	472	467	447	463	463	462	76	64	260	19792
4 BD	500	489	466	452	449	466	446	446	446	108	86	142	15341
4+5 BE	500	491	482	472	469	467	465	465	465	70	52	174	12153
4+10 BD	500	498	480	466	464	463	462	462	462	76	72	781	59375

Tabela 4.31 - Ensaio de viga Benkelman sobre a sub-base da pista experimental (CEASA) - Dezembro/2003.

ESTACA	LEITURAS ($\times 10^{-2}$ mm)									D_0	D_{25}	R	$R \times D_0$
	L_0	L_{25}	L_{50}	L_{75}	L_{100}	L_{125}	L_{150}	L_{175}	L_{200}	$\times 10^{-2}$ mm	m	$m \cdot 10^{-2}$ mm	
2+15 BE	600	581	571	566	564	562	561	560	560	80	42	82	6579
3 BD	600	598	586	581	580	576	576	576	576	48	44	781	37500
3+5 BE	600	594	581	575	571	570	568	568	568	64	52	260	16667
3+10 BD	600	596	580	574	570	568	567	565	565	70	62	391	27344
3+15 BE	600	585	570	565	562	560	559	558	557	86	56	104	8958
4 BD	600	584	565	559	556	553	553	553	550	100	68	98	9766
4+5 BE	600	580	563	557	553	550	549	549	548	104	64	78	8125
4+10 BD	600	595	579	571	565	563	562	560	560	80	70	313	25000

Tabela 4.32 - Ensaio de viga Benkelman sobre a base da pista experimental (CEASA) - Dezembro/2003.

ESTACA	LEITURAS ($\times 10^{-2}$ mm)									D ₀	D ₂₅	R	RxD ₀
	L ₀	L ₂₅	L ₅₀	L ₇₅	L ₁₀₀	L ₁₂₅	L ₁₅₀	L ₁₇₅	L ₂₀₀	$\times 10^{-2}$ mm	m	$m \cdot 10^{-2}$ mm	
2+15 BE	600	583	572	568	565	564	563	563	563	74	40	92	6801
3 BD	600	582	574	570	569	567	566	565	565	70	34	87	6076
3+5 BE	600	580	569	562	560	559	558	558	558	84	44	78	6563
3+10 BD	600	583	572	567	565	562	560	559	559	82	48	92	7537
3+15 BE	600	586	577	571	568	564	563	562	561	78	50	112	8705
4 BD	600	590	575	567	561	559	558	557	556	88	68	156	13750
4+5 BE	600	584	572	567	563	562	561	560	559	82	50	98	8008
4+10 BD	600	586	573	565	559	557	554	553	552	96	68	112	10714

Tabela 4.33 - Ensaio de viga Benkelman sobre o revestimento da pista experimental (CEASA) - Janeiro/2004.

ESTACA	LEITURAS ($\times 10^{-2}$ mm)									D ₀	D ₂₅	R	RxD ₀
	L ₀	L ₂₅	L ₅₀	L ₇₅	L ₁₀₀	L ₁₂₅	L ₁₅₀	L ₁₇₅	L ₂₀₀	$\times 10^{-2}$ mm	m	$m \cdot 10^{-2}$ mm	
2+15 BE	600	591	585	581	579	578	577	577	577	46	28	174	7986
3 BD	600	590	585	584	583	583	583	583	582	36	16	156	5625
3+5 BE	600	591	585	583	582	582	582	582	582	36	18	174	6250
3+10 BD	600	591	583	580	577	575	574	574	573	54	36	174	9375
3+15 BE	600	590	586	583	581	581	580	580	579	42	22	156	6563
4 BD	600	590	582	575	573	571	570	570	569	62	42	156	9688
4+5 BE	600	591	582	580	577	577	576	576	575	50	32	174	8681
4+10 BD	600	593	584	579	576	575	574	574	573	54	40	223	12054

Tabela 4.34 - Resumo dos ensaios de viga Benkelman realizados na pista experimental (CEASA) - valores médios do subleito, sub-base, base e revestimento.

Camada	D ₀ ($\times 10^{-2}$ mm)		D ₂₅ ($\times 10^{-2}$ mm)		R (m)	R.D ₀ ($m \times 10^{-2}$ mm)
	Média	DESVPAD	Média	DESVPAD		
Subleito	75	17	57	17	174	13064
Sub-base	79	18	57	11	144	11351
Base	82	8	50	12	99	8110
Revestimento	48	9	29	10	171	8134

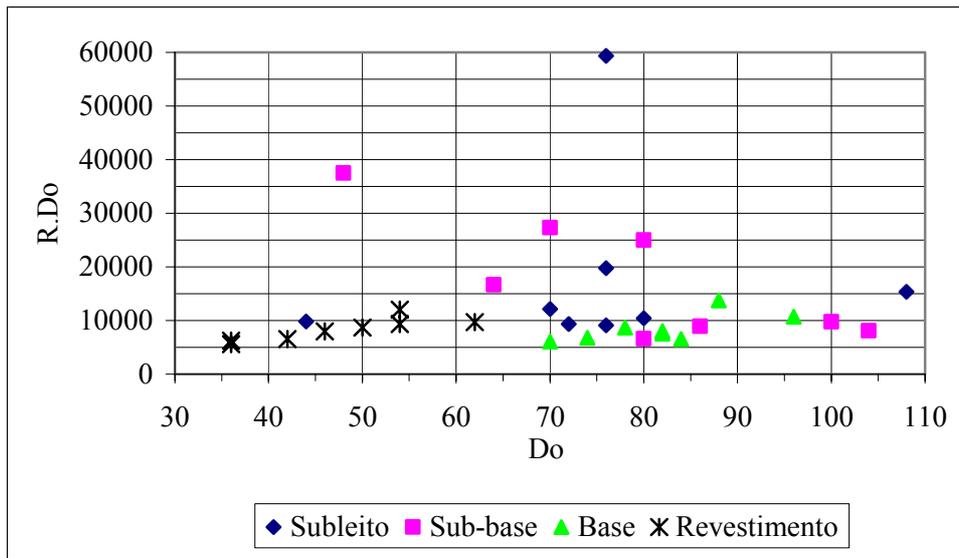


Figura 4.38 – Relação entre D_0 e o produto $R.D_0$.

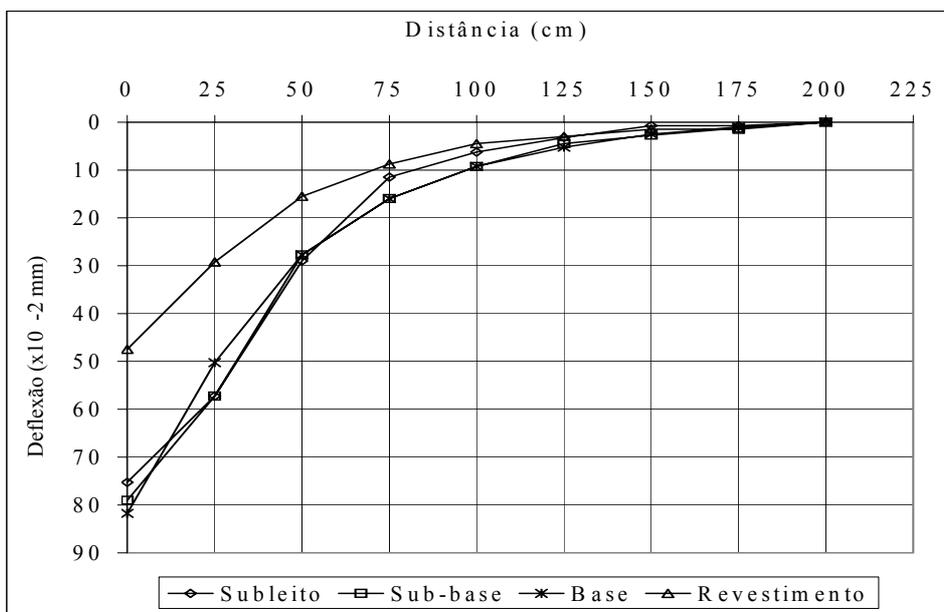


Figura 4.39 - Bacias de deflexão médias do subleito, sub-base, base e revestimento da pista experimental (CEASA), logo após a construção.

A Figura 4.40 apresenta uma comparação entre as deflexões das camadas do pavimento. Pode-se verificar que as deflexões das camadas inferiores influenciam nas deflexões das camadas superiores e obedecem a certas tendências de crescimento. Com relação a esse comportamento, Camapum de Carvalho et al. (2000) comprovaram em campo que o comportamento do subleito interfere na compactação das camadas acima dele e no desempenho da estrutura do pavimento como um todo. Segundo os autores, a qualidade da

camada ou das camadas inferiores interfere diretamente no comportamento das camadas superiores. A importância dessa observação se estende para a análise da relação entre os resultados de campo e de laboratório, tendo em vista que esses últimos são obtidos compactando-se a amostra sobre base rígida, o que geralmente não ocorre *in situ*.

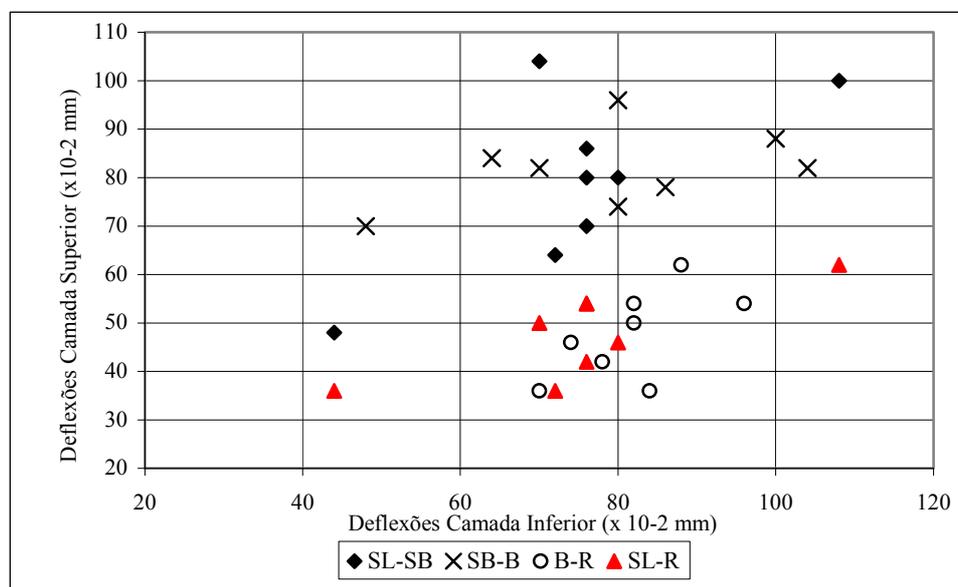


Figura 4.40 – Comparação entre as deflexões das camadas do pavimento da pista experimental (CEASA).

As Tabelas 4.35 a 4.38 apresentam os resultados dos ensaios de viga Benkelman realizados sobre o revestimento asfáltico em Setembro de 2004 (Assis et al., 2004), Maio de 2005, Novembro de 2005 e Maio de 2006, respectivamente. Os ensaios foram realizados nas estacas dos ensaios realizados na fase de construção da pista experimental e em algumas adicionais.

Tabela 4.35 - Ensaio de viga Benkelman sobre o revestimento da pista experimental (CEASA) - Setembro/2004 (Assis et al., 2004).

ESTACA	LEITURAS ($\times 10^{-2}$ mm)									L_{1000}	D_0 $\times 10^{-2}$ mm	D_{25}	R m	RxD_0 m. 10^{-2} mm
	L_0	L_{25}	L_{50}	L_{75}	L_{100}	L_{125}	L_{150}	L_{175}	L_{200}					
2+15 BE	500	494	487	485	484	484	484	484	484	484	32	20	260	8333
3 BD	500	495	492	489	488	487	487	486	486	486	28	18	313	8750
3+5 BE	500	495	489	488	487	486	486	486	484	484	32	22	313	10000
3+10 BD	500	494	486	483	481	479	479	478	477	476	48	36	260	12500
3+15 BE	500	496	490	488	486	486	486	486	484	483	34	26	391	13281
4 BD	499	491	485	482	481	479	478	477	477	475	48	32	195	9375
4+5 BE	500	497	489	489	481	481	480	479	479	477	46	40	521	23958

Tabela 4.36 - Ensaio de viga Benkelman sobre o revestimento da pista experimental (CEASA) - Maio/2005.

ESTACA	LEITURAS ($\times 10^2$ mm)										D_0	D_{25}	R	RxD ₀
	L ₀	L ₂₅	L ₅₀	L ₇₅	L ₁₀₀	L ₁₂₅	L ₁₅₀	L ₁₇₅	L ₂₀₀	L ₁₀₀₀				
2+15 BE	500	489	481	479	478	476	476	476	476	475	53	30	135	7102
3 BD	500	488	483	482	481	480	480	480	480	479	44	19	123	5469
3+5 BE	499	487	478	475	473	473	472	470	470	469	63	38	123	7813
3+10 BD	500	483	475	471	470	468	467	466	466	464	76	40	87	6618
3+15 BE	499	487	481	477	475	473	471	470	470	469	63	38	123	7813
4 BD	500	481	474	470	469	468	467	466	466	464	76	36	78	5921
4+5 BE	500	486	481	479	479	477	477	477	477	476	51	21	106	5357
4+10 BD	500	480	472	467	465	463	462	462	461	460	84	42	74	6250

Tabela 4.37 - Ensaio de viga Benkelman sobre o revestimento da pista experimental (CEASA) - Novembro/2005.

ESTACA	LEITURAS ($\times 10^2$ mm)										D_0	D_{25}	R	RxD ₀
	L ₀	L ₂₅	L ₅₀	L ₇₅	L ₁₀₀	L ₁₂₅	L ₁₅₀	L ₁₇₅	L ₂₀₀	L ₁₀₀₀				
2+15 BD	500	488	483	481	480	480	479	478	478	476	48	24	130	6250
3 BD	500	490	485	482	481	480	480	479	479	479	42	22	156	6563
3+5 BD	500	494	485	482	480	479	477	477	476	475	50	38	260	13021
3+10 BD	500	488	484	484	484	484	484	483	483	482	36	12	130	4688
3+15 BD	500	485	481	479	475	474	471	468	462	460	80	50	104	8333
4 BD	500	479	473	470	467	466	465	465	465	463	74	32	74	5506
4+5 BD	500	480	470	467	465	464	463	463	462	461	78	38	78	6094
4+10 BD	500	484	478	471	469	467	466	465	465	463	74	42	98	7227
2+15 BE	500	486	480	477	477	476	476	475	475	475	50	22	112	5580
3 BE	500	490	483	480	477	477	476	476	476	474	52	32	156	8125
3+5 BE	500	487	478	474	473	472	472	471	471	470	60	34	120	7212
3+10 BE	500	487	482	478	476	475	474	474	473	471	58	32	120	6971
3+15 BE	500	486	480	477	476	475	473	473	472	470	60	32	112	6696
4 BE	500	487	479	476	474	474	473	472	471	470	60	34	120	7212
4+5 BE	500	486	477	472	470	470	469	468	468	467	66	38	112	7366

Tabela 4.38 - Ensaio de viga Benkelman sobre o revestimento da pista experimental (CEASA) - Maio/2006.

ESTACA	LEITURAS ($\times 10^2$ mm)										D_0	D_{25}	R	RxD ₀
	L ₀	L ₂₅	L ₅₀	L ₇₅	L ₁₀₀	L ₁₂₅	L ₁₅₀	L ₁₇₅	L ₂₀₀	L ₁₀₀₀				
2+15 BE	500	486	479	476	473	471	468	467	467	467	66	38	112	7366
3+5 BE	500	486	481	477	474	470	469	469	467	467	66	38	112	7366
3+15 BE	500	487	480	477	473	471	471	469	468	466	68	42	120	8173
4+5 BE	500	488	479	477	475	473	472	469	467	465	70	46	130	9115
4+15 BE	500	484	476	472	469	468	466	465	464	463	74	42	98	7227
3 BD	500	494	487	485	484	483	483	482	482	480	40	28	260	10417
3+10 BD	500	490	482	479	478	476	475	474	473	472	56	36	156	8750
4 BD	500	492	483	479	477	477	476	475	475	475	50	34	195	9766
4+10 BD	500	494	485	481	478	476	476	476	475	473	54	42	260	14063

A Tabela 4.39 apresenta o resumo de todos os ensaios realizados sobre o revestimento asfáltico da pista experimental desde a construção (cinco baterias) e a Figura 4.41 as bacias de deslocamento médias referentes aos mesmos. A Figura 4.42 apresenta valores médios mensais típicos de precipitação e temperatura no município de Goiânia, de acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2007). Observando-se a Tabela 4.39 e as Figuras 4.41 e 4.42 pode-se inferir certa compatibilidade entre os resultados obtidos. Os menores deslocamentos obtidos no mês de setembro podem ser explicados por ser este mês um dos meses mais secos do ano, o que induziria a perda de umidade pela estrutura de pavimento e conseqüentemente o seu melhor desempenho. Outro fator, já mencionado, que pode estar relacionado às baixas deflexões obtidas em Setembro de 2004, em relação aos períodos subseqüentes, é o fato de que nessa época o pavimento ainda não havia recebido nenhuma solicitação de tráfego. Os meses de maio e novembro corresponderiam a situações mais ou menos semelhantes, pois enquanto o primeiro corresponde a uma fase situada logo após o início do período chuvoso (geralmente em outubro), o segundo corresponde ao início do período de seca (abril praticamente já não chove). Fugiria a essa explicação o comportamento do pavimento obtido no mês de janeiro, que corresponde ao pico do período chuvoso. No entanto, os controles de umidade efetuados à época mostram teores de umidade das camadas de base, sub-base e subleito, para esse período, ligeiramente inferiores aos registrados para os meses de maio/05, novembro/05 e maio/06 (Tabela 4.40).

Tabela 4.39 - Resumo dos ensaios de viga Benkelman sobre o revestimento asfáltico da pista experimental (CEASA) - valores médios.

Data	D ₀ (x10 ⁻² mm)		D ₂₅ (x10 ⁻² mm)		R (m)	R.D ₀ m x 10 ⁻² mm
	Média	DESVPAD	Média	DESVPAD		
jan/04	48	9	29	10	171	8134
set/04	41	11	30	10	291	11846
mai/05	64	14	33	9	101	6464
nov/05	62	16	33	10	109	6728
mai/06	60	11	38	5	142	8586

As umidades da Tabela 4.40 correspondem às médias das camadas, determinadas com base nos furos realizados nos ensaios pressiométricos no mesmo período. Observando a tabela verifica-se que os desvios padrões das umidades médias, tanto do subleito (0,9) quanto da base e sub-base (1,6) apresentaram valores relativamente pequenos.

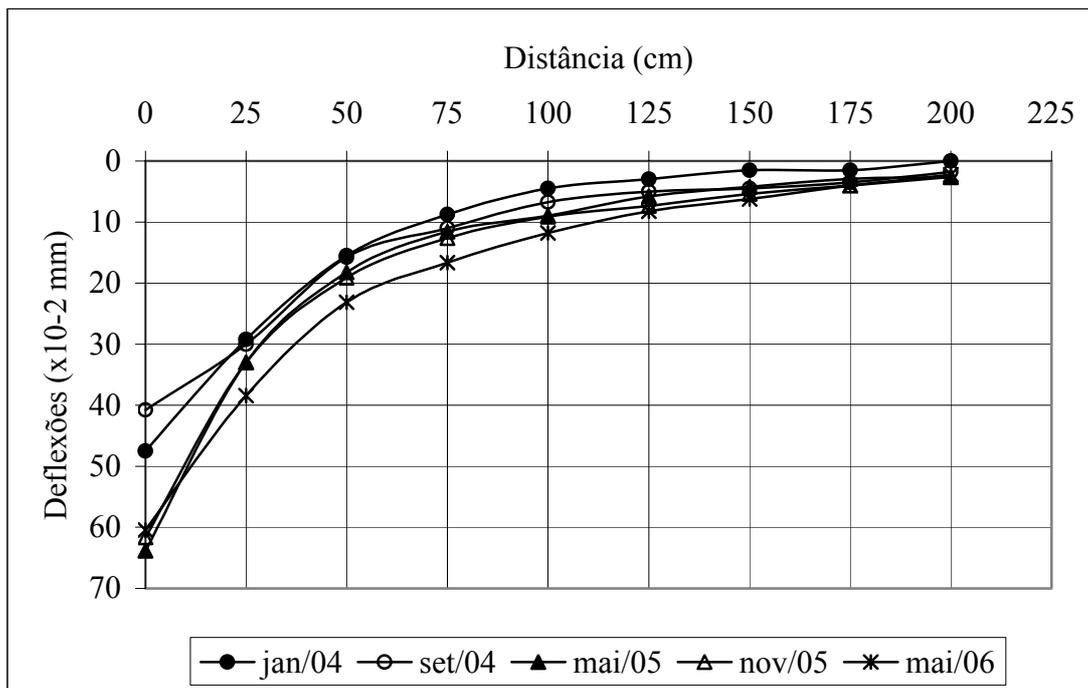


Figura 4.41 - Bacias de deflexões médias dos ensaios realizados sobre o revestimento asfáltico da pista experimental (CEASA), em todos os períodos ensaiados.

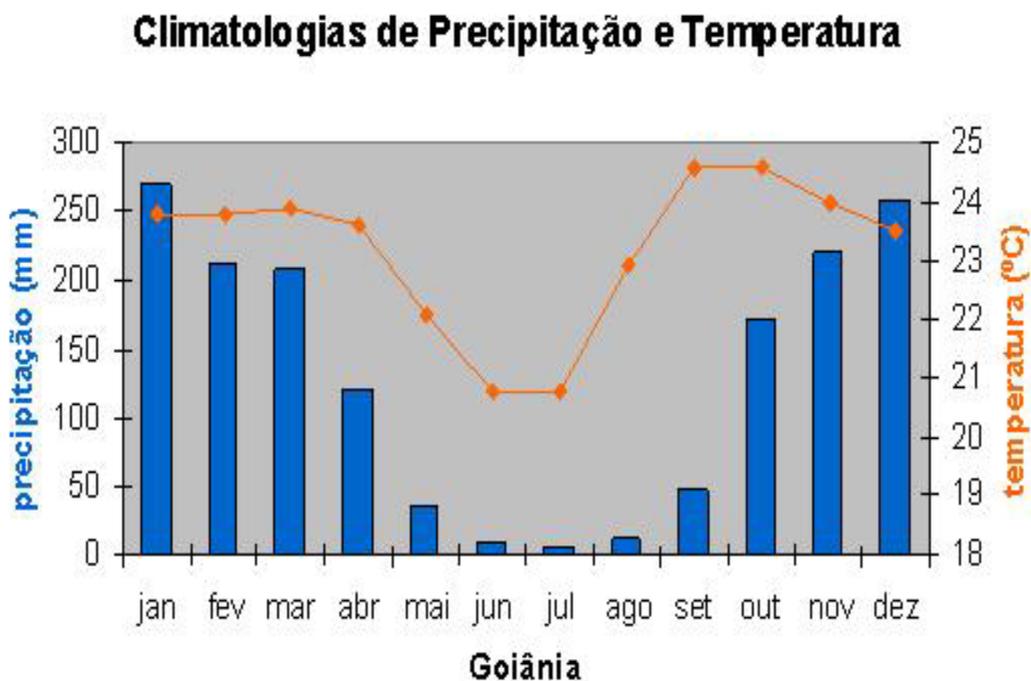


Figura 4.42 – Valores médios mensais típicos de precipitação e temperatura no município de Goiânia (INMET, 2007).

Tabela 4.40 – Umidades médias das camadas da pista experimental (CEASA), nos ensaios de viga Benkelman.

Período	Teores de Umidade (%)	
	Subleito	Base e Sub-base
Janeiro/2004	17,0	9,2
Setembro/2004	-	-
Maior/2005	19,0	12,8
Novembro/2005	18,7	12,0
Maior/2006	18,0	12,2
Média	18,2	11,6
DESVPAD	0,9	1,6

A Tabela 4.41 apresenta os valores das deflexões características determinadas para as cinco etapas de ensaios de medidas de deflexões com a viga Benkelman realizadas sobre o revestimento asfáltico da pista experimental. O cálculo das deflexões características foi feito utilizando a Equação 4.4 conforme as recomendações dos procedimentos PRO 011/79 (DNER, 1979) e PRO 269/94 (DNER, 1994). Na Tabela 4.41 também estão apresentados os valores de deflexão máxima admissível, determinados pelas Equações 4.5 e 4.6, de acordo com os modelos propostos nos procedimentos do DNER citados acima. Para o cálculo das deflexões admissíveis foi utilizado um número N igual a 10^6 , que corresponde a um tráfego leve, compatível com o da pista experimental. Os resultados da Tabela 4.41 mostram que as deflexões características da pista experimental, em todos os períodos ensaiados, apresentaram valores menores que os das deflexões máximas admissíveis.

$$D_c = D + S \quad (4.4)$$

Onde:

D_c = deflexão característica ($\times 10^{-2}$ mm);

D = média aritmética das deflexões máximas ($\times 10^{-2}$ mm);

S = desvio padrão.

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \times \log N \quad (4.5)$$

$$\log D_{adm} = 3,148 - 0,188 \times \log N \quad (4.6)$$

Onde:

D_{adm} = deflexão máxima admissível ($\times 10^{-2}$ mm);

N = Número de solicitações do eixo padrão de 82 kN.

Tabela 4.41 – Deflexões características e admissíveis da pista experimental

PERÍODO	Data	Dc ($\times 10^{-2}$ mm)	D_{adm} PRO 011	D_{adm} PRO 269
Construção	jan/04	57	90	105
set/04	set/04	52	90	105
6 Meses	mai/05	78	90	105
12 Meses	set/05	78	90	105
18 Meses	nov/05	71	90	105

A Figura 4.43 apresenta a relação entre os teores de umidade do subleito e algumas das deflexões máximas nos pontos de ensaio (D_0) nos cinco períodos ensaiados. Observando essa figura verifica-se que há uma tendência de aumento dos valores de D_0 com o aumento do teor de umidade. Isso seria esperado, entretanto, dá ênfase à importância da determinação do teor de umidade quando da realização do ensaio, pois em determinadas ocasiões as variações das deflexões podem estar mais associadas à variação do teor de umidade do subleito e demais camadas, do que com a variação do comportamento estrutural do pavimento propriamente dito.

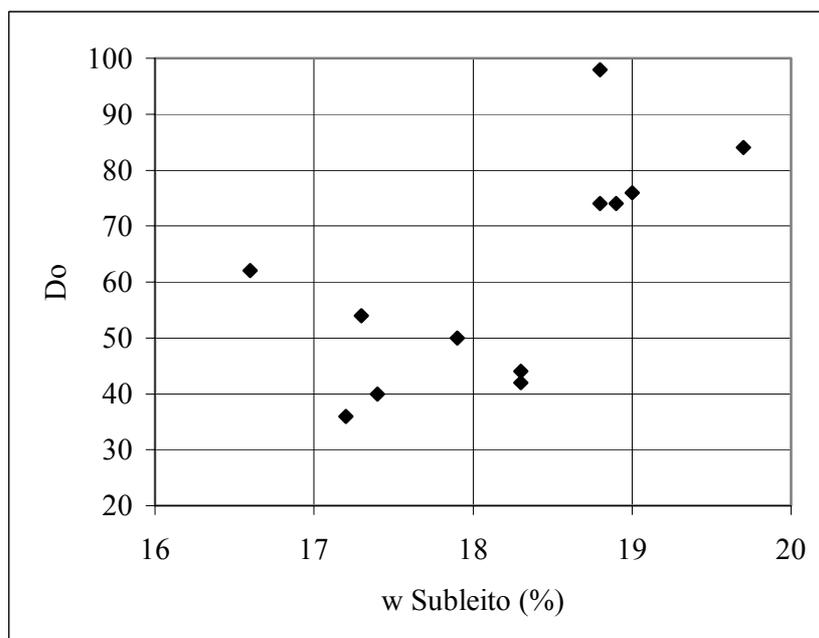


Figura 4.43 – Relação entre os teores de umidade do subleito e as deflexões máximas (D_0) medidas sobre o revestimento asfáltico, da pista experimental, nos períodos ensaiados.

4.3.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O PENETRÔMETRO DINÂMICO DE CONE (DCP)

A Tabela 4.42 apresenta os índices de penetração (DN) obtidos de todos os ensaios realizados com o penetrômetro dinâmico de cone (DCP) na pista experimental. Na fase de construção foram executados seis ensaios, sendo três sobre a camada de subleito e três sobre a camada de base de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil. Durante o monitoramento da pista foram realizadas três novas baterias de ensaios, com três ensaios de DCP em cada uma. Após a execução do revestimento asfáltico, para executar os ensaios sobre a base foram feitos pequenos cortes no revestimento com auxílio de marreta e talhadeira. Observando a Tabela 4.42 verifica-se que a partir dos ensaios de DCP realizados sobre o subleito foram determinados três valores de DN e para as curvas dos ensaios realizados sobre a base, quatro valores. Como na realização dos ensaios de DCP não foi feito um controle sistemático de umidade para todos os ensaios, as umidades da Tabela 4.42 são em boa parte retiradas dos ensaios pressiométricos realizados nos mesmos períodos. Verificou-se que as umidades das camadas variaram em torno de 3% para o subleito (16,6 a 19,7%), cuja umidade ótima de compactação era de 20% e em torno de 2%, para a base e sub-base (8,7 a 13,5%), cujas umidades ótimas eram respectivamente iguais a 14,5% (base) e 11,8% (sub-base).

Os ensaios de DCP no subleito foram executados após alguns dias da compactação da camada. Observando a Figura 4.44, verifica-se que a camada sofreu um forte ressecamento e apresentou elevado grau de trincamento. A Figura 4.45 apresenta as curvas DCP dos ensaios realizados sobre o subleito. Na curva DCP, as declividades das retas representam os índices de penetração (DN) em mm/golpe, os quais são obtidos por meio da razão entre a profundidade e o número de golpes necessários para penetrar a haste do DCP até a respectiva profundidade. Para pequenos valores de DN, ou seja, quanto menor a declividade do trecho reto da curva DCP, maior será a resistência da camada. De uma forma geral, as curvas DCP dos ensaios realizados sobre o subleito expressaram a existência de três subcamadas com índices de penetração diferentes, como pode ser visto na Figura 4.45, em função do efeito superficial da compactação, do ressecamento e da variação do teor de umidade no momento de realização do ensaio.

Tabela 4.42 – Índices de penetração do DCP (DN) de ensaios realizados na pista experimental (CEASA), em todos os períodos ensaiados.

Período	Data	Camada					w (%)	
		Base e Sub-base		Subleito			B e SB	SL
		Índice de Penetração DN (mm/golpe)						
		DN ₁	DN ₂	DN ₁	DN ₂	DN ₃		
Construção - N0v/2003								
Subleito - Est. 3 EX	13/11/2003	-	-	2,2	7,0	21,1	-	17,2
Subleito - Est. 4 BD	12/11/2003	-	-	3,3	8,8	23,0	-	16,6
Subleito - Est. 4+15 BE	12/11/2003	-	-	2,9	8,9	23,4	-	17,3
Média do Subleito				2,8	8,2	22,5	-	17,0
Desvio Padrão				0,6	1,1	1,2	-	0,4
Construção - Dez/2003								
Base - Est. 3 EX	19/12/2003	3,7	1,1	4,3	7,8	-	9,8	17,2
Base - Est. 4 BD	19/12/2003	3,5	1,9	5,6	13,1	-	9,2	16,6
Base - Est. 4+15 BE	19/12/2003	2,4	2,4	6,8	25,6	-	8,7	17,3
Média		3,2	1,8	5,6	15,5		9,2	17,0
Desvio Padrão		0,7	0,7	1,3	9,1		0,6	0,4
Maio/2005 -								
06 Meses de Operação								
Base - Est. 3 EX	4/5/2005	1,7	1,2	3,9	7,5	-	13,5	18,3
Base - Est. 4 BD	4/5/2005	1,7	1,7	4,8	19,3	-	12,2	19,0
Base - Est. 4+15 BE	4/5/2005	1,9	1,9	5,4	33,9	-	12,8	19,7
Média		1,8	1,6	4,7	20,2		12,8	19,0
Desvio Padrão		0,1	0,4	0,8	13,2		0,7	0,7
Novembro/2005 -								
12 Meses de Operação								
Base - Est. 3 EX	2/12/2005	1,7	0,8	4,8	4,8	-	11,1	18,3
Base - Est. 4 BD	5/12/2005	2,3	1,5	5,1	12,2	-	13,1	18,9
Base - Est. 4+15 BE	5/12/2005	3,2	3,2	6,7	34,0	-	11,8	18,8
Média		2,4	1,8	5,5	17,0		12,0	18,7
Desvio Padrão		0,8	1,2	1,0	15,2		1,0	0,3
Maio/2006 -								
18 Meses de Operação								
Base - Est. 3 EX	5/5/2006	2,0	0,9	6,8	6,8	-	11,2	17,4
Base - Est. 4 BD	5/5/2006	2,5	1,4	5,1	10,9	-	12,6	17,9
Base - Est. 4+15 BE	5/5/2006	2,9	2,9	6,8	34,6	-	12,9	18,8
Média		2,5	1,7	6,2	17,4		12,2	18,0
Desvio Padrão		0,5	1,0	1,0	15,0		0,9	0,7
Média Geral - B e SB		2,5	1,7	5,5	17,5		11,6	18,0
Desv. Pad. Geral - B + SB		0,7	0,8	1,0	11,5		1,6	1,0



Figura 4.44 - Trincamento do subleito da pista experimental após a compactação – Novembro/2003.

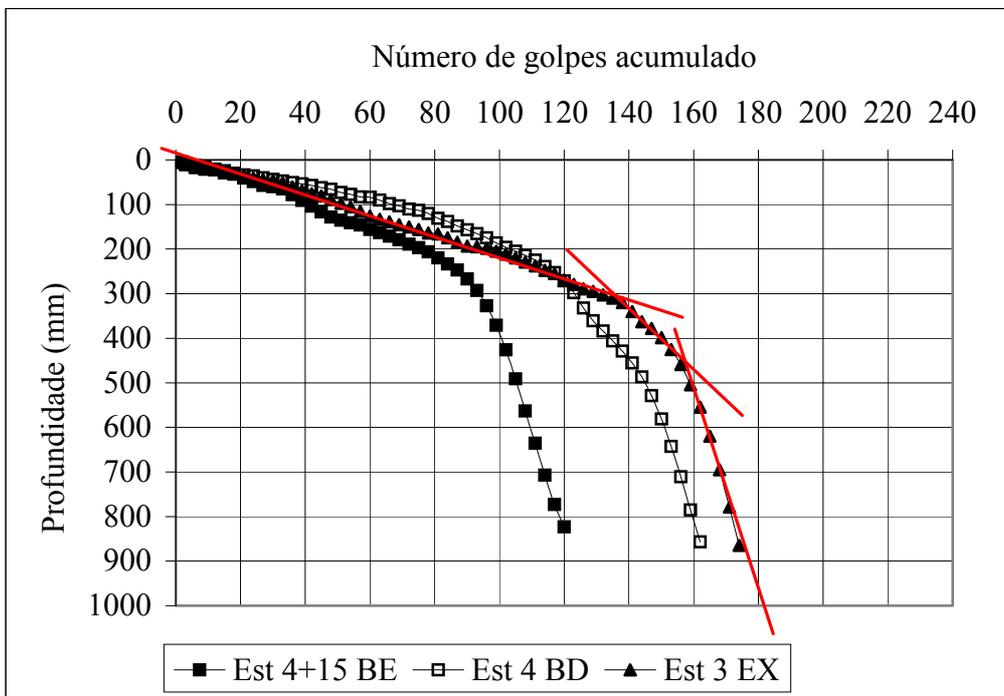


Figura 4.45 - Curvas DCP do subleito da pista experimental – Novembro/2003.

As Figuras 4.46 a 4.48 apresentam as curvas DCP dos ensaios realizados sobre a camada de base de agregados reciclados nas estacas 3 EX (eixo), 4 BD (bordo direito) e 4+15 BE (bordo esquerdo), nos quatro períodos ensaiados. Observando as figuras verifica-se que para todos os períodos ensaiados o ponto localizado no eixo apresentou maior resistência à penetração do DCP que o ponto situado no bordo direito, que por sua vez apresentou maior resistência à penetração que o ponto situado no bordo esquerdo. De uma forma geral, as curvas DCP dos ensaios realizados após a conclusão da base expressaram a existência de quatro camadas com índices de penetração diferentes: base e sub-base, variando de 20 a 30 cm de profundidade e subleito, dividido em duas subcamadas. Algumas das curvas apresentaram diferenciação entre as camadas de base e sub-base (inflexão) e uma maior rigidez da parte superior do subleito. Observando as figuras verifica-se que o penetrômetro dinâmico de cone apresenta-se como um bom indicador da espessura das camadas do pavimento, em termos de variação de resistência.

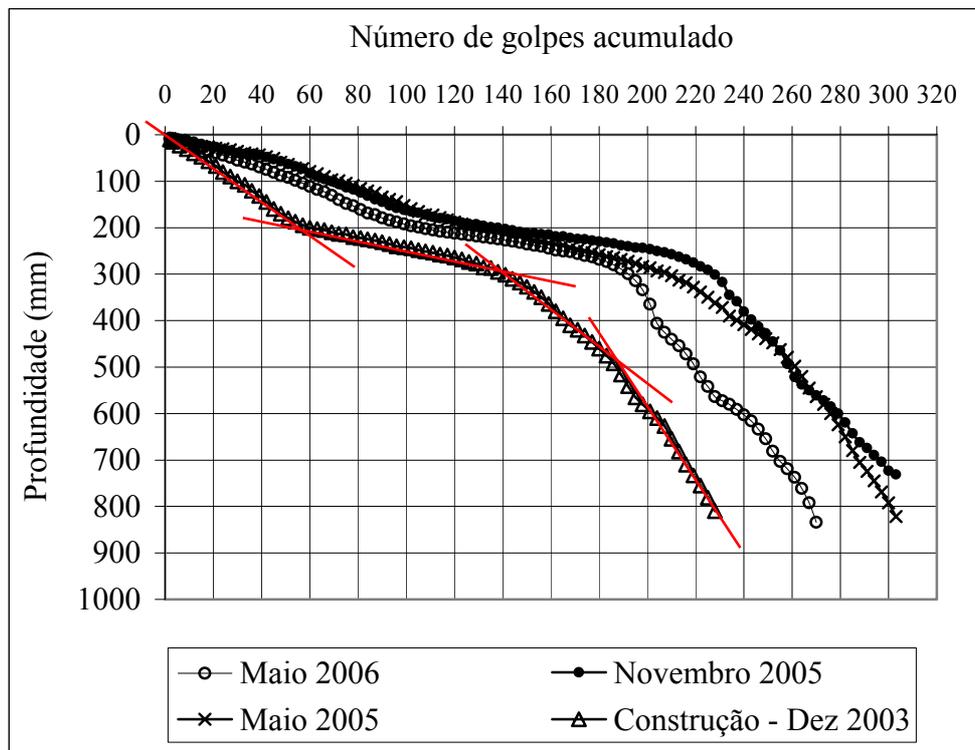


Figura 4.46 - Curvas DCP da camada de base da pista experimental – estaca 3 EX.

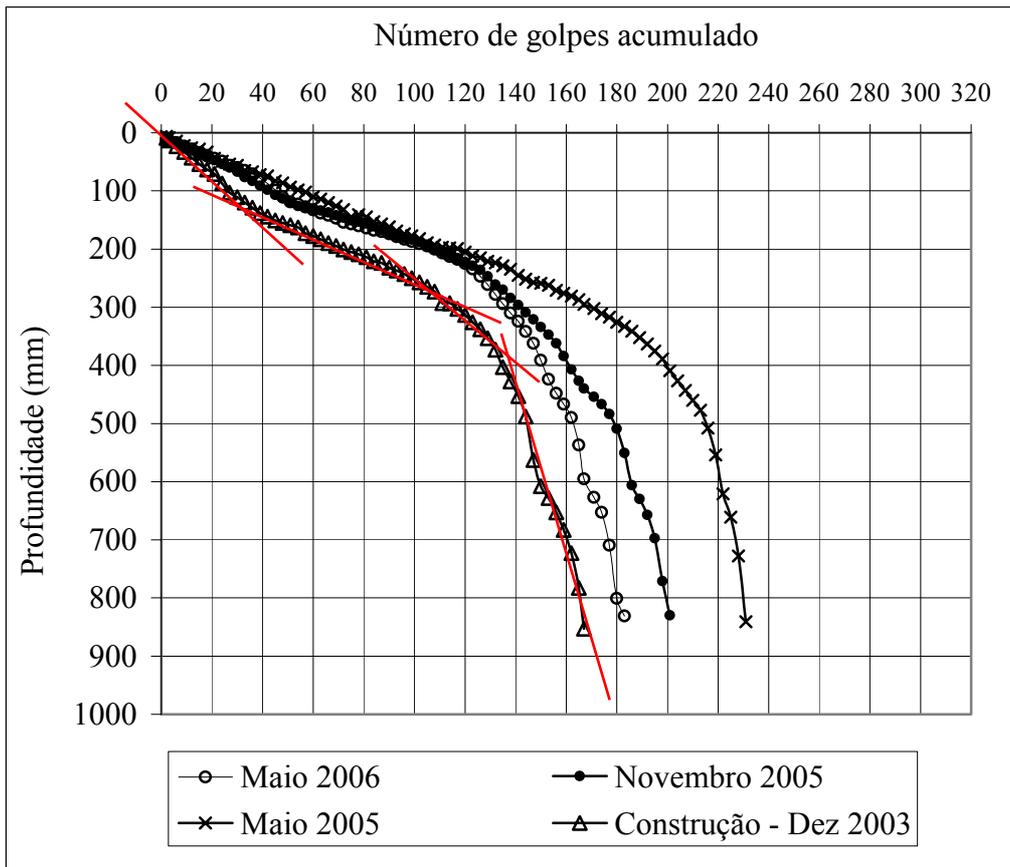


Figura 4.47 - Curvas DCP da camada de base da pista experimental – estaca 4 BD.

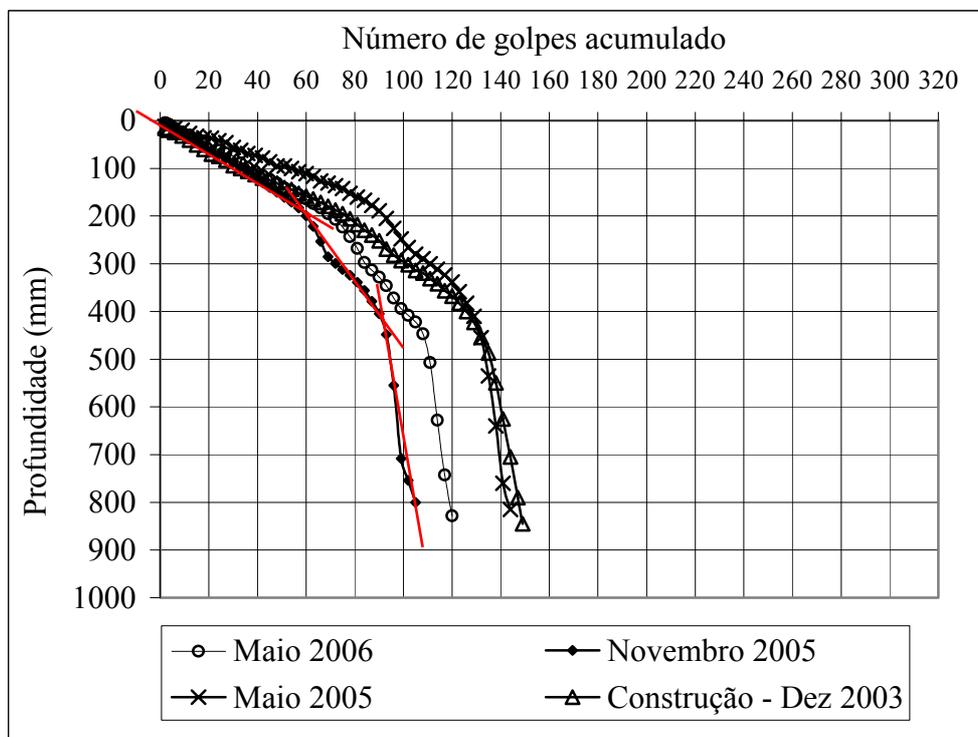


Figura 4.48 - Curvas DCP da camada de base da pista experimental – estaca 4+ 15 BE.

Os modelos representados pelas Equações 4.7 a 4.13 apresentam sete proposições, encontradas na literatura, de correlações entre os valores de índice de penetração (DN) do DCP e o ISC, para aterros e subleitos (Cardoso & Trichês, 1998). Os modelos representados pelas Equações 4.14 e 4.15 apresentam duas proposições de Kryckyj & Trichês (2000), obtidas em agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil.

- kleyn, 1982 – África do Sul: $\log ISC = 2,60 - 1,26 \times (\log DN)$ (4.7)

- Harison, 1987 – Indonésia: $\log ISC = 2,81 - 1,32 \times (\log DN)$ (4.8)

- Oliveira & Vertamatti, 1997 – Brasil – São Paulo:

$$\log ISC = 2,490 - 1,057 \times (\log DN) \quad (4.9)$$

- Angelone et. al., 1991 – Argentina: $ISC = 450 \times (DN)^{-1,05}$ (4.10)

- Heyn, 1986 – Brasil – Paraná: $ISC = 443,45 \times (DN)^{-1,30}$ (4.11)

- Cardoso & Trichês, 1998 – Brasil – Santa Catarina (DN x ISC com e sem imersão):

$$ISC = 512,64 \times (DN)^{-1,25} \quad (4.12)$$

- Cardoso & Trichês, 1998 - Brasil – Santa Catarina (DN sem imersão x ISC com imersão):

$$ISC = 151,58 \times (DN)^{-1,03} \quad (4.13)$$

- Kryckyj & Trichês, 2000 - Brasil – Santa Catarina (ISC sem imersão – em agregados reciclados):

$$ISC = 126,35 \times (DN)^{-0,6354} \quad (4.14)$$

- Kryckyj & Trichês, 2000 - Brasil – Santa Catarina (ISC com imersão – em agregados reciclados):

$$ISC = 121,02 \times (DN)^{-0,659} \quad (4.15)$$

Onde:

ISC = índice de suporte Califórnia;

DN = índice de penetração do penetrômetro dinâmico de cone (DCP).

Com o intuito de verificar a possível adequação dos modelos representados pelas Equações 4.7 a 4.15, as Tabelas 4.43 e 4.44 apresentam os valores de ISC obtidos utilizando essas equações e os ensaios de DCP realizados na pista experimental. Observando a Tabela 4.43 e a Figura 4.45 verifica-se que no subleito, para profundidades maiores que 40 cm, que

algumas das correlações apresentaram valores de ISC semelhantes ao de laboratório (13%). Verifica-se também, em função dos valores de ISC obtidos, que a parte superior do subleito apresentou uma resistência elevada em função do ressecamento sofrido pela camada após a compactação. Observando a Tabela 4.44 e as Figuras 4.46 a 4.48, verifica-se que houve uma boa correspondência entre os valores de ISC determinados pelas Equações 4.14 e 4.15 para as camadas de base e sub-base e os valores de laboratório (83% para a base e 90% para a sub-base), especialmente as determinadas pelo modelo da Equação 4.15.

Tabela 4.43 - Correlações entre o índice de penetração (DN) médio e o ISC – ensaios realizados sobre o subleito da pista experimental (CEASA) na fase de construção – Novembro/2003.

Fase	DN	w (%)	ISC (4.7)	ISC (4.8)	ISC (4.9)	ISC (4.10)	ISC (4.11)	ISC (4.12)	ISC (4.13)
Construção	2,80	17,0	109	153	166	116	104	142	52
Construção	8,20	17,0	28	49	40	29	33	37	17
Construção	22,50	17,0	8	17	11	8	12	10	6

Tabela 4.44 – Valores de ISC obtidos das correlações com o índice de penetração médio (DN) – ensaios realizados sobre a base da pista experimental (CEASA).

Camada	DN	w(%)	ISC(4.14)	ISC(4.15)
Base	2,50	11,6	55	71
Sub-base	1,70	11,6	77	90
Subleito 1	5,50	18,0	28	43
Subleito 2	17,50	18,0	10	20

4.3.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PROVA DE CARGA SOBRE PLACA

A Tabela 4.45 apresenta o resultado das provas de carga realizadas sobre as diversas camadas do pavimento durante a fase de construção da pista experimental, para a carga de 28 kN (570,42 kPa), que corresponde à carga aplicada pela roda do eixo padrão e para a carga de 40 kN (814,88 kPa), que corresponde à carga máxima aplicada nos ensaios. Na fase de construção foram executadas 12 provas de carga sobre placa, sendo três sobre a camada de subleito, três sobre a camada de sub-base de agregado reciclado, três sobre a camada de base de agregado reciclado e três sobre o revestimento asfáltico. Na Tabela 4.45 também são apresentadas as umidades médias dos pontos ensaiados. Os deslocamentos das camadas obtidos pelas provas de carga apresentaram valores bem próximos, embora ao contrário do que poderia se esperar, o subleito apresentou deslocamentos ligeiramente menores que as demais camadas. Esse fato pode ter ocorrido em função do enrijecimento da superfície do

subleito devido ao ressecamento e também devido à baixa coesão das camadas de sub-base e base. A Figura 4.49 apresenta a relação entre o teor de umidade e os deslocamentos medidos nas provas de carga realizadas sobre as camadas de subleito, sub-base e base. Pela figura verifica-se a tendência esperada de aumento dos deslocamentos com o aumento do teor de umidade.

Após o início de operação da pista experimental, ocorrido em Novembro de 2004, ao lado dos pontos ensaiados durante a fase de construção foram realizadas novas provas de carga sobre o revestimento asfáltico. Em um dos pontos ensaiados, além da placa de 25 cm de diâmetro, também foi realizado um ensaio com uma placa menor, de 15 cm de diâmetro, para avaliar a variação dos deslocamentos da estrutura do pavimento.

Tabela 4.45 - Resumo das prova de carga - subleito, sub-base, base e revestimento – fase de construção da pista experimental – Novembro/2003 a Janeiro/2004.

Camada	Estaca	Deslocamento (mm) Carga = 28 kN	Deslocamento (mm) Carga = 40 kN	Teor de umidade (%)
Subleito	3 EX	1,08	1,58	5,1
Subleito	4 BD	1,49	2,05	9,4
Subleito	4+15 BE	0,94	1,36	11,9
Subleito	Média	1,17	1,66	8,8
Sub-base	3 EX	0,79	1,08	4,7
Sub-base	4 BD	1,33	2,00	6,6
Sub-base	4+15 BE	1,80	2,62	8,5
Sub-base	Média	1,31	1,90	6,6
Base	3 EX	0,80	1,10	9,5
Base	4 BD	2,04	2,57	10,1
Base	4+15 BE	1,27	1,72	9,3
Base	Média	1,37	1,80	9,6
Revestimento	3 EX	0,92	1,17	-
Revestimento	4 BD	1,38	2,00	-
Revestimento	4+15 BE	1,46	2,07	-
Revestimento	Média	1,25	1,75	-

As Tabelas 4.46 e 4.47 apresentam os deslocamentos obtidos nas provas de carga realizadas sobre o revestimento asfáltico para as cargas de 28 kN (570,42 kPa) e 40 kN (814,88 kPa). As tabelas expressam os resultados dos ensaios com a placa de 25 cm de diâmetro, em todos os períodos ensaiados, inclusive na fase de construção. A Figura 4.50 apresenta as curvas médias de tensão *versus* deslocamento dos ensaios representados nas Tabelas 4.46 e 4.47. Observando as tabelas e a figura, verifica-se que os deslocamentos obtidos em janeiro de 2004, logo após a construção do pavimento foram maiores que nos demais períodos ensaiados, após o pavimento ter sofrido a ação do tráfego. Os valores mantiveram-se aproximadamente constantes para os demais períodos ensaiados, para as

solicitações de seis, doze e dezoito meses de tráfego.

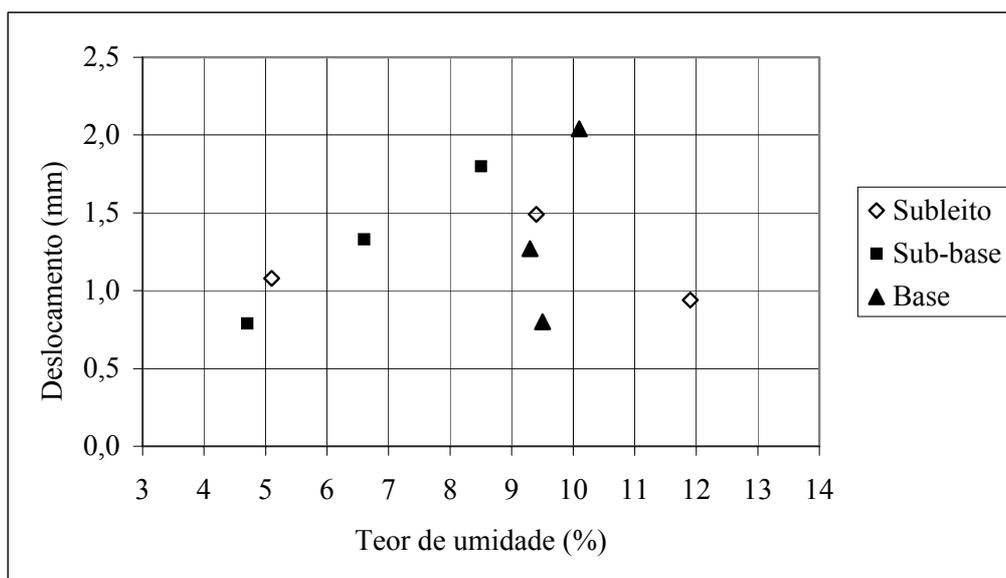


Figura 4.49 - Relação entre o teor de umidade e os deslocamentos das provas de carga - fase de construção da pista experimental - Novembro a Dezembro/2003.

Tabela 4.46 - Resumo dos deslocamentos medidos nas provas de carga realizadas sobre o revestimento asfáltico da pista experimental (CEASA) em quatro períodos – carga de 28 kN (570,42 kPa).

Estaca	Deslocamento (mm)			
	Carga 28 kN (570,42 kPa)			
	Janeiro/2004	Mai/2005	Novembro/2005	Mai/2006
3 EX	0,92	0,60	0,50	0,82
4 BD	1,38	0,93	0,87	0,79
4+15 BE	1,46	0,71	1,00	0,92
MÉDIA	1,25	0,75	0,79	0,84
DESV. PADRÃO	0,29	0,17	0,26	0,07

Tabela 4.47 – Resumo dos deslocamentos medidos nas provas de carga realizadas sobre o revestimento asfáltico da pista experimental (CEASA) em quatro períodos – carga de 40 kN (814,88 kPa).

Estaca	Deslocamento (mm)			
	Carga 40 kN (814,88 kPa)			
	Janeiro/2004	Mai/2005	Novembro/2005	Mai/2006
3 EX	1,17	0,81	0,64	1,03
4 BD	2,00	1,21	1,10	1,11
4+15 BE	2,07	1,15	1,33	1,19
MÉDIA	1,75	1,06	1,02	1,11
DESV. PADRÃO	0,50	0,22	0,35	0,08

A Figura 4.51 apresenta as curvas das duas provas de carga realizadas na Estaca 4 BD com as placas de diâmetro de 25 e 15 cm. Fazendo-se uma normalização dos deslocamentos, ou seja, dividindo-se os mesmos pelos diâmetros das placas utilizadas, verifica-se que, como previsto pela teoria da elasticidade, os deslocamentos são proporcionais ao diâmetro da placa, para um mesmo nível de tensão atuante (Figura 4.52).

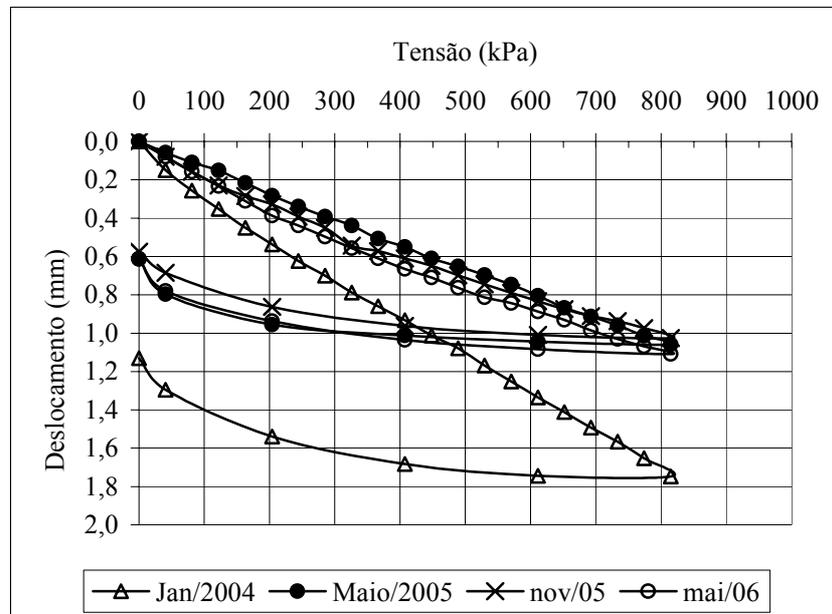


Figura 4.50 - Curvas médias das provas de carga realizadas sobre o revestimento asfáltico da pista experimental (CEASA) nos quatro períodos ensaiados.

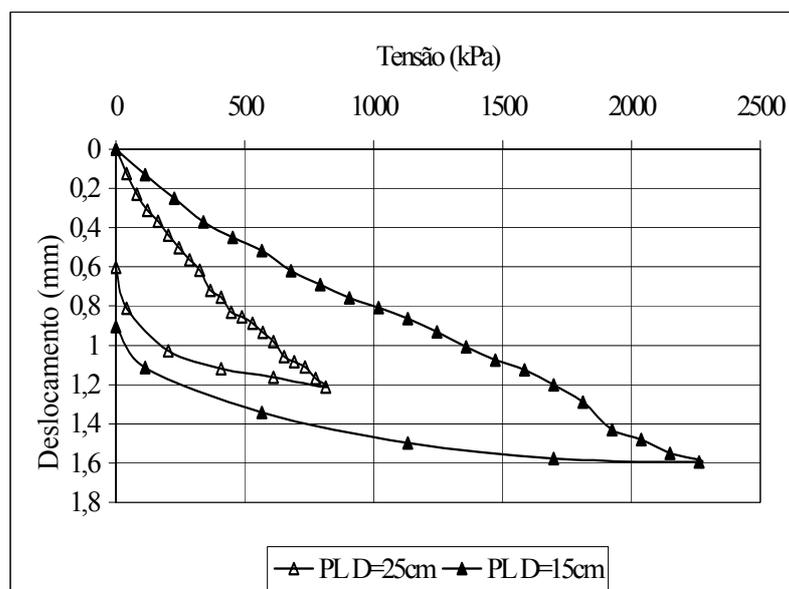


Figura 4.51 - Provas de carga sobre o revestimento asfáltico da pista experimental (CEASA) com dois diâmetros de placa diferentes – Maio 2005.

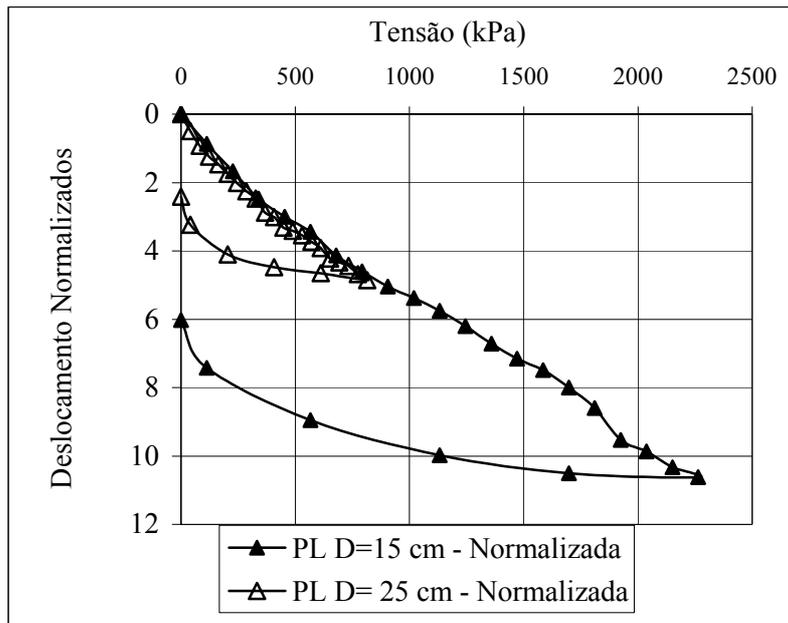


Figura 4.52 - Provas de carga sobre o revestimento asfáltico da pista experimental (CEASA) com dois diâmetros de placa diferentes – deslocamentos normalizados - Maio 2005.

A Figura 4.53 apresenta a relação entre o índice de penetração (DN) da parte superior do subleito e os deslocamentos máximos das provas de carga realizadas sobre o revestimento asfáltico, para os quatro períodos ensaiados. Pela figura verifica-se a tendência de aumento dos deslocamentos com o aumento do DN, uma vez que a resistência da camada é inversamente proporcional ao valor do índice.

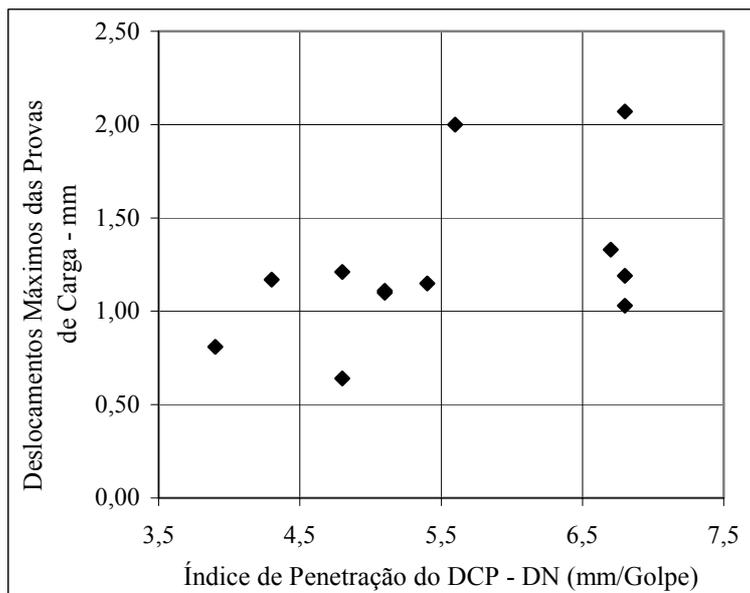


Figura 4.53 - Relação entre os deslocamentos das provas de carga e os índices de penetração (DN) do DCP - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em quatro etapas.

4.3.7 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O PRESSIÔMETRO PENCEL

A Figura 4.54 apresenta duas curvas típicas obtidas nos ensaios com o pressiômetro Pencil, uma do subleito e a outra das camadas de base e sub-base da pista experimental. Como pode ser verificado na figura, nos ensaios foram realizados um ou dois ciclos de descarregamento e recarregamento. Os parâmetros obtidos dos ensaios foram o módulo pressiométrico obtido no trecho de carregamento (E_p), os módulos pressiométricos obtidos nos trechos de recarregamento intermediário e final (E_{r1} e E_{r2}) e a pressão limite (P_L), que corresponde teoricamente àquela necessária para dobrar o volume inicial da sonda (V_0), que corresponde à aplicação de um volume de 90 cm^3 e um diâmetro inflado de 45 mm . O coeficiente de Poisson adotado foi igual a $0,33$. Como a capacidade do equipamento utilizado é limitada a 2500 kPa , nos ensaios onde não foi possível chegar ao volume injetado de 90 cm^3 , a pressão limite foi considerada igual à capacidade do aparelho, ou seja, 2500 kPa , porém esses valores não foram incluídos nas correlações.

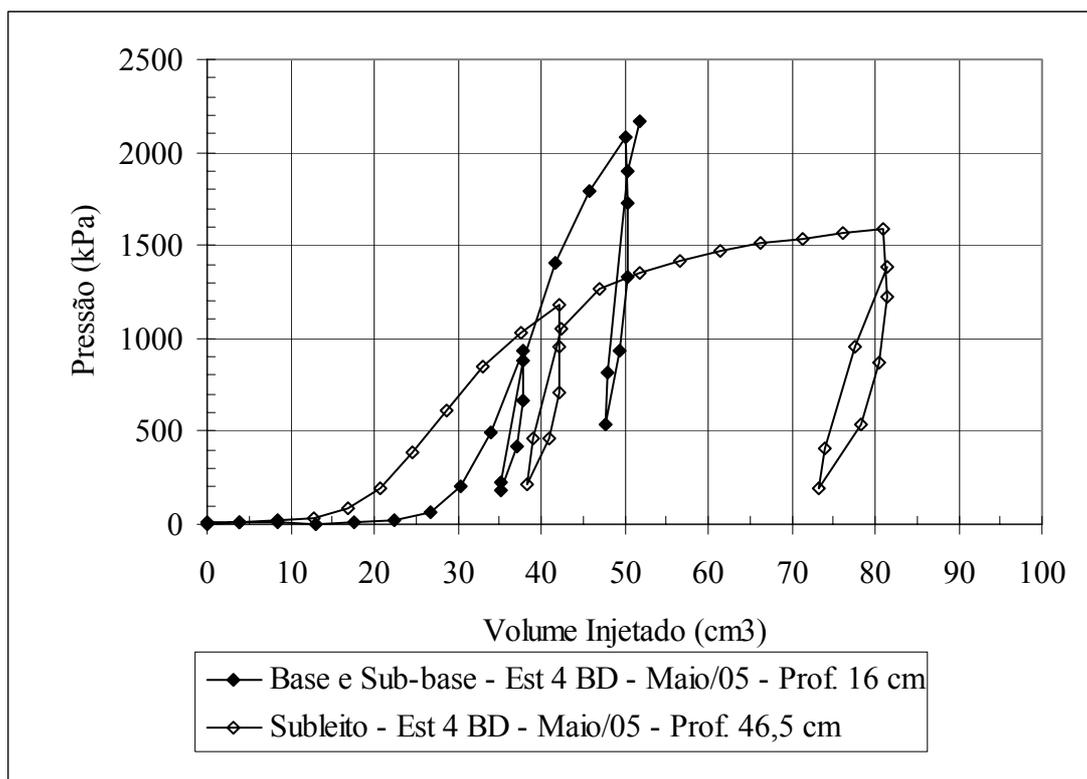


Figura 4.54 – Curvas típicas corrigidas do ensaio com o pressiômetro Pencil na pista experimental (CEASA), em Maio/2005.

As Tabelas 4.48 e 4.49 apresentam os resultados dos ensaios realizados em furos verticais (módulos horizontais), no subleito e nas camadas de base e sub-base de agregados reciclados, respectivamente.

Tabela 4.48 – Módulos pressiométricos horizontais, obtidos em furos verticais, do subleito da pista experimental (CEASA) nos quatro períodos ensaiados.

ESTACA	PERÍODO	UMIDADE (%)	E_{PH} (MPa)	E_{rH1} (MPa)	E_{rH2} (MPa)	(P_L) (kPa)
Est 3 EX - Prof. 15 cm	Construção	17,2	35	127	113	1740
Est 4 BD - Prof. 15 cm	Construção	16,6	18	96	63	1200
Est 4+15 BE - Prof. 15 cm	Construção	17,3	28	80	91	1380
Média		17,0	27	101	89	1440
Desvio Padrão		0,4	9	24	25	275
Est 3 EX - Prof. 46,5 cm	mai/05	18,3	61	340	386	2500
Est 4 BD - Prof. 46,5 cm	mai/05	19,0	31	106	126	1720
Est 4+15 BE - Prof. 46,5 cm	mai/05	19,7	17	61	75	1450
Média		19,0	36	169	196	1890
Desvio Padrão		0,7	22	150	167	545
Est 3 EX - Prof. 46,5 cm	nov/05	18,3	57	303	284	2500
Est 4 BD - Prof. 46,5 cm	nov/05	18,9	19	73	70	1300
Est 4+15 BE - Prof. 46,5 cm	nov/05	18,8	17	49	53	1220
Média		18,7	31	142	136	1673
Desvio Padrão		0,3	23	140	129	717
Est 3 EX - Prof. 46,5 cm	mai/06	17,4	31	-	120	2300
Est 4 BD - Prof. 46,5 cm	mai/06	17,9	9	-	92	1390
Est 4+15 BE - Prof. 46,5 cm	mai/06	18,8	10	-	77	1180
Média		18,0	17	-	96	1623
Desvio Padrão		0,7	12	-	22	595

Tabela 4.49 - Módulos pressiométricos horizontais, obtidos em furos verticais, da base e sub-base da pista experimental (CEASA) nos quatro períodos ensaiados.

ESTACA	PERÍODO	UMIDADE (%)	E_{PH} (MPa)	E_{rH1} (MPa)	E_{rH2} (MPa)	(P_L) (kPa)
Est 3 EX - Prof. 12 cm	Construção	9,8	67	337	359	2500
Est 4 BD - Prof. 14,5 cm	Construção	9,2	54	245	-	2500
Est 4+15 BE - Prof. 12 cm	Construção	8,7	69	451	-	2500
Média		9,2	63	344		2500
Desvio Padrão		0,6	8	103		0
Est 3 EX - Prof. 16 cm	mai/05	13,5	118	228	252	2500
Est 4 BD - Prof. 16 cm	mai/05	12,2	73	144	283	2500
Est 4+15 BE - Prof. 16 cm	mai/05	12,8	38	224	251	1880
Média		12,8	76	199	262	2293
Desvio Padrão		0,7	40	47	18	358
Est 3 EX - Prof. 16 cm	nov/05	11,1	131	-		2500
Est 4 BD - Prof. 16 cm	nov/05	13,1	107	-	699	2500
Est 4+15 BE - Prof. 16 cm	nov/05	11,8	183	-	372	2500
Média		12,0	140	-	536	2500
Desvio Padrão		1,0	39	-	231	0
Est 3 EX - Prof. 16 cm	mai/06	11,2	105	-	364	2500
Est 4 BD - Prof. 16 cm	mai/06	12,6	57	-	144	2500
Est 4+15 BE - Prof. 16 cm	mai/06	12,9	34	-	163	2500
Média		12,2	65	-	224	2500
Desvio Padrão		0,9	36	-	122	0

As profundidades apresentadas nas Tabelas 4.48 e 4.49 correspondem às distâncias entre a superfície do pavimento e a metade da altura da parte expansiva (bainha) da sonda. Na fase de construção os ensaios foram realizados com o equipamento apoiado diretamente sobre as camadas de subleito, base e revestimento e nas demais fases, sobre o revestimento asfáltico. Observando as tabelas verifica-se que os valores de umidade do subleito apresentaram variação da ordem de 3% (16,6 a 19,7%), em todos os períodos ensaiados; as camadas de base e sub-base de agregados reciclados apresentaram variação de umidade da ordem de 5% (8,7 a 13,5%). Os valores dos módulos apresentaram-se relativamente dispersos, um pouco influenciados pela variação de umidade, bem como pela provável diferença de grau de compactação. No caso do subleito, o ressecamento sofrido pela camada também pode justificar as variações ocorridas dos módulos e no caso da base e sub-base, a heterogeneidade natural do material e da mistura lançada na pista.

Os valores médios dos módulos pressiométricos horizontais de todos os ensaios realizados no subleito da pista experimental foram respectivamente $E_{PH} = 27,8$ MPa, $E_{r1H} = 137,2$ MPa e $E_{r2H} = 129,2$ MPa. Como exemplo da utilização do pressiômetro Pencil em camadas de subleito, Rezende (2003) determinou em campo valores médios de módulos pressiométricos horizontais da ordem de $E_{p1} = 24,4$ MPa, $E_{p2} = 48,9$ MPa e $E_{p3} = 43,8$ MPa. Os valores médios dos módulos pressiométricos horizontais de todos os ensaios realizados nas camadas de base e sub-base de agregados reciclados da pista experimental foram respectivamente $E_{PH} = 86,3$ MPa, $E_{r1H} = 271,5$ MPa e $E_{r2H} = 320,8$ MPa. Como exemplo de utilização do pressiômetro Pencil em camadas de base e sub-base, Rodrigues et al. (1996) realizaram ensaios em uma camada de sub-base constituída de solo A-2-6 (ISC = 20%) e encontraram valores médios de módulos pressiométricos horizontais, por furo, de $E_0 = 44,33$ MPa, $E_1 = 97,10$ MPa, $E_2 = 134,09$ MPa e $E_3 = 178,12$ MPa, sendo que os valores que levaram a essas médias também apresentaram certa variabilidade.

As Tabelas 4.50 e 4.51 apresentam os resultados dos ensaios realizados nas camadas de subleito, sub-base e base, porém em furos horizontais, para a obtenção dos módulos pressiométricos verticais.

Tabela 4.50 - Módulos pressiométricos verticais, obtidos em furos horizontais, do subleito da pista experimental (CEASA) nos quatro períodos ensaiados.

ESTACA	PERÍODO	UMIDADE (%)	E_{pv} (MPa)	E_{rv1} (MPa)	E_{rv2} (MPa)	P_L (kPa)
Est 3+1,8 - Prof. 15 cm	Construção	18,6	8	21	6	381
Est 3+ 1,8 - Prof. 45 cm	Construção	22,8	6	27	35	400
Est 4 - Prof. 15 cm	Construção	22,6	3	-	-	293
Média		21,3	6	24	21	358
Desvio Padrão		2,4	3	4	21	57
Est 3-3,2 - Prof. 40 cm	mai/05	22,2	21	79	72	1445
Est 4-2 - Prof. 40 cm	mai/05	18,0	12	42	46	830
Média		20,1	17	61	59	1138
Desvio Padrão		3,0	6	26	18	435
Est 3-3,2 - Prof. 44 cm	nov/05	19,2	13	58	49	940
Est 4-3,1 - Prof. 40 cm	nov/05	21,7	5	55	48	980
Média		20,5	9	57	49	960
Desvio Padrão		1,8	6	2	1	28
Est 3+2 - Prof. 40 cm	mai/06	17,4	23	-	100	1520
Est 4-5 - Prof. 42 cm	mai/06	17,9	13	-	32	800
Média		17,7	18		66	1160
Desvio Padrão		0,4	7		48	509

Tabela 4.51 – Módulos pressiométricos verticais, obtidos em furos horizontais, da base e sub-base da pista experimental (CEASA) nos quatro períodos ensaiados.

ESTACA	PERÍODO	UMIDADE (%)	E_{pv} (MPa)	E_{rv1} (MPa)	E_{rv2} (MPa)	P_L (kPa)
Est 3+1,8 - Prof. 10 cm	Construção	11,7	8	19	16	370
Est 3+1,8 - Prof. 20 cm	Construção	14,7	12	36	27	631
Est 4+5 - Prof. 10 cm	Construção	15,9	5	11	9	335
Est 4+5 - Prof. 20 cm	Construção	14,9	8	13	23	460
Média		14,3	8	20	19	449
Desvio Padrão		1,8	3	11	8	132
Est 3-3,2 - Prof. 10 cm	mai/05	15,5	25	64	22	900
Est 4-2 - Prof. 10 cm	mai/05	16,4	22	57	11	729
Est 4-2 - Prof. 15 cm	mai/05	13,3	15	41	26	720
Média		15,1	21	54	20	783
Desvio Padrão		1,6	5	12	8	101
Base - Prof. 16 cm	nov/05	16,2	13	40	23	640
Base - Prof. 14 cm	nov/05	17,5	13	28	14	467
Sub-base - Prof. 16 cm		17,3	14	27	18	508
Média		17,0	13	32	18	538
Desvio Padrão		0,7	1	7	5	90
Est 3+2 - Prof. 16 cm	mai/06	11,2	19	-	46	1282
Est 4-5 - Prof. 16 cm	mai/06	12,6	10	-	28	500
Média		11,9	15		37	891
Desvio Padrão		1,0	6		13	553

A Figura 4.55 ilustra os furos horizontais realizados em um dos pontos ensaiados em novembro de 2005 e pela figura é possível visualizar as camadas de base, sub-base e subleito. Em função de problemas executivos, as espessuras de projeto das camadas de base e sub-base, que eram de 15 cm cada, não foram alcançadas. Em medidas realizadas nos ensaios pressiométricos verificou-se que as duas camadas juntas apresentaram um valor médio de 24 cm. A redução da espessura durante a execução foi verificada também para o revestimento asfáltico cuja espessura de projeto era igual a 5 cm e nos furos realizados foi verificado um valor médio de 4 cm.



Figura 4.55 – Furos horizontais dos ensaios pressiométricos nas camadas de base, sub-base e subleito da pista experimental (CEASA) – estaca 4 BD – Novembro de 2005.

Na bateria de ensaios realizada em Maio de 2006, com os objetivos de determinar a variação da umidade e dos módulos pressiométricos do subleito com a profundidade e comparar os resultados obtidos com o penetrômetro dinâmico tipo Panda, os furos verticais foram estendidos até a profundidade de dois metros e realizados cinco ensaios por furo, dois

no primeiro meio metro (sendo um para a base e sub-base e outro para o subleito) e um a cada meio metro subsequente. Como nos demais períodos, os ensaios também foram realizados nas estacas 3 EX, 4 BD e 4+15 BE. As Figuras 4.56 a 4.58 apresentam as correlações obtidas entre o módulo pressiométrico horizontal de compressão, de recompressão e pressão limite com o teor de umidade, para as camadas de base, sub-base e subleito.

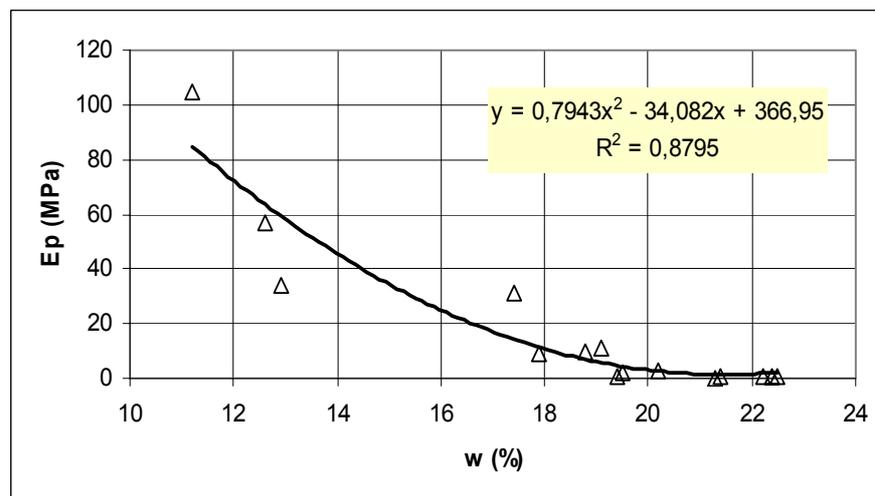


Figura 4.56 – Variação do módulo pressiométrico horizontal das camadas de base, sub-base e subleito da pista experimental (CEASA) com o teor de umidade, até dois metros de profundidade – Maio/2006.

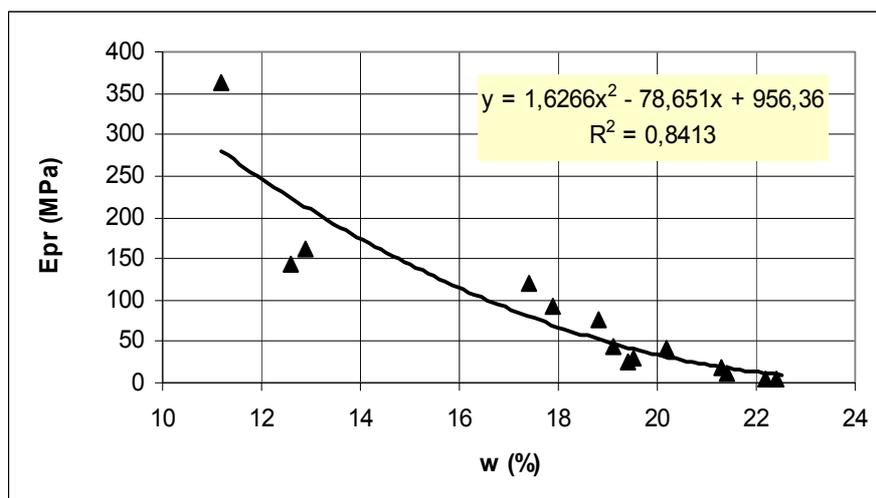


Figura 4.57 – Variação do módulo pressiométrico horizontal de recompressão das camadas de base, sub-base e subleito da pista experimental (CEASA) com o teor de umidade, até dois metros de profundidade – Maio/2006.

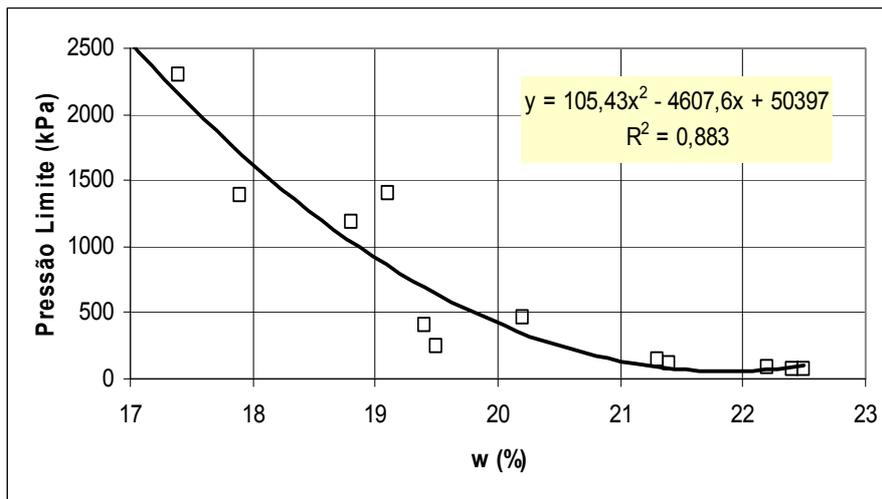


Figura 4.58 - Variação da pressão limite horizontal das camadas de base, sub-base e subleito da pista experimental (CEASA) com o teor de umidade, até dois metros de profundidade – Maio/2006.

Os resultados apresentados nas Figuras 4.56 a 4.58 expressam a redução dos valores de módulo e pressão limite com o aumento do teor de umidade. Esse conjunto de resultados mostra mais uma vez ser indispensável levar-se em conta as variações de umidade na avaliação do comportamento e desempenho das camadas que compõem a estrutura dos pavimentos, e mais que isso, como tais variações influenciam no desempenho das camadas.

4.3.8 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O PENETRÔMETRO DINÂMICO PANDA

A Figura 4.59 apresenta os perfis de resistência de ponta obtidos nas três séries de ensaios realizados com o penetrômetro Panda na pista experimental, em Maio de 2006. Os ensaios foram realizados nas estacas 3 EX, 4 BD e 4+15 BE. Observando a figura, verifica-se que os maiores valores de resistência de ponta nas camadas superficiais foram determinados para a estaca 3 EX, seguida pela estaca 4 BD e pela estaca 4+15 BE. Um comportamento semelhante a esse foi determinado pelo penetrômetro dinâmico de cone (DCP). Os pontos de inflexão das curvas de resistência de ponta com a profundidade (Figura 4.59) correspondem a mudanças das características da camada penetrada.

A Figura 4.60 apresenta a relação estabelecida entre os resultados do penetrômetro dinâmico Panda e do penetrômetro dinâmico de cone (DCP), para os três pontos ensaiados. Os resultados indicam boa correlação entre os índices obtidos pelos dois equipamentos de penetração. A Figura 4.61 apresenta a relação obtida entre a resistência de ponta do

penetrômetro Panda e o teor de umidade.

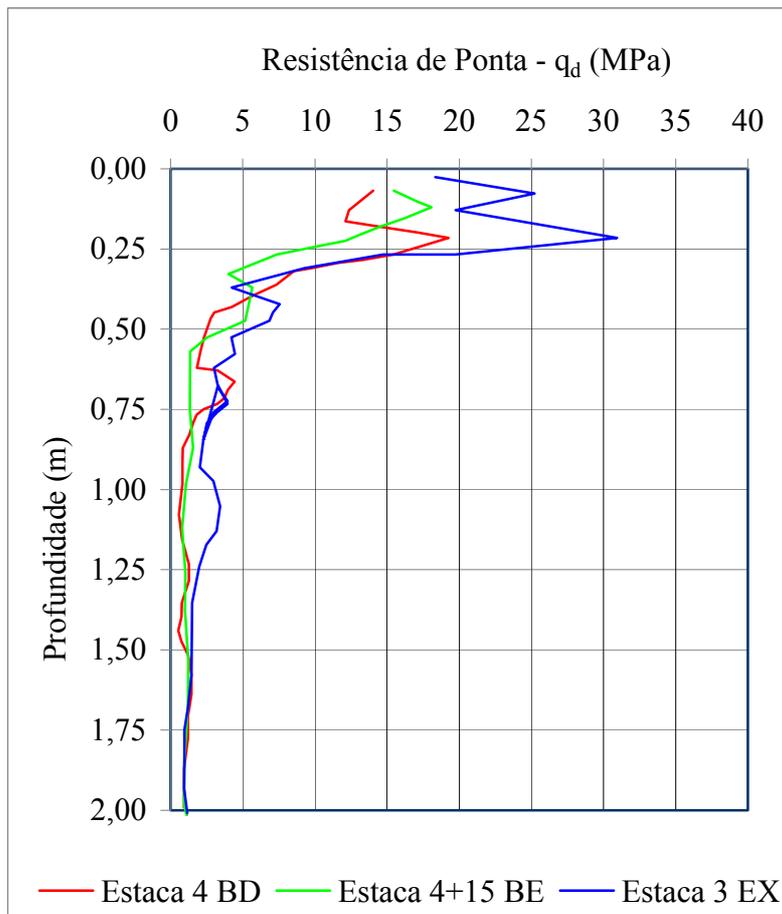


Figura 4.59 – Perfis de resistência de ponta (q_d) do penetrômetro Panda – ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.

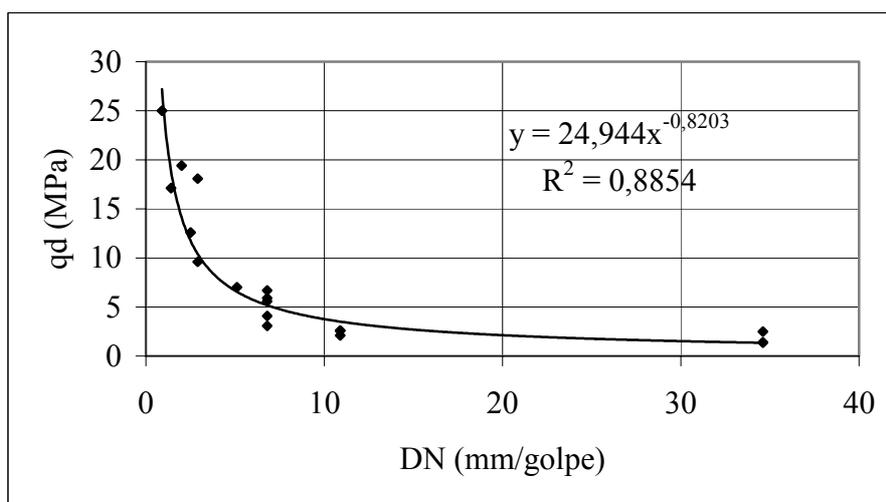


Figura 4.60- Relação entre os índices de resistência obtidos com o penetrômetro dinâmico de cone (DN) e o penetrômetro Panda (q_d) - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.

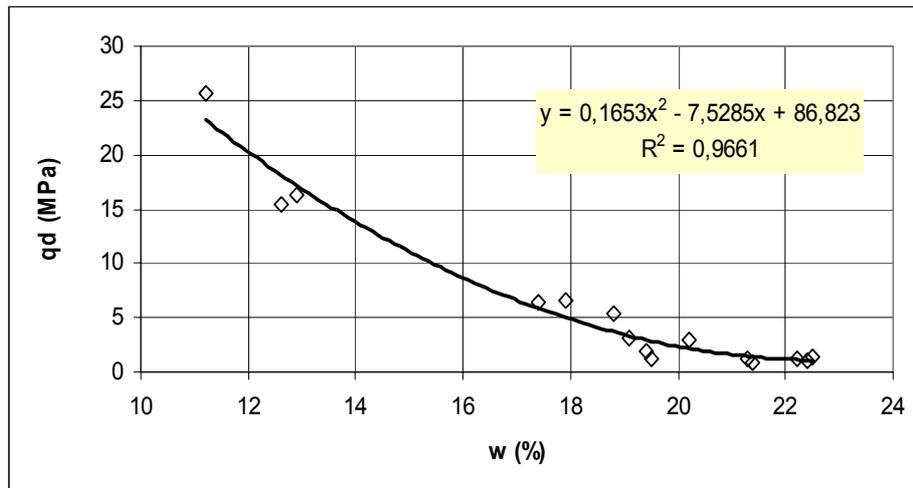


Figura 4.61 – Variação da resistência de ponta do penetrômetro Panda (qd) com o teor de umidade - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.

As Figuras 4.62 a 4.64 apresentam relações entre a resistência de ponta do penetrômetro Panda e os valores do módulo pressiométrico horizontal (E_{pH}), do módulo pressiométrico horizontal de recarregamento (E_{rH2}) e da pressão limite horizontal (P_L). Como no ensaio Panda a determinação de qd é contínua, foram calculados os valores médios de qd considerando-se ± 10 cm em relação ao centro da sonda pressiométrica que mede 24 cm. A obtenção dos valores para ± 10 cm se explica pelo fato de que embora seja flexível, a sonda tem variação de diâmetro cerceada nos dois extremos. As Figuras 4.62 a 4.64 mostram que os parâmetros obtidos pelos dois ensaios são bem correlacionáveis.

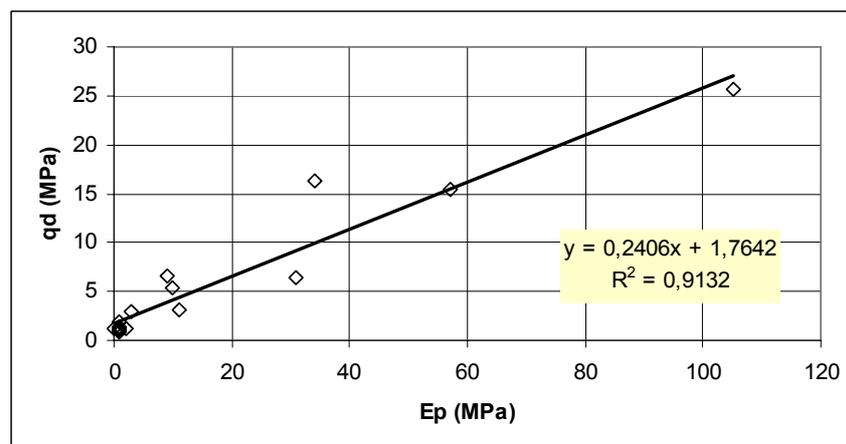


Figura 4.62 – Relação entre o módulo pressiométrico horizontal e a resistência de ponta do penetrômetro Panda - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.

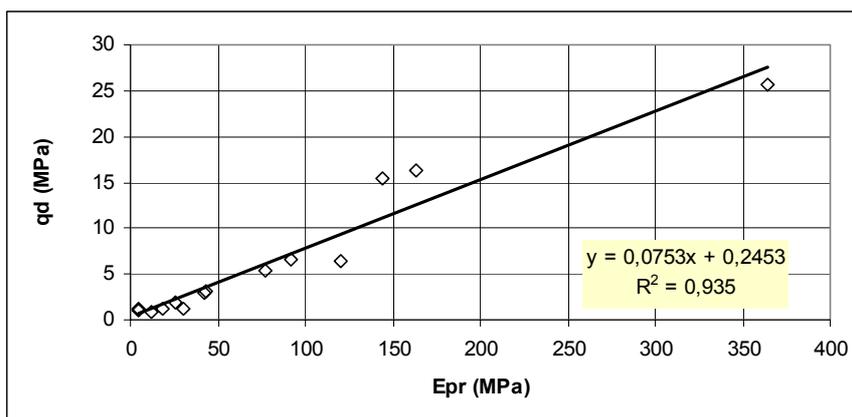


Figura 4.63 – Relação entre o módulo pressiométrico horizontal de recompressão e a resistência de ponta do penetrômetro Panda - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.

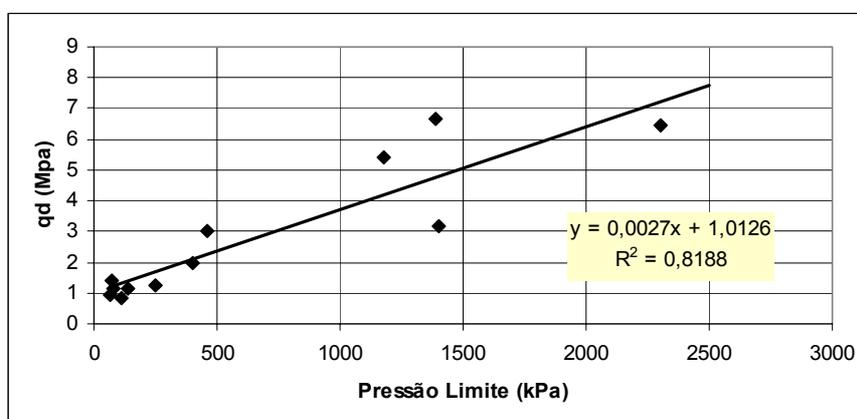


Figura 4.64 – Relação entre a pressão limite do pressiômetro Pencil e a resistência de ponta do penetrômetro Panda - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Maio/2006.

4.3.9 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O GEOGAUGE

A Tabela 4.52 apresenta os valores dos módulos de Young obtidos a partir dos ensaios com o geogauge realizados em Novembro de 2005 e Maio de 2006, na pista experimental. Os valores apresentados na tabela correspondem à média de pelo menos três determinações feitas com o geogauge em cada local ensaiado. Os valores dos módulos de Young apresentaram variações significativas entre as estacas ensaiadas, sendo que os valores sobre o revestimento, como era de se esperar, foram maiores que os valores determinados sobre a base. Os ensaios realizados sobre revestimento asfáltico nos mesmos pontos onde também foram realizadas as provas de carga resultaram em módulos maiores que os determinados próximo desses pontos, o que sugere que a prova de carga possa ter realizado um tipo de compactação estática do pavimento, aumentando a sua rigidez. Esse efeito de pré-carregamento na rigidez aparece

nitidamente nos valores dos módulos pressiométricos apresentados anteriormente.

Observando os valores dos módulos determinados sobre o revestimento asfáltico, fora do centro das provas de carga (Tabela 4.52), verifica-se que, em média, os valores mantiveram-se aproximadamente constantes ao longo do período estudado; entretanto, os valores determinados sobre a base apresentaram uma significativa redução para o mesmo período. Comparando os valores médios de módulo obtidos para a base de agregados reciclados utilizando o geogauge ($E = 235$ MPa em Novembro/2005 e $E = 155$ MPa em Maio/2006) com os valores de módulo de resiliência obtidos em laboratório para essa dosagem (150 a 400 MPa), verifica-se que os mesmos se situam dentro de uma mesma faixa de valores.

Tabela 4.52 – Módulos de Young do geogauge - ensaios realizados na pista experimental (CEASA) em Novembro/2005 e Maio/2006.

Local Ensaiado	Sobre o Revestimento Envolta PC E (MPa)		Sobre o Revestimento Centro PC E (MPa)		Sobre a Base Envolta PC E (MPa)	
	nov/05	mai/06	nov/05	mai/06	nov/05	mai/06
Estaca 3 EX	222	251	247	277	240	171
Estaca 4 BD	246	227	319	233	259	171
Estaca 4+15 BE	234	233	340	293	207	122
Média	234	237	302	268	235	155
Desvio Padrão	12	12	49	31	26	28

5 CONCLUSÕES

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo estão apresentadas as principais conclusões obtidas na pesquisa, com base na análise dos resultados dos ensaios realizados em laboratório e na pista experimental.

5.2 ANÁLISES DE LABORATÓRIO

Um importante indicador das potencialidades de agregados reciclados em pavimentos é a sua constituição, em termos de grãos cimentícios, cerâmicos e solo. A mensuração dessa constituição pode ser feita mediante a análise visual dos grãos da fração grossa, acima de 4,8 mm, ou por meio da medida do pH, que além de se apresentar como bom indicador do percentual de grãos cimentícios da amostra, também serve para indicar a possibilidade de ganho de resistência ao longo do tempo. A qualidade e o próprio ganho de resistência das misturas solo-agregado reciclado mostraram-se diretamente associados ao pH, tal qual se observa na estabilização química dos solos com cal ou cimento. Nas determinações realizadas em laboratório verificou-se que dosagens com pH acima de 10,5 apresentaram ganho de resistência com o tempo apontando assim para a ocorrência de reações pozolânicas nas misturas. Dosagens realizadas com a mesma textura, porém com constituição e pH diferentes apresentaram resistências, em termos de índice de suporte Califórnia e de módulo de resiliência, diferentes. Os agregados reciclados sem adição de solo local apresentaram maiores valores de ISC, porém, foi verificado que para algumas dosagens é possível utilizar o solo local a fim de reduzir custos, melhorar a trabalhabilidade da mistura e, mesmo assim, obter valores satisfatórios de ISC para camadas de base e sub-base. Nesses casos, a sucção das misturas também pode ser um bom indicador de potencialidades, auxiliando no entendimento do comportamento do pavimento.

Um outro indicador de potencialidades dos agregados reciclados é a textura das dosagens. Dosagens com textura fina (grãos menores que 4,8 mm) apresentam potencial para aplicação em camadas de reforço do subleito e em sub-bases, enquanto dosagens com texturas mais grossas podem ser aplicadas tanto em camadas de sub-base como de base de pavimentos, apresentando a mesma eficiência que materiais naturais.

Embora algumas experiências tenham mostrado que o uso de agregados reciclados

obtidos da britagem sem a classificação granulométrica apresentem bons resultados quando aplicados em camadas de base e sub-base de pavimentos, a classificação ou dosagem dos agregados processados em diferentes granulometrias e constituições tende a fornecer um melhor controle sobre o comportamento em campo do material, reduzir a sua variabilidade e possibilitar uma aplicação mais eficiente para diferentes casos. Como o percentual de grãos cimentícios e cerâmicos influencia diretamente nos parâmetros obtidos das dosagens realizadas com os mesmos, é perfeitamente viável que as usinas de reciclagem promovam a seleção dos resíduos de concreto e cerâmicos e façam seus beneficiamentos separadamente, de forma que se possa trabalhar diferentes dosagens para a aplicação em situações de campo distintas.

A alta porosidade dos agregados reciclados está associada à sua constituição e influencia bastante no comportamento das dosagens, sendo outro indicador de potencialidades e desempenho. As análises realizadas mostraram que é importante que se determine além do índice de vazios total, que inclui os vazios internos dos agregados, o índice de vazios interagregados, ou seja, entre os agregados. As análises realizadas só apresentaram boas correlações quando feita essa separação dos índices de vazios e se utilizou apenas o índice de vazios interagregados.

A resistência dos grãos dos agregados reciclados, que pode ser determinada pelo índice de abrasão Los Angeles, ou pelo índice de degradação após a compactação Proctor, também mostrou-se como um bom indicador de potencialidades dos agregados reciclados.

Os parâmetros de índice de suporte Califórnia e de módulo de resiliência também se mostraram bons indicadores de potencialidades e desempenho, apresentando uma faixa de valores adequada para o emprego dos agregados reciclados em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Os valores indicam, apesar da necessidade de estudos complementares, a possibilidade de emprego dos agregados reciclados em pavimentos de tráfego médio e pesado, embora isso não seja recomendado pela ABNT. Convém ressaltar ainda que a energia de compactação empregada nos ensaios, com exceção de um, foi a do Proctor intermediário e que a norma do DNER (atual DNIT) para bases estabilizadas granulometricamente recomenda utilizar a energia Proctor modificado para as rodovias com tráfego representado por um número $N > 5 \times 10^6$. Em algumas situações específicas, análises de custo-benefício podem indicar a utilização da energia modificada e a obtenção de parâmetros ainda melhores devendo-se, no entanto, verificar a influência do aumento da energia na quebra dos grãos dos agregados, o que por certo, poderá interferir negativamente no comportamento.

O uso desses diferentes indicadores deve se associar à fase de projeto de modo a otimizar o custo do estudo, sendo que o pH destaca-se pelo seu baixo custo, rapidez e praticidade.

5.3 MONITORAMENTO DA PISTA EXPERIMENTAL

O índice de penetração (DN), obtido a partir do penetrômetro dinâmico de cone (DCP), mostrou-se como um bom indicador de resistência das camadas, tanto espacialmente quanto em perfil. Com base nos valores de índice de penetração (DN) o pavimento manteve-se estável durante o período de observação. Uma vez aferido com os materiais empregados, o penetrômetro dinâmico de cone pode ser bastante útil no controle de compactação e determinação de resistência das camadas.

Os deslocamentos medidos nas provas de carga realizadas sobre as camadas de subleito, sub-base, base e revestimento, na fase de construção da pista experimental apresentaram-se semelhantes, com valores inferiores a 2 mm para o carregamento total aplicado de 40 kN. Os deslocamentos medidos após 6, 12 e 18 meses de operação da pista experimental mantiveram-se estáveis, pouco menores que os medidos após a construção do pavimento. Esse comportamento também foi verificado nos ensaios de viga Benkelman e pode estar relacionado às variações sazonais de sucção ou às reações de cimentação ao longo do tempo. As deflexões medidas durante a construção da pista experimental e nos três períodos de operação monitorados, apresentaram-se relativamente próximos e não indicam a ocorrência de quaisquer problemas estruturais no pavimento. Portanto, os deslocamentos e as deflexões medidas indicam um bom desempenho do pavimento ao longo do período de monitoramento.

Os módulos obtidos com o pressiômetro Pencil apresentaram-se um pouco dispersos, tanto para o subleito quanto para a base e sub-base de agregados reciclados. Os valores dos módulos horizontais (E_{PH}) mantiveram-se estáveis até o período de 12 meses de operação da pista experimental (Novembro/2005) e apresentaram redução após 18 meses de operação (Maio/2006). Essa redução foi menos acentuada para os módulos de recarregamento (E_{rH1} e E_{rH2}). Os valores de pressão limite (P_L) permaneceram constantes durante todo o período de monitoramento. Na determinação dos módulos horizontais, das camadas de base e sub-base de agregados reciclados, a pressão gerada nos ensaios atingiu o valor máximo do aparelho, sendo os ensaios encerrados nessa pressão limite. Isso indica uma alta resistência das camadas e bom desempenho das mesmas. Os valores dos módulos verticais, provenientes dos furos horizontais, apresentaram menor dispersão que os horizontais. Os parâmetros obtidos dos

ensaios pressiométricos mostraram-se inversamente proporcionais aos teores umidade e bastante dependentes destes.

As resistências de ponta das camadas (q_d) medidas utilizando o penetrômetro dinâmico Panda apresentaram boas correlações com o índice de penetração (DN) do penetrômetro dinâmico de cone, com os módulos pressiométricos e com o teor de umidade. Com isso, dada a simplicidade e operacionalidade do penetrômetro Panda, o índice q_d mostra-se como um bom indicador de desempenho de estruturas de pavimento, inclusive com agregados reciclados.

Os módulos de Young obtidos do geogauge apresentaram-se como possíveis indicadores de desempenho das camadas do pavimento, necessitando, porém de uma maior base de dados para validar a sua aplicação.

Os pesos específicos das camadas monitoradas pelo frasco de areia e pelo densímetro nuclear apresentaram uma pequena variação após os 18 meses de ação do tráfego. As medidas de textura também não determinaram grandes variações, indicando que não houve quebra acentuada dos grãos em função da ação do tráfego, ao longo do período monitorado. Essas determinações também constituem indicadores de bom desempenho do pavimento.

Após decorridos dois anos e nove meses da ação do tráfego sobre a pista experimental a mesma não apresentou defeitos superficiais aparentes nem deformações que comprometam a sua estrutura e funcionalidade, indicando assim, serem os agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil, apropriados para o uso em bases e sub-bases de estruturas de pavimentos com características semelhantes às estudadas, o que corresponde à grande maioria dos pavimentos urbanos.

Os ensaios de campo apresentados podem ser usados como indicadores de desempenho na fase de execução e durante a vida útil da obra. Os penetrômetros dinâmicos destacam-se nesse contexto pela simplicidade e facilidade de execução.

5.4 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Construção e monitoramento de um trecho experimental, em local com elevado volume de tráfego, utilizando agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil nas camadas de base e sub-base e verificação do desempenho do pavimento mediante esse nível de solicitação. Caso o desempenho venha a ser satisfatório o mesmo pode reforçar a possibilidade de aplicação de agregados reciclados em vias de tráfego acima do atualmente

recomendado por norma.

Verificar de forma abrangente e minuciosa a influência do pH na resistência imediata e sua variação com o tempo em dosagens de agregados reciclados.

Estudar a estabilização de misturas de agregados reciclados com cal hidratada buscando relacionar a variação de resistência com os valores de pH.

Realizar experimentos para mensurar a atividade pozolânica de dosagens com agregados reciclados visando correlacioná-la com a variação de resistência das misturas com o tempo.

Realizar a instrumentação de pistas experimentais com agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil.

Estudar a influência da energia e da textura na quebra dos grãos de agregados reciclados.

Utilizar os dados obtidos nos ensaios de campo da presente pesquisa para realização de análises numéricas, adotando hipóteses que simulem as condições reais e possam contribuir para o entendimento do comportamento do pavimento estudado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (1984a). Norma Brasileira – NBR – 6489 – Prova de Carga Direta Sobre Terreno de Fundação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 2 p.

ABNT (1984b). Norma Brasileira – NBR – 7181 – Solos - Análise Granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 13 p.

ABNT (1984c). Norma Brasileira – NBR – 6508 – Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa Específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 8 p.

ABNT (1984d). Norma Brasileira – NBR – 6458 – Grãos de Pedregulho Retidos na Peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa Específica, da Massa Específica Aparente e da Absorção de Água. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 6 p.

ABNT (1984e). Norma Brasileira – NBR – 6459 – Solo - Determinação do Limite de Liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro, RJ, 6 p.

ABNT (1984f). Norma Brasileira – NBR – 7180 – Solo - Determinação do Limite de Plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 3 p.

ABNT (1986). Norma Brasileira – NBR 7185 – Solo – Determinação da Massa Específica Aparente, “in situ”, com Emprego do Frasco de Areia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 7 p.

ABNT (1987). Norma Brasileira – NBR – 9895 – Solo - Índice de Suporte Califórnia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 14 p.

ABNT (2003). Norma Brasileira - Norma Mercosul - NBR NM 248 - Agregados - Determinação da Composição Granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.

ABNT (2004a). Norma Brasileira – NBR – 10.004 – Resíduos Sólidos – Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 71 p.

ABNT (2004b). Norma Brasileira – NBR – 10.007 – Amostragem de Resíduos Sólidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 21 p.

ABNT (2004c). Norma Brasileira – NBR – 10.006 – Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 3 p.

ABNT (2004d). Norma Brasileira – NBR – 15.115 – Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Execução de Camadas de Pavimentação - Procedimentos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 10 p.

ABNT (2004e). Norma Brasileira NBR 15.116 – Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Utilização em Pavimentação e Preparo de Concreto Sem Função

Estrutural – Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 12 p.

Assis, L. M. R., Vilela, M. T. L. e Sousa, R. V. (2004). Análise Comportamental de um Pavimento com Base e Sub-Base Compostas com Resíduos Sólidos da Indústria da Construção Civil - Ensaio de Viga Benkelman. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia - GO, 68 p.

Bodi, J., Brito Filho, J. A., Almeida, S. (1995). Utilização de entulho de construção civil reciclado na pavimentação urbana. 29ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Mato Grosso, p. 409-436.

Blumenschein, R. N. (2004). A Sustentabilidade na Cadeia Produtiva da Indústria da Construção. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Distrito Federal, DF, 263 p.

Camapum de Carvalho, J., Konrad, J. M., Lachance, D., Fortin, S. (2000). Influência da heterogeneidade do subleito na compactação e desempenho estrutural dos pavimentos urbanos. 32ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Brasília, Distrito Federal, 2:527-534.

Camapum de Carvalho, J., Leroueil, S. (2004). Curva Característica de Sucção Transformada. Revista Solos e Rochas, São Paulo, SP, 27 (3), p. 231-242.

Cardoso, A. B., Trichês, G. (1998). Avaliação da capacidade de suporte de aterros e subleito de rodovias utilizando o penetrômetro dinâmico de cone. XI COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS, Brasília, Distrito Federal, 2:649-656.

Cardoso, A. B., Trichês, G. (2000). Proposição de uma metodologia para utilização do penetrômetro dinâmico de cone no controle da execução da camada final de terraplenagem. 32ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Brasília, Distrito Federal, 2:662-673.

Carneiro, A. P., Burgos, P. C., Alberte, E. P. V. (2001). Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos. Reciclagem de Entulho Para Produção de Materiais de Construção – Projeto Entulho Bom, A. P. Carneiro, I. A. S. Brum e J. C. Cassa (orgs.), Editora da Universidade Federal da Bahia- EDUFBA, Salvador, Bahia, pp. 188-227.

CONAMA (2002). Resolução N° 307, de 5 de julho de 2002. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/2002.

DER-GO (1997). Projeto Final de Engenharia – Rodovia GO-050 – Trecho BR-364/Rio Verde (1997). Departamento de Estradas de Rodagem de Goiás, Volume 3.

Dias, J. F., Agopyan, V., Bernucci, L. L. B., Moura, E. (2001). Estudo em laboratório de resíduo da fabricação de telhas cerâmicas para uso em pavimentação. 33ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Florianópolis, SC, 9 p.

Dias, J. F., Agopyan, V., Bernucci, L. L. B., Acerbi, J. M. C. (2005a). Agregados reciclados de telha cerâmica – ensaios de caracterização. 36ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Curitiba, PR, 12 p.

Dias, J. F., Agopyan, V., Bernucci, L. L. B., Rezende, M. E. B. (2005b). Avaliação das características de compactação e do ISC de agregado reciclado de telha cerâmica e de suas misturas com solos lateríticos. 36ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Curitiba, PR, 12 p.

Dias, J. F., Agopyan, V., Bernucci, L. L. B., Moura, E. (2006). Avaliação do módulo de resiliência de misturas solo-agregado reciclado cerâmico em função da porosidade do esqueleto granular do agregado. 13ª Reunião de Pavimentação Urbana, ABPv, Maceió, AL, 10 p.

DNER (1979). Procedimento - PRO 011 B - Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro - RJ, 16 p.

DNER (1994a). Procedimento - PRO 175 - Aferição de Viga Benkelman. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro - RJ, 11 p.

DNER (1994b). Método de ensaio – ME 024 - Pavimento - Determinação das Deflexões pela Viga Benkelman. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro - RJ, 6 p.

DNER (1994c). Método de ensaio – ME 053 – Misturas Betuminosas – Percentagem de Betume. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro - RJ, 5 p.

DNER (1994d). Método de ensaio – ME 086/94 – Agregado – Determinação do Índice de Forma. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro - RJ, 5 p.

DNER (1994e). Método de ensaio - ME 131/94 - Solos - Determinação do Módulo de Resiliência. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro - RJ, 8 p.

DNER (1996a). Procedimento PRO 273 – Determinação de Deflexões utilizando Defletômetro de Impacto FWD, Falling Weight Deflectometer. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro - RJ, 4 p.

DNER (1996). Manual de Pavimentação. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico - IPR/DNER, Rio de Janeiro - RJ, 320p.

DNER (1997a). Especificação de Serviço ES 303 - Pavimentação - Base Estabilizada Granulometricamente. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro - RJ, 7 p.

DNER (1997b). Especificação de Serviço ES 290 – Drenagem – Meios-fios e Guias. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro - RJ, 7 p.

DNER (1998a). Método de ensaio ME 083 – Agregados – Análise Granulométrica. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro - RJ, 5 p.

DNER (1998b). Método de ensaio ME 035 – Agregados – Determinação da Abrasão *Los Angeles*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro - RJ, 6 p.

DNIT (2006). Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico. Especificação de Serviço.

- Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Rio de Janeiro, RJ, 14 p.
- Elliot, R. P. (1992). Selection of subgrade modulus for AASHTO flexible pavement design. Transportation Research Record, USA, vol. 1354, 39-44.
- Fredlund, D. G. & Rahardjo, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. Jonh Wiley & Sons, Inc. New York, 517 p.]
- Frota, C. A., Melo, D. M., Nunes, F. R. G. (2005). Estudo de creep de misturas asfálticas com resíduo processado da construção civil. 36ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Curitiba, PR, 12 p.
- Google Earth (2006). Aplicativo de Imagens de Satélite. Europa Technologies Image. Digital Globe. Terra Métrics. Site da Internet: www.superdownloads.com.br. Acessado em Outubro/2006.
- Gouves, R.P.H. (1991). Le Panda : Pénétrómètre dynamique léger à energie variable pour la reconnaissance des sols. Université Blaise Pascal.
- Greco, J.A.S. (2004). Avaliação da Influência de Alguns Fatores nas Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Densas, à Luz da Técnica de Planejamento e Análise de Experimentos Fatoriais Fracionários Assimétricos. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP.
- Guimarães, R. C., Ribeiro, H. C., Castro, C. H., Rezende, L. R. (2004). Estudo da Aplicação de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Revestimento Asfáltico. 17º Encontro do Asfalto, IBP 919-04, Rio de Janeiro, RJ.
- Hamassaki, L. T., Sbrighi Neto, C., Florindo, M. C. (1996). Uso de entulho como agregado para argamassas de alvenaria. Workshop Sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Material de Construção Civil, EPUSP/ANTAC. São Paulo, SP, pp. 107-115.
- Hendriks, Ch. F., Pietersen, H. S. (2000). Sustainable Raw Materials: Construction and Demolition Waste. Report 22. France : Rilem : Publications s.a.r.l.
- Hendriks, Ch. F. (2000). Durable an sustainable construction materials. The Netherlands : Aeneas Technical Publishers.
- Humboldt (2000). GeoGauge User Guide. Humboldt Mfg. Co. Illinois, U.S.A., 15 p.
- IBAM (2001). Instituto Brasileiro de Administração Municipal. Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, RJ, 200 p.
- INMET (2007). Site da internet: <http://www.inmet.gov.br/>. Acessado em 16/08/2007.
- IPR (1998). Estudos e pesquisas de rochas de pedreiras para estabelecimento de critérios de qualidade frente às normas e procedimentos existentes e sua aceitação. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, DNER, Ministério dos Transportes. Relatório Final, Rio de Janeiro, RJ, 153 p.
- John, V. M., Agopyan, V. (2000). Reciclagem de resíduos da construção. Seminário – Reciclagem de Resíduos Sólidos Domiciliares, SEMA, CETESB, São Paulo, SP, 13 p.

Kryckyj, P. R. e Trichês, G. (1999). Aproveitamento de entulho da construção civil na pavimentação urbana. Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São José dos Campos.

Kryckyj, P. R. e Trichês, G. (2000). Use of civil construction waste in urban pavements: a feasibility study. 5th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development. COD 142, ID 065, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

LNEC (1967). Norma Técnica: Solos – Determinação do pH. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2 p.

Laterza, L. (2000). A problemática dos resíduos no Brasil. ABGE em Revista, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, (82): 12-15.

Leal, U. (2001). Sobras que valem uma obra. Técnica – Revista de Tecnologia e Negócios da Construção, Editora PINI, (55): 58-62.

Leite, F. C., Motta, R. S., Bernucci, L. L. B., Moura, E., Abdou, M. R. (2006a). Comparação de valores de índice de suporte Califórnia de agregados reciclados de resíduo sólido da construção civil. 13ª Reunião de Pavimentação Urbana, ABPv, Maceió, AL, 8 p.

Leite, F. C., Bernucci, L. L. B., Preussler, L. A., Motta, R. S., Moura, E., Abdou, M. R. (2006b). Monitoramento de trecho experimental com agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil e asfalto-borracha. 37ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Goiânia, GO, 11 p.

Marinho, F. A. M. (1995). A técnica do papel filtro para medição de sucção. Encontro Sobre Solos Não Saturados. Porto Alegre, RS, p. 112-125.

Medeiros, F. (2002). Resíduos da construção – leis e projetos tentam solucionar o destino final do material que sobra nas obras. Revista Qualidade na Construção, SINDUSCON-SP, (26): 6-13.

Medina, J. (1997). Mecânica dos Pavimentos. Ed. da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 380p.

Medina, J. & Motta, L. M. G. (1988). Design of asphalt pavements using lateritic soil in Brazil. Solos e Rochas, vol. 11, número único, 3-9.

Medina, J. & Preussler, E. S. (1980). Características resilientes de solos em estudos de pavimentos. Solos e Rochas – Revista Brasileira de Geotecnia, COPPE-UFRJ, vol. 3, número 1, 3-26.

Merighi, J.V. Fortes, R.M (2003). O Ensaio de creep estático: uma referência para a avaliação do desempenho de misturas asfálticas quanto à deformação permanente. 12ª Reunião de Pavimentação Urbana, ABPv, Aracaju, SE.

Miranda, L., Selmo, S. (2003). Argamassas com areia de entulho reciclado. Técnica – Revista de Tecnologia e Negócios da Construção, Editora PINI, (74): 68-71.

Monteiro, J. H. P. (2001). Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. Instituto Brasileiro de Administração Municipal. Rio de Janeiro – RJ, 204 p.

Moreira, J. F., Dias, J. F., Rezende, M. E. B (2006). Utilização de resíduos de construção e demolição em base de pavimentos na cidade de Uberlândia – MG. 13ª Reunião de Pavimentação Urbana, Código 48, Maceió, AL, 12 p.

Motta, L. M. G., Aranovich, L. A. S. & Ceratti, J. A. P. (1985). Comportamento resiliente de solos utilizados em pavimentos de baixo custo. Solos e Rochas, vol. 8, número 3: 15-42.

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

Paiva, C. E. L., Causim, P. B. (2000). Estudo de avaliações das condições estruturais de um pavimento a partir de bacias de deformação. 32ª Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, Distrito Federal, 1:297-307.

Pinto, T. P. (1999). Metodologia Para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana. Tese de Doutorado em Engenharia da Construção Civil na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 1999, 189 p.

Pinto, T. P. (2001). Reciclagem de Entulho Para Produção de Materiais de Construção – Projeto Entulho Bom, A. P. Carneiro, I. A. S. Brum e J. C. Cassa (orgs.), Editora da Universidade Federal da Bahia- EDUFBA, Salvador, Bahia, 309 p.

Pinto, S., Preussler, E. (2002). Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis. Copiarte, Rio de Janeiro, RJ, 259 p.

PMGRSIC – Plano Municipal de Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Indústria da Construção Civil de Goiânia – Goiás (2004). Diagnóstico Preliminar e Planejamento. Relatório de Novembro de 2004, 76 p.

PMSP – Prefeitura Municipal de São Paulo (2003). Camadas de Reforço do Subleito, Sub-base e Base Mista de Pavimento com Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos da Construção Civil. Especificação de Serviço 001, São Paulo, SP, 14 p.

Powers, M. C. (1953). Jour. Sed. Pet. V. 23, p. 117-119.

Prefeitura de Goiânia (2005). Instrução Normativa N° 18, de 26 de Dezembro de 2005, Goiânia, 2005.

Raverdy, M., Brivot, F., Paillere, A. M., Dron, R. Appréciation de l'activité pouzzolanique des constituants secondaires (1980). Congrès International de La Chimie des Ciments, 7., Paris. Proceedings. V.3, IV-36/41.

Resplandes, H. M. S. (2007). Estudo Ambiental e Técnico da Aplicação do Agregado Reciclado na Estrutura de Pavimentos Flexíveis. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 210 p.

Rezende, L. R. (2003). Estudo do Comportamento de Materiais Alternativos Utilizados em Estruturas de Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutorado, Publicação GTD-014/03, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 372 p.

Ribeiro, F., Serra, N. G. S. (2001). Utilização de Entulho na Pavimentação. Projeto Final para Conclusão do Curso de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, Goiás, 104 p.

Rodrigues, J. K. G., Felex, J. B., Lucena, F. B., Pontes Filho, G. (1996). Análise dos módulos de elasticidade estimados a partir de dados coletados com o pressiômetro Pencil. 30ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPV, Salvador, BA, 2: 772-743.

SHRP (1995). Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of SHRP Asphalt Research Program. Superpave Series Nº 2.

Silva, A. L. A. (2004). Aplicação de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Base e Sub-Base de Pavimentos. Trabalho de Conclusão do Curso de Infra-Estrutura de Vias no Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás, Goiânia - GO, 215 p.

SINDUSCON – MG (2005). Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Construção Civil. Comissão de Meio Ambiente do SINDUSCON – MG e Parceiros, 2ª. Edição, Belo Horizonte, MG, 68 p.

Trichês, G.; Kryckyj, P. R. (1999). Aproveitamento de entulho da construção civil na pavimentação urbana. Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São José dos Campos.

Vertamatti, E., Oliveira, L. E. (1997). Análise de pavimento de baixo volume de tráfego executado com solos transicionais. 1º Simpósio Internacional de Pavimentos de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego, ABPv, Rio de Janeiro, RJ, 1:325-344.

Villibor, D. F. (1981). Pavimentos Econômicos. Novas Considerações. Tese de Doutorado. Departamento de Vias de Transportes e Topografia. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 224 p.

Villibor, D. F., Nogami, J. S., Beligni, M., Cincerre, J. R. (2000). Pavimentos com solos lateríticos e gestão de manutenção de vias urbanas. ABPV/UFU, São Paulo, SP, 138 p.

Zordan, S. E. (1997). A Utilização do Entulho como Agregado, na Confeção do Concreto. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 156 p.