

IGOR AMORIM BEJA

**AGREGADO RECICLADO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COM
ADIÇÃO DE AGLOMERANTES HIDRÁULICOS COMO SUB-BASE
DE PAVIMENTOS**

São Paulo
2014

IGOR AMORIM BEJA

**AGREGADO RECICLADO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COM
ADIÇÃO DE AGLOMERANTES HIDRÁULICOS COMO SUB-BASE
DE PAVIMENTOS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia de
Transportes.

São Paulo
2014

IGOR AMORIM BEJA

**AGREGADO RECICLADO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COM
ADIÇÃO DE AGLOMERANTES HIDRÁULICOS COMO SUB-BASE
DE PAVIMENTOS**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Área de Concentração: Engenharia de Transportes

Orientador: Prof^a Dr^a Liedi Légi Bariani Bernucci

São Paulo
2014

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 31 de janeiro de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Beja, Igor Amorim

**Agregado reciclado de construção e demolição com adição de aglomerantes hidráulicos como sub-base de pavimentos / I.A. Beja. -- versão corr. -- São Paulo, 2014.
218 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1. Resíduos de construção 2. Pavimentos flexíveis 3. Agregados (Reciclagem) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

DEDICATÓRIA

À minha amada Ana Lígia (mãe) pela orientação, força e amor para toda vida.

A toda minha família e em especial a Jorge Luiz (pai), Maria Goretti e Evandro Andrade (tios).

À Maria e Orlando (avós) meu amor eterno e exemplo de vida e humildade.

À minha amada Paraíba (estado) e aos amigos e o amor que cultivei ao longo de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Deus pai eterno e soberano em suas ações para guiar e proteger os meus passos.

Ao meu mentor professor John Kennedy G. R. por sua participação decisiva em minha formação profissional e pessoal.

À minha orientadora, a professora Liedi L. B. Bernucci por ter acreditado em minha capacidade, me oferecido a oportunidade e por edificar meu conhecimento em todos os sentidos.

À Dr^a. Rosângela Motta e ao professor Dr. Carlos Suzuki pela contribuição valorosa na análise da dissertação no exame de qualificação.

À Dr^a Kamilla L. Vasconcelos pelas boas vibrações do dia a dia e por contribuir sensivelmente com o saber em comportamento de misturas asfálticas.

Ao Dr. Edson de Moura pela amizade, bom humor de sempre e por transmitir e esmiuçar os conhecimentos da metodologia MCT.

À Diomaria Santos pelo seu trabalho, gentileza e empenho junto a todos do LTP.

Ao amigo Kendi, o “Japonês”, pelo privilégio e honra de sua amizade nas horas alegres e de dor, pela ajuda na coleta dos materiais e parceria nas campanhas de campo.

Ao amigo Rodrigo, pelo bom humor, descontração, pelas horas de estudos somadas juntos e ajuda na correção da dissertação.

Ao amigo Tiago pela ajuda substancial com o programa de elementos finitos, e pelo sua presença nas tardes de sábados e domingos com estudos.

Aos amigos Robson, Vanderlei e Erasmo e à amiga Patricia pela força e entusiasmo em ajudar na execução dos ensaios de laboratório.

À empresa Fremix, representada pelo Msc. Valmir Bonfim pela ajuda na concessão dos trechos experimentais, materiais e suporte nas campanhas de levantamento em campo.

À Prefeitura Municipal de São Paulo pela parceria e empenho em prol do desenvolvimento de inovações no meio técnico de infraestrutura.

Ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentação pela oportunidade de aprendizado e desenvolvimento da pesquisa.

À empresa Dynatest pela colaboração nos levantamentos de campo e pelo empréstimo do equipamento FWD a pesquisa.

À empresa Belocal pelo fornecimento da cal hidratada utilizada na pesquisa laboratorial e no trecho experimental.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia pela gentileza em conceder os dados pluviométricos empregados na presente pesquisa.

À CAPES pela ajuda financeira e contribuição essencial à formação deste profissional.

À minha pequena “grande” Ju por seu amor, paciência e dedicação e por estar presente mesmo quando eu estive ausente.

O saber a gente aprende com os mestres e os livros. A sabedoria se aprende é com a vida e com os humildes.

(Cora Coralina)

Ainda que eu ande pelo vale da sombra da morte, não temerei mal algum, porque tu estás comigo, a tua vara e o teu cajado me consolam.

(Salmo 23:4)

RESUMO

O uso de resíduos de construção e demolição civil (RCD) vem ganhando espaço crescente em aplicações na engenharia. Este material adquiriu maior importância a partir da década de 70, com seu emprego ampliado como material granular em concretos de cimento para obras civis e no setor de infraestrutura, principalmente como camadas de pavimentos. O presente trabalho tem por objetivo compreender o comportamento físico e mecânico do agregado reciclado de resíduos de construção e demolição com adição de aglomerantes, a cal hidratada e cimento Portland. Foram construídos três trechos experimentais de uma via urbana com uso de RCD misto na sub-base dos pavimentos: (i) um sem aglomerantes adicionais, (ii) um com adição em usina de 3% de cal hidratada, e (iii) um com adição em usina de 3% de cimento Portland. Todas as amostras coletadas em usina foram caracterizadas em laboratório e foram analisados os comportamentos mecânicos das três diferentes misturas por meio de ensaios de (i) resistência à compressão simples aos 7 dias de cura para os materiais com aglomerantes, (ii) ensaios de módulo de resiliência a 7, 28 e 60 dias de cura para todas as misturas, e (iii) ensaios de deformação permanente com diferentes tensões. Analisando os resultados das misturas a 60 dias de cura, a mistura em RCD apresentou com o menor ganho em módulo de resiliência, enquanto que a mistura de RCD com 3% cimento, apresentou os maiores módulos, e a mistura RCD com adição em 3% de cal obteve um valor pouco abaixo daquele com cimento. Quanto ao comportamento à deformação permanente, verificou-se a baixos níveis de tensão que, todas as misturas apresentaram baixas deformações e comportamento similar, e que a maiores níveis de diferença de tensões principais, as misturas estabilizadas apresentaram comportamento estável e as misturas em RCD obteve-se deformação permanente mais significativa. Com o monitoramento deflectométrico foi possível realizar retroanálise, e estimar os módulos de resiliência *in situ*, cujos valores são similares aos encontrados em laboratório. Passados quase dois anos, o comportamento funcional e estrutural dos trechos experimentais é satisfatório.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição, Rigidez, Deflexões.

ABSTRACT

The use of construction and demolition waste (CDW) has been gaining increasing applications in engineering; the use of CDW has become more important since the 70's as granular material in cement concrete applications in civil engineering and transportation infrastructure, mainly as pavement layers. This study aims to understand the physical and mechanical behavior of recycled aggregate from construction and demolition waste with the addition of hydraulic binders, as hydrated lime and Portland cement. Three experimental urban pavement sections were constructed using CDW as the subbase material: (i) the first one using CDW, (ii) the second using CDW with 3% of hydrated lime (mixed in the plant), and (iii) the third one employing CDW with 3% of cement (also mixed in the plant). All samples collected in the plant were characterized in laboratory. The mechanical behavior of these materials and mixtures were analyzed through the following tests: (i) compressive strength at 7 days of curing for materials with hydraulic binders, (ii) resilient moduli at 7, 28 and 60 days of curing for all mixes, and (iii) permanent deformation. By analyzing the responses of the mixture at 60 days of curing, the CDW mixture presented, as a crushed stone, the smallest gain on resilient modulus, whereas mixture with 3% cement with CDW had the highest modulus. The mixture with 3 % hydrated lime with CDW showed resilient modulus smaller than with cement. The permanent deformations at low stress levels were low and similar for the three tested materials. On the other hand, at higher stress level, the stabilized mixtures exhibited stable behavior, and the mixture with CDW shows a significant permanent deformation. The backcalculation based on the measurement of deflections showed values of resilient moduli in situ similar to the laboratory results. After almost two years, the performance of the experimental sections is considered satisfactory.

Keywords: Construction and demolition waste, Stiffness, Deflections.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ligação física, entre solo e aglomerante (adaptado de Xuan <i>et al.</i> , 2011)	37
Figura 2.2 – Mudança na textura do solo (argiloso) devido a troca catiônica e estabilização da camada de água difusa (LITTLE, 1995)	38
Figura 2.3 – Distribuição granulométrica antes e após a compactação (ARULRAJAH <i>et al.</i> , 2011)	47
Figura 2.4 – Efeito da energia, intermediária e modificada: curva de Proctor (LEITE, 2007)	49
Figura 2.5 – Módulo de resiliência em função do grau de compactação da mistura de agregado reciclado (MOLENAAR e NIEKERK, 2002)	54
Figura 2.6 – Estado de tensões atuantes no ponto médio de uma camada de pavimento (HUANG, 2004)	57
Figura 2.7 – Equipamento para indução de trincas (AGRELA <i>et al.</i> , 2011)	63
Figura 3.1 – Fluxograma do estudo de comportamento do material em laboratório	68
Figura 3.2 – Fluxograma do estudo de comportamento <i>in situ</i>	68
Figura 3.3 – Processo de desconstrução das edificações: São Vito e Mercúrio (PINIWEB, 2013)	69
Figura 3.4 – (i) estocagem do RCD e retirada de materiais contaminantes, (ii) britagem do RCD, (iii) catação de contaminantes após britagem, e (iv) estocagem em pilha do agregado reciclado	70
Figura 3.5 – Agregado reciclado espalhado para fins de secagem ao ar e quarteamento	71
Figura 3.6 – Fluxograma de ensaios em laboratório	71
Figura 3.7– Equipamentos em laboratório para determinação da formados agregados: (i) segundo NBR 7809 (ABNT, 2006), (ii) segundo D4791 (ASTM, 2010).	73
Figura 3.8 – (i) acomodação dos agregados em molde, e (ii) aplicação de carga	74
Figura 3.9 – Ensaio e desgaste Los Angeles: (i) amostra de RCD antes do ensaio, e (ii) aspecto do RCD após quebra	74

Figura 3.10 – Determinação do CBR: (i) preparo das amostras dentro do cilindro CBR; (ii) amostras imersas em água para verificação da expansão	75
Figura 3.11 – Granulometria do RCD para compor amostras similares em laboratório para fins de ensaios	77
Figura 3.12 – Processo de dosagem e preparo de corpos de prova para ensaios de módulo de resiliência: (i) homogeneização com o aglomerante a seco, (ii) mistura e homogeneização com água potável, e (iii) compactação com cilindro tripartido e controle de camadas	78
Figura 4.1 – Localização dos trechos experimentais na Av. Sapopemba, São Paulo, SP	82
Figura 4.2 – Concepções estruturais dos três trechos experimentais: (i) RCD, (ii) RCD + 3% cimento, e (iii) RCD + 3% cal	83
Figura 4.3 – Pugmill e esteiras de distribuição de material reciclado em usina recicladora.....	84
Figura 4.4 – (i) coleta do material de subleito, e (ii) ensaio de perda por imersão do procedimento MCT	85
Figura 4.5 – (i) lançamento de RCD, e (ii) espalhamento com motoniveladora	85
Figura 4.6 – (i) compactação do RCD, e (ii) camada acabada.....	86
Figura 4.7 – Curva granulométrica da mistura 80%RAP +19%Pó de RAP e 1% cal CH-1	86
Figura 4.8 – Processos de aplicação do RAP espumado: (i) lançamento e espalhamento por vibroacabadora, (ii) compactação por rolo pneumático e liso, e (iii) aplicação da emulsão e “salgamento” com pó de RAP	88
Figura 4.9 – Execução da camada de revestimento: (i) limpeza por meio de vassoura mecânica e aplicação de pintura de ligação, e (ii) lançamento e compactação do CBUQ.....	88
Figura 5.1 – Curva granulométrica do RCD obtido para três amostras.....	89
Figura 5.2 – Secagem em estufa até constância da massa após lavagem.....	91
Figura 5.3 – Composição do RCD em função da sua natureza	91
Figura 5.4 – Composição por natureza: média de quatro corpos de prova por material	92
Figura 5.5 – Forma dos agregados: média de quatro corpos de prova por material ..	94
Figura 5.6 – Curvas de compactação dos materiais empregados na sub-base do trecho experimental.....	96

Figura 5.7 – (i) vista do corpo de prova compactado, e (ii) instrumentação para ensaio triaxial conforme ME 134 (DNIT, 2010).....	98
Figura 5.8 – Grau de compactação das amostras de MR e seus respectivos desvios	98
Figura 5.9 – Influência do grau de compactação para módulo de resiliência do RCD	99
Figura 5.10 – Influência da reação pozolânica residual no RCD.....	100
Figura 5.11 – Influência do tempo de cura nas misturas com RCD+3%cimento.....	101
Figura 5.12 – Influência do tempo de cura nas misturas com RCD+3%cal.....	101
Figura 5.13 – Comparativo entre idades de cura para todas as misturas da pesquisa.	102
Figura 5.14 – Situação do carregamento e da estrutura estudada durante a análise com o programa DIANA	106
Figura 5.15 – Tensões atuantes na estrutura com sub-base em RCD após avaliação com o programa DIANA	106
Figura 5.16 – Resultado médios da deformação permanente para as misturas estudadas.....	108
Figura 6.1 – Logística de levantamento: sentido centro e bairro	112
Figura 6.2 – Ensaio referentes a metodologia MCT: (i) expansão, (ii) CBR, (iii) permeabilidade, e (iv) contração	113
Figura 6.3 – Execução do furo de interesse e determinação da umidade pelo método do fogareiro	115
Figura 6.4 – (i) aspecto das amostras compactadas, e (ii) imersão em água durante o período de 24 horas para posterior ruptura	116
Figura 6.5 – Influência do tempo de cura no módulo de resiliência das misturas com RAP espumado, média de 2 corpos de prova	117
Figura 6.6 – (i) amostra compactada em laboratório, e (ii) instrumentação para ensaio de módulo de resiliência em mistura asfáltica	118
Figura 6.7 – Resumo da deformação permanente em laboratório obtida por simulador de tráfego LCPC.	120
Figura 6.8 – Medida de deflexão no eixo e na trilha externa da via	122
Figura 6.9 – Resumo das deflexões máximas e seus respectivos desvios para os meses de levantamento	127

Figura 6.10 – Precipitação acumulada ao longo dos meses: 2012 e 2013. (Fonte: INMET, 2013).....	128
Figura 6.11 – Exemplo de delineamento de bacia média retroanalizada – Segmento Homogêneo 1 – RCD Bairro – T=4M	131
Figura 6.12 – Resumo de módulos de resiliência obtidos após retroanálise para as misturas estudadas	136
Figura 6.13 – Exemplo de abaulamento da bacia de deflexão – segmento homogêneo 3 – T=10M	137
Figura 6.14 – Geometria de carregamento e distribuições de pressões segundo Balbo (2007).....	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Critérios de classificação de resíduos em Portugal (LNEC, 2009)	28
Tabela 2.2 – Resumo da classificação segundo a metodologia dinamarquesa (GARB <i>et al.</i> , 2011)	29
Tabela 2.3 – Resumo de requisitos para o agregado reciclado de RCD segundo especificações sueca e francesa (GOUX <i>et al.</i> , 2003; PIHL; MILVANG-JENSEN; BERG, 2003)	30
Tabela 2.4 – Resumo das especificações australianas: Estado de Victoria e região oeste da Austrália (GARB <i>et al.</i> , 2011)	32
Tabela 2.5 – Aplicação do RCD para aplicação em pavimentação, requisitos mínimos no Brasil ETS-001(PMSP, 2003) e NBR 15115 (ABNT, 2004)	33
Tabela 2.6 – Requisitos a serem atendidos para o emprego em concretos não estruturais (NBR 15116, ABNT, 2004)	41
Tabela 2.7 – Resultados de CBR de diferentes pesquisas	51
Tabela 2.8 – Média de valores de resistência a compressão simples (MOTTA, 2005)	55
Tabela 2.9 – Média de valores da resistência a compressão simples (AGRELA <i>et al.</i> , 2011)	55
Tabela 2.10 – Estudos que abordam a deformação permanente em materiais granulares	61
Tabela 2.11 – Valores médios de deflexão e módulo equivalente	64
Tabela 2.12 – Resumo de parâmetros para o controle executivo (HERRADOR <i>et al.</i> , 2012)	65
Tabela 2.13 – Valores críticos de T, quando o desvio é calculado no mesmo espaço amostral (GRUBBS, 1950)	67
Tabela 3.1 – Correção granulométrica e percentual em cada fração para misturas de RCD	77
Tabela 5.1 – Resultados referentes aos ensaios de índice de forma	93
Tabela 5.2 – Resumo do resultado dos 10% de finos	94
Tabela 5.3 – Média de valores da resistência à compressão simples.....	97

Tabela 5.4 – Módulos de resiliência retroanalizados obtidos para as estruturas em estudo	104
Tabela 5.5 – Comparativo das deflexões e tensões verticais na camada de RCD pelo ELSYM 5 e DIANA	104
Tabela 5.6 – Comparativo das deflexões e tensões verticais na camada de RCD +3% cim. pelo ELSYM 5 e DIANA.....	105
Tabela 5.7 – Comparativo das deflexões e tensões verticais na camada de RCD +3% cal pelo ELSYM 5 e DIANA.....	105
Tabela 5.8 – Relação de tensões assumida para os ensaios de deformação permanente.	107
Tabela 5.9 – Resumo de análises pelos modelos propostos.	110
Tabela 6.1 – Controle tecnológico das camadas de sub-base do trecho experimental	115
Tabela 6.2 – Resistência à tração por compressão diametral seco e úmido	116
Tabela 6.3 – Resumo de resultados obtidos com a mistura asfáltica aplicada ao revestimento.....	118
Tabela 6.4 – Tratamento estatístico dos dados do subleito segundo Grubbs (1969): deflexões máximas de campo	121
Tabela 6.5 – Tratamento estatístico segundo Grubbs (1969): segmentos homogêneos para T=4M	124
Tabela 6.6 – Tratamento estatístico segundo Grubbs (1969): segmentos homogêneos para T=10M	125
Tabela 6.7 – Tratamento estatístico segundo Grubbs (1969): segmentos homogêneos para T=16M	126
Tabela 6.8 – Exemplo de bacia delineada por retroanálise – Segmento Homogêneo 1 – RCD Bairro – T=4M.....	131
Tabela 6.9 – Resumo de módulos retroanalizados pelo BAKFAA: T=4M	132
Tabela 6.10 – Resumo de módulos retroanalizados pelo BAKFAA: T=10M	134
Tabela 6.11 – Resumo de módulos retroanalizados pelo BAKFAA: T=16M	135
Tabela 6.12 – Deflexão parcial de cada camada na deflexão total: T= 4M	139
Tabela 6.13 – Deflexão parcial de cada camada na deflexão total: T=10M	139
Tabela 6.14 – Deflexão parcial de cada camada na deflexão total: T=16M	140
Tabela 6.15 – Análise da contribuição de cada camada na deflexão total e tensão vertical no topo do subleito: T= 4M.....	140

Tabela 6.16 – Análise da contribuição de cada camada na deflexão total e tensão vertical no topo do subleito: T= 10M.....	141
Tabela 6.17 – Análise da contribuição de cada camada na deflexão total e tensão vertical no topo do subleito: T=16M.....	141
Tabela 6.18 – Equações para análise de desempenho proposta pela IP-DE-P00/001 (DER-SP, 2006)	142
Tabela 6.19 – Verificação mecanicista para os segmentos homogêneos propostos: T= 4M.....	143
Tabela 6.20 – Verificação mecanicista para os segmentos homogêneos propostos: T=10M.....	143
Tabela 6.21 - Verificação mecanicista para os segmentos homogêneos propostos: T=16M.....	144
Tabela 6.22 – Coeficientes estruturais	145
Tabela 6.23 – Parâmetros adotados para estimativa do CE para os materiais em estudo	147
Tabela 6.24 – Resumo de tensões encontradas na camada inferior	148
Tabela 6.25 – Redução relativa de tensões de cada material em relação a BGS...	148
Tabela 6.26 – Resumo de CE estimados com a avaliação geométrica e uso do sistema de camadas elásticas.....	149

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
AASTHO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BAKFAA	<i>Backcalculation of Federal Aviation Administration</i>
BGS	Brita graduada simples
BGTC	Brita graduada tratada com cimento
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
Cc	Coeficiente de curvatura
CDW	<i>Construction and Demolition Waste</i>
Cu	Coeficiente de uniformidade
DCP	<i>Dynamic Cone Penetrometer</i>
DIANA	<i>Displacement Method Analyzer</i>
ELSYM 5	<i>Elastic Layer System Model 5</i>
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
GC	Grau de compactação
IRI	<i>International Roughness Index</i>
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
MCT	Miniatura Compactado Tropical
N	Número de tráfego previsto conforme eixo padrão de 8,2 ton
NA'	Grupo de solo arenoso-siltoso não laterítico da classificação MCT
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
Rc	Resíduo de concreto
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RCD+3%cim.	Resíduo de Construção e Demolição com Adição em 3% de Cimento Portland

RCD+3%cal	Resíduo de Construção e Demolição com Adição em 3% de Cal Hidratada
Rcm	Resíduo cerâmico
RCS	Resistência à Compressão Simples
SC	Solo-cimento
TS	Tratamento superficial
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
USEPA	<i>United State Environmental Protection Agency</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

D_0	Deflexão máxima recuperável
K_1, K_2, K_3	Coefficientes determinados experimentalmente após execução do ensaio de módulo de resiliência
δ_1	Deflexão total do pavimento no topo do revestimento
δ_b	Deflexão no topo da camada de base
δ_{ref}	Deflexão no topo da camada de reforço
δ_{sb}	Deflexão no topo da camada de sub-base
δ_{sl}	Deflexão no topo do subleito
ϵ_p	Deformação plástica ou permanente
ϵ_t	Deformação de tração horizontal na fibra inferior do revestimento
ϵ_v	Deformação vertical compressiva no topo do subleito
ν	Coefficiente de Poisson
σ_1	Tensão atuante, tensão principal maior
σ_3	Tensão de confinamento, tensão principal menor
σ_d	Tensão desviadora, diferença entre tensões principais
σ_h	Tensão horizontal no ponto de avaliação
σ_z	Tensão vertical no ponto de avaliação

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xv
LISTA DE SÍMBOLOS	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 Objetivos	24
1.2 Estrutura da dissertação.....	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 Definições	27
2.2 Especificidades para pavimentação	29
2.3 Técnicas de processamento do RCD	33
2.4 Estabilização do agregado reciclado de RCD.....	35
2.5 Aplicação do agregado reciclado de RCD na engenharia	39
2.6 Características e propriedades do agregado reciclado de RCD	43
2.6.1 Natureza	43
2.6.2 Forma e resistência dos grãos.....	45
2.6.3 Graduação.....	46
2.6.4 Compactação	48
2.7 Propriedades mecânicas	50
2.7.1 Capacidade de suporte CBR	50
2.7.2 Módulo de resiliência triaxial.....	51
2.7.3 Resistência à compressão simples	54
2.7.4 Deformação permanente.....	56
2.8 Características e propriedades <i>in situ</i>	62
2.8.1 Controle executivo	62
2.8.2 Variabilidade	65
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	68
3.1 Materiais empregados e ensaios realizados	69
3.2 Características físicas, mecânicas e de estado do RCD.....	71
3.2.1 Granulometria	71

3.2.2	Natureza	72
3.2.3	Índice de forma	72
3.2.4	Resistência dos agregados graúdos	73
3.2.5	Resistência à abrasão	74
3.2.6	Dosagem da curva de Proctor	75
3.3	Propriedades mecânicas	75
3.3.1	California Bearing Ratio	75
3.3.2	Resistência à compressão simples	76
3.3.3	Módulo de resiliência	76
3.3.4	Deformação permanente acumulada	79
4	TRECHOS EXPERIMENTAIS	81
4.1	Concepção estrutural	81
4.2	Execução do trecho experimental	84
5	RESULTADOS EM LABORATÓRIO	89
5.1	Composição granulométrica	89
5.2	Natureza da composição e teor de contaminantes	91
5.3	Forma das partículas	93
5.4	Resistência pelo método dos 10% de finos	94
5.5	Resistência à abrasão das partículas	95
5.6	Curva de compactação e capacidade de suporte	95
5.7	Resistência à compressão simples	97
5.8	Módulo de resiliência	97
5.9	Deformação permanente triaxial	103
6	RESULTADOS EM CAMPO	110
6.1	Caracterização do subleito	113
6.2	Controle das camadas de sub-base	114
6.3	Controle das camadas de base	116
6.4	Controle da camada de revestimento	118
6.5	Controle deflectométrico por meio de Viga Benkelman	120
6.6	Controle deflectométrico por meio de FWD	122
6.7	Retroanálise	128
6.7.1	Retroanálise no período T=4M de levantamento	131
6.7.2	Retroanálise no período T=10M de levantamento	133

6.7.3	Retroanálise no período T=16M de levantamento	134
6.8	Contribuição relativa de cada camada na deflexão total	137
6.9	Análise mecanicista	141
6.10	Análise da equivalência estrutural.....	144
7	CONCLUSÕES.....	150
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
	ANEXO A – LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO DO CONTROLE TECNOLÓGICO POR FWD.....	160
	APÊNDICE A – AMOSTRAS PREPARADAS EM LABORATÓRIO E TENSÕES ATUANTES NAS ESTRUTURAS PELO DIANA.....	173
	APÊNDICE B – RETROANÁLISE DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS POR SEGMENTO HOMOGÊNEO.....	185

1 INTRODUÇÃO

A preocupação mundial em proporcionar um destino ambientalmente correto aos resíduos gerados pelas atividades de construção civil e demolição tem impulsionado o estudo de técnicas para a reutilização desses materiais. Estes resíduos apresentam um elevado potencial para reciclagem e utilização em diversos segmentos dentro da engenharia. Nas últimas décadas do século XX a demanda por materiais economicamente viáveis e de cunho socioambiental, tem forçado a iniciativa pública e privada a incorporar tecnologias com o intuito de minimizar os impactos ambientais pela extração de recursos naturais (ANGULO, 2005; MOTTA, 2005). Desde então, várias pesquisas e incentivos foram outorgados para um melhor conhecimento das propriedades destes materiais, com constantes técnicas desenvolvidas para o seu aprimoramento e posterior utilização.

Aliadas as pesquisas, políticas públicas de fomento à reciclagem e reuso de materiais foram aperfeiçoadas e agências reguladoras foram criadas com a finalidade de mediar às formas de reuso, citando como exemplo a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA). A cada ano são gerados novos montantes de resíduos sólidos urbanos de toda natureza, no entanto, seu maior montante deve-se às atividades relacionadas à construção civil, necessitando políticas e medidas de reutilização destes materiais com potencial de reciclagem.

Neste âmbito, Cochran e Townsend (2010) comentam que a quantidade de resíduo gerado em todo território americano é difícil de ser estimado, pois os dados da agência reguladora, USEPA remetem a estatísticas de 2003, tornando incertas as estimativas e definição de políticas quanto ao reuso e reciclagem. Esses pesquisadores propõem a consideração da análise de fluxo de materiais, a qual emprega o peso bruto do produto, tempo de vida médio do mesmo e a composição do resíduo. Os dados estatisticamente trabalhados nesta pesquisa são oriundos de agências que controlam o mercado de materiais de construção civil, como a PCA (*Portland Cement Association*). Em tal metodologia existem pontos positivos quanto ao ciclo de vida do material, pois assumem resíduos, aqueles descartados ou

abandonados durante a fase de manufatura, e possui adequada estimativa com previsões futuras de geração de resíduos. Suas limitações residem na não consideração da origem dos resíduos e que em vários casos podem superestimar a geração de materiais demolidos.

Segundo os mesmos pesquisadores, por esta metodologia de trabalho, o total de resíduos gerados para uma região dos Estados Unidos, ficou estimado entre 610 e 780 milhões de toneladas a depender da vida de serviço assumida ao material. A maior contribuição do total de resíduos compreende 42-59% de concreto de cimento Portland, 26-43% de concreto asfáltico, 6-7% de madeira, 1-3% de blocos e telhas cerâmicos entre outros.

Na Europa cerca de 461 milhões de toneladas de resíduo de construção e demolição são geradas todos os anos. O percentual de reciclagem por federação componente da União Europeia é variável, tendo, por exemplo, a Espanha uma taxa de reciclagem de 14% ao ano e a Holanda 98%. (JIMÉNEZ *et al.*, 2011).

No Brasil, o quantitativo de resíduos de construção e demolição está em cerca de 68,5 milhões de toneladas/ano (JOHN *et al.*, 2004). Tendo em vista que boa parte destes resíduos é destinada a aterro de inertes, os valores para deposição final crescem com a falta de áreas para tal prática, aumentando a necessidade de reuso para o equilíbrio econômico e sustentável.

Além disso, a instalação, de mecanismos de beneficiamento e reuso (usinas de reciclagem) destes resíduos em grandes centros urbanos, permite uma redução substancial no consumo de matérias primas básicas (agregados, areias e outros), bem como a diminuição da distância de transporte, proporcionando reduções de custo em obras que fazer uso destes resíduos para a engenharia (ULSEN, 2011).

No setor de pavimentação, o uso de agregados reciclados tem despertado grande interesse, devido ao grande volume empregado e ao fato destes materiais terem características adequadas para sua aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos. Seu aproveitamento é viável devido ao material possuir habilidade similar tal qual materiais convencionais, como as britas graduadas simples (BGS),

reduzindo e dissipando as tensões atuantes no subleito, caso se construa uma camada granular destes materiais sobre o solo.

Segundo apontam diversas pesquisas (LEITE, 2007; MOTTA, 2005; TSENG, 2010), após o processo de beneficiamento por cominuição, o resíduo de construção e demolição pode ser empregado em várias áreas da engenharia civil, como estruturas, fundações, aterros e, além destas, em estruturas de pavimentos. A transformação do RCD em agregado reciclado é realizada através de usinas recicladoras, onde este deve ser pré-selecionado, uma vez que a ocorrência de materiais tidos como indesejáveis (como vidro, metal, borracha, gesso e madeira) deve ser mínima. A seleção normalmente é feita por catação, podendo ainda haver sistemas auxiliares, como correias transportadoras e separador magnético que asseguram a remoção de materiais metálicos indesejados.

No Brasil, a primeira experiência de aplicação de RCD em pavimentação ocorreu na cidade de São Paulo nos anos 80. No início da década de 90, a PMSP (Prefeitura Municipal de São Paulo) adquiriu a primeira recicladora de RCD do Brasil e deu início aos trabalhos de reciclagem. Mas foi somente nos anos 2000 que esta técnica tomou impulso, principalmente com a publicação das duas normas que atualmente especificam o emprego de agregado reciclado de RCD em pavimentação: a ETS-001 (PMSP, 2003) da Prefeitura do Município de São Paulo e a NBR 15115 (ABNT, 2004).

Em 2006, a PMSP criou um decreto versando sobre a obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados oriundos dos resíduos de construção e demolição em obras e serviços de pavimentação em vias públicas do próprio município (PMSP, 2006), incentivado assim a prática do reuso.

Várias experiências em cidades localizadas nos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Bahia, Goiás, entre outros, são registradas (ANGULO, 2005; LEITE, 2007; MOTTA, 2005). Entretanto, mesmo disponíveis tais normas e aplicações com sucesso em campo, o emprego de agregado reciclado de RCD em pavimentação ainda não se dá de maneira efetiva. O estudo de suas propriedades

tem assim grande importância no sentido de contribuir para um maior conhecimento de suas características, além de impulsionar sua utilização.

Aplicações aliadas a estabilizações com aglomerantes do agregado do resíduo de construção e demolição foram observadas em abordagem laboratorial, para comprovação de melhora em características mecânicas (ANGULO, 2005; MOTTA, 2005). Existem, porém, poucos estudos que comprovem a eficácia das estabilizações com aglomerantes e agregados de resíduos de construção e demolição com aplicações de campo. No estudo desenvolvido por Agrela *et al.* (2011), os autores concluem que a estabilização promove um ganho de rigidez associada à diminuição da variabilidade de resposta estrutural do material, comprovado pelo baixo desvio padrão do controle de peso específico *in situ*, e umidade ótima.

A utilização deste material em pavimentação é relativamente recente, existindo ainda lacunas quanto ao emprego deste material, principalmente no que tange a critérios de dimensionamento de estruturas de pavimento, necessitando assim, o desenvolvimento de trabalhos para suprir estas dificuldades.

1.1 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo contribuir para um maior conhecimento das propriedades físicas, mecânicas e de estado, do agregado reciclado proveniente de RCD por meio de ensaios laboratoriais, da execução de sub-base de pavimentos e monitoramento de trechos experimentais em campo, com três tipos de misturas com agregado reciclado: (i) misto¹, (ii) misto com adição de cal, e (iii) misto com adição de cimento. A investigação a ser aprofundada, remete a:

1. Avaliar as propriedades físicas do agregado reciclado de RCD misto, verificando a sua aceitação quanto à aplicação em camada estrutural de pavimentos rodoviários;

¹ Misto é a designação empregada na literatura para agregados reciclados contendo materiais de várias naturezas, sendo principalmente cimentícios, cerâmicos e britas.

2. Detectar com abordagem laboratorial, as possíveis reações químicas presentes no material que conferem ganho de desempenho, na resposta quanto ao módulo de resiliência das misturas propostas;
3. Compreender o comportamento mecânico quanto à deformação permanente, com ensaios triaxiais de carga repetida para as misturas estudadas, e analisar a influência de cada ligante hidráulico no comportamento das misturas;
4. Verificar o comportamento mecânico *in situ* das estruturas de pavimento, com variação das misturas na camada de sub-base, por meio do cálculo do módulo de resiliência *in situ* (por retroanálise), com verificação dos efeitos sazonais durante os períodos de levantamento, detectando as possíveis melhoras de comportamento das misturas de referência, estabilizadas em relação à mistura de referência, constituída por RCD misto.

1.2 Estrutura da dissertação

No capítulo 1 é abordado à introdução do tema da pesquisa e a definição dos principais objetivos a serem alcançados.

O capítulo 2 remete à revisão bibliográfica do tema definido, com auxílio de um levantamento sistemático das informações relevantes, considerando conceitos, metodologias e resultados de pesquisas anteriores correlatas à aplicação do RCD em pavimentação e áreas afins.

No capítulo 3 são descritas as principais metodologias aplicadas à investigação em laboratório, discutindo os procedimentos relevantes em concordância a extrair os parâmetros chave da pesquisa, como resistência, rigidez e deformabilidade, por meio de ensaios de compressão simples, de módulo de resiliência e de deformação permanente.

No capítulo 4 é descrito a concepção e construção de trechos experimentais, mencionando as características construtivas e detalhes das campanhas relativas à medição das deflexões em campo.

No capítulo 5 é realizada a discussão dos principais resultados obtidos com relação aos estudos em laboratório. Propriedades físicas, mecânicas são analisadas.

No capítulo 6 são analisados os resultados referentes à metodologia aplicada ao levantamento de campo. Apresenta à campanha de levantamento deflectométrico, definição dos segmentos homogêneos, o levantamento da pluviometria mensal ao longo do estudo, a retroanálise e análise mecanicista considerando a concepção das estruturas, bem como uma proposta de coeficientes estruturais para os materiais avaliados.

O capítulo 7 é dedicado às considerações finais acerca do tema abordado e dos resultados obtidos em laboratório e em campo, comentando os principais fatores inerentes às respostas obtidas nas duas condições.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definições

O resíduo de construção e demolição pode ser definido como todo e qualquer material proveniente de desconstrução, construção, reformas, reparos e demolição de projetos de construção estruturais, geotécnicas, infraestrutura, entre outras. Segundo a resolução CONAMA n° 307 (CONAMA, 2002), que define as diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos de construção e demolição, os resíduos são oriundos de materiais manufaturados como: blocos cerâmicos, telhas, madeiras, concretos em geral, solos, rochas, materiais asfálticos, vidros plásticos, etc. A própria resolução define os resíduos em quatro classes quanto a sua aplicação e potencial de reciclagem:

- Classe A: reutilizáveis ou recicláveis, como agregados, oriundos de atividades de construção, demolição, reformas e reparos de obras de infraestrutura, edificações, terraplanagem e outros tais como: blocos cerâmicos, argamassas, concretos asfálticos, peças pré-moldadas, placas, telhas, etc;
- Classe B: recicláveis de outras atividades como: plásticos, papeis, metais, vidros, papelão, madeiras e gesso;
- Classe C: resíduos não aplicáveis à recuperação ou economicamente inviáveis a recuperação;
- Classe D: resíduos perigosos, provenientes de processos de construção, desconstrução e reparos de clínicas radiológicas e instalações industriais tais como tintas, solventes, óleos, e outros prejudiciais à saúde.

Na França, a prática remete que nos materiais de demolição há uma variedade de produtos e que nem todos são viáveis economicamente para reciclagem, necessitando que o resíduo com potencial ao reuso, passe por uma etapa de

seleção. A distinção do resíduo de demolição é feita principalmente pela sua natureza de composição e este é classificado em quatro categorias (GOUX *et al.*, 2003):

- Classe 1: materiais de desconstrução de edifícios e estruturas de concreto sem conter aço, gesso, amianto e outros resíduos industriais;
- Classe 2: materiais de desconstrução de pavimento, feito de camadas não tratadas ou tratadas com ligantes hidráulicos, ligantes asfálticos, entre outros;
- Classe 3: misturas de materiais compósitos (estruturas em concreto, alvenaria, etc) com níveis baixos de gesso, madeira, plástico;
- Classe 4: misturas heterogêneas com concentração de substâncias indesejáveis (gesso, madeira, plástico, etc) superiores a 10% em massa.

Na prática brasileira de tecnologia de materiais, tornou-se corrente classificar os resíduos após seu processamento (britados e selecionados) como: (i) agregados reciclados de concreto (predominância de aglomerações com pasta de cimento ou concreto), (ii) agregados reciclados de cerâmica (com predominância de agregações de blocos cerâmicos e telhas), e (iii) agregados reciclados mistos (com agregações tanto cerâmicas quanto a base de cimento Portland e rochas) (ANGULO, 2005; LEITE, 2007).

Em Portugal, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), desenvolveu especificações para o uso do RCD, bem como sua classificação (Tabela 2.1). Os produtos recicláveis são classificados em B ou C, de acordo com a natureza de seus constituintes após o produto ser beneficiado (LNEC, 2009). A aplicação em pavimentação resume-se a camadas de sub-base e base de vias de tráfego leve.

Tabela 2.1 – Critérios de classificação de resíduos em Portugal (LNEC, 2009)

Classe	$R_C + R_N + R_V$	R_{Cer}	R_{Asf}	G	C
B	$\geq 90\%$	$\leq 10\%$	$\leq 5\%$	$\leq 1\%$	$\leq 0,2\%$
C	$\geq 50\%$	$\leq 50\%$	$\leq 30\%$	$\leq 1\%$	$\leq 0,2\%$

Onde: R_C – Agregados de concreto e pasta de cimento;

R_N – Agregados naturais, agregados tratados;

R_V – Vidros;

R_{Cer} – Agregados cerâmicos;

R_{Asf} – Materiais betuminosos;

G – Gessos;

C – Contaminantes, como plásticos, borracha e etc.

Em geral, cada país possui um critério de classificação quanto à nomenclatura e ao uso, a depender principalmente do material oriundo do processo construtivo, das técnicas e das culturas construtivas, dos critérios (limites) de aceitação quanto a parâmetros geotécnicos, contaminantes e aplicação *in situ*.

2.2 Especificidades para pavimentação

Na Dinamarca, a classificação dos resíduos de concreto para uso em pavimentação é definida por critérios como módulo de elasticidade do material, resistência abrasiva pelo ensaio Los Angeles e pureza do mesmo (GARB *et al.*, 2011). Estes podem ser divididos em três classes (A, B e C), como observado na Tabela 2.2, onde as classes A e B poderão ser utilizadas como base em qualquer tipo de estrutura e a classe C tem seu uso limitado.

Tabela 2.2 – Resumo da classificação segundo a metodologia dinamarquesa (GARB *et al.*, 2011)

Propriedades	A	B	C
E (módulo de elasticidade) MPa	400	300	200
Abrasão Los Angeles % (máx.)	35	40	...
Concreto reciclado % (min.)	98	95	80
Materiais betuminosos % (máx.)	2	2	2
Concreto de baixa densidade % (máx.)	2	5	20
Vidros, plásticos, etc % (máx.)	2	5	20
Madeira, papel, etc % (máx.)	5	1	2
Poliuretano % (máx.)	0,02	0,02	0,02

Na Suécia, o uso em pavimentação acontece de maneira efetiva com agregados reciclados de concreto. A classificação destes passa pelos seguintes critérios: (i) módulo de elasticidade, (ii) resistência à abrasão pelo Micro-Deval, (iii) porosidade,

entre outras características. Os materiais são classificados em quatro classes de acordo com o nível de importância do projeto e suas solicitações. Os agregados reciclados de classe 1 e 2 podem ser utilizados como camada de base ou sub-base para baixo volume de tráfego (PIHL; MILVANG-JENSEN; BERG, 2003).

A França, divide o agregado reciclado de RCD em cinco categorias, a depender: (i) do diâmetro nominal das partículas, (ii) resistência à abrasão, e (iii) aplicação, e (iv) classe de tráfego. As categorias GR2, GR3 e GR4 podem ser utilizadas como base de pavimentos, diferenciadas segundo sua classe de tráfego, sendo o GR4 aplicável ao maior tráfego de projeto (GOUX *et al.*, 2003).

A Tabela 2.3 resume os requisitos necessários à aplicação do agregado reciclado de RCD de acordo com as especificações suecas e francesas para uso em pavimentação.

Tabela 2.3 – Resumo de requisitos para o agregado reciclado de RCD segundo especificações sueca e francesa (GOUX *et al.*, 2003; PIHL; MILVANG-JENSEN; BERG, 2003)

Agregado reciclado	Suécia		França		
Características / Classes	Classe 1	Classe 2	GR2	GR3	GR4
Distribuição 0/Dmáx, (mm)	-	-	0/31,5	0/20	0/20
Módulo de elasticidade E (mín) (MPa)	450	450	-	-	-
Abrasão Los Angeles (máx) (%)	-	-	45	40	35
Porosidade (máx)	0,32	0,32	-	-	-
Micro-Deval (máx)	25	35	45	35	30
(%) de reciclado de concreto	100	95	-	-	-

Percentuais permitidos de materiais indesejáveis

(%) de reciclado de concreto	100	95	Considera a solubilidade ao sulfato Fração acima 4,8 mm ($\leq 0,7\%$ em massa) Fração abaixo da 4,8 mm ($\leq 0,7\%$ em massa)
Cerâmica de alta densidade $>1,6\text{g/cm}^3$ (máx) (%)	0	5	
Concreto de baixa densidade $<1,6\text{g/cm}^3$ (máx) (%)	0	1	
Outros materiais como madeira, plástico e etc (máx) (%)	0	0,5	

Na Austrália, existem algumas especificações para uso em pavimentação que dependem da região e do estado de aplicação e da atuação do departamento de transportes. A especificação do oeste australiano é pautada principalmente nas experiências de campo, com construção de trechos experimentais com agregados reciclados de concreto e a condução de estudos de caso com análise de tensões e deformações, subdividindo o uso quanto à responsabilidade estrutural em: (i) camada de base e (ii) camada de sub-base (GARB *et al.*, 2011)

A especificação do estado de Victoria (VicRoads), por exemplo, subdivide o agregado reciclado de concreto em três categorias: (i) camada de base para tráfego leve, (ii) camada de sub-base para tráfego pesado, e (iii) camada de sub-base para tráfego meio pesado. Na Tabela 2.4 pode ser vista a diferença entre especificações na Austrália, a depender da região. Pode-se observar que para o uso deste material como base, apesar de ser aplicável a tráfego leve (baixo volume de tráfego), os requisitos são mais restritivos que para o material de sub-base, embora estes sejam para tráfego pesado ou meio pesado.

Tabela 2.4 – Resumo das especificações australianas: Estado de Victoria e região oeste da Austrália (GARB *et al.*, 2011)

Características / Classes	Oeste australiano		Estado de Victoria		
	Base	Sub-base	Base para tráfego leve	Sub-base para tráfego pesado	Sub-base para tráfego meio pesado
Peneira 37,5 mm	...	100	...	...	...
26,50	100	...	100	100	100
19,00	95-100	71-100	95-100	95-100	...
13,20	...	...	78-92	75-95	...
9,50	59-80	...	63-83	60-90	...
4,75	41-60	36-65	44-64	42-76	42-76
2,36	29-45	...	30-48	28-60	...
1,18	20-35	...	...	...	...
0,60	13-27	...	...	...	...
0,42	10-23	...	13-21	10-28	10-28
0,30	8-20	...	...	...	...
0,15	5-14	...	...	...	...
0,075	3-11	2-14	5-9	2-10	2-14
Limite de Liquidez (%) (máx)	35	45	35	35	40
Índice de Plasticidade (%) (máx)	...	...	6	10	20
Califórnia Bearing Ratio após 4 dias de imersão (%) (min)	100	50	100	80	20
Abrasão a Los Angeles (%) (máx)	40	45	35	40	45
Resistência a compressão simples após 7 dias (máx) MPa	0-1	1	...	...	...
Metais, vidro e cerâmica (%) (máx)	10	15	2	3	5
Plástico, borracha e etc (%) (máx)	2	3	0,5	1	3
Madeira e matéria orgânica (%) (máx)	0,5	1	0,1	0,2	0,5

As especificações nacionais, por sua vez, limitam-se à aplicação em vias com baixo volume de tráfego ($N \leq 10^6$) e, quando comparadas às especificações de outros países, não limitam os agregados reciclados em faixas de distribuição granulométrica, mas apenas frações em certas peneiras, não assumem limites ao módulo de resiliência, fornecendo seu controle de propriedades através de: (i) parâmetros de curvatura da distribuição granulométrica, (ii) forma dos grãos, (iii) percentual de contaminantes, (iv) capacidade de suporte pelo CBR e outros requisitos como resistência a compressão simples em caso de inclusão de ligantes hidráulicos. Na Tabela 2.5 é apresentado o resumo de especificações que versam sobre o uso do agregado de RCD em pavimentação como camada de base ou sub-base, constantes nas normativas ETS-001 (PMSP, 2003) e NBR 15115 (ABNT, 2004)

Tabela 2.5 – Aplicação do RCD para aplicação em pavimentação, requisitos mínimos no Brasil ETS-001(PMSP, 2003) e NBR 15115 (ABNT, 2004)

Propriedade/Especificação	ETS-001			NBR 15115		
Dimensão máx. característica (máx. 2/3 da camada)	50,0 mm			63,5 mm		
Coeficiente de curvatura	1 a 3			-		
Coeficiente de uniformidade	≥ 10			≥ 10		
Passante na peneira 0,42 mm	entre 10 e 30%			entre 10 e 40%		
Estabilização com aglomerante	Resistência à compressão simples após 7dias ≥ 2,1 MPa					
	(energia especificada)					
Grãos lamelares na fração graúda (> 4,8 mm)	≤ 30%			≤ 30%		
Materiais indesejáveis	≤ 2 a 3%			≤ 2 a 3%		
Camada	CBR (%)	Expansão (%)	Energia	CBR (%)	Expansão (%)	Energia
Ref. do subleito	≥ 12	≤ 1	Normal	≥ 12	≤ 1	Normal
Sub-base	≥ 20	≤ 1	Interm.	≥ 20	≤ 1	Interm.
Aplicação à base quanto ao número de tráfego	N ≤ 10 ⁵			N ≤ 10 ⁶		
Base	≥ 60	≤ 0,5	Interm.	≥ 60	≤ 0,5	Interm.

2.3 Técnicas de processamento do RCD

No contexto de tratamento e reciclagem de resíduos da construção e demolição, as técnicas de processamento estão intimamente ligadas às técnicas de mineração ou produção de agregados naturais (ANGULO, 2005). Comumente no Brasil, existe uma série de procedimentos que convencionalmente é empregada às plantas de reciclagem do país. A norma NBR 15114 (ABNT, 2004) descreve os principais requisitos para instalação das plantas de reciclagem.

Para o uso de agregados reciclados de construção e demolição, as especificações, tanto nacionais quanto internacionais, preconizam requisitos importantes para manutenção das características funcionais e estruturais de uma camada de pavimento com o uso destes agregados, principalmente como camada granular de

comportamento mecânico similar à de uma BGS. No entanto, tais recomendações apenas podem ser atingidas caso o RCD seja processado, beneficiado e reciclado.

Garb *et al.* (2011) comentam que a experiência australiana, em linhas gerais, adota a seguinte sequência de reciclagem: (i) remoção inicial de materiais indesejáveis, (ii) britagem, (iii) armazenamento, e (iv) classificação dos agregados produzidos. Em primeiro lugar, os resíduos de demolição de concreto são levados à unidade de processamento central, são limpos e separados por sua constituição de natureza. Em seguida, o RCD é triturado em pedaços por britadores ou rompedores, seguidos da remoção do aço aderido ao RCD remanescente por separadores magnéticos. O material então é britado novamente, classificado e armazenado.

Na Espanha, Herrador *et al.* (2012), trabalhando com resíduos de concreto, cerâmica e concreto asfáltico, aplicaram em seu procedimento uma lavagem preliminar manual e mecânica para eliminação de impurezas como plástico, madeira e papel, seguida da retirada mecanizada de armaduras expostas no RCD remanescente. Na sequência, o RCD foi reduzido de tamanho em britador de impacto, sendo o produto final repassado a uma câmara seletora onde o material é classificado e separado de acordo com o interesse. Os pesquisadores ressaltam que tal técnica diminui os efeitos de heterogeneidade e também a concentração de agentes nocivos (gesso, plástico, metais, madeiras e outros) ao agregado reciclado para aplicação em pavimentação.

Na cidade de Málaga, município espanhol, a experiência com reciclagem de concreto e produtos cerâmicos dá-se através do uso do britador de impacto. O procedimento em planta de reciclagem consiste em: (i) classificação inicial entre resíduo de concreto e cerâmico, (ii) remoção de materiais orgânicos ou não inertes, (iii) britagem por meio de britador de impacto, e (iv) triagem final e classificação. Com os agregados reciclados produzidos, é realizado um controle de qualidade quanto a parâmetros de índice de forma, resistência à abrasão Los Angeles, equivalente de areia, entre outros, apresentando o agregado reciclado resultados satisfatórios para aplicação como camada de sub-base de pavimento (AGRELA *et al.*, 2011).

Por sua vez, propondo um processo para separabilidade de areias oriundas do processo de cominuição dos resíduos de construção e demolição, principalmente de estruturas e peças de concreto e argamassas, Ulsen *et al.*(2012) desenvolveram um processo de separação que consiste em: (i) peneiramento úmido da fração areia, (ii) separação por líquidos densos, (iii) separação por decantação e (iv) separação por suscetibilidade magnética. O objetivo é separar as partículas (quartzo/feldspato) dos agregados naturais, das partículas enriquecidas com pasta de cimento aderido. Os resultados em escala laboratorial apontam que o processo foi eficiente para frações abaixo da peneira 1,2 mm e a suscetibilidade magnética mostrou-se eficiente para detectar a presença de partículas ricas em pasta de cimento.

Segundo a bibliografia em geral, os procedimentos de reciclagem demandam a realização das seguintes etapas: (i) coleta ou concentração das fases e sua caracterização inicial quanto à sua natureza, (ii) separação manual ou mecanizada para retirada de contaminantes orgânicos, como papéis e madeira, (iii) separação magnética, ou remoção de contaminantes inorgânicos, como materiais metálicos ferrosos, (iv) cominuição por britagem (esforços compressivos ou de impacto), a depender do dispositivo de cominuição, (v) classificação por tamanho, com o emprego de peneiras e correias transportadoras e (vi) concentração do produto final em pilhas ou baias, a depender do tamanho máximo nominal do agregado (ANGULO, 2005; LEITE, 2007; MOTTA, 2005; TSENG 2010).

2.4 Estabilização do agregado reciclado de RCD

Os tratamentos de camadas granulares de pavimentos, de grande relevância na concepção estrutural de estruturas de pavimento, resumem-se basicamente a dois grandes grupos de estabilização: (i) granulométrica, e (ii) com adição de aglomerantes (cal, cimento Portland, ou outro). O primeiro, por vezes, consiste no encaixe granulométrico segundo uma limitação física imposta por procedimentos normativos, o qual concebe materiais com curvas granulométricas, em geral, bem distribuídas. No segundo grupo, no entanto, o agente para promover a estabilização é um aglomerante hidráulico que potencializa o aumento de rigidez e da resistência à flexão do material estabilizado (BALBO, 2007).

Muitos países aplicam a estabilização de materiais granulares a tempos, com isso, adquiriram experiência e desenvolveram procedimentos e concepções estruturais para aplicação destes materiais em camadas de pavimento. No entanto, devido ao incremento de novos agentes estabilizantes e ao uso de materiais reciclados, novas pesquisas e conclusões a cerca das propriedades físicas e mecânicas dos materiais são constantemente adquiridas (XUAN *et al.*, 2011).

Na estabilização com cimento, por exemplo, Xuan *et al.* (2011) comentam que seja qual for o material a ser tratado (solo, mistura granular, ou outro), a estabilização com cimento é aplicada devido às seguintes razões: (i) melhorar a trabalhabilidade dos materiais de pavimentação, (ii) aumentar a resistência mecânica do material estabilizado, (iii) aumentar a durabilidade, e (iv) aumentar a capacidade de suporte às solicitações. A sua melhora mecânica, acontece pela melhora na estrutura intragranular e hidratação do aglomerante presente, como apresentado na Figura 2.1.

As reações químicas que acontecem em materiais estabilizados com cimento necessitam da presença de água no meio, conferindo a hidratação do cimento Portland e formação dos hidróxidos de cálcio e silicatos hidratados de cálcio, que proporcionam ganhos de resistência do material cimentado (BALBO, 2007). Apesar dos mecanismos de ganho de resistência serem os mesmos (hidratação do cimento) em misturas com adição de cimento, nas granulares, as reações conferem ligações pontuais entre grãos e a pasta de cimento gerada após a hidratação, e para solos a hidratação do cimento forma uma matriz que envolve os grãos de solo pela pasta de cimento.

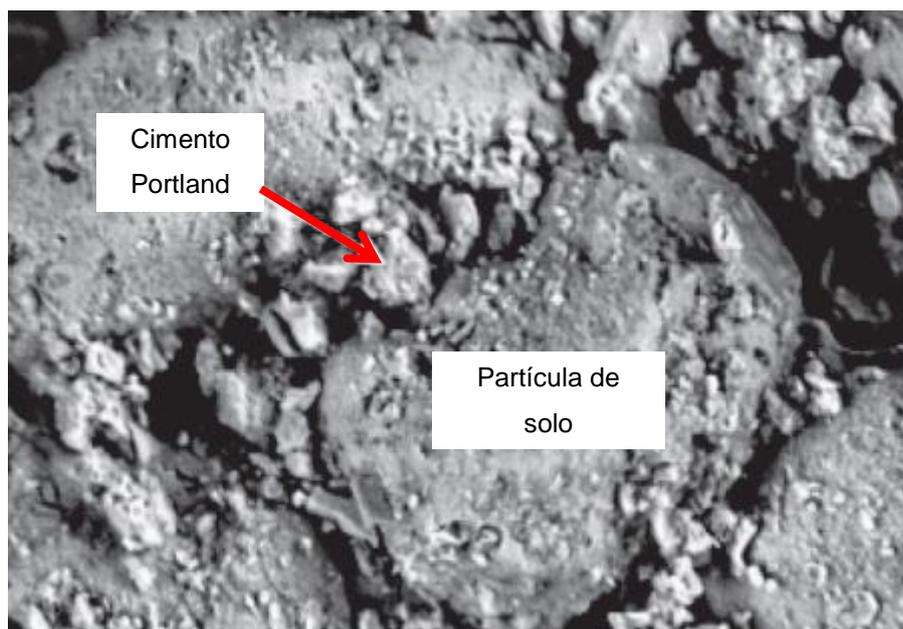


Figura 2.1 – Ligação física, entre solo e aglomerante (adaptado de Xuan *et al.*, 2011)

Segundo a experiência e conhecimento adquirido, o comportamento mecânico das misturas com adição de aglomerantes é potencialmente governado por propriedades como: (i) tipo de agregado, ou solo presente, (ii) graduação, (iii) grau de compactação, (iv) teor de cimento, (v) teor de finos, (vi) teor de umidade, (vii) tempo de cura, (viii) condições de cura, e (ix) fatores ambientais.

Por sua vez, a estabilização com cal, muito difundida no meio técnico para solos de granulometria fina (argilosa) visa melhorar propriedades como: (i) capacidade de suporte do material em condição de mistura estabilizada, (ii) plasticidade do solo, (iii) trabalhabilidade devido à modificação na textura por floculação do material, (iv) intercepto coesivo do material e consequentemente da resistência ao cisalhamento do solo estabilizado, e (v) rigidez com possíveis reações pozolânicas a longo prazo (ARAUJO, 2009).

Os mecanismos de associação química entre o solo (granulometria fina) e a cal acontecem devido ao sistema físico-químico da partícula de argila com a água. As partículas de argila são muito pequenas, e possuem uma enorme área específica. A superfície da partícula torna-se ativa devido à demasiada área específica disponível e facilmente absorve líquidos polares como a água e cátions livres no meio ambiente. Esta associação da partícula de argila à água resulta em uma camada

difusa de água, repulsando a interação entre as partículas de argila, tornando o meio instável (LITTLE, 1995).

Com a adição de cal ao meio partícula-água (solo de granulometria fina) há reação primária, como troca de cátions e alteração na camada difusa de água (redução em espessura), tornando as partículas do solo próximas pela atração face e canto da partícula, promovendo a estabilização e floculação do solo (LITTLE, 1995). A Figura 2.2 apresenta o efeito das reações primárias na estabilização solo-cal.

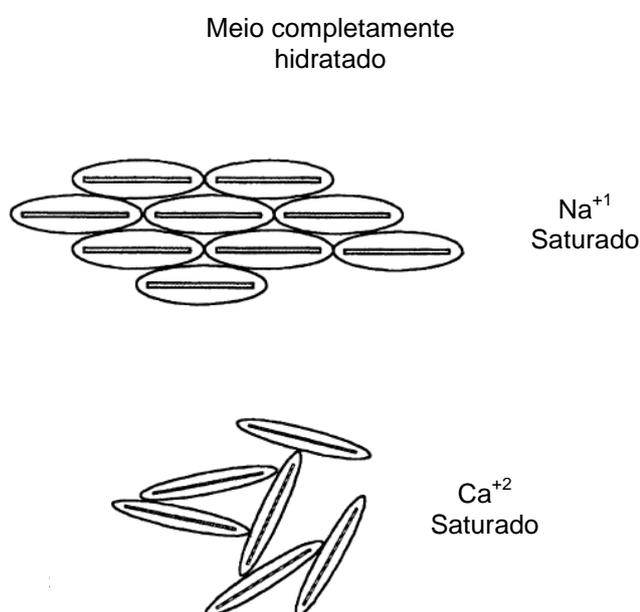


Figura 2.2 – Mudança na textura do solo (argiloso) devido a troca catiônica e estabilização da camada de água difusa (LITTLE, 1995)

Caso o solo estabilizado possua fases mineralógicas como sílica ou alumina presentes em sua constituição, pode ocorrer uma etapa secundária com reações pozolânicas. A pozolana é definida como um material silício, ou aluminoso o qual na presença de água e hidróxido de cálcio (cal) formam um produto cimentante. Este produto é conhecido como silicatos de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratados (LITTLE, 1995). São os mesmos hidratos que são formados durante a reação de hidratação do cimento Portland. Estas reações podem se desenvolver com o tempo, aumentando a rigidez do solo que antes não possuía capacidade de suporte adequada, conferindo a este estabilidade às solicitações.

No que tange ao acontecimento destes fenômenos reativos nas estabilizações de agregado reciclado de RCD com cal, o material em questão, quando de categoria mista, possui diversos constituintes em sua natureza. Constituintes como a cerâmica (em presença de fração fina) e solos de granulometria fina apresentam a possibilidade de ocorrência de fases mineralógicas como sílica ou alumina, propiciando o acontecimento de reações pozolânicas, com o posterior aumento da capacidade de suporte do material, trabalhabilidade e estabilidade (BARONIO e BINDA, 1997; VEGAS *et al.*, 2011).

A maioria das experiências com estabilização de RCD versa sobre conclusões de cunho laboratorial, na caracterização quanto à ruptura por compressão simples ou por tração por compressão diametral (ANGULO, 2005; MOTTA, 2005; TSENG, 2010).

Na Espanha, existem experiências com trechos experimentais, de 300,0 metros de comprimento, compostos com materiais reciclados de concreto e cerâmico com adição de cimento (composto por cinza volante contendo 20% de sílica), para camadas de sub-base com 20,0 cm de espessura, estando sobrejacentes a um subleito estabilizado com 3% do mesmo cimento (AGRELA *et al.*, 2011).

O primeiro trecho foi definido com agregados naturais de ardósia (“controle”) com adição em 3% de cimento. O segundo era composto com reciclado de concreto (50%) e cerâmica (50%) mais a incorporação em 3% de cimento. Por fim, o terceiro possuía 34% de concreto e 66% de cerâmica com adição de 3% cimento. A porcentagem de cimento refere-se à massa seca de agregados e a energia empregada foi Proctor modificada. Os resultados apontam um adequado comportamento mecânico dos materiais reciclados estabilizados com cimento, tanto do ponto de vista da ruptura por compressão simples, quanto à medição de deflexões na estrutura de pavimento em campo (AGRELA *et al.*, 2011).

2.5 Aplicação do agregado reciclado de RCD na engenharia

Impulsionado pela conservação e manutenção dos recursos naturais, o uso de resíduos reciclados de construção e demolição civil tornou-se notório nos dias

atuais. No entanto, a prática da reciclagem e da reutilização destes materiais advém após a Segunda Guerra Mundial, na experiência adquirida no processo de reconstrução da Alemanha (RAO; JHA; MISRA, 2007). Desde então, muitas pesquisas foram desenvolvidas no âmbito mundial com a intenção de conhecer a fundo as propriedades e as limitações ao uso deste material em várias áreas da engenharia.

Atualmente existem especificações quanto ao uso de agregados reciclados de construção e demolição em diversas áreas da engenharia, e suas especificações variam em sinergia quanto ao uso e refino do material em questão.

Como uso de agregados reciclados para concreto, por exemplo, a experiência mostra que sua resistência, porosidade, desgaste abrasivo, bem como sua distribuição granulométrica, influenciam sensivelmente em um posterior comportamento mecânico, bem como em seu comportamento reológico. (ANGULO, 2005; RAO; JHA; MISRA, 2007).

A RILEM (RILEM, 1994), por exemplo, recomenda em suas especificações para uso de RCD em concretos as seguintes diretrizes: (i) ao propor uma mistura de concreto com agregados reciclados de qualidade variável, um maior desvio padrão deve ser empregado com o objetivo de determinar a resistência média de interesse com base em uma resistência característica requerida, (ii) quando o agregado reciclado é misturado com areia natural, pode-se supor na fase de dosagem, que a relação água/cimento livre, necessária para uma determinada resistência à compressão, vai ser a mesma tanto para concretos com agregados reciclados, como para concretos com traços convencionais, (iii) para uma mistura de agregado reciclado alcançar o mesmo abatimento, o teor de água livre será cerca de 5% maior do que para o concreto convencional, e (iv) a proporção de areia/agregado em concretos com agregados reciclados é a mesma que se utiliza em agregados naturais.

No Brasil, existe o procedimento normativo NBR 15116 (ABNT, 2004) que estabelece as diretrizes para preparo de concretos sem função estrutural, com resistência mecânica à compressão simples de até 15 MPa, como apresentado na Tabela 2.6. A norma supracitada define requisitos gerais para utilização de

agregados reciclados do tipo: (i) agregado de resíduo de concreto (ARC) e (ii) agregado de resíduo misto (ARM).

Tabela 2.6 – Requisitos a serem atendidos para o emprego em concretos não estruturais (NBR 15116, ABNT, 2004)

Propriedades		Agregados reciclados classe A			
		ARC		ARM	
		Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo
Classificação de acordo com o percentual de fragmentos à base de cimento e rochas (%)		≥90	-	<90	-
Absorção de água (%)		≤7	≤12	≤12	≤17
Teor de contaminantes	Cloretos	≤1			
	Sulfatos	≤1			
	Materiais não minerais	≤2			
	Torrões de argila	≤2			
	Total máximo de contaminantes	≤3			
(%) passante na peneira 0,075 mm		≤10	≤15	≤10	≤20

Para o uso de agregados de RCD em pavimentação, existem varias experiências de sucesso que comprovam tanto no âmbito laboratorial, como de campo, que há eficácia na aplicação destes agregados em camadas de pavimentos sob solicitação de tensões verticais de menor magnitude (AGRELA *et al.*, 2011; HERRADOR *et al.*, 2012; LEITE, 2007; JIMÉNEZ *et al.*, 2011; MOLENAAR e NIEKERK, 2002; MOTTA, 2005). As especificações destes materiais variam com o órgão viário e a nacionalidade, a depender principalmente de características como: (i) graduação, (ii) teor de contaminantes, (iii) CBR e (iv) abrasão Los Angeles , entre outros critérios como citados no sub-ítem 2.2.

Por sua estrutura ser essencialmente granular, o agregado reciclado de RCD muitas vezes substitui os materiais das camadas de base, sub-base e reforço, como a BGS, em estruturas de pavimentos flexíveis.

Na Espanha, Jiménez *et al.* (2011), executaram trechos experimentais como camada de base com mistura de agregados reciclados de categoria mista e tratamento primário com agregados de concreto reciclados para vias de baixo volume de tráfego. Os materiais foram coletados em pista e inicialmente caracterizados em laboratório quanto à sua composição por natureza, distribuição granulométrica, características físicas, características de estado e características mecânicas, para validação do seu uso frente às especificações.

Concomitantemente, foram realizados controles de qualidade em campo, determinação da umidade e peso específico aparente *in situ*, tanto no subleito como na base e no tratamento primário. Os resultados foram comparados com o ensaio de Proctor modificado das amostras compactadas em laboratório. Avaliaram neste estudo: (i) o peso específico aparente *in situ* do material utilizado na camada de revestimento ao longo de três anos consecutivos para verificação da sua variabilidade com o tempo, (ii) os controles por levantamento deflectométrico com *Falling Weight Deflectometer* (FWD), e (iii) irregularidade longitudinal por meio do IRI (*International Roughness Index*). Os resultados apontam um adequado desempenho para a aplicação do experimento.

No Brasil, Leite (2007) utilizou agregados reciclados em quatro seções experimentais, tanto como camada de sub-base, quanto como camada de base com espessuras variáveis. Nesse estudo, compararam-se os resultados obtidos com um trecho de controle, onde a camada de base era composta de material granular (BGS) e sua sub-base em agregado reciclado. O revestimento consistia de camada de concreto asfáltico, com 10,0 cm de espessura para todos os trechos estudados, dividido em *binder* e camada de rolamento.

O dimensionamento foi realizado pelo método do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) para pavimentos flexíveis (DNIT, 2006), sendo posteriormente feita uma análise mecanicista com o emprego da ferramenta computacional ELSYM5, analisando tensões, deformações e deflexões nos pontos críticos da estrutura do pavimento.

Leite (2007) comenta que o levantamento estrutural foi realizado por meio de FWD e suas respostas por análise de deflexões máximas e retroanálise de bacias de deflexão de campo apontaram comportamento similar do agregado reciclado com o da BGS, possuindo valores de módulo retroanalizados muito próximos, ambos na ordem de 300 MPa. A diferença entre o material reciclado e o natural britado reside na variabilidade do resultado, sendo maior no primeiro. Dada esta característica, a autora reafirma a importância de uso de elevadas energias de compactação para melhorar a homogeneidade de resposta estrutural do material.

2.6 Características e propriedades do agregado reciclado de RCD

2.6.1 Natureza

A heterogeneidade é uma característica inerente aos resíduos de construção e demolição, tanto nas frações granulométricas produzidas, com variados tamanhos e graduações, quanto em sua natureza de composição que, por muitas vezes, devido ao processo de desconstrução, ou de descarte, e também pela cultura construtiva, podem encontrar-se contaminados por materiais inorgânicos (metais/ligas metálicas) ou orgânicos (madeira, papel e outros).

Devido a esta condição de heterogeneidade, tanto em frações quanto em natureza, torna-se por vezes difícil quantificar as fases presentes. A forma com que esta é quantificada influencia significativamente na descrição do material quanto à sua natureza e também nas propriedades mecânicas. Segundo Angulo (2005), é provável que a dureza dos agregados reciclados possa ser variável dentre as frações granulométricas, devido às fases químicas e mineralógicas presentes em cada fração.

Em geral, os processos de caracterização do RCD quanto à sua natureza para emprego como material de pavimentação é simplificado. A quantificação passa por peneira de corte 4,8 mm, que separa as partículas graúdas (acima de 4,8 mm) das partículas miúdas (abaixo de 4,8 mm) e, com a fração grosseira é realizada a catação e separação de componentes, por processo visual e divisão em classes como: (i) rocha, (ii) cerâmica, (iii) pasta de cimento, e (iv) materiais contaminantes

(inorgânicos e orgânicos). Estas medidas são efetuadas em peso, e a posteriori, são calculados seus percentuais em função da massa total de uma amostra (BARBUDO *et al.*, 2011; LEITE, 2007; MOTTA, 2005).

Angulo (2005) propôs uma caracterização avançada de RCD, utilizando-se da análise química e mineralógica. A análise química passou pelo processo de fluorescência de raio x, que consiste na quantificação das fases químicas presentes por análise qualitativa e obtenção de espectros dos elementos presentes no composto avaliado. A análise mineralógica foi realizada pela técnica de difração por raio x e esta, por sua vez, identifica as fases cristalinas, tanto orgânicas como inorgânicas.

Atualmente, há o emprego da técnica de separação por líquidos densos que devido à diferença de densidades das partículas e fases mineralógicas no agregado reciclado, separa as partículas. A técnica utiliza líquidos com densidades intermediárias para separar partículas densas de partículas leves (ANGULO, 2005).

Existem ainda técnicas para quantificação de fases contaminantes ou indesejáveis que, são mais ou menos restritivas, a depender do órgão e país de origem. No Brasil, o procedimento para determinação do teor de contaminantes consiste nos anexos A e B da norma NBR 15116 (ABNT, 2004), sendo o procedimento A, determinação por análise visual e catação de frações acima da peneira 4,8 mm e o procedimento B, a determinação por líquidos densos de frações retidas na peneira 0,3 mm.

Para o perfeito entrosamento da mistura de agregado reciclado de RCD em estruturas de pavimentação como camada granular, estes necessitam sumariamente que os agentes contaminantes sejam controlados, pois estes podem ocasionar patologias como: deformações mesmo após a compactação e a falta de coesão do material (MOTTA, 2005).

De acordo com Barbudo *et al.* (2011), caso o agregado reciclado seja aplicado para concretos trabalhando como britas graduadas tratadas com cimento (BGTC), a exemplo, o teor de sulfato remanescente presente no material, pode promover a

expansão (variação volumétrica) e trincamento do mesmo. Portanto, a solubilidade ao sulfato deve ser restringida em materiais de pavimentação para garantir a estabilidade da mistura trabalhada, e para evitar potenciais efeitos adversos devido à presença de sulfatos.

2.6.2 Forma e resistência dos grãos

Com grande relevância no que tange às características de agregados convencionais, como a BGS, para uso principalmente em camadas de base, sub-base ou reforço do subleito, a forma e a resistência das partículas mais graúdas (>4,8 mm) envolvidas no material contribui significativamente no comportamento ao cisalhamento quando submetido às cargas aplicadas a uma determinada estrutura de pavimento.

Leite (2007) e Motta (2005) ressaltam que misturas com agregados reciclados com formas de partículas cúbicas apresentam maior resistência ao efeito das cargas e, conseqüentemente, maior vida útil do material. Poon e Chan (2006) realçam que a resistência ao cisalhamento de misturas recicladas pode ser influenciada também pela sua porosidade: agregados mais porosos tendem a possuir menor resistência ao cisalhamento.

Países como a Itália, Holanda, Austrália e outros, possuem especificações acerca da forma, resistência de agregados de RCD para uso em pavimentação (GARB *et al.*, 2011). No Brasil, as especificações normativas ao uso em pavimentação (PMSP ETS-001 2003; ABNT NBR 15115 2004) tratam apenas do controle de material lamelar para agregados maiores que 4,8 mm, onde sua presença deve ser inferior a 30% em amostras em laboratório.

Assim como em agregados naturais, a forma dos grãos pode servir como limite ao controle de qualidade do material. No entanto, devido ao agregado de RCD possuir maior capacidade de quebra, este aspecto deve ser investigado, como abordado por Leite (2007). A pesquisadora ressalta que materiais que possivelmente não se enquadrem nos requisitos normativos, não devem ser excluídos preliminarmente

sem uma análise, devendo-se estudar os parâmetros de controle após o processo de compactação.

2.6.3 Graduação

Fator muitas vezes preponderante para um bom desempenho de materiais de pavimentação, a curva granulométrica de materiais reciclados no Brasil para uso em pavimentação não impõe faixas (superior e inferior) nos procedimentos normativos (PMSP ETS 001, 2003; ABNT NBR 15115, 2004) quanto à sua distribuição, reservando-se a parâmetros de controle granulométrico como: (i) coeficiente de uniformidade (C_u), (ii) coeficiente de curvatura (C_c), (iii) diâmetro máximo dos grãos ($D_{máx}$), e (iv) porcentagem de passantes na peneira 0,42 mm (porcentagem abaixo da peneira n°40).

Esta graduação, por vezes, depende muito da forma como os agregados são cominuidos (britagem ou moagem) e do tipo de dispositivo empregado para redução de tamanho (britadores de impacto, mandíbula, cônicos, moinhos de rolo, entre outros). Tseng (2010) avaliou o efeito do tipo de britador (mandíbula e impacto) nas curvas granulométricas produzidas de RCD oriundos da demolição de pavimentos de concreto e constatou que estas são muito semelhantes, não evidenciando um melhor desempenho quanto ao uso de determinado tipo de britador em face ao outro.

Segundo Xiao *et al.* (2012), muitas vezes o comportamento dos materiais granulares não é bem interpretado e a graduação é um fator chave não apenas para entender o comportamento mecânico, mas também a permeabilidade e suscetibilidade à água. Os pesquisadores comentam que, para garantia de um desempenho adequado, o *Minnesota Department of Transportation* (MDOT), nos Estados Unidos, trabalhando com agregados naturais para confecções de BGS, utiliza classes com várias graduações, cujas especificações determinam diferentes tipos de agregados a depender da qualidade da pedreira de origem dos mesmos.

Leite (2007) avaliou as consequências do emprego da energia intermediária e modificada no processo de compactação em laboratório e observou que, devido ao

incremento na energia, esta influencia no comportamento e na distribuição granulométrica final do material, ocorrendo alterações devido à quebra de partículas, propiciando uma maior geração de grãos retidos na peneira 0,075 mm nas duas energias. A quebra propicia um melhor entrosamento entre as partículas de diversos tamanhos, aumentando a resistência ao cisalhamento e propiciando um emprego mais nobre em termos estruturais de camadas de pavimento.

Deve-se ressaltar que as maiores quebras dos materiais testados por Leite (2007) já se deram na energia intermediária. Motta (2005) mostrou que a quebra pronunciada se dá nos primeiros golpes de soquete em laboratório, obtendo o peso específico aparente a uma curva de tendência à assíntota com o aumento de energia.

Estudando materiais reciclados de blocos e telhas cerâmicos no estado de Victoria na Austrália, Arulrajah *et al.* (2011) observaram o efeito da energia durante o processo de compactação e suas consequências na composição granulométrica. A energia aplicada foi modificada e os resultados denotaram que as partículas se quebram durante o processo (Figura 2.3), fazendo com que a estrutura da curva granulométrica se altere, melhorando assim a graduação do material. O mesmo foi observado por Leite (2007) nos trechos de pavimentos executados com base e sub-base de RCD misto.

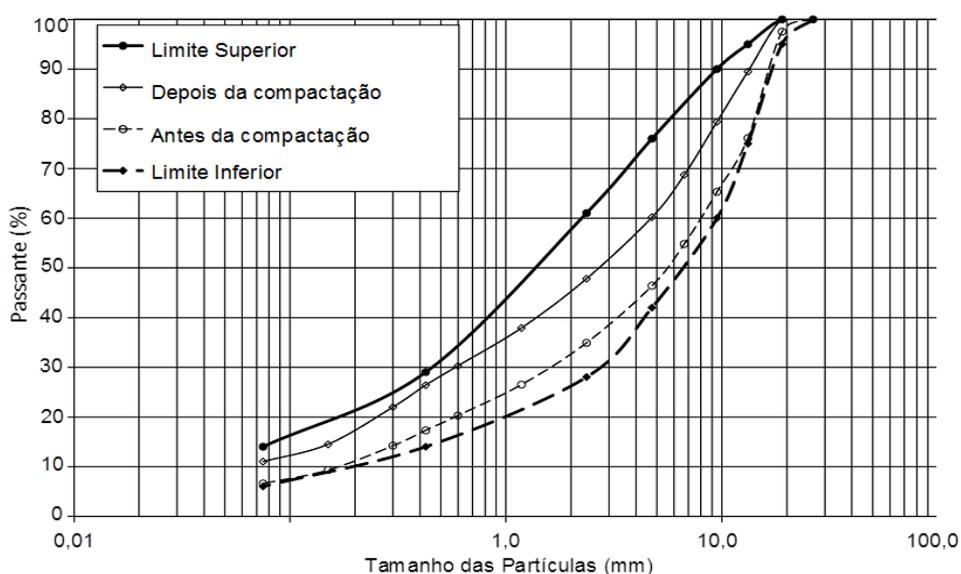


Figura 2.3 – Distribuição granulométrica antes e após a compactação (ARULRAJAH *et al.*, 2011)

2.6.4 Compactação

O processo de compactação é usado por vários segmentos da engenharia e pode ser entendido como o processo induzido por solicitação mecânica para redução dos vazios de um material qualquer, ocorrendo à expulsão do ar nos vazios dos poros. Este difere do adensamento, que se entende pelo processo de densificação de um material, por expulsão lenta da água dos vazios.

Segundo Pinto (2002), a estrutura de um solo compactado depende, por ocasião, principalmente da energia e umidade em que este foi compactado. Este autor ressalta que, para argilas, quando a umidade empregada está abaixo da ótima, à atração entre as partículas não é vencida pela energia aplicada e o solo tende a ficar com uma estrutura floculada. Quanto maior a energia empregada, maiores serão os valores de peso específico seco máximo e menores serão as umidades ótimas, tendendo a deslocar as curvas de peso específico aparente *versus* umidade para esquerda e para o topo do gráfico da curva de compactação.

Para os materiais granulares como os RCD reciclados, fenômeno semelhante foi observado por Leite em 2007, avaliando o comportamento com o fator da energia de compactação aplicada ao RCD de categoria mista. A energia utilizada no processo de compressão do material em laboratório resulta em variações na forma, na graduação, no peso específico seco e no teor de umidade. À medida que há o incremento da energia, mais esta se desloca para esquerda, tendendo o seu pico a ficar mais inclinado. A seguir, na Figura 2.4, é possível verificar o efeito da energia empregada à curva de compactação.

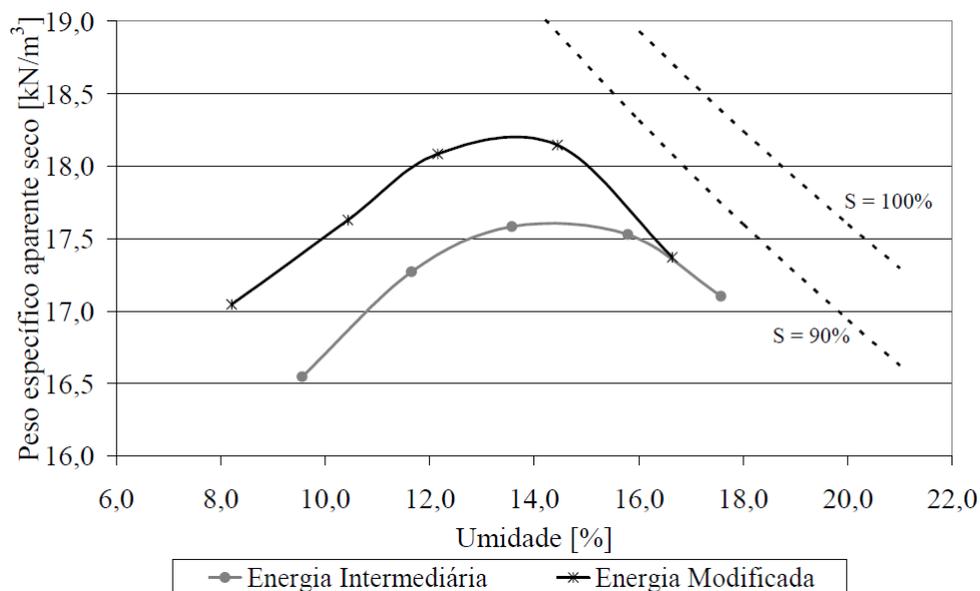


Figura 2.4 – Efeito da energia, intermediária e modificada: curva de Proctor (LEITE, 2007)

Este fato reforça a importância da energia de compactação elevada, obtendo-se uma maior quebra dos grãos durante a execução. Assim, o problema de degradação durante a vida útil do pavimento se minimiza, evitando possíveis afundamentos, ou mesmo rupturas indesejadas.

Segundo a literatura (LEITE, 2007; MOLENAAR e NIEKERK, 2002; MOTTA, 2005) existem dificuldades em se determinar uma curva de compactação adequada, devido à grande variabilidade de frações envolvidas e a influência destas composições na quebra.

Estudando as características físicas, de estado e mecânicas de agregados reciclados de concreto e cerâmico no município chinês de Hong Kong, Poon e Chan (2006) verificaram que para construção de curvas de compactação, as misturas com maior percentual em massa de agregados reciclados de concreto possuem maior peso específico seco máximo e menor teor de umidade ótimo, se comparadas a misturas com maiores concentrações de agregados reciclados cerâmicos.

É fato que resíduos com maior composição de materiais cerâmicos, ao serem quebrados, possuem uma maior área específica, necessitando por vezes de teores mais elevados de água para sua lubrificação e perfeita compressão do material, além de serem geralmente mais porosos que os cimentícios, requerendo maior

quantidade de água, uma vez que o agregado absorve parte da água introduzida para a execução de camadas granulares de pavimentos.

2.7 Propriedades mecânicas

2.7.1 Capacidade de suporte CBR

O *California Bearing Ratio* (CBR) foi desenvolvido no final da década de 20 nos EUA. Este tinha como objetivo principal avaliar a ruptura plástica em solos de fundação de pavimentos por meio da aplicação de uma carga com deslocamento constante até o seu cisalhamento, visto que na época de sua concepção a maioria das rupturas se dava por este tipo de característica

Vários ensaios foram realizados, principalmente em materiais granulares, com qualidade para aplicação (permeáveis, estáveis e duráveis), e estes foram definidos como material padrão, atribuindo a este material o valor padrão de CBR igual a 100%. Concomitantemente, para garantia da estabilidade, também se pode obter a resposta quanto à expansão do material, em face de uma frente de umidade ou de descongelamento na época após inverno, para uma condição de 96 horas de imersão.

Ao longo das décadas seguintes, vários métodos de dimensionamento de estruturas rodoviárias foram desenvolvidos com base no CBR. O ensaio passou a servir como um critério de aceitação de materiais em muitas especificações, tanto nacionais quanto estrangeiras (DNIT, 2006; GARB *et al.*, 2011; POON e CHAN, 2006). Além disto, várias correlações empíricas foram estabelecidas com outros tipos de ensaio a exemplo do módulo de resiliência. Cabe ressaltar, no entanto, que este tipo de parâmetro é aplicável para determinar o comportamento à ruptura de materiais granulares ou plásticos (sem presença de aglomerantes), não sendo indicado para materiais estabilizados quimicamente e de elevada rigidez.

Muitas pesquisas realizadas com materiais reciclados apontam que os principais fatores que influenciam o comportamento para obtenção do CBR são: (i) teor de umidade, (ii) energia empregada, bem como a peso específico aparente seco, (iii)

graduação e, (iv) natureza da composição (LEITE, 2007; MOTTA, 2005; POON e CHAN, 2006). Materiais com elevada heterogeneidade de composição, tanto em frações granulométricas, quanto em natureza da sua matriz de agregados, apresentam elevada dispersão de resultados. Em geral, nas referências consultadas, os materiais apresentam expansão nula. A Tabela 2.7 apresenta os resultados de CBR com misturas de agregado reciclado de RCD em pesquisas realizadas no Brasil e no exterior.

Tabela 2.7 – Resultados de CBR de diferentes pesquisas

Referência	Local da Pesquisa	Natureza da composição	Energia	Teor de umidade (%)	Expansão (%)	CBR (%) méd.
MOTTA, 2005	Brasil	Agregado reciclado misto	Intermediária	12	Nula	75 - 125
POON e CHAN, 2006	China	Agregado reciclado de concreto	Normal	11,8	Nula	66
		Agregado reciclado de concreto e cerâmico		16	Nula	47
LEITE, 2007	Brasil	Agregado reciclado misto	Intermediária	14,6	Nula	73
			Modificada	13,5		117
ARULRAJAH <i>et al.</i> , 2011	Austrália	Agregado reciclado cerâmico	Modificada	10,7	Nula	123 - 138
JIMÉNEZ <i>et al.</i> , 2011	Espanha	Agregado reciclado misto	Modificada	12,7	Nula	68
		Agregado reciclado concreto		11,6	Nula	138

Atualmente, este tipo de caracterização de parâmetro mecânico de materiais granulares e finos está em desuso, pelo tipo de carregamento aplicado durante o ensaio não representar o comportamento das solicitações em campo. No entanto, o seu uso ainda é corrente no meio prático brasileiro por ser um ensaio simples, sendo aceito em projetos para exclusão, ou para controle de materiais usados em camadas granulares de estruturas de pavimentos, como apontam a EST 001 (PMSP, 2003) e a NBR 15115 (ABNT, 2004).

2.7.2 Módulo de resiliência

Parâmetro muito utilizado atualmente em projetos de implementação e restauração de vias, o Módulo de Resiliência (MR) é citado por muitos estudiosos (BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2006) como sendo a rigidez dos materiais (granulares, finos e

cimentados), definidos segundo um plano de tensões gerados a partir da tensão desviadora aplicada pela razão da deformação resultante, devido à carga cíclica, a qual simula um eixo veicular, sob a estrutura. Em laboratório, o módulo de resiliência é determinado pela eq.(1) indicada:

$$M_R = \sigma_d / \varepsilon_r \quad (1)$$

Onde: M_R – Módulo de resiliência (MPa);

σ_d – Tensão aplicada no ensaio (MPa);

ε_r – Deformação elástica axial, definida como o deslocamento axial pela altura do corpo de prova (mm/mm).

O manual de pavimentação do DNIT (2006) ressalta que grande parte das metodologias de dimensionamentos até a década de 70 visava proteger e suprir as deficiências do subleito. Com a facilidade de resolução numérica das equações constitutivas da Teoria da Elasticidade, o uso de módulos de resiliência obtidos com ensaios em laboratório ou por retroanálise de resultados deflectométricos de campo em estruturas teste, viabilizou em nível de projeto, o cálculo de tensões e de deformações atuantes e compará-las com as admissíveis que os materiais adotados na estrutura de um pavimento poderiam estar sujeitos.

Atualmente no país, o procedimento de ensaio para obtenção do módulo de resiliência em laboratório é definido segundo a especificação do DNIT – ME 134 (2010). Por outro lado, quando se deseja determinar em campo, o módulo de resiliência, este pode ser obtido por aferição de bacias de deflexão obtidas com o uso de provas de carga (Viga Benkelman, FWD, Curviâmetro) para a determinação dos módulos de resiliência por meio do procedimento de retroanálise. O DNIT (DNIT, 2006) denomina o módulo determinado através de retroanálise de bacias por módulo de elasticidade efetivo *in situ* (E_{ef}).

Deve-se ater que este módulo efetivo é relativo à certa condição de umidade de campo. A variação deste parâmetro pode levar à variação do módulo efetivo de campo. Por este motivo a AASHTO (1993) solicita que se calcule um módulo de

resiliência efetivo ponderado, de acordo com as estações climáticas e sensibilidade à água. Evidentemente, como o RCD tem se mostrado um material bastante estável em relação à variação de umidade, esta variabilidade sazonal pode ser dispensada na maior parte das vezes. A variabilidade deste material advém principalmente da variabilidade da natureza dos agregados e do tempo de cura, que se constituem em outros efeitos que se interagem para alterar o comportamento mecânico, que serão abordados em outro item.

Segundo a bibliografia consultada (ARULRAJAH *et al.*, 2011; LEITE, 2007; MOLENAAR e NIEKERK, 2002; MOTTA, 2005), o comportamento mecânico do RCD se assemelha ao de uma BGS, podendo o seu módulo atingir valores de 100 MPa a 500 MPa, a depender da graduação, energia de compactação e do estado de tensões de confinamento.

Os estudiosos comentam que um dos principais fatores que influenciam sensivelmente na resposta ao comportamento resiliente do RCD, seria no modelo analítico experimental a ser utilizado (caso considere a tensão desviadora e a confinante, ou apenas a confinante), natureza da sua composição (cerâmico, pasta de cimento, rochas e outros), distribuição granulométrica a ser trabalhada, energia de compactação e tempo de cura.

Molenaar e Niekerk (2002), observando as características físicas do RCD na resposta mecânica, constataram que o tipo de britador, o tempo de cura, bem como a graduação possuía pouca influência na resposta do módulo resiliente. No entanto, o grau de compactação (GC) foi apontado como o fator preponderante nos valores de módulo de resiliência. Com isso, os pesquisadores desenvolveram um estudo verificando o incremento do módulo de resiliência em função do GC obtido para as amostras em laboratório, de uma mistura de 65% de concreto e 35% de cerâmica, em massa. A Figura 2.5 apresenta as respostas obtidas.

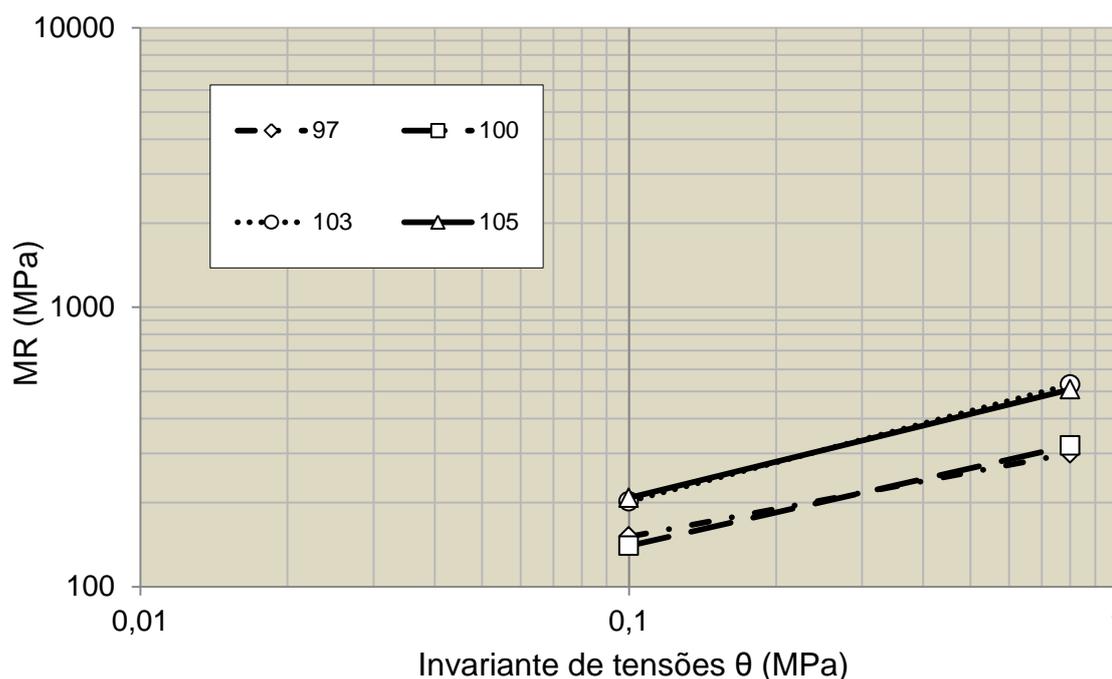


Figura 2.5 – Módulo de resiliência em função do grau de compactação da mistura de agregado reciclado (MOLENAAR e NIEKERK, 2002)

Pode-se perceber que os materiais com menor grau de compactação (G.C.= 97% e 100%), ou seja, menor densificação obtiveram respostas resilientes menores que as amostras com maior grau de compactação (G.C.=103% e 105%), sendo acrescido cerca de 70% no valor real do módulo resiliente quando o invariante de tensões é assumido 0,8 MPa.

2.7.3 Resistência à compressão simples

Ensaio bastante difundido no meio técnico e, principalmente, aplicável à caracterização de misturas de solo-cimento (SC) e concretos. Atualmente nos dois procedimentos normativos brasileiros que versam sobre reuso e aplicação de RCD em pavimentação (PMSP ETS-001, 2003; ABNT NBR 15115, 2004) faz-se menção que quando adicionados aglomerantes ao material, como cal hidratada e cimento Portland, deve ser avaliada a sua resistência à compressão simples (RCS) após 7 dias de cura, devendo esta atender a uma resistência mínima de 2,1 MPa. No geral, tal tipo de ensaio é realizado em misturas cimentadas para o uso em pavimentação, caso do solo-cimento ou mesmo de uma BGTC.

Motta (2005) avaliou o ganho em termos de resistência à compressão simples ao estabilizar agregado reciclado misto com 4% cimento Portland e também com 4% de cal, e obteve resultados considerados satisfatórios principalmente com a incorporação do cimento. Na Tabela 2.8 é possível visualizar os resultados obtidos por Motta (2005) e, variação no tempo de cura das misturas propostas.

Tabela 2.8 – Média de valores de resistência a compressão simples (MOTTA, 2005)

Idade (dias)	Agregado reciclado misto	Agregado reciclado + 4% cal	Agregado reciclado + 4% cim. Portl.
	RCS méd. (MPa)	RCS méd. (MPa)	RCS méd. (MPa)
7	-	1,38	2,78
28	0,53	1,74	4,20

Em experiência espanhola, Agrela *et al.* (2011) avaliaram à RCS de amostras com 3, 7, 28 e 90 dias de cura, de misturas recicladas com concreto e cerâmica com adição de 3% de cimento, segundo dois processos: (i) amostras coletadas em campo e compactadas em laboratório, e (ii) corpos de prova extraídos de campo por broqueamento após a camada executada (Tabela 2.9). As especificações na Espanha remetem ao uso de camadas cimentadas com um mínimo de RCS igual a 2,5 MPa aos 7 dias cura.

Tabela 2.9 – Média de valores da resistência a compressão simples (AGRELA *et al.*, 2011)

Amostras	Idade (dias)	50%Rc. + 50%Rcm+ 3%cim.	34% Rc. + 66%Rcm+ 3%cim.
		RCS (MPa)	RCS (MPa)
Amostras em laboratório	3	2,52	3,18
	7	3,17	3,41
	28	3,88	3,99
	90	4,28	5,05
Amostras extraídas de campo	28	4,51	4,25

Onde: R_c – Agregado reciclado de concreto;
 R_{cm} – Agregado reciclado cerâmico;
3% cim. – Adição de 3% em cimento Portland.

Torna-se evidente o ganho em termos de resistência à compressão simples após os 7 dias iniciais, e o aumento após esse tempo. Além disto, as amostras de campo em geral apresentaram maior RCS, quando comparadas a amostras em laboratório a 28 dias de cura, devido à eficiência no ato da compactação, e incremento de seu peso específico *in situ*. Deve-se ressaltar, no entanto, que os materiais ensaiados eram distintos não somente com relação à natureza de agregados, mas há outros parâmetros que divergem. Não se pode dizer que quanto mais agregados cerâmicos seria mais desejável que cimentícios. São resultados particulares e não podem ser extrapolados para esta distinção.

2.7.4 Deformação permanente

No uso das atribuições de uma estrutura flexível de pavimento, por muitas vezes a responsabilidade estrutural fica imposta às tensões geradas nas camadas granulares, devido à estrutura concebida em seu revestimento possuir materiais com funcionalidade não estrutural, como é o caso dos tratamentos superficiais (TS).

No Brasil, as camadas inferiores nas estruturas de pavimento (base e sub-base) vêm ganhando, finalmente, maior responsabilidade estrutural. Estas camadas, por serem muitas vezes granulares (dependentes do ângulo de atrito interno, coesão e tensões atuantes), podem vir à ruína por plastificação, quando durante a passagem de um pneumático possa ter sofrido mudanças significativas em seu estado, sem que retorne à condição inicial. Outra forma de ruína se dá com densificação por falta de compactação adequada e não se constitui propriamente um estado de plastificação. Tais modificações em sua macroestrutura podem ser indicadas como uma patologia muito encontrada nos pavimentos flexíveis, como sendo o afundamento em trilha de roda.

Uma das formas de se avaliar o potencial quanto à resistência à plastificação pronunciada ou de densificação por falta de compactação adequada, gerando

deformação permanente de camadas granulares, reside na execução de ensaios triaxiais de cargas cíclica, com combinações de tensões condizentes com a realidade do material aplicado à estrutura em estudo. Huang (2004) retrata que existem dois procedimentos básicos para a estimativa da deformação permanente de camadas: (i) método direto, e (ii) método computacional. No método direto, o autor ressalta que o operador numa fase de anteprojetado, considerando a aplicação de uma carga de área circular, deverá dividir as camadas da estrutura a ser analisada e calcular as tensões radiais e tangenciais (σ_r e σ_t) e verticais (σ_v) atuantes no centro da camada avaliada (Figura 2.6).

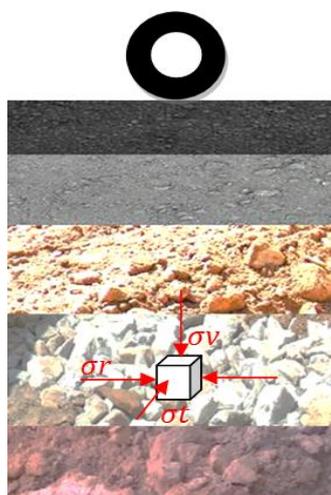


Figura 2.6 – Estado de tensões atuantes no ponto médio de uma camada de pavimento (HUANG, 2004)

O processo consiste em:

- a. Utilizar a tensão vertical devido à simulação, como tensão desviadora atuante (σ_d), e as tensões radiais combinadas, como tensão de confinamento (σ_3). Conduzir ensaios de cargas repetidas axiais com a dada combinação de tensões (σ_d/σ_3) a um número de ciclos fixado para a determinação da deformação permanente;
- b. Calcular cada deformação vertical acumulada (em cada camada), para um número finito de solicitações, multiplicando a deformação permanente (obtida com ensaios em laboratório) com a espessura da camada;

- c. Por fim, com a resposta da deformação permanente em cada camada, tem-se o afundamento total na superfície da estrutura analisada.

O segundo método reside na aplicação do Programa VERSYS², onde este assume que a deformação permanente é proporcional à deformação resiliente definida pela eq. (2):

$$\varepsilon_p(N) = \mu \cdot \varepsilon \cdot N^{-\beta} \quad (2)$$

Onde: $\varepsilon_p(N)$ – Deformação permanente devido a um eixo de carga simples;

ε – Deformação elástica ou resiliente a 200 ciclos de repetição;

N – Número de aplicações da carga;

μ – Parâmetro de deformação permanente, que representa uma constante proporcional entre as deformações permanentes e elásticas;

β – Parâmetro de deformação permanente, que indica a taxa de redução da deformação permanente à medida que o número de aplicações de carga aumenta.

Deve-se realçar que esta forma de previsão é uma aproximação restrita da realidade, pois a deformação permanente pode não estar interligada ao mesmo mecanismo resiliente. Estes modelos não preveem deformação por falta de compactação adequada, por exemplo, principalmente se o módulo de resiliência foi determinado em condições de baixas tensões ou após alteração volumétrica.

Várias pesquisas ao longo dos anos foram desenvolvidas com o intuito de tentar representar a plastificação por afundamento em materiais granulares de pavimentação. Nos dias de hoje, estudos fazem o uso de modelagem por meio da teoria da plasticidade e da teoria do *shakedown*.

A primeira teoria aborda equações constitutivas, correlacionando a deformação permanente a qualquer ciclo de carga a uma tensão aplicada. A segunda teoria

²FHWA. **Predictive design procedures, VESYS user's manual**. Report No. FHWA-RD-77-154, Federal Highway Administration, 1978.

consiste numa aproximação por equações constitutivas analíticas elasto-plásticas que descrevem o comportamento de misturas granulares, calculando a resposta do material com a continuidade do carregamento cíclico. Esta sugere limites de estado de tensões tais que separam o material de um comportamento estável (deformações elásticas) e instável (deformações plásticas) até a ruptura.

Segundo Cerni; Cardone e Bocci (2012), a instrumentação do ensaio de deformação permanente é simples e resume-se a uma câmara triaxial para controle da pressão confinante, munida de medidores de deslocamentos conhecidos como *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT), capaz de coletar as deformações oriundas dos ciclos de carga aplicados. Neste estudo foi aplicada uma carga de forma senoidal com 3 Hz de frequência.

Quanto à deformação máxima admissível, existem dificuldades na definição de um critério de ruptura (parada do ensaio), pois este depende em geral do estado de tensões, número de repetições de ciclos de carregamento e o teor de umidade. Malysz (2004) definiu em seu estudo, com corpos de prova de 100,0 x 200,0 mm de BGS, que o colapso estaria representado com 10% da deformação axial do material.

A norma NF EN 13286 (2004) possui um anexo no qual define um procedimento apropriado para o estudo e classificação dos materiais granulares de acordo com seu comportamento baseado na sua capacidade de deformação plástica. Ainda de acordo com a própria norma, podem ser definidos dois limites, para uma série variada de combinações de tensões (σ_d/σ_3): (i) Limite do *Shakedown* Plástico, e (ii) Limite da Fluência Plástica.

(i) comportamento à deformação estável: $\epsilon_{p\ 5000} - \epsilon_{p\ 3000} > 0,045 \times 10^{-3} \text{ mm/mm}$.

(ii) falha em número elevado de ciclos: $\epsilon_{p\ 5000} - \epsilon_{p\ 3000} > 0,40 \times 10^{-3} \text{ mm/mm}$.

Onde: ϵ_{p5000} – Deformação permanente acumulada até o ciclo de 5000;

ϵ_{p3000} – Deformação permanente acumulada até o ciclo de 3000.

Leite (2007) optou por simular a deformação permanente com um acumulativo de 100.000 ciclos, avaliando o comportamento quanto à deformação permanente pelos

modelos desenvolvidos por Monismith *et al.*³ e Barksdale⁴ apud Leite (2007), e posteriormente aplicou a teoria do *shakedown* com 180.000 ciclos de carga. Na Tabela 2.10 são apresentadas algumas pesquisas realizadas para determinação e estudo da deformação permanente, bem como as características abordadas na metodologia dos pesquisadores.

³ MONISMITH, C. L.; OGAWA, N.; FREEME, C. R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated load. **Transportation Research Record**. Washington, n. 537, p. 1-17. 1975.

⁴ BARKSDALE, R. D. **Repeated load test evaluation of base course materials**. Georgia Highway Department Research Project 7002, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1972.

Tabela 2.10 – Estudos que abordam a deformação permanente em materiais granulares

Ano	Autor	Material	Energia de Compactação	Modelo adotado	Parâmetro		Considerações sobre a tensão de confinamento σ_3
					a	b	
1997	Garg e Thompson	Britas graduadas simples	Normal	$\epsilon p = aN^b$	1,0.10 ⁻² a 1,0.10 ⁻³	4,5.10 ⁻¹ a 1,1.10 ⁻¹	Utilizou três níveis de tensões (σ_d/σ_3): 1,5, 2,0 e 3,0 ; os valores obtidos foram feitos em 1, 10, 50, 100, 500 e 1000 aplicações de carga.
1999	Puppala <i>et al.</i>	Areia bem graduada, argila siltosa e argila pura	Normal	$\epsilon p = AN^a \left[\frac{\sigma_z}{\sigma} \right]^\beta$	Variável	Variável	Utilizou os níveis de tensões da normativa da AASTHO T-294 que define os procedimentos necessários para condução do teste de módulo de resiliência em câmaras triaxiais.
2004	Malysz	Britas graduadas simples	Modificada	$\epsilon p = a.e^{b.\sigma_d}$	1,44.10 ⁻¹ a 5,32.10 ⁻¹	1,28.10 ⁻² a 8,96.10 ⁻³	Ensaio de multi-estágios nos quais foram aplicados a um mesmo corpo de prova vários níveis de tensão, além de ensaios com um único estado de tensões.
2007	Leite	Resíduo de construção e demolição	Intermediária e Modificada	$\epsilon p = aN^b$ $\epsilon p = a + b.log(N)$	Variável	Variável	Utilizou quatro níveis de tensões (σ_d/σ_3): 2,0, 4,0, 6,0 e 6,7. A relação $\sigma_d/\sigma_3= 6,0$ foi obtida por meio de retroanálise da estrutura, logo abaixo do topo da camada de base de agregado reciclado.
2012	Cerni; Cardone; Bocci	Resíduo de construção e demolição	Modificada	$\epsilon p = A + B.N - C.e^{-D.N}$	Variável	Variável	Utilizou-se do nível de tensões segundo a norma europeia EN 13286-7 (2004) a qual define combinações de tensões em sistema de multi-estágios.

2.8 Características e propriedades *in situ*

2.8.1 Controle executivo

Todo procedimento construtivo nas áreas da engenharia demanda controles da execução e também dos materiais, para conferir à estrutura, homogeneidade e critérios de aceitação quanto às propriedades mecânicas e deformações admissíveis previstas na fase de projeto.

Existem vários procedimentos normativos que recomendam critérios de aceitação para a execução de camadas de base para pavimentação, tanto para controle geométrico, quanto de propriedades físicas adequadas. Huang (2004) comenta que a distribuição normal é a função probabilística mais comumente empregada nas metodologias de dimensionamento de pavimentos. Em geral, no Brasil, as normas aplicáveis aos materiais granulares para camadas de pavimentação incorporam o controle de qualidade segundo a distribuição normal, com alguns níveis de aceitação, por exemplo a normativa para emprego de BGS, ET-DE-P00/008 (DER-SP, 2005).

No Brasil, Leite (2007) estudando o uso de agregados reciclados na USP Leste acompanhou e analisou os resultados encontrados pela empresa do controle de qualidade da obra segundo a metodologia convencional, a partir do método expedito do fogareiro e do método do frasco de areia, respectivamente para a umidade e GC. Adicionalmente, a autora realizou o controle via *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP), o qual tem a finalidade de determinar a capacidade de suporte *in situ*, tanto de solos em estado natural quanto compactado, podendo servir como parâmetro para controle tecnológico para liberação de camadas pós-compactadas.

Os resultados encontrados nesta pesquisa apontam deméritos para o controle usualmente empregado em materiais coesivos e granulares, apresentando os agregados reciclados considerável dispersão de resultados. Os resultados empregando o DCP foram analisados por meio de correlação com o CBR segundo a equação proposta pela *United States Army Corps of Engineers* (USACE), e

apresentaram possibilidade de aplicação desta ferramenta no controle executivo de camadas de agregado reciclado.

Na Espanha Agrela *et al.* (2011), por sua vez, trabalhando com misturas recicladas tratadas com cimento em camadas de sub-base, além de material de controle (ardósia com adição de 3% cimento), utilizaram um equipamento para indução das trincas nas camadas cimentadas durante o controle executivo, com a finalidade de evitar a reflexão de trincas para camada de base em concreto asfáltico. O equipamento produz um furo após a compactação da camada e, em seguida, injeta uma emulsão catiônica.

Este procedimento possui duas finalidades: (i) criar uma zona de fraca resistência, favorável para a formação de fissuras de retração, e (ii) devido à descontinuidade, permitir a localização precisa da pré trinca. Na Figura 2.7 apresenta-se o equipamento em ação e o procedimento descrito.



Figura 2.7 – Equipamento para indução de trincas (AGRELA *et al.*, 2011)

Em seguida, os autores realizaram o controle estrutural por meio de ensaios deflectométricos com o uso de FWD com carga aplicada de 6700 kgf e diâmetro do prato de 45,0 cm, sob as camadas de interesse, após 28 dias de construção. Foram

calculados os módulos equivalentes, segundo a eq. (3) proposta por Brown (1996)⁵ apud Agrela *et al.* (2011), cujos resultados são apresentados na Tabela 2.11.

$$E_u = \frac{2pa(1-u^2)}{d} \quad (3)$$

Onde: E_u – Módulo equivalente;

p – Pressão aplica=0,421 MPa;

a – Raio do prato = 225 mm;

u – Coeficiente de Poisson = 0,25;

d – Deflexão de campo em 10^{-2} mm.

Tabela 2.11 – Valores médios de deflexão e módulo equivalente

Propriedades aos 28 dias	BGS (ardósia) + 3% cim.	50%Rc. + 50%Rcm+ 3%cim.	34% Rc. + 66%Rcm+ 3%cim.
Deflexão média na sub-base, d ($\times 10^{-2}$ mm)	20,90	10,16	9,28
Módulo equivalente médio na sub-base, (MPa)	865,70	1748,10	1913,90

Onde: Rc – Agregado reciclado de concreto;

Rcm – Agregado reciclado cerâmico;

BGS – Brita graduada simples com adição de 3% de cimento Portland;

3% cim. – Adição de 3% em cimento Portland.

Os resultados apontam um ganho significativo tanto na redução da deflexão, quanto no módulo equivalente das camadas recicladas. O trecho com maior concentração de resíduo de concreto obteve melhor desempenho mecânico (AGRELA *et al.*, 2011).

⁵ BROWN S. F. Soil Mechanics in pavements engineering. **Géotechnique**, vol. 46, n 3, p. 383-426. 1996.

Herrador *et al.* (2012), trabalhando com segmentos experimentais na Espanha, com 80,0 m de comprimento, e misturas recicladas de concreto (concentração >75% em massa seca), cerâmica (concentração >5% em massa seca) e concreto asfáltico (concentração >20% em massa seca), aplicadas como camada de base com 30,0 cm de espessura, apontam que o controle adequado da produção na planta de reciclagem é o principal fator para garantia da homogeneidade em campo. Na ocasião, o controle de qualidade em campo foi realizado pelo equipamento Troxler 3440, determinando os respectivos pesos específicos *in situ* e teores de umidades nos pontos de interesse, como apresenta a Tabela 2.12.

Tabela 2.12 – Resumo de parâmetros para o controle executivo (HERRADOR *et al.*, 2012)

Parâmetros	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Y_s (KN/m ³)	20,30	0,20	0,99
Teor de umid. (%)	9,45	1,54	16,30
G.C (%)	99,40	0,89	0,90

2.8.2 Variabilidade

A variabilidade ao estudo dos materiais está muitas vezes associada aos controles em laboratório e *in situ*, para garantia das mesmas propriedades e manutenção das características. Por vezes, estes métodos de controle são respaldados por conceitos probabilísticos e estatísticos. No estudo de algumas metodologias de dimensionamento, por exemplo, estas por vezes assumem parâmetros mecanicistas, os quais consideram em sua maioria uma análise probabilística ao projetar. Estes métodos são mais realísticos, pois consideram em cada coeficiente de projeto uma média e uma variância atribuída, diferentemente dos métodos determinísticos, os quais assumem valores aos coeficientes de projetos pré-estabelecidos de acordo com a experiência, e que por muitas vezes majoram ou minoram a capacidade estrutural de um pavimento (HUANG, 2004).

Estes métodos incorporam em cada variável de interesse uma função estatística. Esta função estatística se traduz numa tendência de ocorrência de um fenômeno

aleatório, e pode ser descrita em distribuição normal, t Student, lognormal, entre outras (YODER; WITCZAK, 1975). No Brasil, para controle de características dos materiais *in situ* em geral aplica-se a distribuição normal ou gaussiana e esta se caracteriza por uma curva em forma senoidal com limites probabilísticos definidos segundo valor de média e desvio padrão amostral, de acordo com cada especificação ou projeto. Sua função para descrever a frequência de ocorrência de uma variável aleatória é dada pela eq. (4):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]} \quad (4)$$

Onde: $f(x)$ – função densidade de probabilidade;

x – variável aleatória;

μ – média aritmética;

σ – desvio padrão.

Existe uma metodologia de controle estatístico desenvolvido por Grubbs (1969), para exclusão de observações de um espaço amostral que detecta dentro de um conjunto os valores mais discrepantes (“*outliers*”), os quais possuem maior desvio em relação aos outros membros da amostragem. A partir da detecção dos *outliers*, duas considerações podem ser assumidas: (i) a observação detectada apresenta-se como uma variabilidade inerente a todo espaço amostral, logo a observação deve ser mantida em conjunto com as outras presentes na amostragem, e (ii) a observação detectada pode ser relativa a um erro grosseiro (ora por metodologia de cálculo, procedimento amostral ou outro).

Grubbs (1969) recomenda a análise da observação discrepante, para a então definição da possibilidade do seu descarte. A teoria é chamada de amostragem aleatória, a qual determina que qualquer variável independente possa ser rejeitada ou aceita no espaço amostral, quando comparada a um valor crítico.

O valor crítico (T) é tido como um critério amostral, o qual limita segundo uma pequena probabilidade a chance de uma variável ser excluída. O valor T é definido

segundo um nível de significância (N.S), o qual remete a um risco de exclusão errôneo a uma adequada variável independente do espaço amostral.

Adotando o critério de amostragem simples, por exemplo, há um número de variáveis no espaço amostral e o critério de teste de aceitação (definição do T) considera a média aritmética e o desvio padrão da amostragem a um determinado N.S desejado (1%, 2,5% ou 5%, por exemplo), escolhido conforme valor na Tabela 2.13. A eq. (5) demonstra o cálculo assumido para definição do valor crítico.

$$T = \frac{\mu - \mu_i}{\sigma} \quad (5)$$

Onde: μ – média aritmética;

μ_i – variável independente no ponto i;

σ – desvio padrão.

Tabela 2.13 – Valores críticos de T, quando o desvio é calculado no mesmo espaço amostral (GRUBBS, 1950)

n° Observações	Nível de Significância				
	0,10%	0,50%	1%	2,50%	5%
3	1,555	1,555	1,155	1,153	1,148
4	1,499	1,496	1,492	1,463	1,425
5	1,780	1,764	1,749	1,672	1,602
6	2,011	1,973	1,944	1,822	1,729
7	2,201	2,139	2,097	1,938	1,828
8	2,358	2,274	2,221	2,032	1,909
9	2,492	2,387	2,323	2,11	1,977
10	2,606	2,482	2,41	2,176	2,036
11	2,705	2,564	2,485	2,234	2,088
12	2,791	2,636	2,55	2,285	2,134
13	2,867	2,699	2,607	2,331	2,175
14	2,935	2,755	2,659	2,371	2,213
15	2,997	2,806	2,705	2,409	2,247

Nos trabalhos realizados com a aplicação do RCD em camadas de pavimento, há poucas constatações a cerca da variabilidade de resultados bem como critérios de aceitação e confiabilidade estatística empregada à avaliação das propriedades físicas e mecânicas tanto, em laboratório quanto *in situ*.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais empregados na pesquisa e os métodos abordados durante a mesma.

Os processos de investigação adotados na pesquisa consistem em duas etapas principais: (i) seleção de materiais e determinação de propriedades em laboratório e (ii) levantamento e análise das propriedades *in situ* dos materiais empregados em trechos experimentais. As Figuras 3.1 e 3.2 apresentam o resumo investigativo.



Figura 3.1 – Fluxograma do estudo de comportamento do material em laboratório

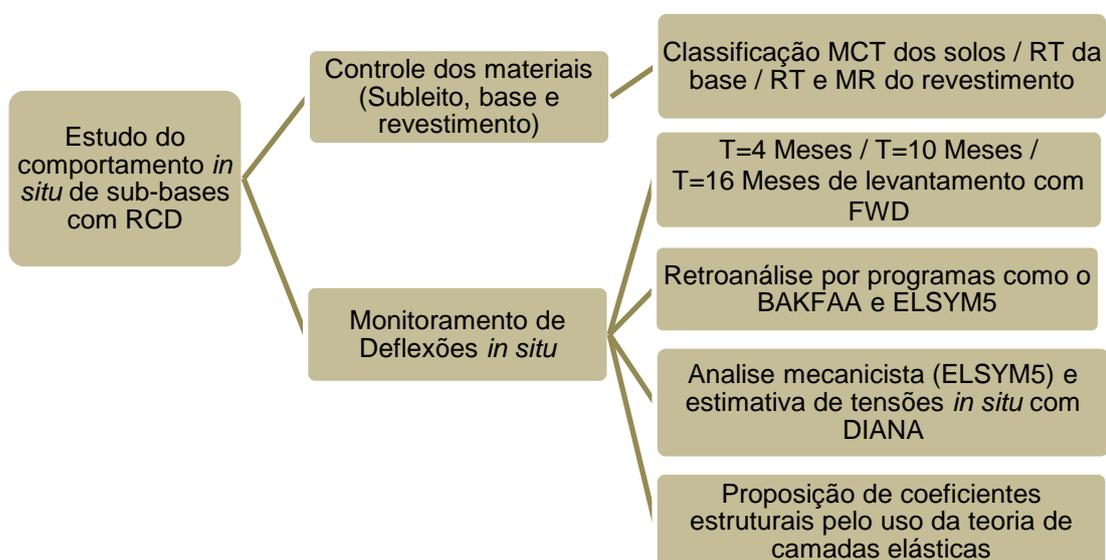


Figura 3.2 – Fluxograma do estudo de comportamento *in situ*

3.1 Materiais empregados e ensaios realizados

Nesta pesquisa, os materiais empregados na investigação laboratorial, e que foram aplicados em campo como camada de sub-base de pavimento, consistiam em agregados britados e beneficiados das edificações São Vito e Mercúrio (Figura 3.1), em São Paulo, conhecidos popularmente como “Treme-Treme”, onde a demolição total foi concluída em maio de 2011. Os edifícios foram demolidos por técnica de desconstrução, fator importante para correta seleção de resíduos de categoria A, em face de resíduos de outras categorias.

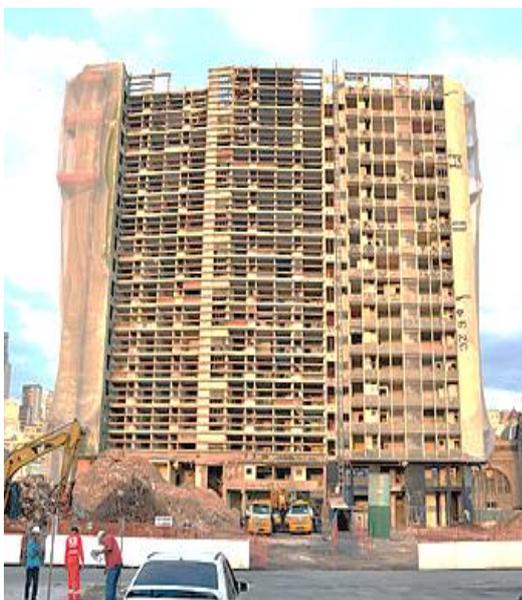


Figura 3.3 – Processo de desconstrução das edificações: São Vito e Mercúrio (PINIWEB, 2013)

Os materiais foram processados na planta de reciclagem da empresa FREMIX, situada próximo à Ponte Júlio de Mesquita Neto, São Paulo. A metodologia de reciclagem e processamento do material consistiu-se dos seguintes passos (ilustrados na Figura 3.2): (i) retirada por catação manual de materiais orgânicos e inorgânicos contaminantes, (ii) cominuição por processo de britagem, com britador de mandíbulas e relação de redução de 1:4, (iii) retirada de materiais contaminantes ferrosos na esteira de transporte do material, e (iv) estocagem em pilhas do produto final.



Figura 3.4 – (i) estocagem do RCD e retirada de materiais contaminantes, (ii) britagem do RCD, (iii) catação de contaminantes após britagem, e (iv) estocagem em pilha do agregado reciclado

Em seguida, foram coletados cerca de 1.500 kg de agregados reciclados de categoria mista (com percentuais variáveis quanto à natureza) na usina supracitada para aferição das suas características físicas e mecânicas no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTP-EPUSP). Todo o material coletado foi seco ao ar, até constância de massa (Figura 3.3) e em seguida foi realizado um quarteamento segundo o procedimento NBR NM 27 (ABNT, 2001). O programa de ensaios laboratoriais proposto para a metodologia de investigação da pesquisa é apresentado na Figura 3.4. A nomenclatura utilizada na pesquisa para caracterizar as misturas de agregado reciclado proposta na pesquisa foi: (i) RCD, (ii) RCD+3% cimento Portland, e (iii) RCD+3% cal hidratada.



Figura 3.5 – Agregado reciclado espalhado para fins de secagem ao ar e quarteamento

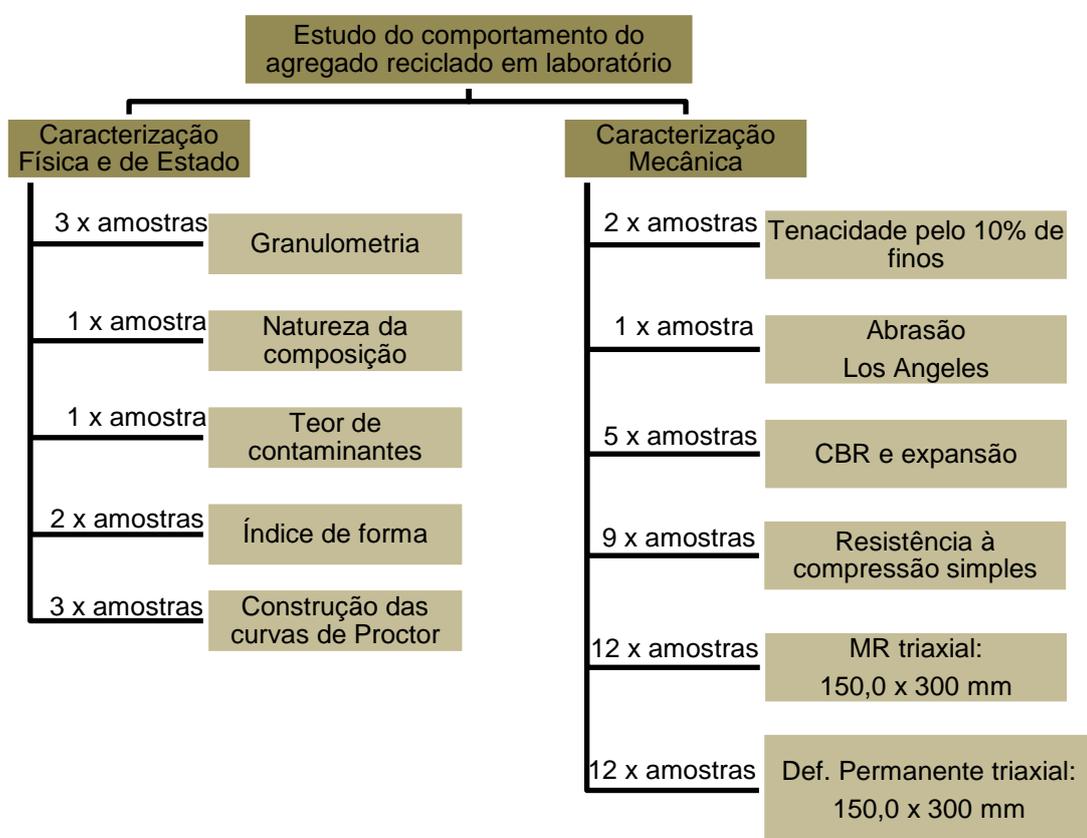


Figura 3.6 – Fluxograma de ensaios em laboratório

3.2 Características físicas, mecânicas e de estado do RCD

3.2.1 Granulometria

A avaliação da distribuição granulométrica do material foi realizada segundo o procedimento de ensaio definido na norma brasileira NBR 7181 (ABNT, 1984), e

com esta, retirada os parâmetros de controle como diâmetro máximo nominal, Cc, Cu, e % passante na 0,42 mm. Um total de três curvas granulométricas foi obtido, conforme requisito mínimo de controle especificado na ETS 001 (PMSP, 2003). A série de peneiras utilizadas compreende a sequência, 50,0-37,5-25,4-19,0-12,5-9,5-4,75-2,0-1,4-0,6-0,42-0,25-0,150-0,075 mm.

3.2.2 Natureza

Procurou-se realizar uma análise da composição do RCD em função da natureza dos materiais constituintes, como realizado por Leite (2007) e Motta (2005). Tal determinação apenas está reservada às frações retidas na peneira 4,8 mm, pois o processo de catação e identificação das fases é executado manualmente. Frações abaixo desta peneira dificilmente são distinguíveis visualmente, podendo ser caracterizadas por processo de líquidos densos, como proposto por Angulo (2005). No entanto, esta avaliação não foi objeto de análise nesta pesquisa.

3.2.3 Índice de forma

Foram utilizados dois procedimentos de análise da forma dos grãos: (i) NBR 7809 (ABNT, 2006), e (ii) ASTM D 4791 (ASTM, 2010) como mostra a Figura 3.5. A NBR 7809 (ABNT, 2006) fornece um índice em função da geometria de cada agregado, obtido por meio de um paquímetro (comprimento em razão com a espessura da partícula), de forma que tal índice próximo a três define o material como lamelar, e próximo de um, define o material como cúbico. O procedimento ASTM D 4791 (ASTM, 2010) define o percentual de partículas lamelares e alongadas e não lamelares e não alongadas dentro de um universo finito de partículas analisadas, segundo uma relação de braço de um paquímetro especial, ou compasso de calibre.



Figura 3.7– Equipamentos em laboratório para determinação da formados agregados: (i) segundo NBR 7809 (ABNT, 2006), (ii) segundo D4791 (ASTM, 2010).

3.2.4 Resistência dos agregados graúdos

Para a avaliação da resistência da matriz graúda, foi empregado o método dos 10% de finos, apesar deste ensaio não ser requerido pelas especificações nacionais para o uso de agregado reciclado de RCD em pavimentação. Este também é fator limitante ao uso em algumas especificações estrangeiras e permite fornecer uma ideia da friabilidade do material. O ensaio consiste em determinar qual é a carga necessária para que a fração passante na peneira 12,7 mm e retida na 9,5 mm produza entre 7,5 e 12,5% de finos.

Quanto maior a carga necessária para produção dos finos em questão, melhor o comportamento mecânico (menor porcentagem de quebra), gerando maior resistência à quebra das partículas. Este teste foi realizado segundo as normas ME 096 (DNER, 1998) e BS 812-111 (BSI, 1990), como mostra a Figura 3.6.

Apesar da metodologia de ambas ser bastante similar, existem algumas diferenças. A especificação inglesa permite que o ensaio seja feito não somente com o material na condição seca, mas também úmida, bem como define uma taxa de deslocamento do pistão na aplicação de carga (pormenores que a norma brasileira não menciona).



(i)

(ii)

Figura 3.8 – (i) acomodação dos agregados em molde, e (ii) aplicação de carga

3.2.5 Resistência à abrasão

A resistência abrasiva não é contemplada nas especificações brasileiras para uso do agregado reciclado como camada granular, no entanto, alguns países consideram a análise usual e apresentam restrições consideráveis quanto ao seu uso caso não seja atingido o percentual desejado (GARB *et al.*, 2011). Este ensaio foi realizado seguindo os preceitos da norma NBR NM 51 (ABNT, 2001), utilizando a graduação de acordo com a distribuição granulométrica do material como indicada na referida norma. A Figura 3.7 mostra o aspecto da amostra antes e após a realização do ensaio.



(i)

(ii)

Figura 3.9 – Ensaio e desgaste Los Angeles: (i) amostra de RCD antes do ensaio, e (ii) aspecto do RCD após quebra

3.2.6 Dosagem da curva de Proctor

A metodologia para determinação do teor ótimo e peso específico seco máximo de cada mistura proposta foi realizada segundo a metodologia descrita na NBR 7182 (ABNT, 1986), com confecção de cinco pontos, tendo sido moldados um grupo de corpos de prova em cada caso, em energia modificada (cinco camadas com 55 golpes por camada), como preconizado em projeto dos trechos experimentais, a serem descritas mais adiante.

3.3 Propriedades mecânicas

3.3.1 California Bearing Ratio

O ensaio para obtenção dos valores de CBR, e concomitantes da expansão, foi realizado segundo a norma ASTM D 1883 (ASTM, 2007), para solos, com imersão do material em água por um período de quatro dias, conforme ilustrado na Figura 3.8. O ensaio foi realizado apenas nos corpos de prova de RCD puro, sem adição de aglomerantes.



Figura 3.10 – Determinação do CBR: (i) preparo das amostras dentro do cilindro CBR; (ii) amostras imersas em água para verificação da expansão

3.3.2 Resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado segundo a norma ASTM D 1633 (ASTM, 2007), normativa empregada para procedimentos de ruptura em solo-cimento e em amostras coletadas de campo apenas com sete dias de cura, para verificação da sua aceitação quanto ao critério estabelecido na ETS 001 (PMSP, 2003) e NBR 15115 (ABNT, 2004) que estabelecem que a RCS seja superior ou igual a 2,1 MPa para misturas estabilizadas com cal hidratada e/ou cimento.

3.3.3 Módulo de resiliência

O ensaio para determinação do módulo de resiliência foi realizado de modo similar ao descrito na norma ME 134 (DNIT, 2010) (para solos), como em Motta (2005) e Leite (2007). Uma matriz de 12 corpos de prova de dimensões 150,0 por 300,0 mm foi proposta com as seguintes misturas: (i) RCD, (ii) RCD+3% cimento, e (iii) RCD+3% (sendo quatro corpos de prova para cada material, em cada condição). A finalidade é de avaliar a influência do grau de compactação e o potencial pozolânico com o tempo de cura para as misturas em RCD. Para avaliação do ganho de rigidez dos materiais estabilizados com aglomerantes foi proposta uma avaliação do módulo de resiliência a 7, 28 e 60 dias de cura.

Antes de cada composição de corpo de prova, foram avaliadas as propriedades de índice de forma por norma NBR 5564 (ABNT, 2011) nas frações entre as peneiras 12,5 e 9,5 mm, além da natureza das fases presentes: (i) pasta de cimento, (ii) rocha e (iii) cerâmica pela NBR 15116 (ABNT, 2004). As amostras foram preparadas e quarteadas com o uso do quarteador tipo Jones. Além desta medida, foi realizada uma correção na curva original de compactação Proctor em função do teor de umidade e da quantidade de finos presentes nas frações de 12,5, 9,5, 4,8 e 2,0 mm respectivamente, bem como o teor de umidade da fração abaixo da peneira 2,0 mm, como mostra a Tabela 3.1. Utilizando a mesma sistemática empregada a misturas asfálticas, bem como o uso do ferramental Solver, foi possível propor as quantidades necessárias corrigidas de cada fração para chegar à composição original do material proposto na curva de Proctor, denominada de “Referência” (Figura 3.9).

Tabela 3.1 – Correção granulométrica e percentual em cada fração para misturas de RCD

Percentual Passante							
(#) peneira mm	Referencia	# 12,5	# 9,5	# 4,75	# 2,00	# Passante 2,00	Mistura (%)
19	100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12,50	78,03	0,37	100,00	100,00	100,00	100,00	78,03
9,50	66,59	0,37	0,57	100,00	100,00	100,00	66,59
4,75	44,12	0,37	0,57	3,71	100,00	100,00	44,12
2,00	34,2	0,37	0,57	3,71	6,53	100,00	34,20
Percentual da mistura		22,05%	11,51%	23,34%	10,61%	32,49%	100,00%

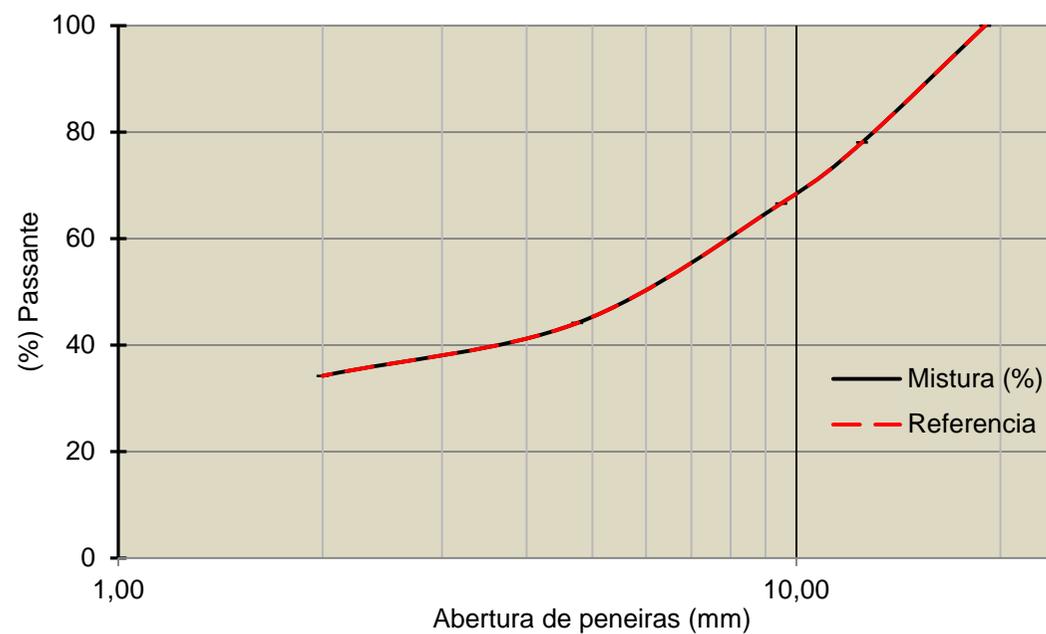


Figura 3.11 – Granulometria do RCD para compor amostras similares em laboratório para fins de ensaios

O processo de dosagem foi realizado com a compactação e confecção dos corpos de prova com: (i) mistura e homogeneização dos materiais, em massa seca, (ii) adição e homogeneização com água potável, em concordância com o teor ótimo obtido no desenvolvimento da curva de Proctor, da energia modificada, para cada material, (iii) compactação com controle de altura das camadas e escarificação do material em cilindro tripartido com dimensões 150,0 mm de diâmetro, por 300,0 mm de altura, (iv) nivelamento de camada final e (v) condicionamento em câmara úmida, como mostra a sequência apresentada na Figura 3.10.



Figura 3.12 – Processo de dosagem e preparo de corpos de prova para ensaios de módulo de resiliência: (i) homogeneização com o aglomerante a seco, (ii) mistura e homogeneização com água potável, e (iii) compactação com cilindro tripartido e controle de camadas

Existem vários modelos para determinação do módulo de resiliência, a depender principalmente do estado de tensões atuantes, σ_d e σ_3 , e também do tipo de material (fino, granular, entre outros). Nesta pesquisa, adotou-se o modelo composto, eq.(6) adotado por Macêdo (1996), desenvolvido estatisticamente para solos de subleito, sub-base e base e possui um coeficiente de regressão (R^2) igual a 0,96.

$$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (6)$$

Onde: M_R – Módulo de resiliência (MPa);

σ_d – Tensão desviadora aplicada às combinações do ensaio (MPa);

σ_3 – Tensão de confinamento aplicada às combinações do ensaio (MPa);

k_1, k_2, k_3 – Coeficientes de regressão obtidos aplicando o modelo de regressão combinado.

3.3.4 Deformação permanente acumulada

Foi avaliado o acúmulo de deformação permanente dos materiais, por ensaio triaxial com carregamento repetido após 90 dias de cura, pois acredita-se que todas as reações de hidratação do cimento e pozolânicas da cal haveriam atuado passados, pelo menos a maior parte delas, a 90 dias de cura.

O procedimento para a determinação das tensões a serem utilizadas no ensaio triaxial em laboratório, foi realizado por: (i) retroanálise das bacias de deflexões obtidas por meio de FWD para determinação dos módulos elásticos (módulo de resiliência) das camadas de campo (através dos programas BAKFAA e ELSYM 5), (ii) estimativa das tensões e deformações atuantes na camada de interesse (sub-base de RCD), (iii) aplicação da mesma estrutura ao programa de elementos finitos (DIANA), com aproximação pela teoria da elasticidade linear, e (iv) comparativo da estrutura proposta, de acordo com as tensões e deflexões atuantes obtidas nos softwares DIANA e ELSYM5.

Com as tensões atuantes na camada (topo, meio e base da camada) do programa de elementos finitos, executou-se ensaio de carga cíclica a 3 Hz de frequência, com

onda semi-senoidal até 100.000 ciclos de carga, monitorando em todos os ciclos a deformação. Em seguida, calculou-se a deformação acumulada ao longo do número de ciclos predefinidos e avaliou-se a deformação permanente segundo equações de Monismith *et al.* (1975) e Barksdale (1972).

4 TRECHOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo trata da metodologia aplicada à investigação de campo, com foco principal nas análises de monitoramento deflectométrico com FWD, de trechos experimentais. Os materiais aplicados às estruturas propostas e os métodos construtivos foram acompanhados através da realização de controle de qualidade.

4.1 Concepção estrutural

Concomitante à execução de ensaios em laboratório, foram executados três trechos experimentais em parceria com a Prefeitura Municipal de São Paulo, com extensão de 100,0 m (cada um) em pista simples, estando sua seção, em meia encosta, porém com grande maioria dela, em corte. Os trechos se situam na Avenida Sapopemba, altura do nº 20200, zona leste do município de São Paulo (Figura 4.1).

Esta obra foi inserida em um programa de pavimentação da cidade, que vinha sendo implantado no local, prevendo a construção de cerca de cinco quilômetros de um pavimento com uma camada de sub-base de RCD misto com espessura de 25,0 cm, base de material reciclado constituído por RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) com asfalto-espuma com espessura de 20,0 cm e revestimento asfáltico de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) com espessura de 5,0 cm. O projeto não previa drenagem profunda, nem subsuperficial.

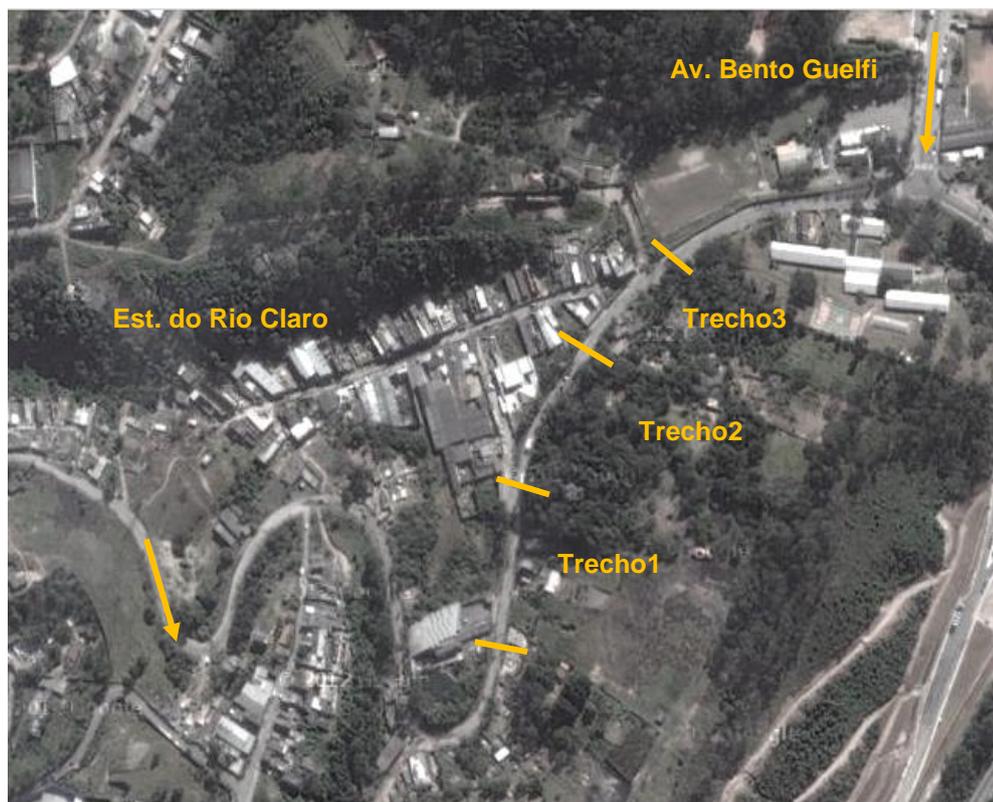


Figura 4.1 – Localização dos trechos experimentais na Av. Sapopemba, São Paulo, SP

De comum acordo entre a contratante (PMSP), a fornecedora de materiais (FREMIX), a empreiteira (SOEBE) e os pesquisadores do LTP-EPUSP, foram definidas suas estruturas, alterando apenas o material constituinte da sub-base. Ficou definido que dos 300,0 m do trecho experimental, os primeiros 100,0 m, seriam compostos pela estrutura que já vinha sendo aplicada (estaca 213 a 218), os 100,0 m seguintes contemplariam uma sub-base de agregado reciclado de RCD com a adição de 3% de cimento Portland (estaca 218 a 223), e os últimos 100,0 m considerariam o uso de 3% de cal hidratada misturada ao agregado reciclado de RCD (estaca 223 a 228) na sub-base (Figura 4.2). Neste experimento, os aglomerantes foram fornecidos gentilmente, a cal hidratada (CH1) pela BELOCAL e o cimento Portland (CP-II-E-32) pela FREMIX.

O CBUQ utilizado como revestimento asfáltico foi fornecido pela usina de asfalto da PMSP, sendo produzido com um ligante convencional tipo CAP 50/70. Todavia, não foram disponibilizados os parâmetros de projeto de dosagem da mistura asfáltica. A base foi executada com RAP com asfalto-espuma, constituída de 80% de material

fresado, 19% de pó de material fresado e 1% de cal, misturados com 2,5% de ligante asfáltico (CAP 50/70).

Durante as etapas construtivas das camadas estruturais, foram realizados os controles de umidade e peso específico *in situ* dos materiais, bem como o controle deflectométrico com uso de Viga Benkelman e FWD. No início dos trabalhos, a Viga Benkelman apontou a necessidade da estabilização com rachão do subleito dos trechos experimentais, devido à presença de material de baixa capacidade de suporte nesta região de corte.

Este é um procedimento comumente utilizado no meio técnico para redução da deflexão a custos competitivos, na capital paulista, devido à dificuldade de seleção e exploração de jazidas de solos a distâncias adequadas às obras. Posteriormente, foram coletadas as bacias deflectométricas com FWD no revestimento para procedimentos de retroanálise e estimativa dos módulos de resiliência *in situ*.

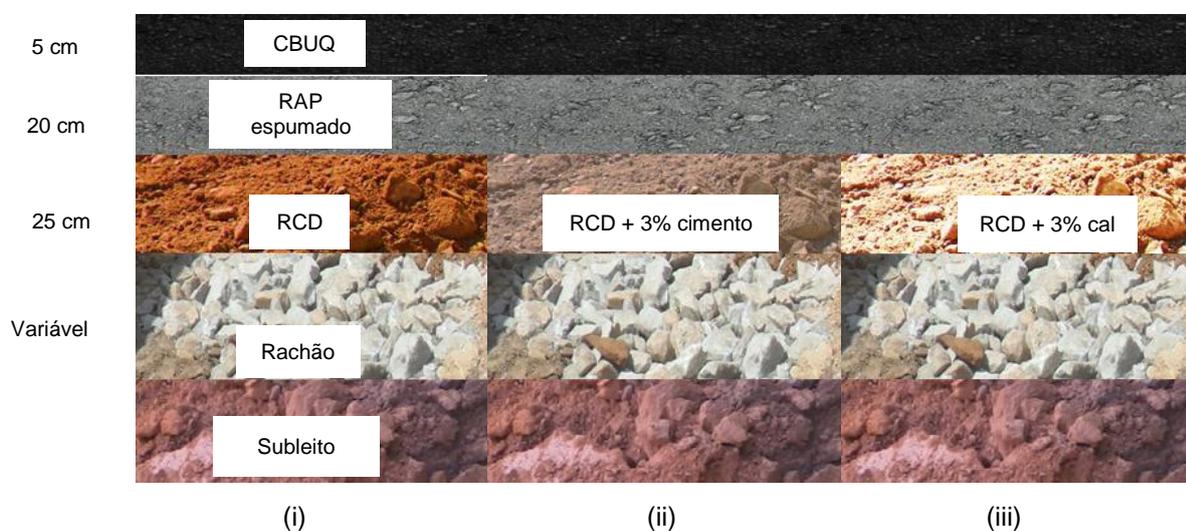


Figura 4.2 – Concepções estruturais dos três trechos experimentais: (i) RCD, (ii) RCD + 3% cimento, e (iii) RCD + 3% cal

A dosagem e homogeneização dos materiais das camadas de base e sub-base ficaram a cargo da empresa FREMIX, tendo executado os procedimentos com a misturadora KMA 200, marca Wirtgen. Tal equipamento possui uma estrutura montada em eixo, que pode ser transportada, possuindo versatilidade para dosagem *in situ* ou em planta de reciclagem. Esta possui um compartimento no qual são

lançados os materiais para serem misturados convenientemente, tal qual um “pugmill”, sendo em sequência adicionados os aglomerantes, para em seguida ser adicionada a água no valor de referência ao teor ótimo de dosagem, como mostra a Figura 4.3.



Figura 4.3 – Pugmill e esteiras de distribuição de material reciclado em usina recicladora

4.2 Execução do trecho experimental

A construção do trecho experimental foi iniciada com retirada do material remanescente, por meio de equipamento fresador, ao longo dos 300,0 m de extensão dos trechos, sendo alcançada a cota de referência, ou subleito. Como o material do subleito demonstrou ser sensível à presença de água, indicando altas deflexões (da ordem de 300,0 a 400,0 x 10⁻² mm), medidas por meio de Viga Benkelman, optou-se pela estabilização com agregados tipo rachão, em uma camada de cerca de 20,0 a 60,0 cm, antes da execução da sub-base.

Em concordância com esta medida, foram coletadas e ensaiadas amostras do subleito da região para verificação da sua capacidade de suporte e da verificação da necessidade do emprego da técnica mencionada (Figura 4.4). Foram realizados ensaios do procedimento MCT que indicaram solos de comportamento não-lateríticos com baixa capacidade de suporte.



Figura 4.4 – (i) coleta do material de subleito, e (ii) ensaio de perda por imersão do procedimento MCT

Em seguida, foi executada a camada de sub-base com agregado reciclado das três seções mencionadas. O transporte, espalhamento, compactação e controle das camadas executadas são especificados pela ETS 001 (PMSP, 2003). Tal norma determina que a espessura de cada camada individual acabada deva se situar no intervalo de 10,0 a 20,0 cm.

No entanto, em campo, a camada final foi executada em uma única frente de serviço, com a espessura total de 25 cm. As Figuras 4.5 e 4.6 mostram as várias etapas do processo executivo da camada de sub-base com agregados reciclados de RCD.



Figura 4.5 – (i) lançamento de RCD, e (ii) espalhamento com motoniveladora



(i)

(ii)

Figura 4.6 – (i) compactação do RCD, e (ii) camada acabada

Após a execução da camada de sub-base, deu-se início à execução da camada de base de RAP com asfalto-espuma. A curva granulométrica da mistura foi definida previamente para atender os requisitos impostos pela ETS 02 (PMSP, 2009) que preconiza um mínimo de 5% na fração fina (abaixo da peneira # 200) para garantia da qualidade da dosagem e homogeneização da mesma (Figura 4.7). Esta foi compactada em campo com energia Proctor modificado.

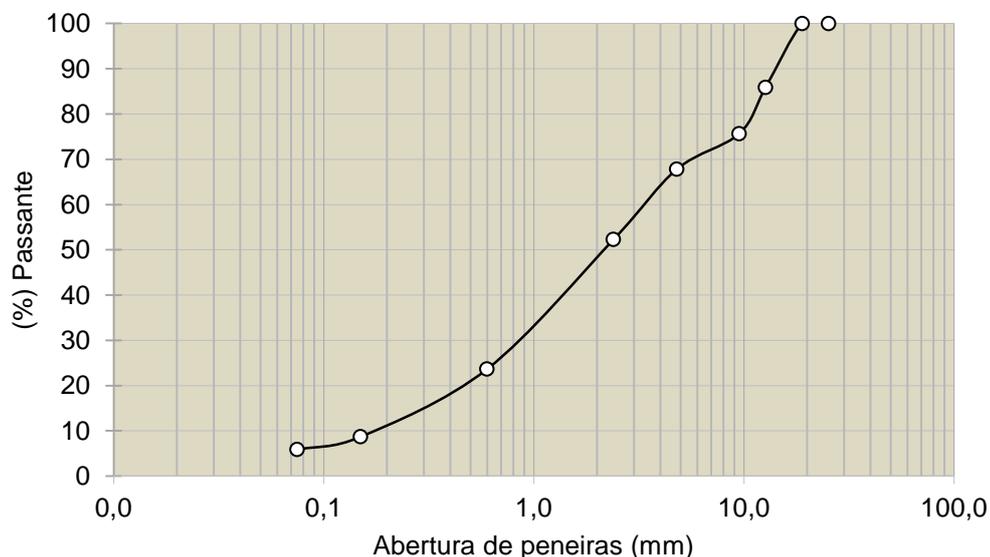


Figura 4.7 – Curva granulométrica da mistura 80%RAP +19%Pó de RAP e 1% cal CH-1

Para cada ponto da curva de compactação foi aplicada tal granulometria com os materiais em peso seco e com estes foram definidos, em seguida, o teor de betume necessário a adicionar para perfeita homogeneização do material. O teor aplicado final, estabelecido pelo processo de dosagem, foi de 2,5% de CAP convencional

para conferir características de uma mistura reciclada espumada. Concomitante a isso foram controladas a taxa de expansão e a meia vida em usina para garantir homogeneidade e estabilidade das características dos materiais.

Um aspecto importante foi observado com a eliminação da imprimação na camada de sub-base, visto que tal procedimento poderia ocasionar patologias nas camadas cimentadas (RCD com cimento) e por impermeabilizar a camada e não permitir o fluxo da frente úmida do RAP com asfalto-espuma. Nesta etapa, o material foi lançado e espalhado em pista com o auxílio de uma vibroacabadora, sendo em seguida compactado.

Como a camada de RAP com asfalto-espuma necessita de um período de alguns dias de cura (para evaporação de água) e como o tráfego estaria liberado neste período, a empresa executora adotou um sistema de “salgamento” feito com a aplicação de uma emulsão asfáltica diluída, seguida do espalhamento de pó fino do RAP, para proteção da camada acabada. A Figura 4.8 ilustra os processos envolvidos na execução da camada de base.



(i)



(ii)



(iii)

Figura 4.8 – Processos de aplicação do RAP espumado: (i) lançamento e espalhamento por vibroacabadora, (ii) compactação por rolo pneumático e liso, e (iii) aplicação da emulsão e “salgamento” com pó de RAP

Após este processo e aguardo do tempo de cura de sete dias, a base foi limpa e aplicada à pintura de ligação seguida da execução do revestimento asfáltico. A Figura 4.9 ilustra as atividades realizadas para execução da camada de revestimento em concreto betuminoso usinada a quente (CBUQ).



(i)



(ii)

Figura 4.9 – Execução da camada de revestimento: (i) limpeza por meio de vassoura mecânica e aplicação de pintura de ligação, e (ii) lançamento e compactação do CBUQ

5 RESULTADOS EM LABORATÓRIO

Este capítulo destina-se à apresentação dos principais resultados obtidos durante a aplicação dos procedimentos descritos no capítulo de Materiais e metodologia, bem como analisá-los de modo a observar as características físicas e compreender o comportamento mecânico do agregado reciclado de RCD e as alterações que a adição de aglomerantes implica ao material.

5.1 Composição granulométrica

Três amostras foram preparadas por quarteamento e, em seguida, peneiradas com o objetivo de se estabelecer os parâmetros de curvatura da distribuição do material em estudo, bem como realizar o controle necessário dos materiais segundo a ETS 001 (PMSP, 2003). A Figura 5.1 mostra o resultado das distribuições granulométricas obtidas.

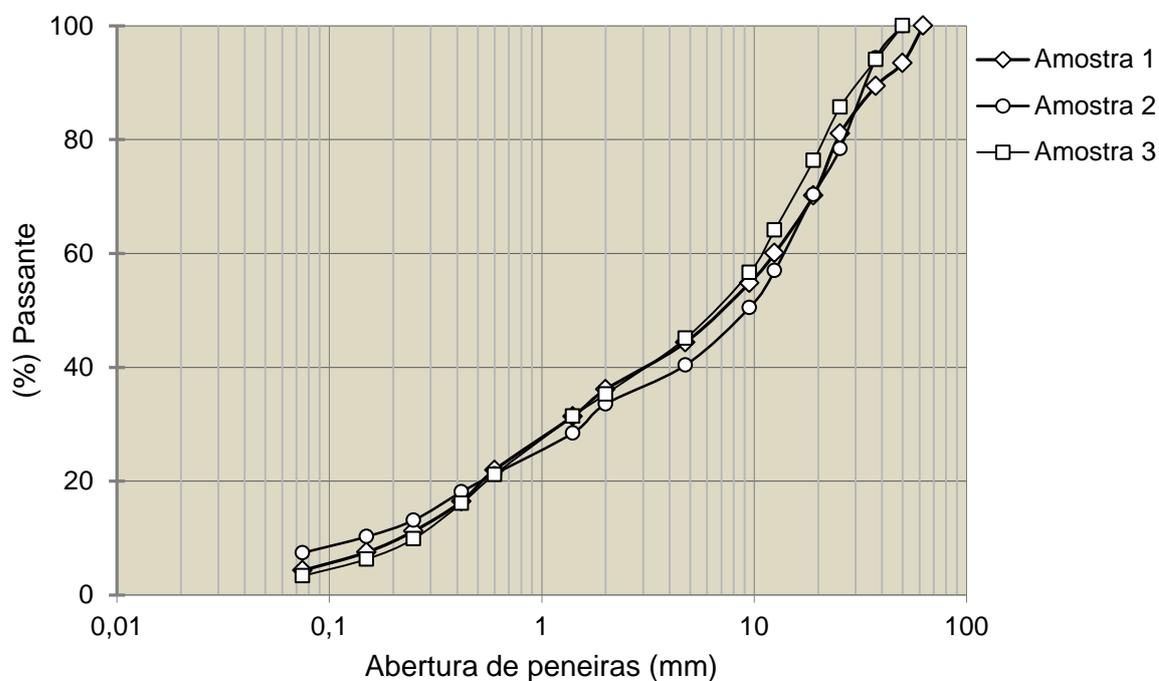


Figura 5.1 – Curva granulométrica do RCD obtido para três amostras

Como é possível observar na Figura 5.1 o material descreve uma distribuição granulométrica não uniforme, apresentando valores de coeficiente de uniformidade (Cu) e percentual passante na peneira 0,42 mm médios de 50% e 17%, respectivamente, atendendo às especificações de projeto, segundo as normas brasileiras vigentes. No entanto, o coeficiente de curvatura (Cc) apresentou resultado inferior à especificação, segundo a norma ETS 001 (PMSP, 2003), com uma média de 0,58, cujo valor está abaixo dos limites preconizados em norma (que são de 1,0 a 3,0).

Quando este se encontra abaixo de 1,0, a curva tende a assumir característica descontínua e há falta de grãos com certo diâmetro ou de uma dada fração. Tal singularidade de aceitação também foi verificada em pesquisas anteriores, com agregados oriundos de São Paulo e região (LEITE, 2007; MOTTA, 2005). Por esta dificuldade com os agregados reciclados de RCD, a norma NBR 15115 (2004) não adota este parâmetro. Sabe-se que este material altera-se de graduação com a compactação e que o parâmetro de controle de graduação importante deveria ser fixado após compactação. As curvas descontínuas promovem mobilidade e, portanto, maior quebra dos agregados durante a construção.

Com relação ao diâmetro máximo dos grãos, foram observados alguns fragmentos com dimensão acima de 50 mm, não se enquadrando assim na ETS 001 (PMSP, 2003), ainda que sua porcentagem retida nesta peneira tenha sido pequena.

As especificações citadas em diversos países assumem limites quanto à distribuição granulométrica, assumindo curvas, em geral, bem graduadas, não havendo nas especificações nacionais esse controle. Acredita-se que o controle de graduação deva ser feito antes e após compactação, e que a distribuição granulométrica bem-graduada deva ser obtida após compactação.

A imposição do controle granulométrico por Cc, Cu e percentual passante na peneira 0,42 mm facilita o emprego do agregado reciclado de RCD, pois sua limitação física é mais abrangente, porém, mesmo atendendo aos requisitos da especificação, podem-se observar discrepâncias granulométricas para um mesmo material.

5.2 Natureza da composição e teor de contaminantes

Foram tomados cerca de 15,0 kg de material após amostragem por quarteamento, onde este foi lavado em água corrente, seco em estufa, e em seguida, pesado e caracterizado conforme a natureza de sua composição: (i) impurezas, (ii) fragmentos cimentícios, (iii) rocha, e (iv) cerâmica. A Figura 5.2 e a Figura 5.3 denotam respectivamente o processo envolvido na avaliação e os resultados obtidos, respectivamente.



Figura 5.2 – Secagem em estufa até constância da massa após lavagem

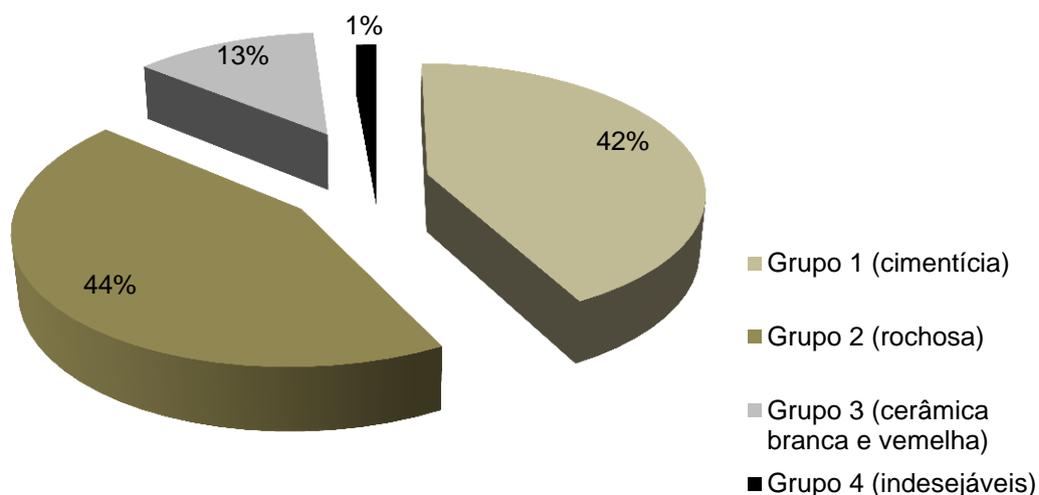


Figura 5.3 – Composição do RCD em função da sua natureza

Foram também quantificados os valores de composição por natureza do RCD, RCD+3%cim. e RCD+3% cal com os corpos de prova preparados para realização dos ensaios de módulo de resiliência e de deformação permanente. A Figura 5.4 mostra, para cada grupo de misturas, uma distribuição média das porcentagens de cada componente e suas variações. Observa-se a similaridade na composição das amostras, demonstrando o cuidado na moldagem dos corpos de prova, a partir de frações bem representativas.

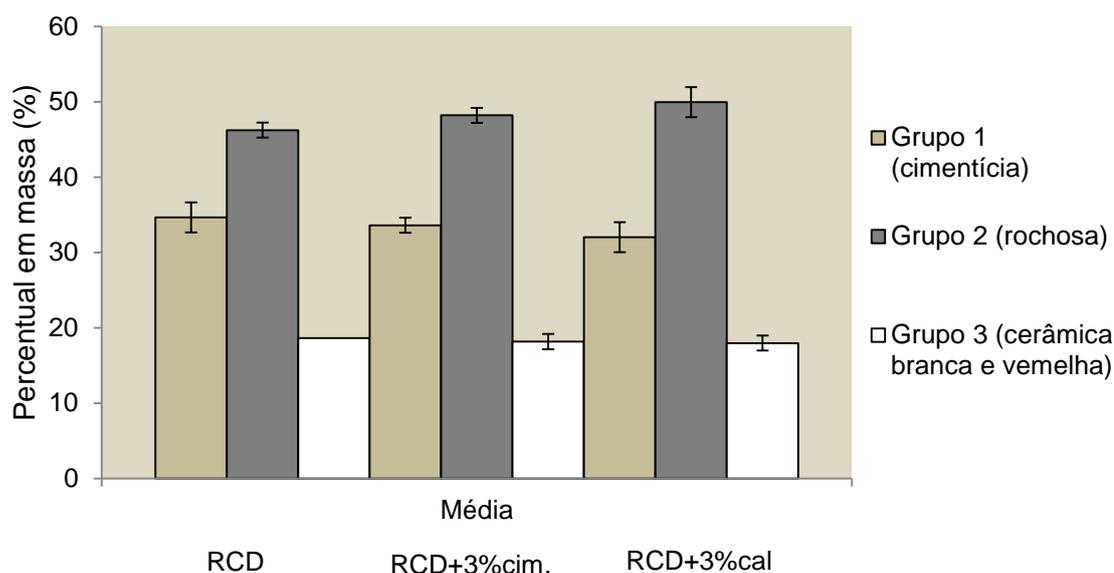


Figura 5.4 – Composição por natureza: média de quatro corpos de prova por material

Pode-se observar que o grupo de maior representação é o de natureza rochosa, tanto considerando uma amostra aleatória de 15,0 kg, como trabalhando apenas com as concentrações nas frações entre 12,5 e 9,5 mm (para confecção dos corpos de prova 150,0 x 300,0 mm). Neste último caso, a variabilidade da natureza por composição entre os materiais foi reduzida a coeficientes de variação da ordem de 2 a 4%. O teor de contaminantes apresentou resultado satisfatório com relação às especificações, que exige ser inferior a 2% em peso para impurezas de mesma natureza e de 3% para naturezas diversas.

Poon e Chan (2006) comentam que quanto maior a matriz pétreia de agregados reciclados de origem de concreto, melhores as propriedades físicas (ex.: peso

específico seco) e propriedades mecânicas (ex.: CBR) quando comparadas às misturas com matriz pétreo de agregados reciclados de cerâmica.

5.3 Forma das partículas

Duas amostras representativas foram retiradas para mensurar o índice de forma segundo as duas especificações citadas no item 3.2.3. Foram testadas duas formas de relação de braço no ensaio ASTM D 4791 (ASTM, 2010), a saber, 1:3 e 1:5. Na Tabela 5.1 é apresentado o resultado médio da análise de forma dos grãos. Adicionalmente, fez-se uma separação dos grãos de acordo com a sua natureza (cimentícia, cerâmica, rochosa), como em Leite (2007), além da determinação do índice em cada caso, de acordo com a especificação da ABNT.

Tabela 5.1 – Resultados referentes aos ensaios de índice de forma

NBR 7809 (ABNT, 2006)				D 4791 (ASTM, 2010)	
Média	Cimentícia	Rocha	Cerâmica	Percentual de part. Lamelares e alongadas	
				1:3	1:5
0,5	0,54	0,57	0,37	14	2,5

Pode-se concluir que, de maneira geral, o material apresentou uma característica cúbica⁶ tanto na especificação ABNT quanto na ASTM, tendo em vista que na ABNT, seus valores foram próximos de 1 (forma tipo cúbica) e na ASTM as duas relações de braço tiveram o percentual de partículas lamelares e alongadas abaixo do limite dado pela norma ETS 001 (PMSP,2003) ou NBR 15115 (ABNT, 2004). Percebe-se que a relação de braço 1:3 torna o espaço amostral mais restritivo, quando comparada à relação 1:5, permitindo um maior controle quanto à forma dos agregados.

Com relação aos corpos de prova cilíndricos de dimensões 150,0 por 300,0 mm concebidos para ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente, a Figura 5.5 mostra que a concentração da forma dos grãos das misturas propostas,

⁶ Segundo NBR 7809 (ABNT, 2006) as frações analisadas acima da peneira 4,8 mm devem possuir relações próximas a 1,0 para serem considerados como materiais cúbicos.

apresentou resultados similares para cada conjunto de quatro corpos de prova, comprovando a eficácia da medida descrita no item 3.3.3 para mitigar os efeitos da variabilidade do próprio material.

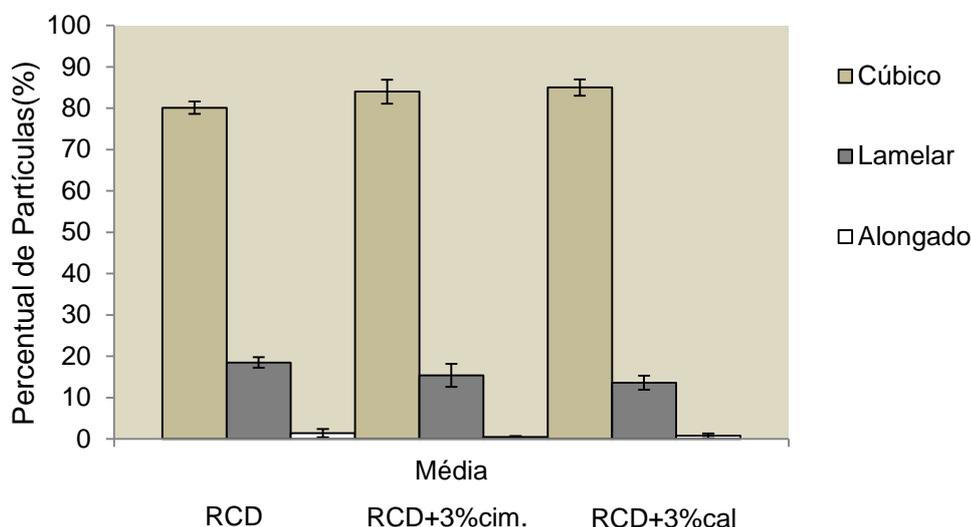


Figura 5.5 – Forma dos agregados: média de quatro corpos de prova por material

5.4 Resistência pelo método dos 10% de finos

Para a resistência segundo o método dos 10% de finos, foram preparadas duas amostras, tal qual descrito em 3.2.4. A Tabela 5.2 apresenta o resumo dos resultados obtidos.

Tabela 5.2 – Resumo do resultado dos 10% de finos

BS 812-111 (BSI, 1990)		ME 96 (DNER, 1998)	
Finos (%)	F(KN)	Finos (%)	F(KN)
10,9	49,9	11,1	49,1

Quanto aos resultados de resistência aos 10% de finos, a situação atual denota que o agregado reciclado misto estudado possui semelhança de valores com os obtidos por Poon e Chan (2006), que realizaram o ensaio através da especificação britânica com agregados reciclados de tijolos e também de concreto e registam valores de 49 e 146 kN, respectivamente. Deste modo, observa-se que o agregado reciclado da presente pesquisa teve resultado comparável àquele advindo de tijolos. É evidente que tal parâmetro é totalmente dependente das características morfológicas do

material a que se quer avaliar, e indiretamente conduz a uma ideia de resistência da matriz pétreo para composição do RCD.

5.5 Resistência à abrasão das partículas

Utilizando a graduação A, foram tomadas 5000,0 g, aproximadamente, de material. O desgaste Los Angeles obtido para o material em estudo foi de 43%, considerado aceitável, uma vez que agregados naturais britados, segundo Bernucci *et al.* (2006), para serem empregados em base de pavimentos devem assumir valores entre 40 a 55%. Tseng (2010), com materiais oriundos da reciclagem de pavimentos de concreto, utilizando-se da graduação B, avaliou a abrasão Los Angeles para dois tipos diferentes de britadores e observou 32% de abrasão para o britador de mandíbulas e 43% de abrasão para o britador de impacto, mantendo-se dentro dos limites estipulados por especificações nacionais que limita em 50% de perda para uso em concreto. A especificação australiana do estado Victoria, menciona que para vias de tráfego leve (classe 4) aplicado em sub-base, os agregados reciclados de concreto devem possuir abrasão Los Angeles inferior a 45,0%, logo o referido valor encontrado enquadra-se na especificação mencionada.

No tocante à resistência dos agregados pelo método dos 10% de finos, com a verificação por dois procedimentos distintos, foi possível observar que o material possui qualidades quanto à aplicação seguindo especificações internacionais. Em geral, as especificações estrangeiras limitam o uso de agregados reciclados de RCD para aplicação em bases, quando os valores de desgaste por abrasão Los Angeles estão abaixo de 30 a 45% (GARB *et al.*, 2011). Nas normas nacionais não são atribuídas considerações quanto à resistência abrasiva ou de resistência aos 10% de finos da fração graúda, sabendo-se que quão melhor o comportamento mecânico das partículas, melhor o comportamento mecânico da mistura, logo, tal parâmetro deve ser abordado para enquadramentos futuros.

5.6 Curva de compactação e capacidade de suporte

Para a compactação dos corpos de prova, foi necessário proceder à substituição da fração retida na peneira 19 mm, pela mesma quantidade em peso de grãos

passantes na peneira 19 mm e retidos na peneira 4,8 mm, como recomenda a NBR 7182 (ABNT, 1986). Portanto, com o material remanescente, procedeu-se à granulometria desejada, assim como abordado por Leite (2007), para manutenção da similaridade amostral e diminuição da variabilidade inerente ao material.

As peneiras de interesse foram: 12,5-9,5, 9,5-4,8, 4,8-2,0 e passante na 2,0 mm. Determinou-se então que cada kg de RCD deveria conter 22% de material retido na peneira 12,5 mm, 12% de retido na peneira 9,5 mm, 22% de retido na peneira de 4,8 mm, 10% de retido na peneira 2,0 mm e 34% de passante na peneira de 2,0 mm. Com isso foram feitas as compactações e determinadas às curvas de Proctor das misturas de RCD propostas. Os 3% de cimento (ou 3% de cal) foram adicionados em massa total seca para compor um corpo de prova. A Figura 5.6 apresenta a configuração das curvas obtidas em função de cada material pesquisado (RCD, RCD+3%cim. e RCD+3% cal).

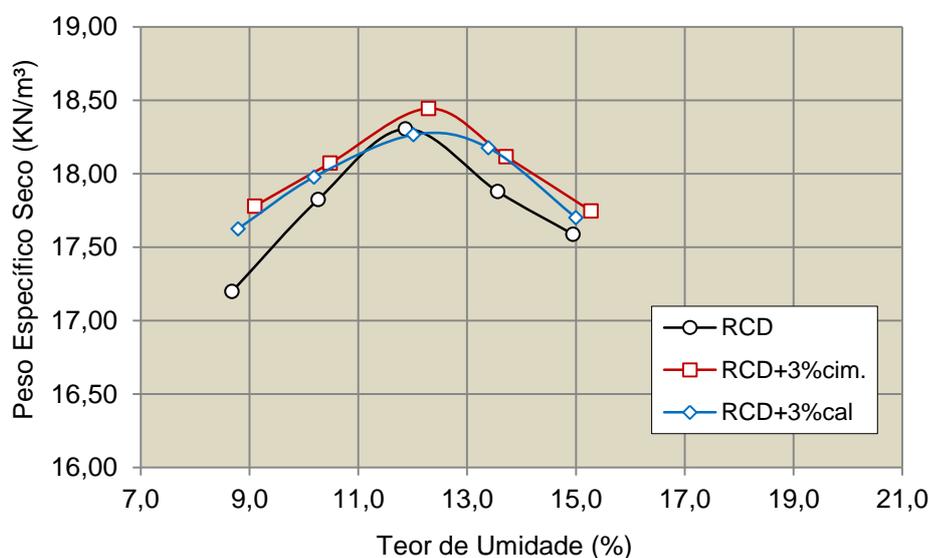


Figura 5.6 – Curvas de compactação dos materiais empregados na sub-base do trecho experimental

Xuan (2012), trabalhando com misturas compostas por agregados reciclados de concreto e cerâmico misturados a 4% de cimento, observou que quanto menor a quantidade de agregados reciclados de cerâmica em relação à mistura total, maior o peso específico seco e menor teor de umidade. Na pesquisa desta dissertação, pode-se perceber que com o incremento de aglomerantes, há de uma forma geral, o aumento do peso específico seco em todos os pontos devido à finura dos materiais

e seus respectivos pesos específicos serem maiores que os agregados reciclados, como comentado por Xuan (2012), no caso de misturas cimentadas.

Quanto à capacidade de suporte, o RCD apresentou valor médio igual a 51% e expansão nula, valores estes considerados satisfatórios pela especificação empregada, a qual considera que a mistura de agregado reciclado de RCD deva ter um mínimo de 20% em relação ao CBR e expansão máxima de 1%, como material aplicado à camada de sub-base.

5.7 Resistência à compressão simples

Quanto à resistência a compressão simples, procurou-se avaliar efeitos como: (i) reações pozolânicas com o tempo na mistura com RCD, e (ii) o incremento da RCS, devido ao tempo de cura das misturas com adição de aglomerantes, RCD + 3% cim. e RCD + 3% cal. Para tanto, o material coletado em campo foi levado ao laboratório, compactado e deixado em repouso por 7 dias em câmara úmida. Foi analisado um total de três amostras para cada material. Pode-se observar pela Tabela 5.3 que os materiais cimentados atendem ao parâmetro de controle de qualidade de projeto como recomendado pela ETS 001 (PMSP, 2003) e NBR 15115 (ABNT, 2004).

Tabela 5.3 – Média de valores da resistência à compressão simples

7dias	RCD misto -	RCD + 3% cim. Portl.	RCD + 3% cal
RCS médio(MPa)	0,42	4,65	3,59
Desv. Padrão (MPa)	0,01	0,21	0,28
CV (%)	2,4	4,5	7,8

5.8 Módulo de resiliência

Para a realização do ensaio de módulo de resiliência, tal qual preconiza a norma ME 134 (DNIT, 2010), foi utilizada a câmara triaxial instalada em equipamento pneumático de cargas cíclicas, com pressão de confinamento dada por ar. Durante a instrumentação, foi realizado o capeamento do topo e da base dos corpos de prova

(camada de gesso). A Figura 5.7 mostra detalhes da câmara triaxial e do equipamento pneumático. Os valores a serem apresentados, representam a média de resultados extraídos de quatro corpos de prova, para cada mistura investigada.



Figura 5.7 – (i) vista do corpo de prova compactado, e (ii) instrumentação para ensaio triaxial conforme ME 134 (DNIT, 2010)

Foi avaliado o grau de compactação nas amostras referentes aos ensaios de MR. A Figura 5.8 mostra o grau de compactação médio para cada mistura proposta e seus respectivos desvios. O RCD, RCD + 3% de cimento e RCD + 3% cal apresentaram-se com média em 99,5%, 99,6% e 100,3%, respectivamente, e com desvio padrão a 1,1%, 1,1% e 0,5%, respectivamente.

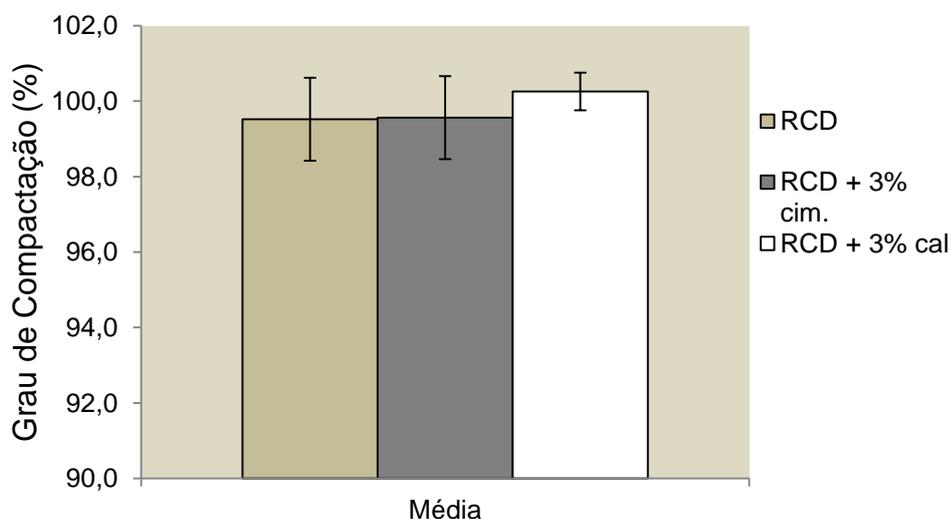


Figura 5.8 – Grau de compactação das amostras de MR e seus respectivos desvios

Procurou-se avaliar o efeito do grau de compactação no módulo de resiliência das amostras de RCD, apontado na Figura 5.9, como observado por Molenaar e Niekerk (2002). Quanto maior fosse o grau de compactação maior o peso específico da amostra, maiores seriam as respostas de módulo de resiliência. Tal fato deve-se, principalmente, à maior quantidade de material para um mesmo volume (massa/volume) e, conseqüentemente, à maior resistência aos deslocamentos.

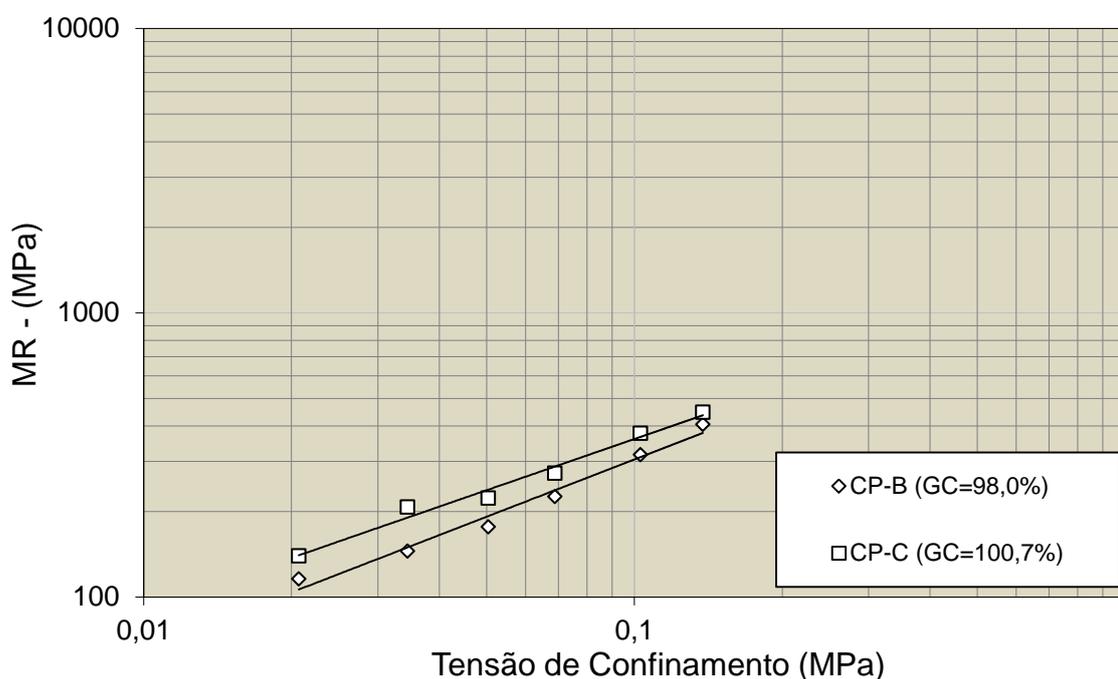


Figura 5.9 – Influência do grau de compactação para módulo de resiliência do RCD

Avaliou-se, na sequência, o efeito do ganho por reações pozolânicas residuais com o tempo, amplamente discutido por Leite (2007), Motta (2005), Poon; Qiao; Chan (2006), e Vegas *et al.* (2011), para caracterização da resposta quanto ao módulo de resiliência desse tipo de material. Fica evidente que após o processo de hidratação das partículas, o material adquire um aumento ao módulo de resiliência com o tempo.

Podem ter ocorrido reações pozolânicas de partículas de cimento não hidratadas, provavelmente dos concretos de origem do resíduo que, novamente expostas devido à britagem, reagem na presença da umidade adicionada aos materiais para a compactação, causando o incremento na rigidez com o tempo.

A Figura 5.10 apresenta tal fato: quando comparando, a exemplo, os módulos de resiliência obtidos a 0,1 MPa de tensão de confinamento para as idades de 7, 28 e 60 dias de cura, a resposta obtida foi 330 MPa, 370 MPa e 445 MPa, respectivamente, para cada idade, comprovando a ação do efeito pozolânico remanescente.

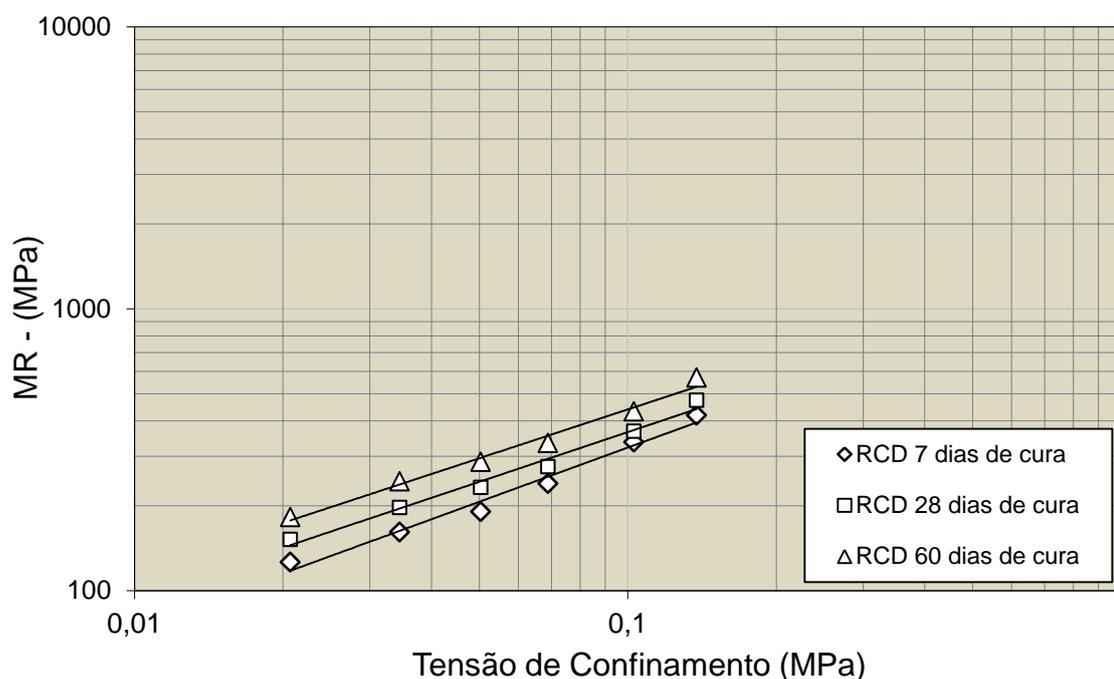


Figura 5.10 – Influência da reação pozolânica residual no RCD.

Com relação às misturas com adição de aglomerantes, RCD+3% cim. e RCD +3% cal, foi verificada a resposta do módulo resiliente quanto ao tempo de cura das misturas, conforme pode ser visto na Figura 5.11 para as misturas com cimento e na Figura 5.12 para as misturas com cal.

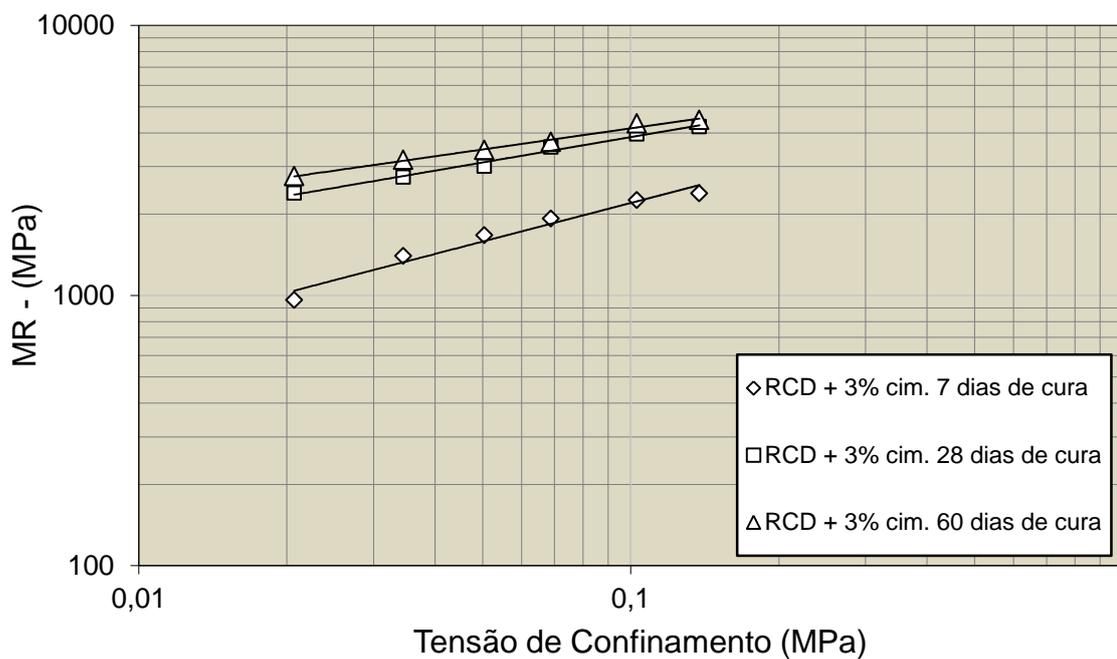


Figura 5.11 – Influência do tempo de cura nas misturas com RCD+3%cimento.

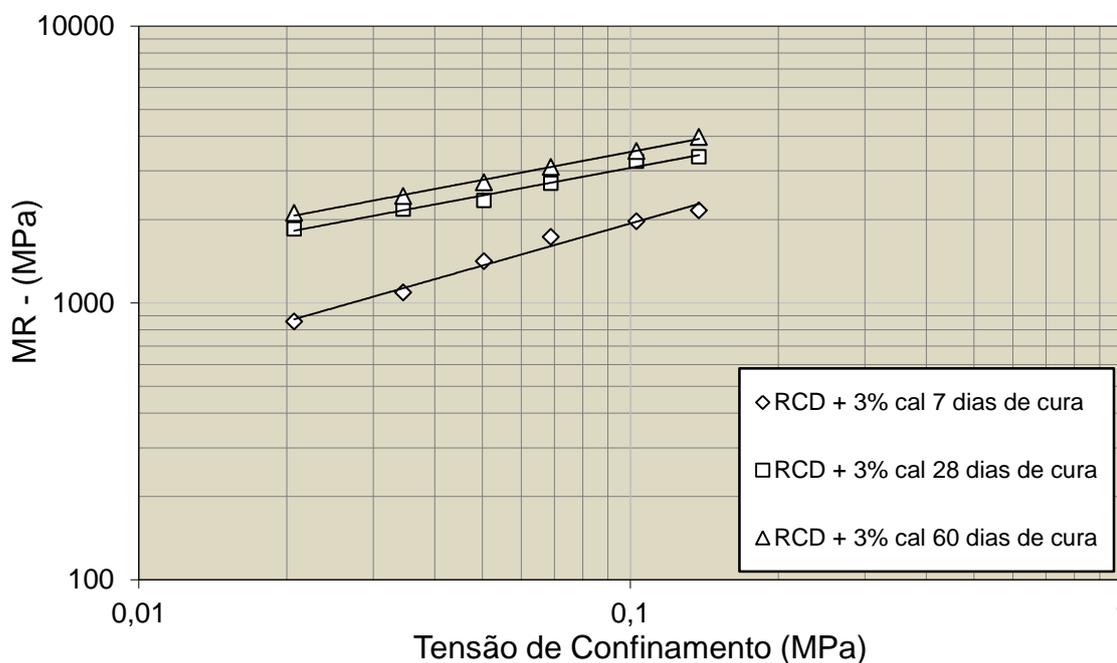


Figura 5.12 – Influência do tempo de cura nas misturas com RCD+3%cal.

Percebe-se que ao longo do tempo, tanto as respostas de deslocamentos resilientes quanto a sensibilidade à tensão de confinamento diminuem, evidenciado pela redução na inclinação da curva $MR=f(\sigma_3;\sigma_d)$ (redução do coeficiente k_2 da equação).

A Figura 5.13 apresenta o comparativo entre idades (7, 28 e 60 dias de cura) para todas as misturas em questão, e ressalta a diferença em termos de módulo de resiliência das misturas não tratadas com relação às misturas tratadas com aglomerantes.

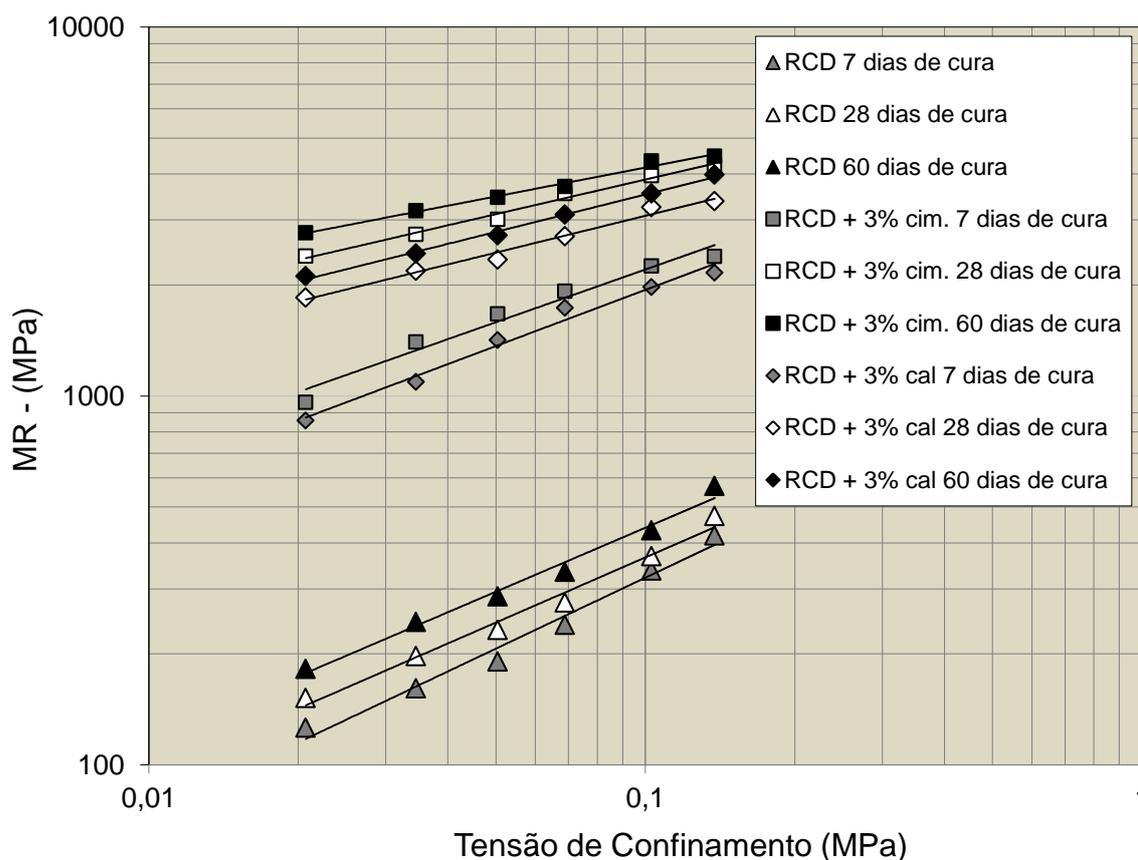


Figura 5.13 – Comparativo entre idades de cura para todas as misturas da pesquisa.

Logo, com o comportamento resiliente em laboratório das misturas estudadas foi possível destacar:

Para as misturas em RCD dois fatores foram elencados como principais para descrever o comportamento quanto ao módulo de resiliência: (i) incremento do módulo resiliente com o tempo de cura, em consequência ao acontecimento de reações pozolânicas residuais no material, e (ii) aumento do módulo de resiliência da mistura devido à densificação das amostras em laboratório, fator importante, comentado na literatura revisada e verificada durante o experimento em laboratório.

Para as misturas em RCD + 3% cim. verificou-se de forma indireta a ocorrência de reações de hidratação do cimento, através do aumento do módulo de resiliência com o tempo de cura.

Para as misturas em RCD + 3% cal acredita-se que ocorreram reações de pozolânicas com o tempo de cura do material. O agregado reciclado trabalhado na pesquisa é de categoria mista, tendo em sua constituição, componentes cerâmicos que podem ser reativos com a cal, provocando o ganho expressivo em módulo de resiliência com o tempo, fato comprovado em laboratório.

5.9 Deformação permanente triaxial

Com o procedimento descrito no item 3.3.4, obtiveram-se os níveis de tensões e deflexões atuantes para comparação entre os programas ELSYM5 e DIANA. Utilizou-se a mesma carga composta do FWD para o ensaio *in situ* (4100,0 kgf) e mesma geometria de aplicação com diâmetro do prato igual a 300,0 mm, realizando a retroanálise referente há quatro meses ($T=4M$) após a execução da camada final de revestimento.

Os módulos de resiliência e coeficientes de Poisson atribuídos foram referentes à retroanálise dos segmentos homogêneos 1,3 e 5, (a serem apresentados mais adiante), com a variação de propriedades de cada estrutura em função do tipo de mistura aplicada à sub-base: RCD, RCD+3% cimento e RCD+3% cal. A Tabela 5.4 mostra os valores de módulo de resiliência e coeficiente de Poisson retroanalizados para cada situação.

Tabela 5.4 – Módulos de resiliência retroanalizados obtidos para as estruturas em estudo

Seg. Homogêneo	Estrutura	MR (MPa)	Coefficiente de Poisson	Espessura (cm)
Seg. 1 - RCD	CBUQ	4.500	0,35	5,0
	RAP espuma	540	0,40	20,0
	RCD	295	0,40	25,0
	Rachão	258	0,40	30,0
	Solo local	200	0,45	∞
Seg. 3 - RCD+3% cim.	CBUQ	4.500	0,35	5,0
	RAP espuma	1.174	0,40	20,0
	RCD	2.928	0,40	25,0
	Rachão	317	0,40	30,0
	Solo local	229	0,45	∞
Seg. 5 - RCD+3% cal	CBUQ	4.500	0,35	5,0
	RAP espuma	915	0,40	20,0
	RCD	2.680	0,40	25,0
	Rachão	236	0,40	30,0
	Solo local	198	0,45	∞

Foram estudados três pontos de análise ao longo da espessura da camada de sub-base para verificar a influência de tensões atuantes: (i) topo, (ii) centro, e (iii) base da camada, $(x;y;z)=(0;0;25,01 / 0;0;37,5 / 0;0;49,99)$, bem como a deflexão máxima no topo da camada de revestimento. As Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam o comparativo entre deflexões e tensões verticais para comparação entre programas.

Tabela 5.5 – Comparativo das deflexões e tensões verticais na camada de RCD pelo ELSYM 5 e DIANA

Localização do ponto de análise	Ponto de análise em z (cm)	Tensões atuantes		Deflexão = (0;0;0,01)	
		ELSYM 5	DIANA	ELSYM 5	DIANA
		σ_z (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	Do (10 ⁻² mm)	Do (10 ⁻² mm)
Topo	25,01	1,50	1,72	33,0	33,4
Centro	37,50	0,83	0,89		
Fundo	49,99	0,50	0,56		

Tabela 5.6 – Comparativo das deflexões e tensões verticais na camada de RCD +3% cim. pelo ELSYM 5 e DIANA

Localização do ponto de análise	Ponto de análise em z	Tensões atuantes		Deflexão = (0;0;0,01)	
		ELSYM 5	DIANA	ELSYM 5	DIANA
	(cm)	σ_z (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	Do (10 ⁻² mm)	Do (10 ⁻² mm)
Topo	25,01	2,24	1,83	15,8	15,2
Centro	37,50	0,88	1,26		
Fundo	49,99	0,29	0,78		

Tabela 5.7 – Comparativo das deflexões e tensões verticais na camada de RCD +3% cal pelo ELSYM 5 e DIANA

Localização do ponto de análise	Ponto de análise em z	Tensões atuantes		Deflexão = (0;0;0,01)	
		ELSYM 5	DIANA	ELSYM 5	DIANA
	(cm)	σ_z (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	Do (10 ⁻² mm)	Do (10 ⁻² mm)
Topo	25,01	2,15	1,84	18,8	17,6
Centro	37,50	0,83	1,26		
Fundo	49,99	0,27	0,79		

Com o programa de elementos finitos DIANA (Figura 5.14) foi possível definir as tensões de confinamento atuantes ao longo de toda a estrutura bem como ao longo de todos os pontos de interesse (topo, centro e base das camadas de RCD, RCD + 3% cim. e RCD + 3% cal). Foram extraídas as tensões principais atuantes (σ_1 , σ_3), a correspondente tensão desviadora, bem como o nível de tensão atuante (σ_d/σ_3) nos pontos desejados. A Figura 5.15 apresenta um exemplo da estrutura com sub-base de RCD, e denotam o comportamento das tensões atuantes (σ_d , σ_3), para toda a estrutura e apenas na camada de interesse.

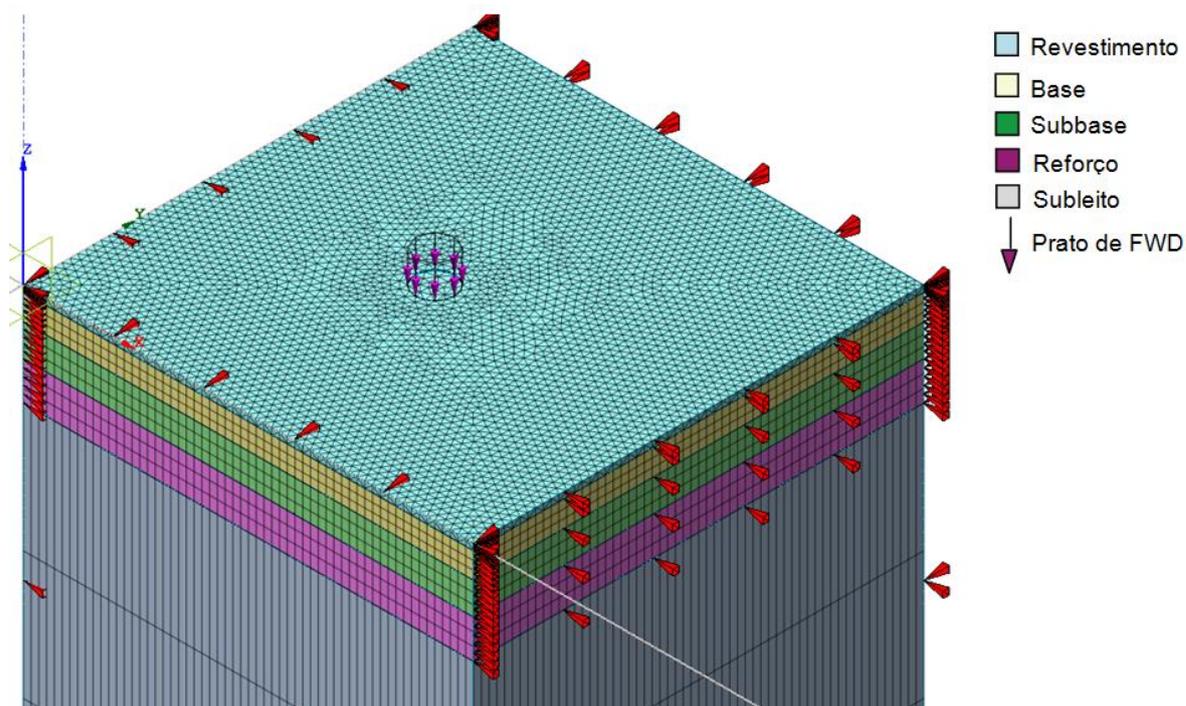


Figura 5.14 – Situação do carregamento e da estrutura estudada durante a análise com o programa DIANA

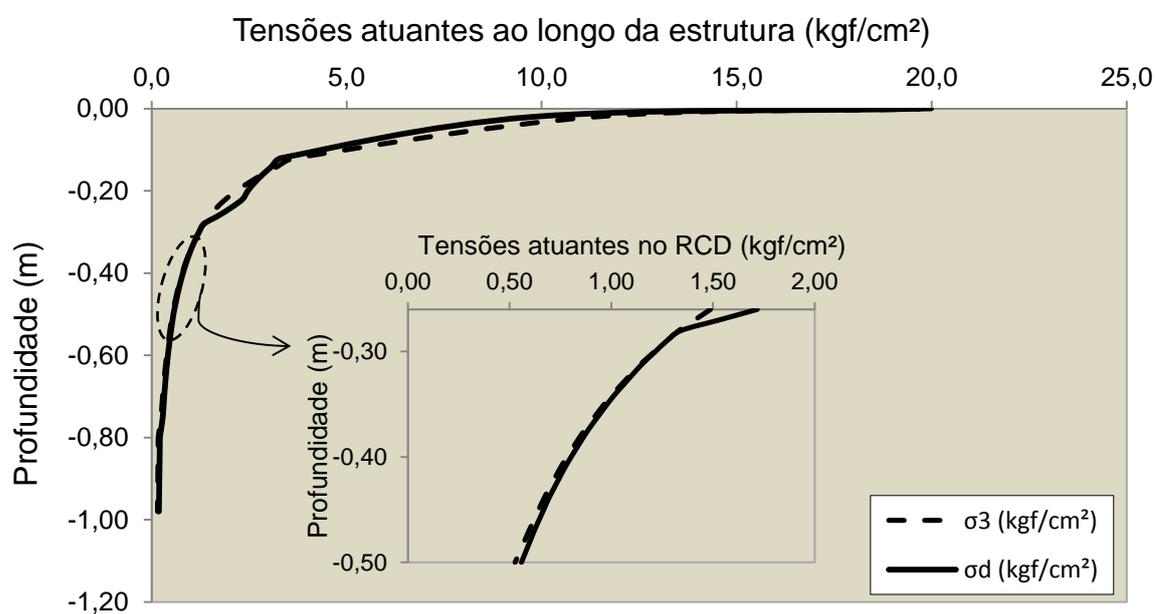


Figura 5.15 – Tensões atuantes na estrutura com sub-base em RCD após avaliação com o programa DIANA

Assumindo que as tensões principais atuantes (σ_1 , σ_3) extraídas pelo programa DIANA assemelham-se ao comportamento de campo, procurou-se avaliar a deformação permanente adotando o nível de tensões atuantes no topo da camada

de sub-base para cada estrutura. A Tabela 5.8 mostra que as relações (σ_d/σ_3) são próximas a 1,0, para a condição de solicitação na estrutura assumida.

Tabela 5.8 – Relação de tensões assumida para os ensaios de deformação permanente.

Tensões (kgf/cm ²)	RCD	RCD + 3% cim.	RCD + 3% cal
σ_3 (kgf/cm ²)	1,50	2,30	2,10
σ_d (kgf/cm ²)	1,72	1,83	1,84
σ_d/σ_3	1,15	0,80	0,87

Como comentado previamente, os ensaios de deformação permanente foram conduzidos até 100.000 ciclos de carga após 90 dias de cura dos materiais. Como efeito comparativo, foram ensaiadas as três misturas nas condições extraídas do DIANA, e aplicando a relação $\sigma_d/\sigma_3 = 3$ para todos os casos, uma vez que na bibliografia consultada há variação no nível de tensões assumido e permite verificar a influência do aumento da tensão desvio para os materiais.

A Figura 5.16 denota que, concluído o ensaio, quando se compara a condição de simulação do nível de tensões assumido pelo DIANA para todas as misturas, todas as respostas apresentam-se semelhantes, não evidenciando melhor resposta ou comportamento à deformação permanente de dado material em relação a outro, estando todas as misturas com pequena deformação permanente acumulada.

Ao se investigar as diferenças entre misturas para a condição de $\sigma_d/\sigma_3 = 3$, a mistura em RCD apresentou-se com uma deformação permanente acumulada ($3,96 \times 10^{-3}$ mm/mm) superior as misturas de RCD +3% cim. ($0,44 \times 10^{-3}$ mm/mm) e RCD+3% cal ($0,31 \times 10^{-3}$ mm/mm), evidenciando o efeito benéfico da adição dos aglomerantes no material, e redução dos efeitos da deformação permanente. Leite (2007), trabalhando com nível de tensões $\sigma_d/\sigma_3 = 2$, obteve resposta de deformação permanente igual a $1,27 \times 10^{-2}$ mm após 100.000 ciclos de carga, para um agregado reciclado misto sem adição de aglomerantes.

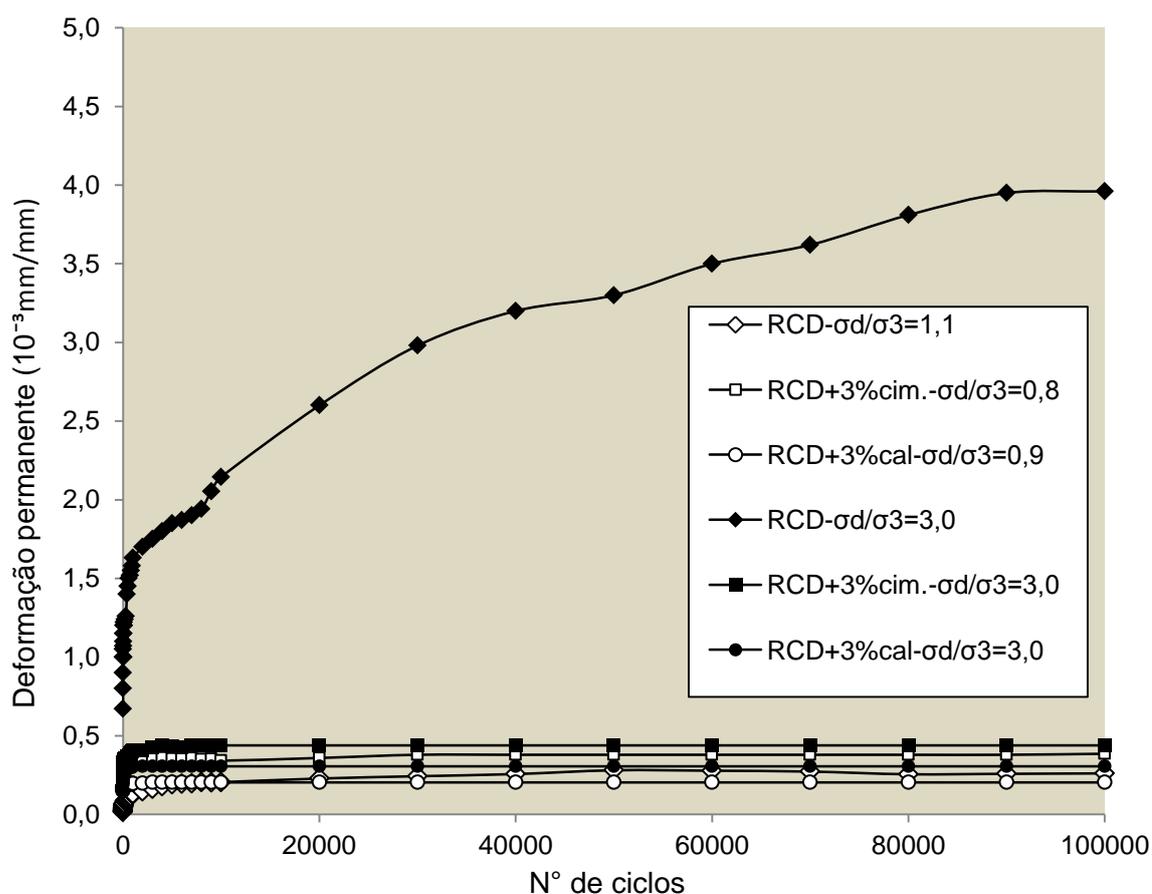


Figura 5.16 – Resultado médios da deformação permanente para as misturas estudadas

Quando se compara os dois níveis de tensão σ_d/σ_3 para todas as misturas, observa-se que as misturas com adição de aglomerantes permanecem em patamares elásticos, tanto no nível de tensões do DIANA, quanto assumindo $\sigma_d/\sigma_3 = 3,0$. Isto é um indicativo que devido à elevada rigidez das misturas pelo tempo de cura assumido (90 dias), os materiais com aglomerantes não sofrem consolidação ou plastificação devido aos esforços aplicados. Ou seja, nos níveis de tensão ensaiados e de repetição cíclica, as ligações cimentantes (do cimento ou da cal) são efetivas e não são rompidas, pelo menos na maior parte delas.

Werkmeister (2003) comenta que para misturas granulares não tratadas, dentre os vários fatores que influenciam a resposta quanto à deformação permanente, pode-se elencar: (i) número de ciclos, (ii) teor de umidade, (iii) histórico e nível de tensões, (iv) peso específico aparente e (v) graduação.

Verificando a resposta da deformação permanente da mistura em RCD quanto ao nível de tensão aplicado, observa-se que quando o nível exerce a relação $\sigma_d/\sigma_3 = 3,0$, o material tende a uma plastificação inicial (ou consolidação inicial – sendo difícil pelos dados obtidos distinguir o processo, podendo ser ambos), porém a partir dos 60.000 ciclos a taxa de crescimento da deformação se mantém menor que no início do ensaio, entrando o material num regime de fluência plástica. Cerni; Cardone; Bocci (2012) comentam que na fluência plástica embora ocorra deformação permanente esta é aceitável, mas o material pode chegar a falha para um elevado número de ciclos de carga.

Para o nível de tensões $\sigma_d/\sigma_3 = 1,1$ (obtido pelo DIANA), é assumido a uma pequena plastificação inicial, seguido de um regime elástico após 4.000 ciclos. A análise denota a importância do estado de tensões aplicado ao material. Tal comparativo é válido e importante para compreensão da aplicação do material em estruturas de pavimento, conferindo a investigação da capacidade de aplicações em camadas mais nobres (base, a exemplo) que as convencionalmente empregadas (camadas de sub-base), como aborda Leite (2007).

Como era esperado, observa-se que a resistência às deformações permanentes diminui com o aumento do nível de tensões aplicado (σ_d/σ_3).

Utilizando-se dos modelos de Monismith *et al.* (1975) e Barksdale (1972), foi realizada uma análise dos resultados à luz das eq. **(7 e 8)** apresentadas a seguir:

$$\varepsilon_p = a \cdot N^b \text{ (MONISMITH } et al., 1975) \tag{7}$$

$$\varepsilon_p = a + b \cdot \log(N) \text{ (BARKSDALE, 1972)} \tag{8}$$

Segundo Leite, (2007) os resultados com o modelo de Barksdale (1972) apresentam deformações inferiores aos resultados avaliados pelo modelo de Monismith *et al.* (1975).

Na Tabela 5.9 é possível verificar que para as misturas com RCD, tal fato ficou evidente para o nível de tensões assumido no DIANA, possuindo o modelo de

Barksdale (1972) melhor aproximação com o real. No entanto, para a relação de $\sigma_d/\sigma_3 = 3,0$ na mesma mistura, o modelo de Monismith *et al.* (1975) apresentou melhor correlação (r^2).

Avaliando as misturas com aglomerantes (RCD+3% cim. e RCD+3% cal), estas apresentaram respostas muito próximas entre modelos analíticos e valor observado no ensaio. Como era esperado, observa-se que a resistência às deformações permanentes diminui com o aumento do nível de tensões aplicado (σ_d/σ_3).

Tabela 5.9 – Resumo de análises pelos modelos propostos.

Material	Relação σ_d/σ_3	Equação	r^2	ϵ_p calculado (10^{-3} mm/mm)	ϵ_p ensaiado (10^{-3} mm/mm)
RCD	1,10	$\epsilon_p = 0,0208 * N^{0,244}$	0,97	0,35	0,26
		$\epsilon_p = -0,034 + 0,0590 * \log(N)$	0,95	0,26	
RCD	3,0	$\epsilon_p = 0,6560 * N^{0,155}$	0,94	3,24	3,96
		$\epsilon_p = 0,1233 + 0,5957 * \log(N)$	0,80	3,12	
RCD +3% cim.	0,8	$\epsilon_p = 0,2633 * N^{0,033}$	0,98	0,39	0,39
		$\epsilon_p = 0,2582 + 0,0248 * \log(N)$	0,97	0,38	
RCD +3% cim.	3,0	$\epsilon_p = 0,2871 * N^{0,042}$	0,94	0,47	0,44
		$\epsilon_p = 0,2795 + 0,0360 * \log(N)$	0,94	0,46	
RCD +3% cal	0,9	$\epsilon_p = 0,1637 * N^{0,022}$	0,88	0,21	0,20
		$\epsilon_p = 0,1630 + 0,0095 * \log(N)$	0,90	0,21	
RCD +3% cal	3,0	$\epsilon_p = 0,2022 * N^{0,04}$	0,84	0,34	0,31
		$\epsilon_p = 0,1993 + 0,0259 * \log(N)$	0,86	0,33	

Portanto, quanto ao desenvolvimento da deformação permanente, pode-se concluir que misturas com aglomerantes, quando comparadas à mistura in natura, assumem baixo valor de deformação permanente acumulada ao final do ensaio, mesmo a um nível de tensões mais alto. Desta forma, caso haja o aumento do nível de tensões no material, as misturas RCD + 3% cim. e RCD + 3% cal mantém a deformação permanente em um mesmo patamar.

Por sua vez, as misturas em RCD, não se mantém estáveis, quando aumentado o nível de tensões, assumindo uma deformação permanente acumulada mais

pronunciada. Tal situação configura a possibilidade do emprego das camadas estabilizadas (RCD + 3% cim. e RCD + 3% cal) num regime de tensões maiores, assumindo uma maior responsabilidade estrutural, em face às misturas com RCD, que requer ter maiores cuidados quanto ao emprego como camada estrutural.

Tal comparativo pode ser tomado como eficaz na fase do projeto de dosagem de misturas, compatíveis a atender certo nível de deformação permanente admissível. Este deve guiar a aceitação ou rejeição de determinada mistura, para um determinado nível de tensões e número de aplicação de carga.

6 RESULTADOS DE CAMPO

Com interesse de fornecer um maior controle dos materiais locados na estrutura dos trechos experimentais, além dos controles comuns da empresa empreiteira, foi realizada a caracterização do subleito pela metodologia MCT, o controle executivo de peso específico seco e umidade ótima da camada de sub-base *in situ*, avaliação do dano por umidade induzida (resistência à tração retida) da base de RAP espumado, resistência à tração do CBUQ.

Também foi realizada a estimativa dos módulos de resiliência dos respectivos materiais, além da deformação permanente do CBUQ e os controles estruturais por meio de Viga Benkelman no subleito e FWD no revestimento. Inicialmente, os segmentos foram divididos de acordo com o sentido do tráfego da localidade, com a finalidade de facilitar a nomenclatura dos levantamentos: sentido centro e sentido bairro, conforme mostra a foto na Figura 6.1.

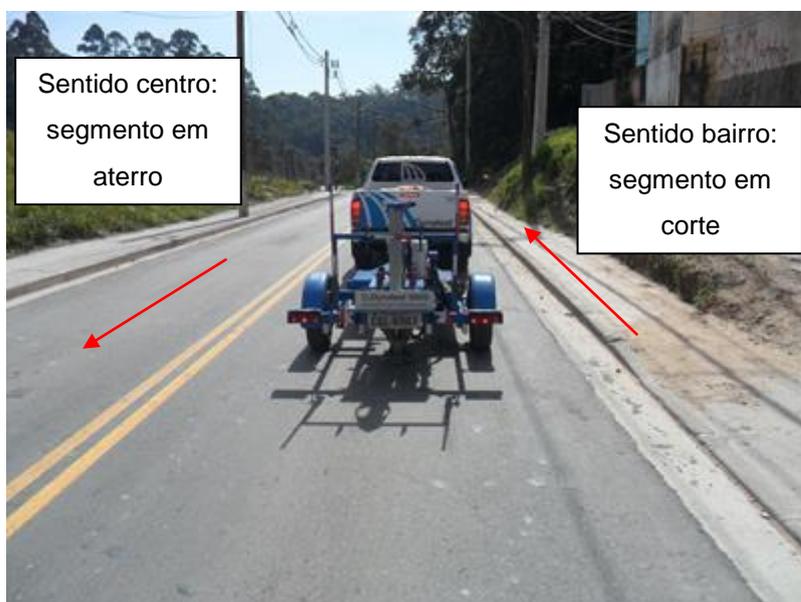


Figura 6.1 – Logística de levantamento: sentido centro e bairro

6.1 Caracterização do subleito

Tomando cerca de oito quilos de material coletado junto à estaca 223, no sentido bairro de levantamento, foram realizados os ensaios de caracterização do subleito preconizados pelo procedimento MCT (NOGAMI; VILLIBOR, 1995). Como o material em campo foi compactado na energia Proctor normal procurou-se estimar a sua classificação e determinar os respectivos valores de CBR na condição seca e úmida, expansão, contração e permeabilidade. Todos os ensaios foram realizados nas condições de variação de teores de umidade da curva de compactação equivalente à curva de golpe N igual a 10 no método M-MCV. A Figura 6.2 apresenta as etapas de ensaio realizadas no material coletado *in situ*.

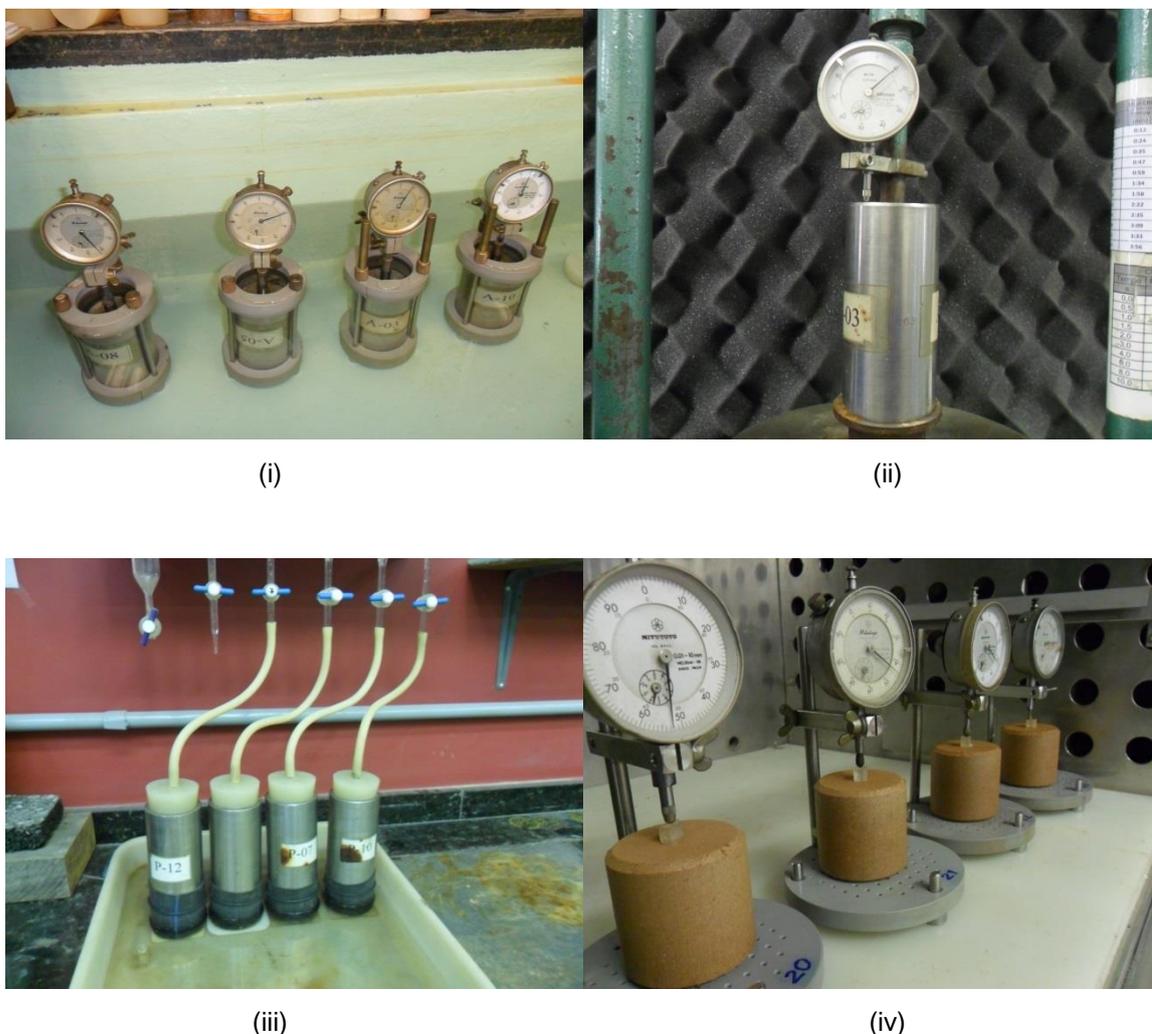


Figura 6.2 – Ensaio referentes a metodologia MCT: (i) expansão, (ii) CBR, (iii) permeabilidade, e (iv) contração

Quanto à classificação, o material se apresentou como NA', sendo uma areia siltosa, ou argilosa não-laterítica. O material apresentou ainda um peso específico seco máximo igual a $16,30\text{KN/m}^3$ e uma umidade ótima de 20,5%. Nos pontos ótimos, a expansão atingiu 1,30%, o mini-CBR imerso e seco remete a ordem de 4,5% e 12,5%, respectivamente.

A permeabilidade no ponto ótimo é função do tipo de material e da energia em que este é compactado e esta ficou próxima de $9,5 \times 10^{-5}\text{cm/s}$. O ensaio de contração que se limita a simulação da diminuição volumétrica em função da perda de água do corpo de prova para o meio ambiente foi da ordem de 1,2%. Este relaciona com o desenvolvimento de trincas e fissuras como fenômeno físico de campo (NOGAMI; VILLIBOR, 1995). Como o material apresentou uma baixa capacidade de suporte imerso, foi necessária a aplicação do reforço em rachão.

6.2 Controle das camadas de sub-base

Tanto a ETS 001 (PMSP, 2003) quanto a NBR 15115 (ABNT, 2004) recomendam para aplicação do material a um grau de compactação mínimo de 100% para a camada final acabada de agregado reciclado e um teor de umidade com variação de $\pm 1,5\%$ em relação àquele obtido em laboratório, tanto na energia normal, quanto na energia intermediária.

O controle tecnológico de compactação desta camada de sub-base com agregado reciclado foi feito pela empresa fiscalizadora da obra, LENC (Laboratório de Engenharia e Consultoria Ltda), utilizando o método do frasco de areia e o método expedito do fogareiro para umidade *in situ* (Figura 6.3). A Tabela 6.1 mostra que todos os valores atendem às especificações correntes ao uso deste material como camada estrutural de pavimento.



Figura 6.3 – Execução do furo de interesse e determinação da umidade pelo método do fogareiro

Tabela 6.1 – Controle tecnológico das camadas de sub-base do trecho experimental

Segmento Homogêneo	T. umd. campo (%)	T. umd. campo méd. (%)	$\gamma_{sm\acute{a}x}$ (KN/m ³)	γ_s (KN/m ³)	G.C.(%)	G.C méd. (%)	G.C. (%) ETS 001 (PMSP, 2003)	G.C. (%) NBR 15115 (ABNT, 2004)
Seg. 1 – RCD Bairro	12,9	12,7	18,3	19,00	103,9	103,9	≥ 100	≥ 100
Seg. 2 – RCD Centro	12,5			19,00	103,8			
Seg. 3 – RCD + 3% cim. Bairro	10,5	11,4	18,5	18,50	100,2	100,1		
Seg. 4 – RCD + 3% cim. Centro	12,3			18,45	100,0			
Seg. 5 – RCD + 3% cal Bairro	11,7	11,55	18,3	18,28	100,0	100,2		
Seg. 6 – RCD + 3% cal Centro	11,4			18,34	100,3			

Durante o processo executivo, a maior dificuldade foi à garantia de homogeneidade da execução das camadas de sub-base em RCD estudadas. Como as especificações brasileiras não restringem o uso do material de acordo com limites de distribuição granulométrica foram detectados alguns pontos não homogêneos. O espalhamento com uso de motoniveladora foi outro fator que acarretou o surgimento de segregação dos materiais. Além disso, a aplicação de agregado com dimensão máxima característica de até 50,0 mm pode favorecer a falta de homogeneidade.

Todos esses fatores somados dificultam o controle de qualidade de propriedades geotécnicas do material em termos estatísticos, diminuindo assim a sua visibilidade e aceitação pelo meio técnica. Tal fato poderia ser resolvido com a criação de limites específicos de distribuição granulométrica como apresentado no item 2.2, o que

remeteria a uma melhor distribuição e manutenção das propriedades de interesse executivo como: peso específico *in situ*, teor de umidade *in situ*, entre outros.

6.3 Controle das camadas de base

Para o controle da camada de base em RAP com asfalto-espuma, os controles realizados apresentam-se em concordância com o que especifica o normativo ETS 002 (PMSP, 2009). O material foi coletado em pista e procedeu-se à compactação do tipo Marshall com 50 golpes em cada face e posterior ruptura à tração por compressão diametral nas condições seca e úmida. A norma recomenda que na condição seca e úmida os valores médios de três corpos de prova devem ser de, no mínimo, de 0,28 MPa e 0,20 MPa, respectivamente. A Figura 6.4 apresenta a metodologia comentada.



Figura 6.4 – (i) aspecto das amostras compactadas, e (ii) imersão em água durante o período de 24 horas para posterior ruptura

Concomitante a isso, deve-se analisar a razão entre os valores úmido e seco e este deverá se situar acima de 70%. A Tabela 6.2, apresenta os resultados e constata-se que as recomendações foram atendidas segundo a especificação ETS 002 (PMSP, 2009).

Tabela 6.2 – Resistência à tração por compressão diametral seco e úmido

RT seco (MPa)	RT úmido (MPa)	Razão (%)
0,283	0,278	98,2

O módulo de resiliência foi realizado tal qual a norma ME 134 (DNIT, 2010), e assim como as sub-bases com amostras coletadas *in situ*, foi feito um conjunto de quatro corpos de prova. Procurou-se avaliar o efeito do tempo com 7 e 28 dias de cura.

No entanto, não houve ganho expressivo e sim valores sobrepostos, conduzindo a reduzida influência no tempo de cura e conseqüentemente no ganho de resistência mecânica, conforme pode ser visto na Figura 6.5. Estes valores são questionáveis, pois não se condicionou o material em estufa como recomendado pela ETS 002 (PMSP, 2009), podendo ter ocasionado uma diminuição da rigidez do material.

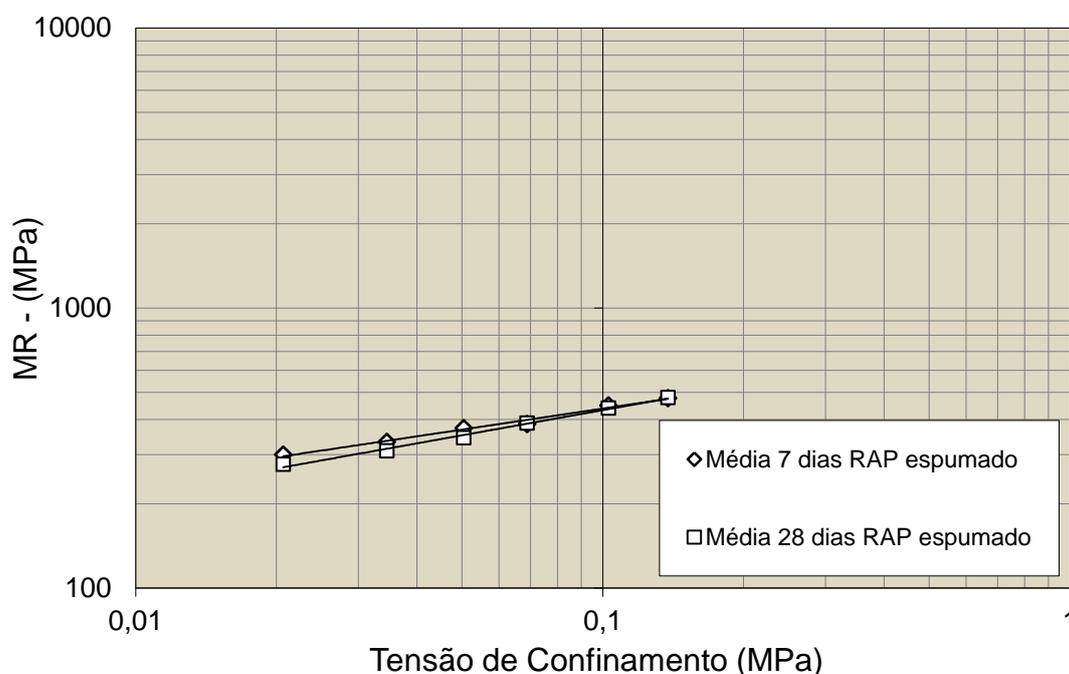


Figura 6.5 – Influência do tempo de cura no módulo de resiliência das misturas com RAP espumado, média de 2 corpos de prova

Acredita-se que a cura do material ocorra nos primeiros dias, com a água para homogeneização e compactação da mistura em campo e, sequencialmente, haja uma estabilização do comportamento mecânico. Em face disto é empregado por norma ETS 002 (PMSP, 2009), o processo de cura por 72 horas a 60°C em estufa, com o intuito de acelerá-la. No entanto, em laboratório, a mistura não foi condicionada por tal processo e seus valores de rigidez estão subestimados.

6.4 Controle da camada de revestimento

Para o controle da mistura asfáltica coletada em pista, existiu uma dificuldade em se definir qual metodologia a ser empregada, uma vez que os parâmetros de projetos não foram fornecidos pelo órgão regulador. Uma bateria de 16 corpos de prova foi preparada por compactação Marshall com 75 golpes em cada face de acordo com a norma ME 43 (DNER, 1995), e em função do tráfego imposto.

Em seis corpos de prova foi avaliada a fluência e a estabilidade da mistura asfáltica. A resistência à tração por compressão diametral e o módulo de resiliência a 25 °C foram avaliados em outros dez corpos de prova. A Figura 6.6 ilustra alguns dos processos envolvidos nos ensaios e a Tabela 6.3 apresenta os resultados obtidos.



Figura 6.6 – (i) amostra compactada em laboratório, e (ii) instrumentação para ensaio de módulo de resiliência em mistura asfáltica

Tabela 6.3 – Resumo de resultados obtidos com a mistura asfáltica aplicada ao revestimento

Parâmetros	Estabilidade (KN)	Fluência (mm)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
Média	11,2	3,6	4432,0	1,6	2811,0
Desvio padrão	0,7	0,8	403,0	0,1	251,0
C.V. (%)	6,3	22,2	9,1	6,25	8,9

A IE 03 (PMSP, 2009) recomenda apenas a análise da fluência e da estabilidade da mistura e estas devem estar entre 2,0-4,0 mm e no mínimo 8 KN respectivamente. O material avaliado se enquadra nas especificações de execução da camada. A especificação IE 03 (PMSP, 2009) não menciona controles por MR e RT, no entanto, os valores assumidos, são similares a uma mistura asfáltica a quente densa com ligante asfáltico convencional.

Complementarmente, foi compactado um par de placas para execução e verificação da formação da trilha de roda por deformação permanente. Foi utilizada a mesa compactadora tipo LCPC, seguindo a metodologia da especificação EN 12697-33 (CEN, 2003). Após um período de cura ao ar de 48 horas as placas foram colocadas no simulador de tráfego para determinação do afundamento em trilha de roda, segundo a normativa EN 12697-22 (CEN, 2003). As placas foram moldadas com espessura de 50,0 mm, tal qual aplicada em campo.

As diretrizes francesas relativas à deformação permanente têm limitado o valor obtido no simulador de tráfego em, no máximo, 10%, após 30.000 ciclos, sendo este o limite aceitável para camadas de concreto asfáltico utilizadas como revestimentos com espessuras entre 6 a 8 cm. Nota-se na Figura 6.7 que o valor encontrado após os 30.000 ciclos foi de 7,3%, limite aceitável considerando as diretrizes francesas.

Porém, para tráfego pesado, as diretrizes europeias tem um limite mais rigoroso e estipulam um máximo de 5% de deformação para 30.000 ciclos. Nesta condição, o resultado está acima do limite, podendo ser suscetível à formação de trilha de roda em campo. Na avenida em questão, o tráfego pode ser caracterizado como classe meio pesado, em virtude de ser uma via coletora, a espessura do revestimento igual a 50,0 mm e N característico igual 2×10^6 seguindo as recomendações da especificação IP 05 (PMSP, 2004). Ou seja, os resultados são compatíveis com o tráfego esperado.

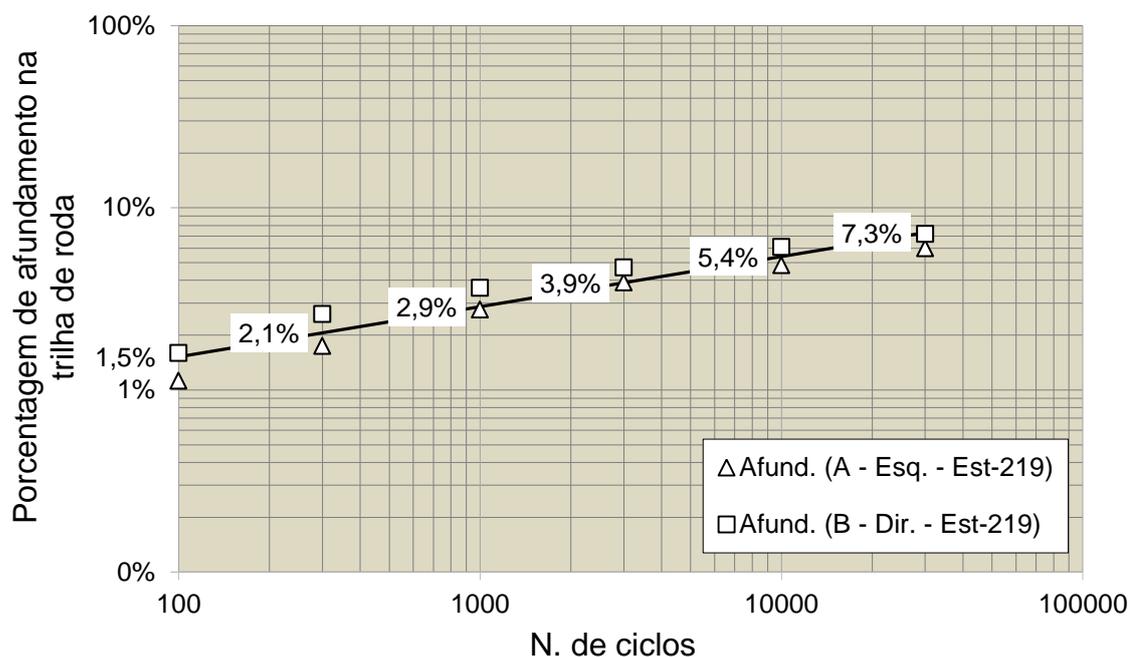


Figura 6.7 – Resumo da deformação permanente em laboratório obtida por simulador de tráfego LCPC.

6.5 Controle deflectométrico por meio de Viga Benkelman

O levantamento das deflexões sobre o reforço estrutural com rachão foi executado utilizando-se a Viga Benkelman a qual apresenta relação entre braços de 1,995/1. Os levantamentos das deflexões máximas (D_0) foram realizados atendendo à norma ME 024 (DNER, 1994). Tal norma fornece, o peso referente ao eixo traseiro (8,2t) e a pressão de contato dos pneus (5,6kgf/cm²). O levantamento foi executado a cada 20 m de extensão, acima do reforço de rachão sobre subleito, alternando-se o ponto de avaliação em função do estaqueamento:

- Estacas ímpares – trilhas internas;
- Estacas pares – trilhas externas.

Foram inventariadas 30 estações, divididas de acordo com o sentido de tráfego.

- Sentido bairro: 15 estações;
- Sentido centro: 15 estações.

Os segmentos homogêneos foram definidos segundo o tipo de material empregado na sub-base, e um tratamento estatístico seguindo a metodologia proposta por Grubbs (1969), onde foi realizada a exclusão das estações que não possuíam comportamento similar a uma tendência. O nível de significância assumido foi igual a 2,5%. A Tabela 6.4 apresenta o resumo do levantamento executado e os resultados obtidos após tratamento estatístico.

Tabela 6.4 – Tratamento estatístico dos dados do subleito segundo Grubbs (1969): deflexões máximas de campo

Segmento Homogêneo	Do ($\times 10^{-2}$ mm)	Média	D.Pad.	Valores de T
Seg. 1 - RCD Bairro	72	77	18,9	0,68
	54			1,63
	-			-
	98			0,70
	86			0,06
Seg. 2 - RCD Centro	120	84,6	30,3	1,16
	72			0,42
	92			0,24
	40			1,47
	100			0,50
GRUBBS n=5 N.S=2,5% - T=1,672				
Seg. 3 - RCD + 3% cim. Bairro	44	55,9	11,7	1,02
	64			0,68
	48			0,68
	68			1,02
Seg. 4 - RCD + 3% cim. Centro	68	55,9	13,3	0,90
	66			0,75
	40			1,20
	50			0,45
GRUBBS n=4 N.S=2,5% - T=1,463				
Seg. 5 - RCD + 3% cal Bairro	76	57,4	17,3	1,06
	52			0,32
	66			0,49
	36			1,24
Seg. 6 - RCD + 3% cal Centro	80	60,8	19,4	0,98
	56			0,26
	72			0,57
	36			1,29
GRUBBS n=4 N.S=2,5% - T=1,463				

Os valores encontrados assumem médias consideradas aceitáveis, visto que segundo Balbo (2007), deflexões de segmentos homogêneos em subleitos acima de 200×10^{-2} mm assumem uma concepção fadada ao colapso, pois a camada de

subleito é fortemente suscetível a ações de cargas variáveis. Havendo o tratamento do subleito com rachão, as deflexões foram reduzidas e a estrutura foi devidamente tratada.

Logo à estabilização com reforço ao subleito demonstrou que o incremento da camada de rachão propiciou uma melhora na condição estrutural, e na condição de drenagem da estrutura, uma vez que houve a diminuição das deflexões na estrutura, após a execução da camada.

6.6 Controle deflectométrico por meio de FWD

Concluído o trecho experimental em 03/04/2012, após quatro (T=4M), dez (T=10M) e dezesseis (T=16M) meses foram efetuadas campanhas de levantamentos de deflexão em campo, com o apoio da empresa Dynatest, que gentilmente viabilizou o equipamento, bem como pessoal qualificado para realização dos trabalhos. As camadas de sub-base com agregado reciclado tinham, no momento dos levantamentos, 5, 11 e 17 meses de cura, respectivamente a cada idade.

As deflexões máximas recuperáveis, com suas respectivas bacias de deflexão, foram levantadas com o uso do equipamento FWD, conforme ilustrado na Figura 6.8, tendo sido seguidos os procedimentos requeridos pela norma ASTM D 4695 (ASTM, 2008), que define algumas diretrizes necessárias para a prática de levantamentos, como pontos de localização e frequência de pontos a serem levantados. Foram levantadas as trilhas externa e o eixo da pista simples nos dois sentidos.



Figura 6.8 – Medida de deflexão no eixo e na trilha externa da via

Em seguida, com os dados coletados de campo, foi realizado um refino estatístico em cada segmento homogêneo para eliminação de possíveis discrepâncias amostral, segundo Grubbs (1969), com o critério da deflexão máxima. Contudo, não foi feita distinção do ponto de aplicação na estação inventariada, haja vista que as deflexões tanto na trilha externa quanto no eixo apresentaram-se similares, logo, foram tratadas simultaneamente.

As Tabelas 6.5, 6.6 e 6.7 apresentam os resultados de deflexão máxima conforme cada idade de levantamento (4M, 10M e 16M). Observa-se, que com o nível de significância de 2,5%, nenhuma bacia necessitou ser excluída do processo, exceto aquela da estaca 228, que apresentou um erro executivo localizado de ensaio. A Figura 6.9 denota a distribuição das deflexões máximas ao longo dos 300,0 m de extensão, a fim de possibilitar comparação entre trechos. Em seguida, foi realizado o processo de retroanálise das bacias médias que representam os segmentos homogêneos, com a finalidade de estipular os valores de módulo das camadas estruturais *in situ*.

Tabela 6.5 – Tratamento estatístico segundo Grubbs (1969): segmentos homogêneos para T=4M

Segmento Homogêneo	Do ($\times 10^{-2}$ mm)		Média	Desv. Padrão	Valores de T	
Seg. 1 - RCD Bairro	32	38	34	5	0,44	0,73
	39	35			0,86	0,10
	43	39			1,56	0,91
	36	32			0,34	0,37
	37	27			0,48	1,40
	26	28			1,50	1,26
Seg. 2 - RCD Centro	22	26	28	5	1,14	0,25
	26	30			0,25	0,43
	39	35			2,14	1,36
	29	29			0,32	0,32
	27	25			0,12	0,59
	22	22			1,03	1,16
GRUBBS n=12 N.S.=2,5% - T=2,285						
Seg. 3 - RCD + 3% cim. Bairro	17	15	16	2	0,52	0,44
	14	14			1,00	1,34
	17	17			0,74	0,57
	14	16			1,06	0,16
	19	16			1,92	0,24
Seg. 4 - RCD + 3% cim. Centro	22	15	18	2	2,06	1,15
	15	17			1,23	0,53
	16	18			0,88	0,13
	19	18			0,39	0,04
	19	19			0,52	0,65
GRUBBS n=10 N.S.=2,5% - T=2,176						
Seg. 5 - RCD + 3% cal Bairro	16	15	19	2	1,25	1,50
	21	22			0,83	1,43
	20	19			0,66	0,06
	19	19			0,02	0,10
Seg. 6 - RCD + 3% cal Centro	20	19	20	2	0,17	0,52
	21	20			0,48	0,08
	19	18			0,83	1,52
	23	21			1,80	0,48
GRUBBS n=10 N.S.=2,5% - T=2,176						

Tabela 6.6 – Tratamento estatístico segundo Grubbs (1969): segmentos homogêneos para T=10M

Segmento Homogêneo	Do (x10 ⁻² mm)		Média	Desv. Padrão	Valores de T	
Seg. 1 - RCD Bairro	25	26	27	5	0,49	0,25
	33	28			1,25	0,08
	36	30			1,86	0,65
	28	28			0,18	0,12
	27	27			0,16	0,07
	18	21			1,88	1,29
Seg. 2 - RCD Centro	23	24	26	5	0,62	0,31
	32	27			1,36	0,32
	31	34			1,08	1,76
	27	26			0,22	0,16
	21	23			0,88	0,62
	20	19			1,18	1,29
GRUBBS n=12 N.S.=2,5% - T=2,285						
Seg. 3 - RCD + 3% cim. Bairro	14	13	12	1	0,95	0,54
	10	12			1,38	0,17
	12	13			0,47	0,19
	10	13			1,61	0,16
	12	15			0,05	1,73
Seg. 4 - RCD + 3% cim. Centro	18	19	13	3	1,77	1,92
	11	12			0,80	0,26
	12	13			0,37	0,13
	12	11			0,23	0,55
10	11	0,80	0,55			
GRUBBS n=10 N.S.=2,5% - T=2,176						
Seg. 5 - RCD + 3% cal Bairro	13	16	16	2	1,76	0,17
	16	19			0,09	1,78
	15	17			0,50	0,53
	15	16			0,33	0,21
	-	-			-	-
Seg. 6 - RCD + 3% cal Centro	14	15	15	2	0,82	0,10
	13	15			1,36	0,02
	15	14			0,26	0,52
	18	18			1,45	1,42
	-	-			-	-
GRUBBS n=10 N.S.=2,5% - T=2,176						

Tabela 6.7 – Tratamento estatístico segundo Grubbs (1969): segmentos homogêneos para T=16M

Segmento Homogêneo	Do ($\times 10^{-2}$ mm)		Média	Desv. Padrão	Valores de T	
Seg. 1 - RCD Bairro	18	19	20	3	0,79	0,10
	25	21			2,00	0,33
	21	21			0,45	0,48
	20	21			0,02	0,50
	21	20			0,39	0,02
Seg. 2 - RCD Centro	15	16	18	4	1,72	1,56
	16	16			0,54	0,66
	18	22			0,19	0,95
	24	27			1,38	2,09
	18	20			0,20	0,42
	15	16			0,79	0,52
	14	15			1,07	0,90
GRUBBS n=12 N.S.=2,5% - T=2,285						
Seg. 3 - RCD + 3% cim. Bairro	10	11	11	1	0,27	0,39
	9	11			1,31	0,23
	10	12			0,52	1,23
	9	11			1,65	0,03
	11	12			0,40	1,53
Seg. 4 - RCD + 3% cim. Centro	14	17	12	2	0,82	2,12
	9	10			1,38	0,80
	10	12			0,80	0,07
	10	13			0,69	0,30
	12	12			0,18	0,19
GRUBBS n=10 N.S.=2,5% - T=2,176						
Seg. 5 - RCD + 3% cal Bairro	11	11	12	2	0,69	0,72
	11	17			0,60	2,10
	11	13			0,62	0,15
	11	14			0,42	0,81
	-	-			-	-
Seg. 6 - RCD + 3% cal Centro	11	12	12	1	0,30	0,04
	11	13			0,47	0,96
	10	11			1,78	0,58
	13	13			1,06	1,06
	-	-			-	-
GRUBBS n=10 N.S.=2,5% - T=2,176						

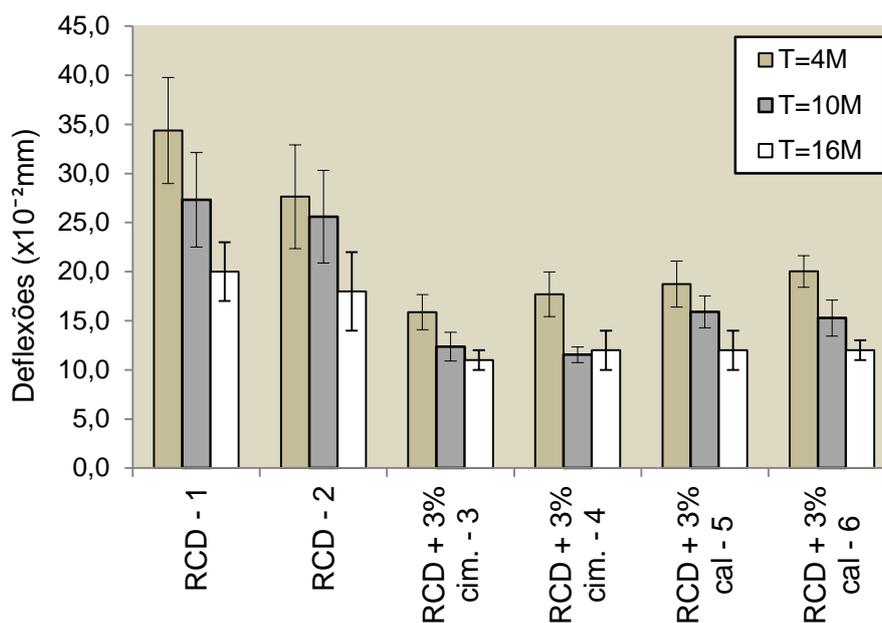


Figura 6.9 – Resumo das deflexões máximas e seus respectivos desvios para os meses de levantamento

Comparando-se à deflexão máxima de cada segmento para os três períodos de levantamento, observa-se uma redução da deflexão máxima nas estações inventariadas. Balbo (2007) comenta que nas estruturas de pavimento flexíveis grande parte da resposta deflectométrica total está associada ao subleito. Como a precipitação pluviométrica indica que no período do segundo levantamento (T=10M) o material encontrava-se com influência das frentes úmidas (Figura 6.10), a tendência a aumento nas deflexões na referida época quando comparada ao primeiro levantamento (T=4M).

No entanto, após os procedimentos de retroanálise (item 6.7, a seguir), ficou constatado que há um aumento significativo da rigidez das camadas de base e sub-base no período T=10M e T=16M e que possivelmente o efeito das frentes úmidas foi minorado em face da aplicação do reforço em rachão, trabalhando como uma camada drenante e diminuindo o efeito da baixa capacidade de suporte do material do subleito na data em questão.

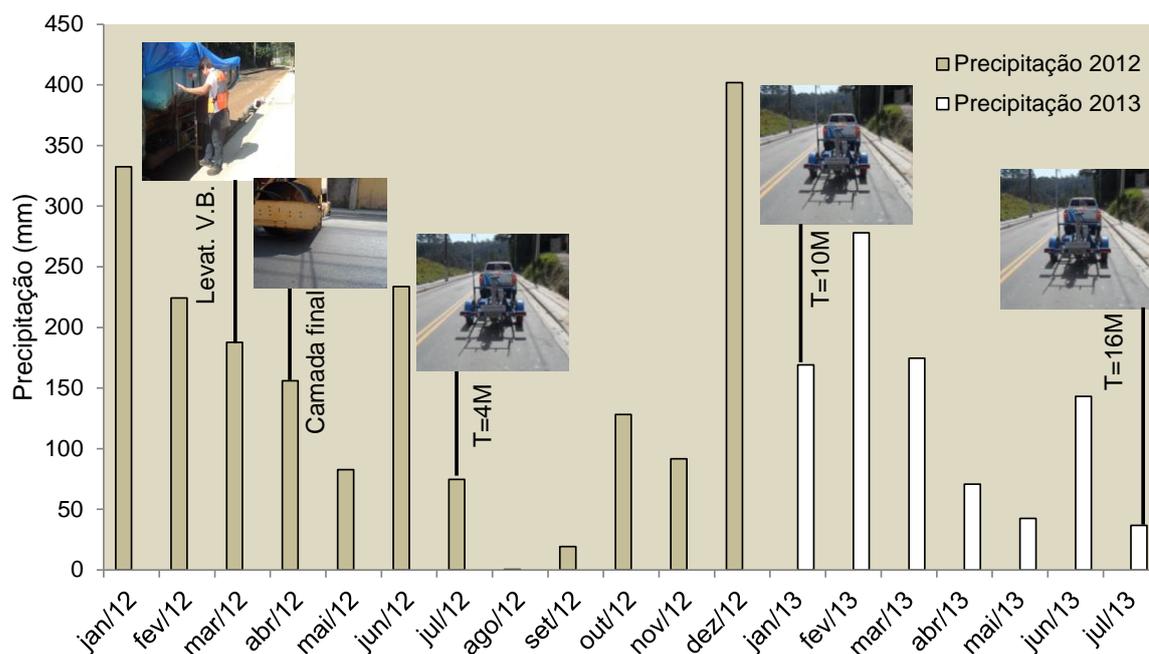


Figura 6.10 – Precipitação acumulada ao longo dos meses: 2012 e 2013. (Fonte: INMET, 2013)

Por fim, comparando-se a resposta deflectométrica de cada segmento homogêneo proposto, percebe-se também a menor dispersão de dados nas seções em misturas com RCD + 3% cim. verificado pelo menor desvio padrão nesta mistura. Entretanto, o desvio padrão nas estruturas com misturas de RCD + 3% cal, apresentam-se também com baixa dispersão. Isto é um indicativo da diminuição da variabilidade e, com consequência, a resposta mecânica em termos de homogeneidade estatística. Logo, o tratamento com estabilizantes hidráulicos, indica possibilidade de ganho em desempenho estrutural e de homogeneidade das características construtivas.

6.7 Retroanálise

No processo de retroanálise, duas ferramentas computacionais foram utilizadas, BAKFAA e ELSYM 5. Ambas promovem um alinhamento da bacia de campo com a bacia de deflexão teórica do programa, submetendo às interações necessárias para ajustes dos módulos de resiliência, ou módulo elástico efetivo (DNIT, 2006) das camadas estruturais do pavimento. O ELSYM 5 promove a checagem do delineamento da bacia realizada pelo BAKFAA e fornece tensões, deformações e deflexões segundo a teoria da elasticidade linear aplicada a um sistema de camadas elásticas.

As ferramentas computacionais BAKFAA e o ELSYM 5 estabelecem os seguintes dados de entrada para a análise de pavimentos, (BALBO, 2007):

- Todas as camadas são elásticas e os materiais são elásticos e lineares (independentem do estado de tensão);
- Todas as camadas possuem espessura constante;
- Definição da geometria de carregamento e magnitude de cargas;
- Pontos de análise no sistema: pontos críticos de deformação, tensão e deslocamento das camadas.

Com o intuito de se determinar a rigidez de cada material apresentada com as bacias de deflexões em campo, realizou-se o processamento iterativo de retroanálise sobre o revestimento, seguindo os conceitos apresentados na norma ASTM D-5858 (ASTM, 2008), onde esta define limites de aceitação bem como procedimentos, metodologias e práticas de cálculo do processo de retroanálise.

Como em campo o rachão apresentava-se com espessura variável, considerou-se previamente que a espessura média da camada de rachão seria de 30,0 cm e o módulo do revestimento em CBUQ seria de 4.500 MPa para efeitos de simplificar o procedimento de interações durante a retroanálise, visto que o valor de módulo de resiliência médio obtido em laboratório foi de 4.432 MPa.

Foram adotados dois critérios matemáticos para definição de um ajuste entre a bacia medida de campo e a calculada pelo BAKFAA / ELSYM 5 para garantia da acurácia entre o levantamento e o procedimento de retroanálise. O primeiro é o erro relativo, eq. **(9)**, calculado para cada ponto da bacia, e o segundo é o erro para raiz média quadrática, eq. **(10)**, sendo calculados conforme as equações abaixo:

$$\varepsilon(\%) = \left[\frac{(d_{mi} - d_{cij})}{d_{mi}} \right] \times 100 \quad (9)$$

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{100 \times (d_{mi} - d_{cij})}{d_{mi}} \right]^2}{n}} \quad (10)$$

Onde: $\varepsilon(\%)$ – erros entre os pontos das bacias medidas e calculadas;

RMSE – raiz média quadrática;

d_{mi} – deflexão medida no ponto i da bacia medida em campo ($i = 1, 2, \dots, n$ sendo n o número de pontos de avaliação da bacia de deformação);

d_{cij} – deflexão calculada no ponto i da j -ésima bacia do BAKFAA / ELSYM 5 ($i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, k$, sendo k , o número de interações até ser atingido o erro máximo permitido).

A norma ASTM D 5858 (ASTM, 2008) define que o erro relativo para cada ponto da bacia esteja entre 7 a 14% para o caso de se utilizar sete sensores para a coleta da bacia de deflexão. O erro para raiz média quadrática se situa entre 1 e 2%, como recomendado por norma. No entanto, no Brasil, tal parâmetro é difícil de ser atingido, devido à variabilidade construtiva e baixa eficiência de controle das propriedades dos materiais aplicados à estrutura.

A bacia média de cada segmento homogêneo foi retroanalizada para um total de seis segmentos, em cada idade de levantamento ($T=4M$, $T=10M$ e $T=16M$), conforme previamente definido no item 6.6. Em seguida foi realizada uma análise da influência da resposta de cada camada das estruturas, quanto a influencia da deflexão em cada camada na deflexão máxima. Concomitantemente, foi realizada uma análise mecanicista para verificação da fadiga dos materiais, segundo o conceito de estruturas flexíveis de pavimento rodoviário.

A título de exemplificação, o procedimento descrito acima é apresentado no segmento homogêneo 1, RCD sentido bairro para $T=4M$, donde são apresentados os cálculos e delineamento das bacias de deflexão média. Na Tabela 6.8 e na Figura 6.11 é possível visualizar o resumo de respostas da deflexão em cada ponto da bacia obtida por FWD.

Tabela 6.8 – Exemplo de bacia delineada por retroanálise – Segmento Homogêneo 1 – RCD Bairro – T=4M

Distâncias (cm)		d ₀	d ₂₀	d ₃₀	d ₄₅	d ₆₀	d ₉₀	d ₁₂₀	RMSE(%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões (x10 ⁻² mm)	Média	33,8	19,8	14,7	12,1	8,3	6,5	4,6	11,5
	σ	5,7	3,0	2,3	1,7	1,2	1,0	0,8	
	Bakfaa	33,0	20,6	15,2	11,1	8,7	6,1	4,6	
	Erro (%)	2,3	4,3	3,3	8,8	4,6	6,7	0,6	11,4
	Elsym5	33,0	20,6	15,2	11,1	8,7	6,1	4,6	
	Erro (%)	2,4	4,2	3,3	8,4	4,6	6,7	0,6	

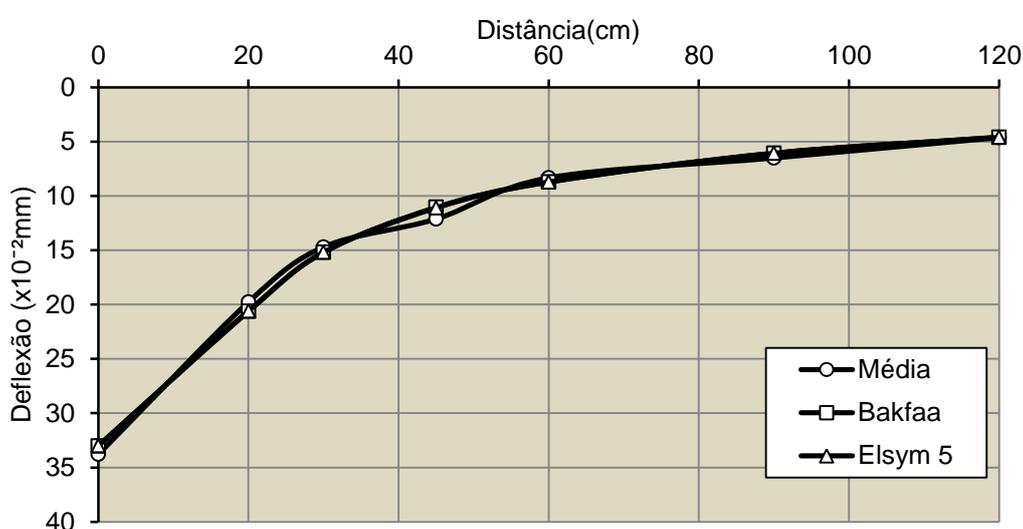


Figura 6.11 – Exemplo de delineamento de bacia média retroanalizada – Segmento Homogêneo 1 – RCD Bairro – T=4M

6.7.1 Retroanálise no período T=4M de levantamento

Os resultados (Tabela 6.9) apontam que o RCD apresenta-se com rigidez inicial de 295 e 500 MPa nos segmentos 1 e 2, respectivamente estando sob um regime de tensão de confinamento da ordem de 0,05 e 0,12 MPa, nos mesmos segmentos, quando se compara este valor com o resultado de módulo de resiliência obtido em laboratório após 60 dias de cura do material (item 5.8).

Tabela 6.9 – Resumo de módulos retroanalizados pelo BAKFAA: T=4M

Seg. Homogêneo	Estrutura	MR (MPa)	Coefficiente de Poisson	Espessuras teóricas (cm)	RMSE (%)
Seg. 1 - RCD Bairro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	11,4
	RAP espuma	540	0,40	20,0	
	RCD	295	0,40	25,0	
	Rachão	258	0,40	30,0	
	Solo local	200	0,45	∞	
Seg. 2 - RCD Centro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	9,8
	RAP espuma	557	0,40	20,0	
	RCD	500	0,40	25,0	
	Rachão	295	0,40	30,0	
	Solo local	220	0,45	∞	
Seg. 3 - RCD+3% cim. Bairro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	8,0
	RAP espuma	1.174	0,40	20,0	
	RCD	2.928	0,40	25,0	
	Rachão	317	0,40	30,0	
	Solo local	229	0,45	∞	
Seg. 4 - RCD+3% cim. Centro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	16,6
	RAP espuma	800	0,40	20,0	
	RCD	2.800	0,40	25,0	
	Rachão	300	0,40	30,0	
	Solo local	245	0,45	∞	
Seg. 5 - RCD+3% cal Bairro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	9,9
	RAP espuma	915	0,40	20,0	
	RCD	2.680	0,40	25,0	
	Rachão	236	0,40	30,0	
	Solo local	198	0,45	∞	
Seg. 6 - RCD+3% cal Centro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	18,1
	RAP espuma	700	0,40	20,0	
	RCD	2.500	0,40	25,0	
	Rachão	400	0,40	30,0	
	Solo local	220	0,45	∞	

Os segmentos com RCD+3% cim. apresentaram melhor comportamento estrutural, o módulo de resiliência retroanalizado foi de 2.928 e 2.800 MPa para os segmentos 3 e 4 respectivamente. Tal fato corrobora as respostas obtidas nos ensaios de módulo de resiliência, onde o material apresentou o melhor comportamento quando comparado com as outras misturas (item 5.8). No caso dos segmentos com sub-base em RCD+3% cal, os módulos foram de 2.680 e 2.500 MPa após a retroanálise para os segmentos 5 e 6, respectivamente, indicando um adequado comportamento estrutural.

6.7.2 Retroanálise no período T=10M de levantamento

Após dez meses do processo construtivo, os resultados (Tabela 6.10) apontam que, a rigidez foi incrementada de 28 a 60% para o RCD, 24 a 43% para o RCD+3% cim. e 7% para os segmentos em RCD+3% cal em valores absolutos. Deve-se realçar que o trecho com adição de cal ao RCD era o que estava na maior parte em corte, e em curva, o que pode ter influenciado os resultados, dadas as questões de drenagem e de solicitação do tráfego.

De um modo geral, em todas as estruturas houve um aumento quanto à rigidez do RAP com asfalto-espuma (base) e das camadas de RCD (sub-base) comprovando a existência do efeito pozolânico *in situ* para o material puro (sem adição de aglomerantes) e a eficácia do tratamento das camadas, tanto com adição de cimento Portland em maior valor absoluto de rigidez, quanto com adição da cal hidratada.

Tabela 6.10 – Resumo de módulos retroanalizados pelo BAKFAA: T=10M

Seg. Homogêneo	Estrutura	MR (MPa)	Coefficiente de Poisson	Espessuras teóricas (cm)	RMSE (%)
Seg. 1 - RCD Bairro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	8,2
	RAP espuma	873	0,40	20,0	
	RCD	381	0,40	25,0	
	Rachão	200	0,40	30,0	
	Solo local	190	0,45	∞	
Seg. 2 - RCD Centro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	10,0
	RAP espuma	729	0,40	20,0	
	RCD	504	0,40	25,0	
	Rachão	293	0,40	30,0	
	Solo local	213	0,45	∞	
Seg. 3 - RCD+3% cim. Bairro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	4,7
	RAP espuma	2.130	0,40	20,0	
	RCD	3.480	0,40	25,0	
	Rachão	448	0,40	30,0	
	Solo local	215	0,45	∞	
Seg. 4 - RCD+3% cim. Centro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	14,4
	RAP espuma	1.800	0,40	20,0	
	RCD	4.000	0,40	25,0	
	Rachão	400	0,40	30,0	
	Solo local	230	0,45	∞	
Seg. 5 - RCD+3% cal Bairro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	3,5
	RAP espuma	1.433	0,40	20,0	
	RCD	2.852	0,40	25,0	
	Rachão	320	0,40	30,0	
	Solo local	183	0,45	∞	
Seg. 6 - RCD+3% cal Centro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	8,7
	RAP espuma	1.300	0,40	20,0	
	RCD	3.000	0,40	25,0	
	Rachão	382	0,40	30,0	
	Solo local	214	0,45	∞	

6.7.3 Retroanálise no período T=16M de levantamento

Com dezesseis meses de levantamento, as respostas apontam que os materiais continuam adquirindo rigidez com o tempo (Tabela 6.11). Apesar de não ser objeto de estudo na presente pesquisa, verificou-se que o material da base também adquire ganho expressivo em rigidez com o tempo.

Tabela 6.11 – Resumo de módulos retroanalizados pelo BAKFAA: T=16M

Seg. Homogêneo	Estrutura	MR (MPa)	Poisson	Espessura (cm)	RMSE (%)
Seg. 1 - RCD Bairro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	7,0
	RAP espuma	1.900	0,40	20,0	
	RCD	400	0,40	25,0	
	Rachão	245	0,40	30,0	
	Solo local	210	0,45	∞	
Seg. 2 - RCD Centro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	10,5
	RAP espuma	1.640	0,40	20,0	
	RCD	560	0,40	25,0	
	Rachão	350	0,40	30,0	
	Solo local	210	0,45	∞	
Seg. 3 - RCD+3% cim. Bairro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	8,4
	RAP espuma	2.500	0,40	20,0	
	RCD	4.500	0,40	25,0	
	Rachão	350	0,40	30,0	
	Solo local	230	0,45	∞	
Seg. 4 - RCD+3% cim. Centro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	6,9
	RAP espuma	2.000	0,40	20,0	
	RCD	4.100	0,40	25,0	
	Rachão	350	0,40	30,0	
	Solo local	230	0,45	∞	
Seg. 5 - RCD+3% cal Bairro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	9,8
	RAP espuma	2.000	0,40	20,0	
	RCD	2.500	0,40	25,0	
	Rachão	230	0,40	30,0	
	Solo local	195	0,45	∞	
Seg. 6 - RCD+3% cal Centro	CBUQ	4.500	0,35	5,0	5,1
	RAP espuma	2.300	0,40	20,0	
	RCD	3.500	0,40	25,0	
	Rachão	300	0,40	30,0	
	Solo local	230	0,45	∞	

Um paralelo importante que pode ser avaliado é quanto à existência dos efeitos das reações químicas em cada mistura estudada. A Figura 6.12 apresenta o resumo dos módulos de resiliência obtidos após retroanálise em quatro e dez meses de monitoramento. É possível verificar que há presença dos mesmos mecanismos de incrementos de módulo de resiliência com o tempo (item 5.8), em campo.

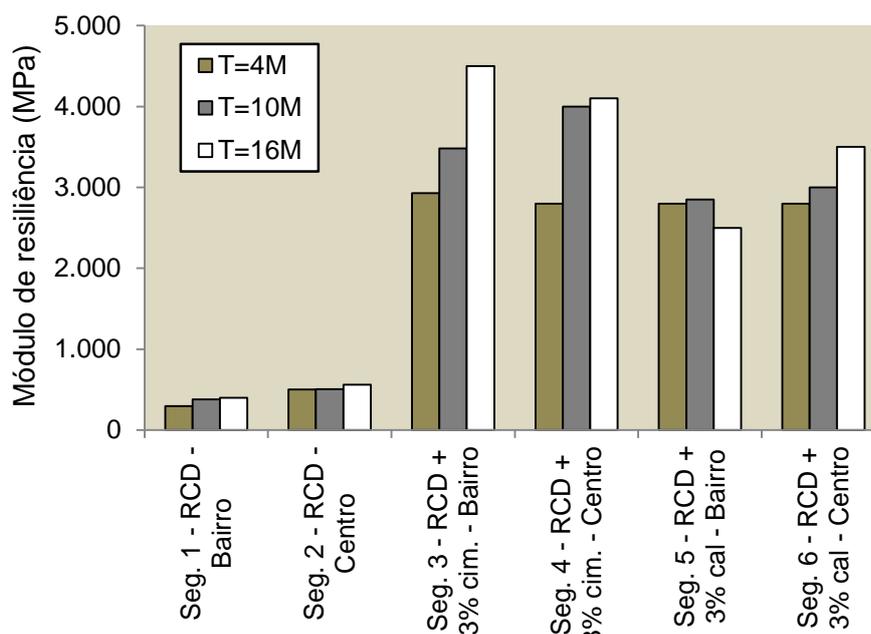


Figura 6.12 – Resumo de módulos de resiliência obtidos após retroanálise para as misturas estudadas

É perceptível que para as três misturas avaliadas, quando se verifica a influência do tempo de cura nas misturas (T=4M, T=10M e T=16M), detecta-se: (i) a existência do efeito das reações pozolânicas no material puro (RCD), aliado ao incremento no módulo de resiliência, (ii) a existência do ganho em rigidez, com a hidratação da pasta de cimento com o tempo e o aumento do módulo de resiliência, nas misturas em RCD + 3% cim., e (iii) a ocorrência de materiais como telhas e tijolos em misturas de agregado reciclado de categoria mista, principalmente na fração fina e pulverizada que na presença de componentes como sílica e alumina quando em contato com a cal hidratada e água, pode gerar reações pozolânicas com propriedades cimentantes e ganho expressivo no módulo de resiliência com o tempo de cura nas misturas de RCD + 3% cal. Estes tipos de reações foram estas amplamente discutidas por Baronio e Binda (1997).

Outro fato interessante são as formas de delineamento das bacias de deflexão (Figura 6.13). No processo de retroanálise foi considerado que todos os segmentos homogêneos se encontravam como estruturas flexíveis. No entanto, após os procedimentos de retroanálise, a estruturas com adição de aglomerantes apresentaram-se com um delineamento da bacia média com aspecto de material

cimentado, indicado pelo abaulamento da bacia de deflexão. Portanto, estas apresentam uma concepção estrutural flexível, com comportamento mecânico invertido.

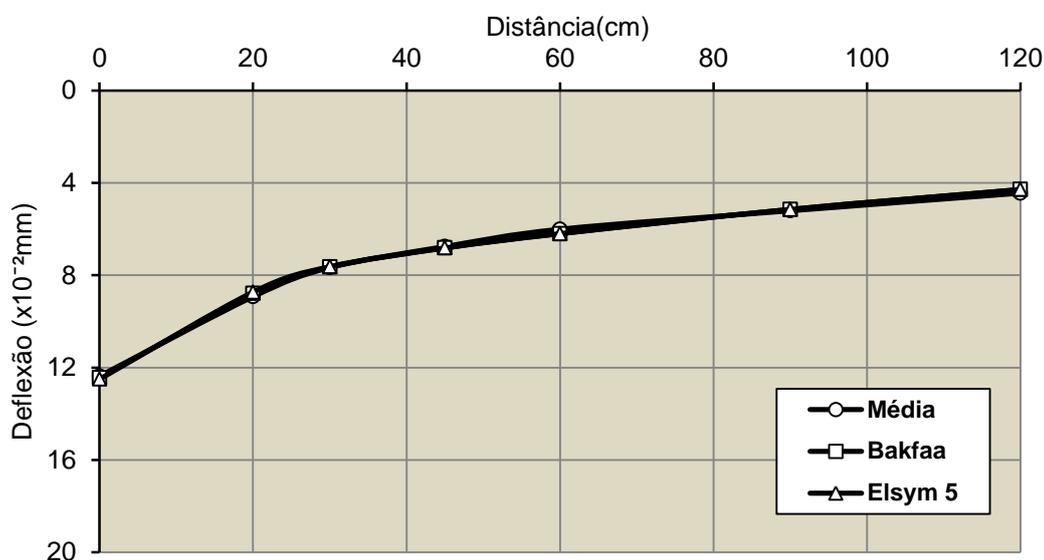


Figura 6.13 – Exemplo de abaulamento da bacia de deflexão – segmento homogêneo 3 – T=10M

6.8 Contribuição relativa de cada camada na deflexão total

Com o interesse em determinar a contribuição de cada camada das estruturas retroanalisadas dos segmentos homogêneos definidos nos trechos em estudo, foi proposta uma análise da parcela da deflexão em cada camada de material adotado nas estruturas e analisados em relação à deflexão total de cada segmento eq.(11, 12, 13, 14 e 15). Atrélado a esta, também foi verificado o nível de tensões atuantes no subleito. Algumas relações foram previamente definidas e calculadas respectivamente como:

$$\left[\frac{\delta_1 - \delta_b}{\delta_1} \right] \times 100 (\%) \quad (11)$$

$$\left[\frac{\delta_b - \delta_{sb}}{\delta_1} \right] \times 100 (\%) \quad (12)$$

$$\left[\frac{\delta_{sb} - \delta_{ref}}{\delta_1} \right] \times 100 (\%) \quad (13)$$

$$\left[\frac{\delta_{ref} - \delta_{sl}}{\delta_1} \right] \times 100 (\%) \quad (14)$$

$$\left[\frac{\delta_{sl}}{\delta_1} \right] \times 100 (\%) \quad (15)$$

onde: δ_b – deflexão sobre o topo da base, em 10^{-2} mm;

δ_{sb} – deflexão sobre o topo da sub-base, em 10^{-2} mm;

δ_{ref} – deflexão sobre o topo do ref. em rachão, em 10^{-2} mm;

δ_{sl} – deflexão sobre o topo do subleito, em 10^{-2} mm;

δ_1 – deflexão total sobre o topo do revestimento, em 10^{-2} mm.

Observa-se, nos segmentos homogêneos 1 e 2, no tempo T=4M, T= 10M e T=16M, que a sub-base em RCD contribui com uma resposta considerável na deflexão, assumindo uma menor parcela em termos percentuais da deflexão total no subleito, como mostram as Tabelas 6.12, 6.13, 6.14, 6.15, 6.16 e 6.17. De modo geral, para todos os segmentos analisados, a maior parcela da deflexão total é dada pelo o subleito.

Com relação à tensão atuante no topo da camada de subleito, é possível observar que com o incremento de aglomerantes nas camadas de sub-base nos segmentos 3, 4, 5 e 6, há uma redução da ordem de 25% a 35% em relação às estruturas dos segmentos 1 e 2 com RCD, comparando-se para o tempo de análise T=4 meses. Quando se compara o mesmo incremento para T=10 meses, a redução foi da ordem de 31% a 42% e para T=16 meses a redução foi de 18% a 35%.

No entanto, o valor absoluto da tensão no topo do subleito pequeno, em todos os segmentos homogêneos abordados, conforme apontam as Tabelas 6.15, 6.16 e 6.17. Tal fato é esperado, uma vez que com aumento de rigidez ou aumento de espessura, a capacidade de distribuição de tensões é melhorada (BALBO, 2007).

Tabela 6.12 – Deflexão parcial de cada camada na deflexão total: T= 4M

Segmento Homogêneo	δ_1 ($\times 10^{-2}$ mm)	δ_b ($\times 10^{-2}$ mm)	δ_{sb} ($\times 10^{-2}$ mm)	δ_{ref} ($\times 10^{-2}$ mm)	δ_{sl} ($\times 10^{-2}$ mm)
1 - RCD Bairro	33,0	32,8	22,3	14,5	10,3
2 - RCD Centro	28,5	28,2	18,1	12,7	9,1
3 - RCD +3% cim. Bairro	15,7	15,4	10,4	9,2	7,2
4 - RCD +3% cim. Centro	18,3	18,0	10,7	9,4	7,1
5 - RCD +3% cal Bairro	18,8	18,5	12,1	10,8	8,3
6 - RCD +3% cal Centro	19,9	19,6	11,3	9,9	7,8

Tabela 6.13 – Deflexão parcial de cada camada na deflexão total: T=10M

Segmento Homogêneo	δ_1 ($\times 10^{-2}$ mm)	δ_b ($\times 10^{-2}$ mm)	δ_{sb} ($\times 10^{-2}$ mm)	δ_{ref} ($\times 10^{-2}$ mm)	δ_{sl} ($\times 10^{-2}$ mm)
1 - RCD Bairro	27,2	27,0	20,3	14,5	10,2
2 - RCD Centro	25,8	25,5	17,6	12,5	9,1
3 - RCD +3% cim. Bairro	12,5	12,2	9,4	8,4	7,0
4 - RCD +3% cim. Centro	12,7	12,4	9,1	8,2	6,7
5 - RCD +3% cal Bairro	15,9	15,6	11,5	10,3	8,4
6 - RCD +3% cal Centro	15,2	14,9	10,4	9,2	7,5

Tabela 6.14 – Deflexão parcial de cada camada na deflexão total: T=16M

Segmento Homogêneo	δ_1 ($\times 10^{-2}$ mm)	δ_b ($\times 10^{-2}$ mm)	δ_{sb} ($\times 10^{-2}$ mm)	δ_{ref} ($\times 10^{-2}$ mm)	δ_{sl} ($\times 10^{-2}$ mm)
1 - RCD Bairro	19,8	19,6	16,4	12,1	8,9
2 - RCD Centro	18,8	18,5	14,9	11,1	8,6
3 - RCD +3% cim. Bairro	11,3	11,0	8,7	7,9	6,5
4 - RCD +3% cim. Centro	12,3	12,0	9,1	8,2	6,7
5 - RCD +3% cal Bairro	14,6	14,3	11,4	10,0	7,9
6 - RCD +3% cal Centro	12,2	11,9	9,3	8,3	6,7

Tabela 6.15 – Análise da contribuição de cada camada na deflexão total e tensão vertical no topo do subleito: T= 4M

Segmento Homogêneo	Revestimento (%)	Base (%)	Sub-base (%)	Reforço (%)	Subleito (%)	σ_z (MPa)
1 - RCD Bairro	1	32	24	13	31	0,021
2 - RCD Centro	1	35	19	13	32	0,020
3 - RCD +3% cim. Bairro	2	32	8	13	46	0,013
4 - RCD +3% cim. Centro	2	40	7	12	39	0,015
5 - RCD +3% cal Bairro	2	34	7	13	44	0,013
6 - RCD +3% cal Centro	2	42	7	10	39	0,015

Tabela 6.16 – Análise da contribuição de cada camada na deflexão total e tensão vertical no topo do subleito: T= 10M

Segmento Homogêneo	Revestimento (%)	Base (%)	Sub-base (%)	Reforço (%)	Subleito (%)	σ_z (MPa)
1 - RCD Bairro	1	25	21	16	38	0,019
2 - RCD Centro	1	31	20	13	35	0,019
3 - RCD +3% cim. Bairro	2	22	8	11	56	0,011
4 - RCD +3% cim. Centro	2	26	7	12	53	0,012
5 - RCD +3% cal Bairro	2	26	8	12	53	0,012
6 - RCD +3% cal Centro	2	30	8	12	49	0,013

Tabela 6.17 – Análise da contribuição de cada camada na deflexão total e tensão vertical no topo do subleito: T=16M

Segmento Homogêneo	Revestimento (%)	Base (%)	Sub-base (%)	Reforço (%)	Subleito (%)	σ_z (MPa)
1 - RCD Bairro	1	16	22	16	45	0,017
2 - RCD Centro	1	19	20	14	46	0,016
3 - RCD +3% cim. Bairro	2	21	7	12	57	0,011
4 - RCD +3% cim. Centro	2	24	7	12	54	0,011
5 - RCD +3% cal Bairro	2	20	10	14	54	0,013
6 - RCD +3% cal Centro	2	21	8	14	55	0,011

6.9 Análise mecanicista

Com o objetivo de avaliar os segmentos homogêneos definidos no trecho experimental segundo uma metodologia de análise mecanicista de pavimentos, foram adotadas as diretrizes da especificação IP-DE-P00/001 (DER-SP, 2006). A análise proposta se reserva aos materiais do revestimento e ao subleito, uma vez que os outros materiais da estrutura não possuem mecanismos e equações de fadiga bem definidos na bibliografia revisada.

Foi realizada a análise de fadiga no revestimento asfáltico segundo as deformações horizontais de tração (ϵt) na fibra inferior da camada asfáltica de revestimento, causadas pelos carregamentos na superfície dos pavimentos. Analisou-se também o acúmulo de deformações verticais de compressão no topo do subleito (ϵv) e ainda as deflexões admissíveis na superfície do revestimento ($Dadm$), de acordo com as relações da Tabela 6.18.

Tabela 6.18 – Equações para análise de desempenho proposta pela IP-DE-P00/001 (DER-SP, 2006)

Camada	Equação	Autor
CБУQ	$\log(Dadm) = 3,01 - 0,176 \cdot \log(N)$	DNER-PRO 11 (1979)
	$Nadm = 2,85 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon t}\right)^{3,69}$	Pinto e Preussler (1980)
Subleito	$Nadm = 6,069 \cdot 10^{-10} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon v}\right)^{4,762}$	Dormon e Metcalf (1965)

Como não se obteve o projeto de dimensionamento da estrutura junto ao órgão competente e à fiscalização da obra, assumiu-se a condição de tráfego meio pesado, com $N=2 \times 10^6$ considerado o admissível de projeto para as interações e a deflexão máxima admissível igual a 82×10^{-2} mm.

Foram simuladas as estruturas dos segmentos homogêneos com auxílio do ELSYM 5 na configuração de um prato de FWD com pressão de contato igual a $5,8 \text{ kgf/cm}^2$, carga de 4.100 kgf e raio igual a $15,0 \text{ cm}$. Com as interações realizadas é possível afirmar que, para condição da estrutura executada, esta atende às situações críticas dos materiais quanto ao número de tráfego de projeto ($N=2 \times 10^6$). As Tabelas 6.19, 6.20 e 6.21 apresentam os resultados obtidos para as estruturas referentes aos levantamentos de $T=4M$, $T=10M$, e $T=16M$.

A diminuição no nível deflectométrico, quando comparado $T=4M$, $T=10M$ e $T=16M$ nos segmentos 1 e 2, está associada ao ganho em módulo de resiliência dos materiais tanto da base, devido à cura do mesmo e sua potencialização da coesão, quanto da sub-base, devido aos efeitos de reações pozolânicas (efeito estes, comprovados em ensaios em laboratório).

Quanto aos segmentos 3, 4, 5 e 6 comparando-se o nível deflectométrico nas duas condições de tempo de monitoramento, a diminuição do nível deflectométrico está associada tanto à camada de base (coesão ao longo do tempo associada ao confinamento do material, como comentado previamente), quanto à camada de sub-base, com o efeito de cura das misturas com aglomerantes e melhora na resposta de módulo de resiliência. Este fenômeno foi verificado em procedimento de retroanálise e ensaios em laboratório com a verificação do efeito do tempo de cura nas misturas propostas.

Tabela 6.19 – Verificação mecanicista para os segmentos homogêneos propostos: T= 4M

Segmento Homogêneo	Do ($\times 10^{-2}$ mm)	ϵ_t (10^{-4} cm/cm)	ϵ_v (10^{-4} cm/cm)	DNER-PRO 11	Pinto e Preussler	Dormon e Metcalf
1 - RCD Bairro	33	1,45	1,05	3,73E+08	4,16E+07	5,37E+09
2 - RCD Centro	28,5	1,38	0,91	8,66E+08	5,00E+07	1,04E+10
3 - RCD +3% cim. Bairro	15,7	0,56	0,54	2,67E+10	1,41E+09	1,29E+11
4 - RCD +3% cim. Centro	18,3	0,90	0,57	1,11E+10	2,43E+08	1,01E+11
5 - RCD +3% cal Bairro	18,8	0,75	0,61	9,46E+09	4,65E+08	7,08E+10
6 - RCD +3% cal Centro	19,9	1,05	0,64	6,83E+09	1,37E+08	5,51E+10

Tabela 6.20 – Verificação mecanicista para os segmentos homogêneos propostos: T=10M

Segmento Homogêneo	Do ($\times 10^{-2}$ mm)	ϵ_t (10^{-4} cm/cm)	ϵ_v (10^{-4} cm/cm)	DNER-PRO 11	Pinto e Preussler	Dormon e Metcalf
1 - RCD Bairro	27,2	0,80	0,96	1,13E+09	3,81E+08	8,31E+09
2 - RCD Centro	25,8	1,02	0,89	1,53E+09	1,52E+08	1,18E+10
3 - RCD +3% cim. Bairro	12,5	0,22	0,48	9,88E+10	4,38E+10	2,23E+11
4 - RCD +3% cim. Centro	12,7	0,31	0,46	9,02E+10	1,31E+10	2,71E+11
5 - RCD +3% cal Bairro	15,9	0,41	0,58	2,48E+10	4,36E+09	8,71E+10
6 - RCD +3% cal Centro	15,2	1,30	0,55	3,21E+10	6,23E+07	1,18E+11

Tabela 6.21 - Verificação mecanicista para os segmentos homogêneos propostos: T=16M

Segmento Homogêneo	Do ($\times 10^{-2}$ mm)	ϵ_t (10^{-4} cm/cm)	ϵ_v (10^{-4} cm/cm)	DNER- PRO 11	Pinto e Preussler	Dormon e Metcalf
1 - RCD Bairro	19,8	0,15	0,78	7,03E+09	1,80E+11	2,19E+10
2 - RCD Centro	18,8	0,27	0,762	9,46E+09	2,03E+10	2,47E+10
3 - RCD +3% cim. Bairro	11,3	0,17	0,412	1,76E+11	1,27E+11	4,62E+11
4 - RCD +3% cim. Centro	12,3	0,25	0,443	1,08E+11	2,65E+10	3,27E+11
5 - RCD +3% cal Bairro	14,6	0,22	0,53	4,05E+10	4,77E+10	1,39E+11
6 - RCD +3% cal Centro	12,2	0,18	0,443	1,14E+11	9,00E+10	3,27E+11

6.10 Análise da equivalência estrutural

Critério imprescindível assumido para cálculo da espessura total da estrutura no método de dimensionamento de pavimentos asfálticos nacional, os coeficientes estruturais (CE) ou coeficientes ponderais de resistência como comenta Motta (1991) foram adotados pelo o Engenheiro Murilo Lopes de Souza com base nos coeficientes estruturais oriundos da pista experimental da AASHO (*American Association of State Highway Officials*) com adaptações primando à segurança ao dimensionar.

O guia da AASHTO (ASSTHO, 1993) comenta que os valores definidos para os coeficientes estruturais foram fundamentados com base nos valores de módulo de resiliência dos materiais, tomando-se como base, análise mecânicas considerando um sistema de camadas elásticas. A Tabela 6.22 apresenta um resumo de valores de coeficientes estruturais de alguns materiais com base nas metodologias mencionadas.

Tabela 6.22 – Coeficientes estruturais

Coeficiente estrutural	ASSTHO, 1993	DNIT, 2006
Concreto asfáltico	0,44	2,0
Brita graduada	0,13	1,0
Brita graduada tratada com cimento	0,23	1,7
Solo cimento	0,11	1,7

Nota: Os valores atribuídos segundo a metodologia AASHTO (1993) dependem do módulo de resiliência obtido em ensaios em laboratório.

Como abordado no método nacional de dimensionamento de pavimentos flexíveis, o manual do DNIT (DNIT, 2006) indica que um dos critérios para determinação da espessura de pavimento total necessária para atender ao número de solicitações de eixo padrão no horizonte de projeto, consiste na aplicação dos coeficientes de equivalência estrutural multiplicados com as espessuras de materiais variados, que comumente são utilizados em pavimentação. Balbo (2007) comenta que tais coeficientes representam a capacidade relativa de dado material em distribuir tensões às camadas inferiores.

A normativa PRO 10 (DNER, 1979) apresenta por sua vez, os fatores de equivalência estrutural, que representa um fator de compatibilização entre a espessura de um material de referência (pedregulho de referência ou equivalente) e a espessura real de um material de interesse. Tal espessura de pedregulho equivalente representa segundo a PRO 10 (DNER, 1979), uma camada “capaz de proporcionar uma distribuição de carga e um efeito sob a superfície subjacente, idêntico aos suscitados pela ação de placa desenvolvida pela espessura do material de interesse”.

Tal coeficiente pode ser variável a depender de parâmetros diretos como o fator climático regional, expresso no método (MOTTA, 1991) e de parâmetros não diretamente expressos como o módulo de resiliência do material, módulo da camada subjacente, espessura e entre outros fatores.

Neste contexto, como as misturas estudadas não apresentam valores de coeficientes definidos, é proposta uma metodologia de avaliação do CE segundo as premissas abordadas por Balbo (2007), onde tais coeficientes podem ser estimados aplicando-se uma análise geométrica (variação de espessuras de materiais) com base na teoria de sistemas de camadas elásticas, com a hipótese de se considerar um sistema elástico com duas camadas e aplicação de carga no topo da camada superior (Figura 6.14).

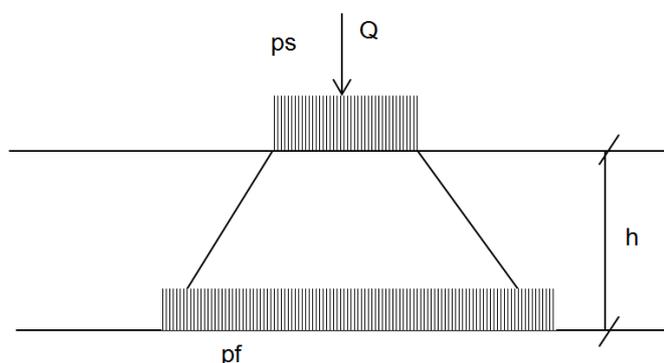


Figura 6.14 – Geometria de carregamento e distribuições de tensões segundo Balbo (2007)

A ideia principal desta metodologia reside no fato de se quantificar a relativa redução de pressão (Δp) eq. **(16)**, dada por um carregamento, que uma determinada camada superior proporciona, em relação à camada inferior. Com isto, o coeficiente estrutural, pode ser obtido pela relação entre a relativa redução de pressão de um dado material, em comparação com um material de referência, eq. **(17)**.

$$\Delta p = \frac{p_s - p_f}{p_s} \cdot 100 \quad (16)$$

$$CE = \frac{\Delta p^j}{\Delta p^{ref}} \quad (17)$$

Onde: p_s – tensão na superfície, dada pela geometria do carregamento;

p_f – tensão no fundo da camada inferior;

Δp^j – redução de pressão relativa dada por um material qualquer;

Δp^{ref} – redução de pressão relativa dada por um material de referência, como a BGS.

O coeficiente estrutural expressa a capacidade de dado material nas distribuições de pressões em relação a um padrão, tomou-se a brita graduada simples, como o padrão a ser avaliado na análise em comparação com os materiais atribuídos no estudo.

Neste contexto, é proposta uma análise da estimativa do CE para os materiais em estudo, considerando: (i) o carregamento e geometria de um eixo simples de roda dupla padrão, (ii) variação da espessura da camada superior, (iii) variação do módulo resiliente da camada inferior, e (iv) fixação dos módulos do material de referência e dos materiais em estudo, com base nos resultados obtidos em laboratório e em retroanálise.

O resumo de variáveis simulado no ELSYM 5 é apresentado na Tabela 6.23. A Tabela 6.24 apresenta o resumo de tensões após a simulação do programa, no topo da camada inferior, a Tabela 6. 25 apresenta a redução relativa de pressão de cada material do estudo, considerando o material de referência como a BGS e a Tabela 6.26 apresenta os CE estimados com base na metodologia proposta.

Tabela 6.23 – Parâmetros adotados para estimativa do CE para os materiais em estudo

Material	Espessura	Coef. Poisson sup.	Coef. Poisson inf.	MRsup (MPa)	MRinf (MPa)
RCD	10, 15, 20, 25	0,40	0,45	200	50, 100, 150, 200
BGS	10, 15, 20, 25	0,40	0,45	200	50, 100, 150, 200
RCD + 3% cal	10, 15, 20, 25	0,40	0,45	2.800	50, 100, 150, 200
RCD + 3% cim.	10, 15, 20, 25	0,40	0,45	3.500	50, 100, 150, 200

Tabela 6.24 – Resumo de tensões encontradas na camada inferior

Materiais		BGS	RCD	RCD + 3% cim	RCD + 3% cal
Espessuras da camada sup.	MR camada inferior (MPa)	Tensões no topo da camada inf. - σ_z (MPa)			
10	50	0,2000	0,2000	0,0896	0,0987
	100	0,2050	0,2050	0,1190	0,1300
	150	0,2040	0,2040	0,1380	0,1480
	200	0,2010	0,2010	0,1510	0,1610
15	50	0,1620	0,1620	0,0509	0,0572
	100	0,1850	0,1850	0,0722	0,0802
	150	0,1950	0,1950	0,0872	0,0961
	200	0,2000	0,2000	0,1010	0,1080
20	50	0,1260	0,1260	0,0325	0,0370
	100	0,1540	0,1540	0,0481	0,0542
	150	0,1680	0,1680	0,0595	0,0666
	200	0,1760	0,1760	0,0687	0,0764
25	50	0,0995	0,0995	0,0222	0,0256
	100	0,1260	0,1260	0,0341	0,0388
	150	0,1400	0,1400	0,0430	0,0486
	200	0,1490	0,1490	0,0503	0,0565

Tabela 6.25 – Redução relativa de tensões de cada material em relação a BGS

BGS	RCD	RCD + 3% cim.	RCD + 3% cal
64,3	64,3	84,0	82,4
63,4	63,4	78,8	76,8
63,6	63,6	75,4	73,6
64,1	64,1	73,0	71,3
71,1	71,1	90,9	89,8
67,0	67,0	87,1	85,7
65,2	65,2	84,4	82,8
64,3	64,3	82,0	80,7
77,5	77,5	94,2	93,4
72,5	72,5	91,4	90,3
70,0	70,0	89,4	88,1
68,6	68,6	87,7	86,4
82,2	82,2	96,0	95,4
77,5	77,5	93,9	93,1
75,0	75,0	92,3	91,3
73,4	73,4	91,0	89,9

Tabela 6.26 – Resumo de CE estimados com a avaliação geométrica e uso do sistema de camadas elásticas

BGS	RCD	RCD + 3% cim.	RCD + 3% cal
1,00	1,00	1,31	1,28
1,00	1,00	1,24	1,21
1,00	1,00	1,19	1,16
1,00	1,00	1,14	1,11
1,00	1,00	1,28	1,26
1,00	1,00	1,30	1,28
1,00	1,00	1,30	1,27
1,00	1,00	1,28	1,26
1,00	1,00	1,22	1,21
1,00	1,00	1,26	1,25
1,00	1,00	1,28	1,26
1,00	1,00	1,28	1,26
1,00	1,00	1,17	1,16
1,00	1,00	1,21	1,20
1,00	1,00	1,23	1,22
1,00	1,00	1,24	1,23

Com os resultados obtidos, verifica-se que a média dos CE estimados para as misturas em RCD, RCD + 3% cim. e RCD + 3% cal foram iguais a 1, 1,24 e 1,23 respectivamente. Logo o CE estimado do RCD pode ser comparável a de uma BGS, o CE estimado do RCD + 3% cim. e RCD + 3% cal são comparáveis a um solo cimento com resistência à compressão a 7 dias de 2,8 a 2,1 MPa e bases de solo cal respectivamente, com valores absolutos próximos a 1,20 (DNIT, 2006).

7 CONCLUSÕES

As respostas obtidas com a realização dos ensaios de caracterização física e mecânica apresentaram-se dentro dos limites especificados, mostrando aplicabilidade ao uso em pavimentação. Para aferição da forma do agregado e sua resistência, com uso de diferentes especificações, foi observado que o material encontra-se aceitável, apesar da variação do método de ensaio. Apesar dos resultados serem favoráveis, cabe ressaltar que as especificações nacionais possuem poucas limitações em suas normatizações.

Quanto à análise proposta para o comportamento do módulo de resiliência para as misturas em laboratório foi possível detectar para as misturas em estudo, que a mistura RCD+3% cim. apresentou o maior módulo em face as outras misturas. Além mais, as possíveis reações químicas aos materiais foram detectadas com o ensaio de módulo de resiliência. Quando realizada a retroanálise das bacias de campo, constatou-se com o tempo, que tais fenômenos também ocorreram em campo e que o material com maior rigidez foi o RCD+3% cim.

As misturas com RCD + 3% cim. apresentaram o melhor comportamento de módulo de resiliência retroanalizada em face as outras misturas avaliadas, porém a mistura com cimento fica muito próxima àquela com cal, com módulo de resiliência cerca de 5 a 10% inferior.

Com relação a deformação permanente investigada em laboratório, percebe-se que a aplicação de RCD com aglomerantes propicia uma maior rigidez e conseqüente menor deformabilidade, podendo o seu uso desta maneira se tornar mais eficaz para aplicação com volumes de tráfego menos conservadores.

Quanto ao estudo do comportamento em campo, ressalvadas as condições da pesquisa, as estruturas retroanalizadas, propiciam uma aplicação das misturas estudadas, em aplicações menos conservadoras, uma vez que realizada a análise mecanicista, os materiais da estrutura demonstraram adequado comportamento à

fadiga e à repetição de carga, apresentando valores de número de sollicitação de eixo padrão compatíveis para cada segmento homogêneo proposto.

Comparando as misturas estabilizadas com cimento ou com cal e a mistura em RCD *in natura*, percebe-se durante a análise da tensão atuante no topo da camada de subleito dos segmentos homogêneos propostos que, o tratamento com cal ou cimento diminui a magnitude de tensões no subleito, corroborando a aplicação das camadas estabilizadas, como forma de prevenção de tensões excessivas atuantes no topo do subleito.

Com relação aos CE estimados para os materiais em estudo, tal estimativa é de interesse, pois para estes materiais fazerem parte do cotidiano de dimensionamento de estruturas de pavimento flexível, é preciso atribuir um coeficiente estrutural para os mesmos, servindo assim de parâmetro para projetos. Tais valores assumidos podem ainda, serem variáveis em função do valor de módulo de resiliência assumido para simulação, devendo o projetista ter cautela em sua consideração, pois o desempenho de cada material avaliado, segundo o módulo de resiliência depende da energia de aplicação, parâmetros geotécnicos, bem como da posição estrutural como camada de pavimento.

Por fim, para a situação de aplicação em campo, as camadas demonstram eficácia no emprego como sub-base, tendo em vista que o tráfego imposto na Av. Sapopemba é maior que a aplicação indicada na ETS-001 (PMSP, 2003). No período da pesquisa, os trechos experimentais apresentaram comportamento adequado e ausência de patologias.

Como sugestão de procedimento ao uso do agregado reciclado de construção e demolição, como camada de base ou sub-base, sua aplicação estaria vinculada as condições:

1. Tratamento e beneficiamento do resíduo em unidade de reciclagem apropriada, com eliminação das impurezas e classificação do material remanescente;

2. Definição de uma mistura de interesse, com ou sem o uso de aglomerantes, necessitando a mesma ser aplicável a enquadramentos normativos nacionais em termos de qualidade;
3. Caracterização da deformabilidade do material. Realização de ensaios de módulo de resiliência para determinação de sua rigidez e ensaios de formação permanente, vinculando o nível de tensão a ser aplicável ao material no ensaio com o nível de tensão aplicado ao material no campo;
4. Quanto à aplicação deste material em pista, deve-se levar em consideração a sua perfeita homogeneização em usina, pois para o estudo em questão, acredita-se que este foi um fator preponderante para o adequado desempenho a aplicação;
5. Em pista deve ser realizado o controle de espessura bem como se evitar o uso de motoniveladora para o espalhamento, tendo em vista que esta provoca segregação ao material e aumento da variabilidade em resposta mecânica, na camada pós compactada. O uso de distribuidores de agregados é capaz de solucionar tal dificuldade;
6. A espessura de compressão da camada acabada individual pode se situar entre 10 a 25,0 cm, sendo tal constatação, corroborada pela aplicação do estudo;
7. Deve ser realizado imprescindivelmente um controle deflectométrico a camada em questão, devendo ser aceita sua aplicação caso atenda aos limites especificados em projeto.

Para pesquisas futuras, podem-se elencar fatores de interesse a serem estudados, como:

1. Estudo do desenvolvimento da fissuração em laboratório de misturas com agregado reciclado, com enfoque na redução do módulo de resiliência, com adição de teores de aglomerantes acima do verificado no presente estudo;

2. Avaliação da deformabilidade as misturas de agregado reciclado em condições saturada e seca para checagem da sua estabilidade quanto à condição de estado do material;
3. Estudo de aplicação da mistura em agregado reciclado com aglomerantes, para volumes de tráfego superiores ao avaliado no presente estudo, para análise de desempenho;
4. Inferência do comportamento de campo do agregado reciclado com uso de aglomerantes, com variação de espessura do material executado de interesse;
5. Verificar a variação do coeficiente estrutural segundo a metodologia considerada no presente estudo, para mistura de interesse, com a variação do módulo de resiliência obtido tanto em laboratório, quanto no campo na condição de variação de espessura do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRELA, F.; BARBUDO, A.; RAMÍREZ, A.; AYUSO, J.; CARVAJAL, M. D.; JIMÉNEZ, J. R. Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 58, p. 98-106, 2011.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO. **Guide for design of pavement structures**. Washington D.C, 1993. 623 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1633**: standard test method for compressive strength of molded soil-cement cylinders. West Conshohocken, 2007. 4 p.

_____. **ASTM D 1883**: standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils. West Conshohocken, 2007. 9 p.

_____. **ASTM D 4695**: standard guide for general pavement deflection measurements. West Conshohocken, 2008. 7 p.

_____. **ASTM D 4791**: standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate. West Conshohocken, 2010. 6 p.

_____. **ASTM D 5858**: standard guide for calculating *in situ* equivalent elastic moduli of pavement materials using layered elastic theory. West Conshohocken, 2008. 7 p.

ANGULO S. C. **Caracterização de agregados de resíduo de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concreto**. 2005. 167 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

ARAUJO, A. F. (2009). **Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do estado do Ceará**. 2009. 175 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia do Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2009.

ARULRAJAH A.; PIRATHEEPAN J.; AATHEESAN, T.; BO, M. W. Geotechnical properties of recycled crushed brick in pavement applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, N. 10, p. 1444-1452, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: agregados: redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001. 7 p.

_____. **NBR NM 51**: agregado graúdo: ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001. 6 p.

_____. **NBR 5564**: via férrea: lastro ferroviário: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2011. 26 p.

_____. **NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

_____. **NBR 7182**: solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 10 p.

_____. **NBR 7809**: agregado graúdo: determinação do índice de forma pelo método do paquímetro: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006. 3 p.

_____. **NBR 15114**: resíduos sólidos da construção civil – áreas de reciclagem – diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004. 7 p.

_____. **NBR 15115**: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: execução de camadas de pavimentação – procedimentos. Rio de Janeiro, 2004. 10 p.

_____. **NBR 15116**: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos. Rio de Janeiro, 2004. 12 p.

BALBO, J.T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1ª.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

BARBUDO, A.; AGRELA, F; AYUSO, J.; JIMÉNEZ, J. R.; POON, C. S. Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. **Construction and Building Materials**, v. 28, p 129-138, 2011.

BARONIO, G.; BINDA, L. Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. **Construction and Building Materials**, v. 11, p. 41-46, 1997.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica, formação básica para engenheiros**. 1ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2006. 475 p.

BRITISH STANDARD.**BS 812 - 111**: testing aggregates: methods for determination of ten per cent fines value United Kingdom, 1990. 16 p.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 12697-22**: mélanges bitumineux: méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud: Partie 22: Essai d'orniérage. Version française. Bruxelles, 2003.

_____. **EN 12697-33**: mélange bitumineux: méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud: partie 33: confection d'éprouvettes au compacteur de plaque. Version française. Bruxelles, 2003.

_____. **EN 13286-7**: unbound and hydraulically bound mixtures: Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures. English version. Brussels, 2004.

CERNI, G.; CARDONE, F; BOCCI, M. Permanent deformation behavior of unbound recycled mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 573-580 2012.

COCHRAN, K.; TOWNSEN, T.G. Estimating construction and demolition debris generation using a materials flow analysis approach. **Waste Management**, v. 30, p. 2247-2254, 2010.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 307, de 5de julho de 2002**. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307> >. Acesso em: 02 de fev. 2013.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM - SP. **ET-DE-P00/008**. Especificação técnica: sub-base ou base de brita graduada. São Paulo, 2005. 20p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM - SP. **IP-DE-P00/001**. Instrução de projeto: projeto de pavimentação. São Paulo, 2006. 53p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 024**. Pavimento: determinações das deflexões pela viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994. 6p.

_____. **DNER ME 43**: misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995. 11 p.

_____. **DNER ME 96**: agregado graúdo – avaliação da resistência mecânica pelo método dos 10% de finos. Rio de Janeiro, 1998. 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER PRO 10**. Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis – procedimento “A”. Rio de Janeiro, 1979. 31p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES (DNIT). **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

_____. **DNIT ME 134**: solos: determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 2010.11p.

GARB, A. R.; CAMERON, D. A.; ANDREW, R.; MITCHELL P. W. Comparison of specifications for recycled concrete aggregate for pavement construction. **Journal of ASTM International**, v. 8, N. 10, p. 1-15, 2011.

GARG, N.; THOMPSON, M. R. Triaxial characterization of Minnesota road research project granular materials. **Transportation Research Record**, N. 1577, p. 27-36, 1997.

GOUX, MT. ; AUSSÉDAT, G.; BASUYAU, V.; BRISSAUD, L.; DROUADAINÉ, I. ; GODARD, E.; JOURDAN, M.; KERGOET, M.; LACROSE, JM.; MEHEUT, D. **Guide techniques pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile de France: Les bétons et produits de démolition recyclés**. Direction Régionale de l'Équipement d'Ile-de-France, France, 2003.32 p.

GRUBBS, F. E. **Sample criteria for testing outlying observations**. Annals of Mathematical Statistics, v. 21, p27-58, 1950.

_____. **Procedure for detecting outlying observations in samples**. Technometrics, v. 11, N.1 p.01-21, 1969.

HERRADOR, R.; PÉREZ, P.; GARACH L.; ORDÓÑEZ, J. Use of recycled construction and demolition waste aggregate for road course surfacing. **Journal of Transportation Engineering**, v. 138, N. 2, p. 182-190, 2012.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. 2° ed. United States of America: Pearson Prentice Hall, 2004. 775 p.

JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J. ; AGRELA, F.; LÓPEZ, M.; GALVÍN A. P. Utilization of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 58, p. 88-97, 2011.

JOHN, V. M.; ANGULO, S. C.; MIRANDA, L. F. R.; AGOPYAN, V.; VASCONCELLOS, F. Strategies for innovation in construction demolition waste management in Brazil. **The 16th CIB World Building Congress**, p. 11, 2004.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (LNEC). **Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos**. Portugal, 2009. 4 p.

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

LITTLE, D. N. **Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime**. 1ª. ed. United States of America: Lime Association of Texas, 1995. 219 p.

MACEDO, J. A. G. **Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis**. 1996. 477 p. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

MALYSZ, R. **Comportamento mecânico de britas empregadas em pavimentação**. 2004. 135 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. 1991. 366 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

MOLENAAR, A. A. A.; NIEKERK, A. A. Effects of gradation, composition, and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound materials. **Journal of the Transportation Research Board**, v. 1787, p. 73-82, 2002.

MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. 135 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. 1ª. ed. São Paulo: Editora Vilibor, 1995. 240 p.

PIHL, K. A.; MILVANG-JANSEN, O.; BERG, F. Crushed concrete from building demolition is a high quality material for road construction **25th International Baltic Road Conference and Exhibition**, p 25-27, 2003.

PINIWEB. São Paulo. Em São Paulo, destroços do prédio São Vito viram base para pavimentação de vias. Disponível em: <<http://www.infraestruturaurbana.com.br/solucoes-tecnicas/9/artigo241032-1.asp>>. Acesso em: 03 fev. 2013.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2ª edição, 2002. 355 p.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. **Módulos resilientes de concretos asfálticos**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens – Instituto Pesquisas Rodoviárias DNER - IPR, Rio de Janeiro. 1980

PUPPALA, A. J.; MOHAMMAD, L. N.; ALLEN A. Permanent deformation characterization of subgrade soils from RLT test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 11, N. 4, p. 274-282, 1999.

POON, C. S.; CHAN, D. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. **Construction and Building Materials**, v. 20, p. 578-585, 2006.

POON, C. S.; QIAO, X. C.; CHAN, D. The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base. **Waste Management**, v. 26, p. 1166-1172, 2006.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Decreto municipal nº 48.075, de 28 de dezembro de 2006**. Disponível em: <http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=29122006D%20480750000>. Acesso em: 03 de fev. 2013.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **PMSP ETS 01**: camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil. São Paulo, 2003. 14 p.

_____. **PMSP ETS 02**: base de material fresado com espuma de asfalto. São Paulo, 2009. p 17.

_____. **PMSP IE 03**: camada de concreto asfáltico usinado a quente. São Paulo, 2009. 21 p.

_____. **PMSP IP 05**: dimensionamento de pavimentos flexíveis tráfego meio pesado, pesado, muito pesado e faixa exclusiva de ônibus. São Paulo, 2004.19 p.

RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources Conservation & Recycling**, v. 50, p. 71-81, 2007.

RILEM.**DRG 121**: specifications for concrete with recycled aggregates, materials and structures. v. 27. 1994. p 3.

TSENG, E. **Reciclagem total de pavimentos de concreto como agregados para construção de novos pavimentos de concreto: o caso do rodoanel metropolitano Mário Covas**. 2010. 220 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição**. 2011. 222 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

ULSEN, C.; KAHN, H.; HAWLITSCHKE G.; MASINI, E. A.; ANGULO, S. C. Separability studies of construction and demolition waste recycled sand. **Waste Management**, v. 33, p. 656-662, 2012.

VEGAS, I.; IBANEZ, A. J; LISBONA, A.; CORTAZAR, A. S.; FRIAS, M. Pré-normative research on use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2674-2682, 2011.

WERKMEISTER, S. **Permanent deformation behavior of unbound granular materials in pavement constructions**. 2003. 152 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Técnica de Dresden, Alemanha, 2003.

XIAO, Y.; TUTUMLUER, E.; QIAN, Y.; SIEKMEIER, J. A. Gradation effects influencing mechanical properties of aggregate base-granular subbase materials in Minnesota. **Journal of the Transportation Research Board**, nº 2267 , p. 14-26, 2012.

XUAN, D. **Cement treated recycled crushed concrete and masonry aggregates for pavements**. 2012. 250 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil e Geociências, Universidade Técnica de Delft , Holanda, 2012.

XUAN, D.X.; HOUBEN, L.J.M.; MOLENAAR, A. A. A.; SHUI, Z. H. Mechanical properties of cement-treated aggregate material – A review. **Materials and Design**, v. 33, p. 496-502, 2011.

YODER, E.J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**.2ª.ed. United States of America, 1975.711 p.

ANEXO A – LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO DO
CONTROLE TECNOLÓGICO POR FWD

Tabela A.1 – Levantamento deflectométrico no eixo da faixa de rolamento, sentido bairro: T= 4M

 CONDICÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD											
Logradouro		Trecho				Sentido		Local	Raio de aplicação		
Av. Sapopemba		Centro > Bairro				Bairro		Eixo	15 cm		
Início		Final		Equipamento				Revestimento			
km 4,260		km 4,560		Falling Weight Deflectometer				CBUQ			
Estaaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav.	
		0	20	30	45	65	90	120			
213	3.930	32,0	18,3	13,6	10,6	6,8	5,0	3,5	22	32	23/07/12
214	3.902	39,0	24,2	18,0	14,6	9,6	7,3	4,9	22	32	23/07/12
215	3.930	42,8	22,7	16,3	12,5	8,3	5,5	4,0	23	33	23/07/12
216	4.291	36,2	18,5	13,0	10,3	6,7	5,7	4,1	23	33	23/07/12
217	4.298	37,0	18,7	13,9	11,3	7,7	6,4	4,9	23	33	23/07/12
218	4.156	26,3	16,1	12,1	11,5	8,8	7,7	5,7	23	33	23/07/12
219	4.114	16,8	10,2	8,3	7,9	6,1	5,7	4,1	23	33	23/07/12
220	4.128	14,1	8,5	6,5	6,4	4,7	4,3	3,7	23	33	23/07/12
221	4.114	17,2	11,4	9,0	8,2	6,1	5,5	4,1	23	33	23/07/12
222	4.142	14,0	8,2	7,3	6,8	5,6	5,2	4,2	23	33	23/07/12
223	4.121	19,3	10,7	8,3	7,3	5,7	5,1	3,8	23	33	23/07/12
224	4.100	15,8	9,9	7,9	7,8	5,8	4,5	4,5	23	33	23/07/12
225	4.057	20,7	11,2	9,2	9,1	7,5	6,7	5,1	23	33	23/07/12
226	4.057	20,3	11,3	9,1	8,5	6,5	6,1	4,2	23	33	23/07/12
227	4.064	18,7	10,7	8,7	8,4	6,6	5,7	4,1	23	33	23/07/12
228	4.029	30,3	19,3	14,8	12,6	8,7	7,0	5,2	23	33	23/07/12

Tabela A.2 – Levantamento deflectométrico na trilha externa da faixa de rolamento, sentido bairro: T= 4M

 CONDICÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD											
Logradouro		Trecho				Sentido		Local		Raio de aplicação	
Av. Sapopemba		Centro > Bairro				Bairro		Trilha Externa		15 cm	
Início		Final		Equipamento				Revestimento			
km 4,260		km 4,560		Falling Weight Deflectometer				CBUQ			
Estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav.	
		0	20	30	45	65	90	120			
213	4.326	38,3	23,4	18,0	14,3	9,5	6,9	4,7	18	29	23/07/12
214	4.305	34,9	23,0	17,6	14,9	10,2	8,3	5,5	18	29	23/07/12
215	4.354	39,3	22,7	16,5	13,5	9,8	6,5	4,6	18	29	23/07/12
216	4.312	32,4	18,6	13,5	10,8	7,2	5,7	3,8	18	29	23/07/12
217	4.192	26,8	17,2	12,8	11,0	7,8	6,4	4,8	18	29	23/07/12
218	4.170	27,6	18,0	14,3	12,8	9,5	8,2	6,1	18	29	23/07/12
219	4.149	15,1	9,9	8,2	7,6	6,1	5,1	4,0	18	29	23/07/12
220	4.170	13,5	8,4	6,9	6,6	5,1	5,0	3,6	18	29	23/07/12
221	4.135	16,9	11,5	9,4	8,8	6,7	6,1	4,3	18	29	23/07/12
222	4.142	15,6	10,1	8,5	8,2	6,7	6,0	4,6	18	29	23/07/12
223	4.121	16,3	12,0	9,3	8,6	6,5	5,7	4,9	18	29	23/07/12
224	4.064	15,2	11,0	9,0	8,7	7,0	6,2	4,9	18	29	23/07/12
225	4.036	22,1	12,6	10,6	10,6	8,5	7,6	5,8	18	29	23/07/12
226	3.973	18,6	11,3	9,6	9,0	7,1	6,1	4,5	18	29	23/07/12
227	3.930	18,5	12,1	9,6	8,8	6,8	6,0	4,0	18	29	23/07/12
228	3.965	29,0	19,2	14,7	12,4	8,7	6,9	4,8	18	29	23/07/12

Tabela A.3 – Levantamento deflectométrico no eixo da faixa de rolamento, sentido centro: T= 4M

 CONDICÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD											
Logradouro		Trecho				Sentido		Local	Raio de aplicação		
Av. Sapopemba		Bairro > Centro				Centro		Eixo	15 cm		
Início		Final		Equipamento				Revestimento			
km 4,560		km 4,260		Falling Weight Deflectometer				CBUQ			
Estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav.	
		0	20	30	45	65	90	120			
228	4.107	31,1	18,3	13,9	11,9	8,1	6,9	4,8	23	33	23/07/12
227	4.050	22,9	11,6	9,3	9,1	7,0	5,9	3,9	23	33	23/07/12
226	4.008	18,7	9,1	7,5	7,3	5,6	5,4	4,0	23	33	23/07/12
225	4.036	20,8	9,4	7,7	7,6	6,2	5,5	4,4	23	33	23/07/12
224	4.015	20,3	8,7	7,1	7,0	5,4	5,6	4,0	23	33	23/07/12
223	4.036	18,9	9,4	7,3	7,1	5,5	5,4	3,4	23	33	23/07/12
222	3.951	18,6	7,9	6,1	5,6	4,6	4,5	3,8	23	33	23/07/12
221	4.008	15,7	8,9	7,6	7,5	5,6	5,4	4,0	23	33	23/07/12
220	3.951	14,9	8,3	6,6	6,5	4,8	4,8	3,4	23	33	23/07/12
219	3.916	22,4	12,5	10,3	9,9	8,0	7,2	5,5	23	33	23/07/12
218	3.902	22,2	14,9	11,2	9,6	6,7	6,0	4,5	23	33	23/07/12
217	3.902	27,0	15,0	10,7	8,9	6,2	5,0	3,8	23	33	23/07/12
216	3.881	29,3	16,1	11,4	9,1	6,4	5,5	4,1	23	33	23/07/12
215	3.973	38,9	24,0	16,5	11,2	7,2	5,9	4,7	23	33	23/07/12
214	3.859	26,3	14,6	10,6	9,2	6,5	5,8	3,9	23	33	23/07/12
213	3.874	21,6	14,5	10,3	7,4	4,3	3,4	2,5	23	33	23/07/12

Tabela A.4 – Levantamento deflectométrico na trilha externa da faixa de rolamento, sentido centro: T= 4M

 CONDICÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD											
Logradouro		Trecho				Sentido		Local		Raio de aplicação	
Av. Sapopemba		Bairro > Centro				Centro		Trilha Externa		15 cm	
Início		Final		Equipamento				Revestimento			
km 4,560		km 4,260		Falling Weight Deflectometer				CBUQ			
Estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav.	
		0	20	30	45	65	90	120			
228	4.114	29,8	19,1	14,8	12,4	8,7	6,9	4,8	18	26	23/07/12
227	4.128	20,8	12,1	9,8	9,2	7,1	6,6	3,6	18	26	23/07/12
226	4.121	17,6	9,4	8,0	7,9	6,1	6,0	4,3	18	26	23/07/12
225	4.114	19,9	10,3	8,4	8,3	7,1	6,3	4,7	18	26	23/07/12
224	4.135	19,2	8,6	7,3	7,1	5,8	5,4	4,2	18	26	23/07/12
223	4.100	17,8	9,1	7,4	7,1	5,5	5,2	3,3	19	29	23/07/12
222	4.086	18,0	8,7	6,8	6,6	5,3	5,0	3,8	19	29	23/07/12
221	4.072	16,5	9,1	7,6	7,5	6,1	5,9	4,2	19	29	23/07/12
220	4.043	15,1	9,0	7,6	7,1	5,3	5,3	3,2	19	29	23/07/12
219	4.022	21,7	12,8	10,5	9,9	7,8	6,8	5,2	19	29	23/07/12
218	4.050	21,5	14,1	10,7	9,0	6,7	5,6	4,3	19	29	23/07/12
217	4.036	24,5	14,7	11,0	9,2	6,3	5,2	3,9	19	29	23/07/12
216	4.022	29,3	16,9	12,7	10,1	7,1	5,6	3,9	19	29	23/07/12
215	4.015	34,8	22,2	16,3	12,3	7,6	6,2	3,9	20	30	23/07/12
214	3.965	29,9	16,8	12,4	9,9	6,8	5,9	4,1	20	30	23/07/12
213	3.958	26,3	13,9	10,2	8,5	5,6	4,8	3,6	20	30	23/07/12

Tabela A.5 – Levantamento deflectométrico no eixo da faixa de rolamento, sentido bairro: T= 10M

		CONDIÇÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD									
RODOVIA		TRECHO			SENTIDO			Local	RAIO DE APLICAÇÃO		
Av. Sapopemba		Centro > Bairro			Bairro			Eixo	15 cm		
INÍCIO		FIM			EQUIPAMENTO				Revestimento		
km 213		km 228			Falling Weight Deflectometer				CBUQ		
Estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav	
213	4.156	25,3	16,4	13,4	10,0	7,0	5,8	4,2	33	37	01/02/13
214	4.170	33,9	24,6	19,4	15,3	11,0	8,5	5,1	33	37	01/02/13
215	4.170	36,9	25,1	18,5	13,5	9,3	6,6	5,0	33	36	01/02/13
216	4.178	28,7	18,3	13,2	10,0	7,2	5,7	4,5	33	38	01/02/13
217	4.170	27,0	17,7	13,4	10,5	7,9	6,4	5,3	33	37	01/02/13
218	4.170	18,6	14,1	12,0	10,3	8,9	7,8	6,4	33	33	01/02/13
219	4.170	14,0	10,0	9,0	7,9	7,3	6,2	5,2	33	33	01/02/13
220	4.163	10,5	7,1	6,4	5,3	5,1	4,3	4,3	33	33	01/02/13
221	4.178	11,9	9,0	7,4	6,8	5,9	5,3	4,2	32	33	01/02/13
222	4.185	10,2	7,2	6,4	5,9	5,3	4,7	4,6	32	33	01/02/13
223	4.185	12,7	8,4	7,0	6,2	5,4	4,7	4,0	32	34	01/02/13
224	4.185	13,3	9,5	7,5	7,2	6,2	5,4	5,1	32	34	01/02/13
225	4.163	16,0	10,1	8,2	7,5	6,7	6,0	5,1	32	34	01/02/13
226	4.156	15,3	9,8	8,5	7,7	6,8	5,8	4,9	32	36	01/02/13
227	4.135	15,5	11,1	9,3	8,1	7,0	5,9	4,6	32	35	01/02/13
228	4.163	27,0	19,8	15,3	12,1	9,3	7,3	5,7	32	34	01/02/13

Tabela A.6 – Levantamento deflectométrico na trilha externa da faixa de rolamento, sentido bairro: T= 10M

 CONDIÇÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD											
RODOVIA		TRECHO				SENTIDO		Local	RAIO DE APLICAÇÃO		
Av. Sapopemba		Centro > Bairro				Crescente		TER	15 cm		
INÍCIO		FIM				EQUIPAMENTO			Revestimento		
km 213		km 228				Falling Weight Deflectometer			CBUQ		
Estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav	
213	4.192	26,7	19,2	15,2	11,8	8,8	6,7	4,5	32	35	01/02/13
214	4.170	28,2	21,9	17,0	13,1	10,1	8,0	5,9	32	35	01/02/13
215	4.178	31,0	22,1	16,8	12,6	9,1	6,8	4,9	32	36	01/02/13
216	4.220	28,7	20,0	14,7	10,8	7,6	5,8	4,6	33	32	01/02/13
217	4.192	27,6	20,3	15,4	12,1	8,9	7,0	5,8	33	35	01/02/13
218	4.192	21,6	16,3	13,1	11,6	9,9	8,2	6,4	33	30	01/02/13
219	4.234	13,6	9,8	8,2	7,2	6,5	5,5	4,5	33	30	01/02/13
220	4.227	12,5	8,8	7,5	6,8	6,0	5,0	4,9	33	30	01/02/13
221	4.213	13,0	10,4	8,9	7,7	6,7	5,9	4,7	33	30	01/02/13
222	4.199	12,9	9,9	8,6	7,8	6,9	6,1	4,9	33	30	01/02/13
223	4.206	15,3	10,8	9,1	7,6	6,4	5,6	4,2	33	31	01/02/13
224	4.206	16,6	12,7	11,0	9,0	8,1	7,2	5,9	33	31	01/02/13
225	4.206	19,3	13,2	11,0	9,9	9,0	8,1	6,6	33	31	01/02/13
226	4.178	17,1	12,5	10,6	9,4	7,9	6,7	4,2	33	34	01/02/13
227	4.163	16,5	11,6	9,7	8,4	6,8	5,9	4,9	33	33	01/02/13
228	4.163	25,5	19,4	15,7	12,4	9,6	7,4	5,2	33	31	01/02/13

Tabela A.7 – Levantamento deflectométrico no eixo da faixa de rolamento, sentido centro: T= 10M

 CONDIÇÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD											
RODOVIA		TRECHO				SENTIDO		Local	RAIO DE APLICAÇÃO		
Av. Sapopemba		Bairro > Centro				Decrescente		EIXO	15 cm		
INÍCIO		FIM				EQUIPAMENTO			Revestimento		
km 228		km 213				Falling Weight Deflectometer			CBUQ		
Estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav	
228	4.093	17,5	12,4	10,5	8,5	7,4	6,1	5,2	32	35	01/02/13
227	4.114	18,0	12,4	9,5	7,9	6,9	5,9	4,7	32	37	01/02/13
226	4.100	14,8	8,5	6,8	6,7	6,1	5,4	4,7	32	37	01/02/13
225	4.100	12,8	7,9	6,8	6,1	5,7	4,9	4,3	32	36	01/02/13
224	4.107	13,8	8,6	7,6	6,4	6,0	5,2	4,5	32	35	01/02/13
223	4.107	10,5	6,4	5,1	4,5	4,4	4,2	3,6	32	35	01/02/13
222	4.114	12,3	7,0	5,6	4,6	4,3	4,2	3,5	32	33	01/02/13
221	4.121	11,9	7,5	6,1	5,5	5,5	4,7	4,1	32	34	01/02/13
220	4.100	10,5	6,8	6,2	5,0	4,7	4,2	3,6	32	34	01/02/13
219	4.057	18,3	12,2	9,7	8,9	7,9	7,5	6,0	32	34	01/02/13
218	4.135	20,2	14,7	11,4	9,6	8,1	6,7	5,7	32	35	01/02/13
217	4.135	21,6	15,0	10,9	7,9	6,0	5,0	4,5	32	37	01/02/13
216	4.128	26,8	17,8	12,1	9,3	6,9	5,3	4,7	32	38	01/02/13
215	4.086	30,6	21,1	14,9	10,7	8,0	6,3	5,0	32	38	01/02/13
214	4.114	22,6	16,5	12,4	9,9	7,7	5,8	5,1	32	37	01/02/13
213	4.107	22,7	15,3	10,3	7,5	5,8	4,5	3,8	32	37	01/02/13

Tabela A.8 – Levantamento deflectométrico na trilha externa da faixa de rolamento, sentido centro: T= 10M

		CONDIÇÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD									
RODOVIA		TRECHO				SENTIDO		Local	RAIO DE APLICAÇÃO		
Av. Sapopemba		Bairro > Centro				Decrescente		TER	15 cm		
INÍCIO		FIM				EQUIPAMENTO			Revestimento		
km 228		km 213				Falling Weight Deflectometer			CBUQ		
Estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav	
228	4.107	16,7	12,3	10,5	8,4	7,0	5,9	4,8	32	33	01/02/13
227	4.128	18,0	11,4	10,5	7,3	6,6	6,0	4,8	32	37	01/02/13
226	4.121	14,4	9,3	8,0	6,9	6,6	5,5	5,0	32	37	01/02/13
225	4.114	15,3	9,8	8,0	7,1	6,3	5,4	4,6	32	36	01/02/13
224	4.135	15,6	9,4	7,7	6,6	6,0	5,3	4,6	32	35	01/02/13
223	4.149	11,4	7,2	5,5	5,4	4,8	4,3	3,8	32	35	01/02/13
222	4.149	11,4	7,6	6,1	5,5	5,0	4,5	3,9	32	31	01/02/13
221	4.107	12,6	8,6	6,9	5,8	5,7	5,0	4,5	32	32	01/02/13
220	4.142	12,3	7,7	6,3	5,6	5,2	5,0	4,2	32	32	01/02/13
219	4.107	19,0	12,4	10,3	9,3	8,1	7,0	5,8	32	32	01/02/13
218	4.142	19,7	14,1	11,5	8,8	7,3	6,3	5,3	32	33	01/02/13
217	4.163	23,0	15,2	11,8	9,4	7,4	6,2	5,2	32	38	01/02/13
216	4.156	26,7	17,4	12,8	9,5	7,4	5,9	5,0	32	39	01/02/13
215	4.135	34,2	22,6	16,0	11,8	8,5	6,7	5,6	32	38	01/02/13
214	4.128	27,3	18,0	13,5	10,0	7,7	6,5	4,9	32	39	01/02/13
213	4.128	24,3	14,8	11,6	8,0	6,4	4,8	3,9	32	38	01/02/13

Tabela A.9 – Levantamento deflectométrico no eixo da faixa de rolamento, sentido bairro: T= 16M

 CONDICÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD											
RODOVIA		TRECHO			SENTIDO			Local	RAIO DE APLICAÇÃO		
Av. Sapopemba		Bairro > Centro			Crescente			Eixo	15 cm		
INÍCIO		FIM			EQUIPAMENTO			Revestimento			
km 213		km 228			Falling Weight Deflectometer			CBUQ			
km inicial	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav	
213	4.284	17,7	13,8	10,8	8,4	6,8	4,9	3,8	13	17	26/07/13
214	4.277	25,5	20,9	16,6	12,7	9,9	6,9	5,1	13	18	26/07/13
215	4.305	21,4	16,2	12,9	9,9	8,0	5,5	4,1	13	18	26/07/13
216	4.326	20,3	14,4	11,0	8,5	6,6	4,9	3,8	13	18	26/07/13
217	4.298	21,2	16,2	12,3	9,4	7,6	5,8	4,7	13	18	26/07/13
218	4.291	15,2	12,4	10,5	9,1	7,9	6,9	5,7	13	17	26/07/13
219	4.269	10,3	8,3	7,2	6,5	5,5	4,7	3,9	13	17	26/07/13
220	4.255	9,3	7,4	6,1	5,3	4,7	4,1	3,4	13	17	26/07/13
221	4.241	10,0	8,8	7,5	6,7	5,9	4,9	4,1	13	17	26/07/13
222	4.262	9,0	7,6	6,4	5,7	5,1	4,6	3,7	13	17	26/07/13
223	4.298	11,0	8,9	7,2	6,0	5,2	4,5	3,8	13	17	26/07/13
224	4.255	10,7	8,9	7,3	6,6	5,8	5,0	4,2	13	17	26/07/13
225	4.248	10,9	8,4	7,3	6,6	6,1	5,5	4,5	13	17	26/07/13
226	4.227	10,9	8,5	7,1	6,1	5,4	4,5	3,6	13	18	26/07/13
227	4.234	11,3	9,3	7,8	6,5	6,0	4,8	4,1	13	17	26/07/13
228	4.277	19,5	16,8	14,0	11,4	9,3	7,0	5,4	13	17	26/07/13

Tabela A.10 – Levantamento deflectométrico na trilha externa da faixa de rolamento, sentido bairro: T= 16M

 CONDICÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD											
RODOVIA		TRECHO				SENTIDO		Local	RAIO DE APLICAÇÃO		
Av. Sampopemba		Bairro > Centro				Crescente		TER	15 cm		
INÍCIO		FIM				EQUIPAMENTO			Revestimento		
km 213		km 228				Falling Weight Deflectometer			CBUQ		
Estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav	
213	4.375	20,2	16,7	13,1	10,3	8,1	5,7	4,0	12	18	26/07/13
214	4.354	21,3	18,0	14,7	11,5	9,3	6,7	5,1	12	18	26/07/13
215	4.368	21,8	17,2	14,0	10,5	8,5	6,1	4,5	13	18	26/07/13
216	4.340	21,7	16,8	13,0	9,9	7,5	5,1	4,1	13	18	26/07/13
217	4.326	20,2	16,3	12,6	9,8	7,6	5,9	4,8	13	18	26/07/13
218	4.333	15,8	13,5	11,6	10,2	9,1	7,5	6,2	13	17	26/07/13
219	4.340	11,1	9,4	7,8	6,8	6,1	5,0	4,1	13	17	26/07/13
220	4.284	10,8	9,0	7,3	6,3	5,8	5,0	4,1	13	17	26/07/13
221	4.305	11,8	10,1	8,9	7,8	6,8	5,5	4,6	13	17	26/07/13
222	4.340	10,7	9,0	7,9	7,1	6,6	5,6	4,6	13	17	26/07/13
223	4.383	12,3	10,0	8,3	7,0	6,1	5,1	4,4	13	17	26/07/13
224	4.326	10,8	9,2	8,2	7,2	6,6	5,6	4,8	13	17	26/07/13
225	4.319	17,7	12,2	11,0	9,9	9,1	7,1	5,6	13	17	26/07/13
226	4.241	12,8	10,5	9,2	8,1	7,2	5,8	4,8	13	18	26/07/13
227	4.248	14,3	11,8	9,9	8,4	7,1	5,8	4,6	13	17	26/07/13
228	4.291	23,0	19,6	16,1	13,0	10,4	7,4	5,6	13	17	26/07/13

Tabela A.11 – Levantamento deflectométrico no eixo da faixa de rolamento, sentido centro: T= 16M

 CONDICÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD											
RODOVIA		TRECHO			SENTIDO			Local	RAIO DE APLICAÇÃO		
Av. Sapopemba		Centro > Bairro			Decrescente			Eixo	15 cm		
INÍCIO		FIM			EQUIPAMENTO			Revestimento			
km 228		km 213			Falling Weight Deflectometer			CBUQ			
Estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav	
228	4.284	12,9	10,7	9,3	8,1	6,8	5,5	4,4	13	18	26/07/13
227	4.312	18,4	14,7	8,9	6,3	4,7	4,1	3,8	13	18	26/07/13
226	4.255	9,7	7,7	6,4	5,8	5,1	4,5	3,9	13	17	26/07/13
225	4.248	11,3	8,8	7,2	5,9	5,5	4,9	4,0	13	18	26/07/13
224	4.255	11,4	7,2	6,4	6,2	4,6	4,5	3,9	13	17	26/07/13
223	4.312	12,6	8,9	7,2	6,4	5,6	4,8	4,2	13	17	26/07/13
222	4.269	10,5	7,0	5,5	5,2	4,5	3,8	3,4	13	17	26/07/13
221	4.284	10,3	8,2	6,1	5,4	4,9	4,5	3,8	13	17	26/07/13
220	4.298	9,0	6,7	5,5	5,1	4,6	4,1	3,6	13	17	26/07/13
219	4.234	13,8	10,8	9,2	8,1	7,0	6,0	5,0	13	17	26/07/13
218	4.241	14,1	10,6	8,7	7,6	7,0	5,3	4,7	13	17	26/07/13
217	4.305	15,6	11,9	9,3	7,9	5,8	4,7	4,2	13	18	26/07/13
216	4.277	17,9	14,4	11,2	8,4	6,4	5,0	4,1	13	18	26/07/13
215	4.319	24,6	19,2	15,1	11,0	8,5	5,9	4,4	13	18	26/07/13
214	4.234	17,6	13,8	10,8	8,6	6,7	5,4	4,4	13	17	26/07/13
213	4.262	16,3	11,8	9,0	6,7	5,1	3,9	3,2	13	17	26/07/13

Tabela A.12 – Levantamento deflectométrico na trilha externa da faixa de rolamento, sentido centro: T= 16M

 CONDIÇÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD											
RODOVIA		TRECHO			SENTIDO			Local	RAIO DE APLICAÇÃO		
Av. Sapopemba		Centro			Decrescente			TER	15 cm		
INÍCIO		FIM			EQUIPAMENTO			Revestimento			
km 228		km 213			Falling Weight Deflectometer			CBUQ			
Estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav	
228	4.284	13,2	11,1	9,5	8,1	7,0	5,6	4,5	13	18	26/07/13
227	4.269	15,4	11,8	8,9	7,4	6,4	5,0	3,6	13	18	26/07/13
226	4.298	11,3	8,8	7,2	6,4	5,6	4,9	4,1	13	18	26/07/13
225	4.305	13,0	9,1	7,7	6,7	6,3	5,4	4,6	13	17	26/07/13
224	4.255	11,8	7,5	7,1	6,1	5,1	5,1	4,4	13	17	26/07/13
223	4.269	12,5	9,5	8,3	7,5	6,7	5,8	4,8	13	17	26/07/13
222	4.255	12,7	8,6	7,1	5,9	5,5	4,9	4,0	13	17	26/07/13
221	4.262	12,2	9,0	8,3	7,5	6,5	5,1	4,5	13	17	26/07/13
220	4.284	10,3	7,6	7,0	6,1	5,2	5,0	4,2	13	17	26/07/13
219	4.277	16,9	12,5	10,5	9,4	8,0	6,9	5,9	13	17	26/07/13
218	4.277	14,9	11,5	9,4	8,3	6,5	5,4	4,4	13	17	26/07/13
217	4.312	16,7	12,6	11,1	9,0	7,2	5,8	4,7	13	18	26/07/13
216	4.312	20,6	16,1	12,8	10,1	7,9	5,8	4,4	13	18	26/07/13
215	4.298	27,4	20,1	15,4	11,6	9,1	6,4	5,0	13	18	26/07/13
214	4.262	22,3	16,5	12,9	10,9	8,4	6,1	4,9	13	17	26/07/13
213	4.284	15,9	11,5	9,1	7,0	5,7	4,7	3,8	13	17	26/07/13

APÊNDICE A – AMOSTRAS PREPARADAS EM LABORATÓRIO E
TENSÕES ATUANTES NAS ESTRUTURAS PELO DIANA

Tabela A.1 – Controle da moldagem dos corpos de prova 15 x30 cm: realização de ensaios de RCS

Material	Ident.	Moldagem	Dados da curva de Proctor		Dados Compactação				RCS				
	Nº	Data	γ_{smax} (KN/m ³)	hot (%)	Mu CP (g)	γ_s (KN/m ³)	h (%)	GC	Idade	(MPa)	Média	DesvPad	CV(%)
RCD	1	06/mar	18,30	11,9	10.948,2	18,6	10,90	101,8	7 dias	0,42	0,42	0,01	1,7
RCD	2	06/mar	18,30	11,9	11.183,5	19,0	10,90	103,9	7 dias	0,41			
RCD + 3% cim.	1	13/mar	18,40	12,3	11.312,0	19,0	12,58	103,0	7 dias	4,89	4,65	0,21	4,6
RCD + 3% cim.	42	29/out	18,40	12,3	11.300,0	19,2	10,90	104,5	7 dias	4,55			
RCD + 3% cim.	43	29/out	18,40	12,3	11.290,0	19,1	11,70	103,6	7 dias	4,50			
RCD + 3% cal	61	22/set	18,30	12,4	11.160,0	18,5	14,00	100,9	7 dias	3,85	3,59	0,28	7,7
RCD + 3% cal	62	02/out	18,30	12,4	11.480,0	19,3	12,30	105,4	7 dias	3,61			
RCD + 3% cal	63	03/out	18,30	12,4	11.160,0	18,5	13,60	101,3	7 dias	3,30			

Tabela A.2 – Controle de moldagem dos corpos de prova Marshall para ensaios de MR em CBUQ

Amostras	H-1	H-2	H-3	H-4	Hméd. (mm)	Hméd. (cm)	D-1	D-2	D-3	Dméd. (mm)	Dméd. (cm)	μ	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
1	62,93	63,51	63,48	63,09	63,25	6,33	101,81	101,66	101,67	101,71	10,17	0,18	4.922	1,69	2912,43
2	61,84	62,22	62,27	62,37	62,18	6,22	101,63	101,63	101,69	101,65	10,17	0,13	4.069	1,59	2559,12
3	64,44	64,03	64,19	64,49	64,29	6,43	101,52	101,53	101,54	101,53	10,15	0,27	4.764	1,58	3015,19
4	65,01	65,48	65,44	64,84	65,19	6,52	101,67	101,53	101,64	101,61	10,16	0,15	4.337	1,62	2677,16
5	64,26	64,49	64,6	65,15	64,63	6,46	101,75	101,9	101,87	101,84	10,18	0,13	3.838	1,43	2683,92
6	64,35	64,39	64,67	64,57	64,50	6,45	101,62	101,57	101,49	101,56	10,16	0,26	4.628	1,48	3127,03
7	64,44	64,19	63,78	63,59	64,00	6,40	101,71	101,71	101,79	101,74	10,17	0,20	4.621	1,51	3060,26
8	64,87	64,23	64,04	62,97	64,03	6,40	101,83	101,83	101,75	101,80	10,18	0,17	4.782	Não realizado	
9	64,24	63,77	64,84	64,71	64,39	6,44	101,57	101,34	101,49	101,47	10,15	0,10	3.923	1,6	2451,88

Tabela A.3 – Controle de moldagem de corpos de prova Marshall para ensaios de estabilidade e fluência em CBUQ

Amostras	H-1	H-2	H-3	H-4	Hméd. (mm)	Hméd. (cm)	D-1	D-2	D-3	Dméd. (mm)	Dméd. (cm)	F (mm)	E (KN)	Fator de corr.	E(N)
1	66,68	66,67	66,4	66,15	66,48	6,65	101,79	101,83	101,68	101,77	10,18	4,75	12,16	0,95	11.555,69
2	63,24	62,75	62,78	63,2	62,99	6,30	101,65	101,9	101,65	101,73	10,17	3,00	11,02	1,04	11.442,95
3	60,16	60,61	61,11	60,97	60,71	6,07	101,68	101,57	101,7	101,65	10,17	2,75	9,52	1,10	10.500,54
4	61,37	61,9	61,84	61,42	61,63	6,16	101,65	101,58	101,63	101,62	10,16	3,50	9,80	1,08	10.546,50
5	63,99	64,33	64,55	64,87	64,44	6,44	101,85	101,79	101,71	101,78	10,18	4,25	12,40	1,00	12.404,41
6	65,05	64,73	64,81	65,35	64,99	6,50	101,85	101,72	101,83	101,80	10,18	3,50	10,95	0,99	10.804,82

Tabela A.4 – Controle de moldagem dos corpos de prova Marshall para ensaios de RT em condição seca e úmida em RAP espumado

Condição	Amostras	H-1	H-2	H-3	H-4	Hméd. (mm)	Hméd. (cm)	D-1	D-2	D-3	Dméd. (mm)	Dméd. (cm)	F(kg)	RT(MPa)
Úmido	1	64,31	64,84	65,33	64,86	64,84	6,48	101,82	101,63	100,38	101,28	10,13	284	0,28
	2	63,45	63,26	63,74	63,06	63,38	6,34	101,62	101,91	101,76	101,76	10,18	280	0,28
	3	64,65	64,76	65,04	64,8	64,81	6,48	101,56	101,71	101,78	101,68	10,17	291	0,28
Seco	4	62,31	62,44	62,53	63,44	62,68	6,27	101,47	101,65	101,39	101,50	10,15	305	0,31
	5	59,9	59,86	60,21	59,62	59,90	5,99	100,91	101,47	101,34	101,24	10,12	259	0,27
	6	55,7	55,56	55,95	55,79	55,75	5,58	101,69	101,92	101,8	101,80	10,18	242	0,27

Tabela A.5 – Controle da moldagem dos corpos de prova 15 x30 cm: realização de ensaios de MR

Dados Compactação	Moldagem		Dados da curva de Proctor		Dados da Compactação					
	Nº	Data	γ_{smax} (KN/m ³)	hot (%)	Mu CP (g)	γ_s (KN/m ³)	h (%)	GC (%)	Média GC	Desv. Pad.
RCD	A	14/jan	18,30	11,9	10.730,0	18,2	10,99	99,7	99,5	1,1
	B	15/jan		11,9	10.560,0	17,9	11,04	98,0		
	C	16/jan		11,9	10.880,0	18,4	11,42	100,7		
	D	17/jan		11,9	10.720,0	18,3	10,80	99,7		
RCD + 3% cim.	E	18/jan	18,40	12,3	10.570,0	18,1	10,03	98,5	99,6	1,1
	F	19/jan		12,3	10.680,0	18,2	10,63	99,0		
	G	20/jan		12,3	11.020,0	18,6	11,86	101,0		
	H	21/jan		12,3	10.890,0	18,4	11,86	99,8		
RCD + 3% cal	I	22/jan	18,30	12,4	10.800,0	18,4	10,58	100,7	100,3	0,5
	J	23/jan		12,4	10.770,0	18,2	11,49	99,6		
	K	24/jan		12,4	10.810,0	18,4	10,88	100,5		
	L	25/jan		12,4	10.790,0	18,4	10,92	100,3		

Tabela A.6 – Resumo de modelos dos ensaios de MR com os tempos de cura: 7, 14, 28 e 60 dias

Material	Ident.	Moldagem		Equação Módulo			
	Nº	Data	Idade	K1	K2	K3	R ²
RCD	A	14/jan	7 dias	1.362	0,64	-0,02	0,93
	B	15/jan	7 dias	1.372	0,62	0,05	0,97
	C	16/jan	7 dias	1.589	0,64	-0,02	0,97
	D	17/jan	7 dias	1.412	0,62	0,08	0,97
	A	11/fev	28 dias	1.414	0,64	-0,06	0,95
	B	12/fev	28 dias	1.273	0,55	0,03	0,93
	C	13/fev	28 dias	1.524	0,55	0,05	0,94
	D	14/fev	28 dias	1.424	0,60	0,01	0,97
	A	15/mar	60 dias	Não realizado			
	B	16/mar	60 dias	Não realizado			
	C	17/mar	60 dias	1.766	0,61	-0,02	0,95
	D	18/mar	60 dias	1.549	0,56	0,01	0,98
RCD + 3% cim.	CP-1	11/jun	7 dias	7.734	0,51	-0,02	0,95
	CP-2	13/jun	7 dias	5.534	0,47	-0,03	0,98
	E	15/fev	28 dias	6.251	0,37	0,08	0,96
	F	16/fev	28 dias	6.181	0,37	0,08	0,96
	G	17/fev	28 dias	7.447	0,27	-0,01	0,96
	H	18/fev	28 dias	8.818	0,40	-0,01	0,98
	E	19/mar	60 dias	Não realizado			
	F	20/mar	60 dias	5.915	0,32	0,03	0,90
	G	21/mar	60 dias	6.497	0,18	-0,01	0,89
	H	22/mar	60 dias	9.112	0,34	0,02	0,99
RCD + 3% cal	CP-1	13/jun	7 dias	5.588	0,50	-0,01	0,98
	CP-2	13/jun	7 dias	6.922	0,56	-0,03	0,96
	CP-3	13/jun	7 dias	6.329	0,52	-0,02	0,96
	I	19/fev	28 dias	12.895	0,45	0,05	0,94
	J	20/fev	28 dias	7.587	0,40	-0,01	0,96
	K	21/fev	28 dias	5.680	0,28	0,001	0,98
	L	22/fev	28 dias	6.707	0,33	-0,001	0,96
	I	23/mar	60 dias	9.144	0,30	0,01	0,97
	J	24/mar	60 dias	6.994	0,34	-0,02	0,94
	K	25/mar	60 dias	7.493	0,36	-0,02	0,99
	L	26/mar	60 dias	8.760	0,39	-0,03	0,98

Tabela A.7 – Análise DIANA: distribuições das tensões ao longo da estrutura de RCD em estudo

Camadas	RCD			
	z [m]	σ_d/σ_3	σ_d (kgf/cm ²)	σ_3 (kgf/cm ²)
CBUQ	0	0,98	19,7	20,0
	-0,02	0,86	9,8	11,4
RAP Espumado	-0,12	0,90	3,3	3,7
	-0,14	0,95	3,1	3,2
	-0,16	1,00	2,8	2,8
	-0,18	1,06	2,6	2,5
	-0,2	1,13	2,5	2,2
	-0,22	1,23	2,3	1,9
	-0,24	1,22	2,1	1,7
RCD	-0,26	1,15	1,72	1,5
	-0,28	1,01	1,3	1,3
	-0,3	1,00	1,2	1,2
	-0,32	1,01	1,1	1,1
	-0,34	1,01	1,0	1,0
	-0,36	1,02	0,94	0,9
	-0,38	1,02	0,87	0,8
	-0,4	1,03	0,8	0,8
	-0,42	1,03	0,7	0,7
	-0,44	1,04	0,7	0,7
	-0,46	1,04	0,6	0,6
	-0,48	1,05	0,6	0,6
Rachão	-0,5	1,06	0,56	0,5
	-0,52	1,06	0,5	0,5
	-0,54	1,06	0,5	0,5
	-0,56	1,07	0,5	0,4
	-0,58	1,08	0,4	0,4
	-0,6	1,09	0,4	0,4
	-0,62	1,09	0,4	0,4
	-0,64	1,11	0,4	0,3
	-0,66	1,12	0,4	0,3
	-0,68	1,13	0,3	0,3
	-0,7	1,14	0,3	0,3
	-0,72	1,16	0,3	0,3
	-0,74	1,18	0,3	0,2
-0,76	1,20	0,3	0,2	
-0,78	1,22	0,2	0,2	
-0,8	1,25	0,2	0,2	
Subleito	-0,82	1,25	0,2	0,2
	-0,84	1,25	0,2	0,2
	-0,86	1,24	0,2	0,2
	-0,88	1,24	0,2	0,2
	-0,9	1,24	0,2	0,2
	-0,92	1,23	0,2	0,2
	-0,94	1,23	0,2	0,2
	-0,96	1,23	0,2	0,2
-0,98	1,22	0,2	0,2	

Tabela A.8 – Análise DIANA: distribuições das tensões ao longo da camada de RCD em estudo

Camada	Deflexão no topo: 33,4 x10 ⁻² mm			
	RCD			
	z [m]	σ_d/σ_3	σ_d (kgf/cm ²)	σ_3 (kgf/cm ²)
RCD	-0,260	1,2	1,72	1,5
	-0,270	1,1	1,53	1,4
	-0,280	1,0	1,34	1,3
	-0,290	1,0	1,27	1,3
	-0,300	1,0	1,22	1,2
	-0,310	1,0	1,16	1,2
	-0,320	1,0	1,11	1,1
	-0,330	1,0	1,07	1,1
	-0,340	1,0	1,02	1,0
	-0,350	1,0	0,98	1,0
	-0,360	1,0	0,94	0,9
	-0,370	1,0	0,90	0,9
	-0,380	1,0	0,87	0,8
	-0,390	1,0	0,83	0,8
	-0,400	1,0	0,80	0,8
	-0,410	1,0	0,77	0,8
	-0,420	1,0	0,74	0,7
	-0,430	1,0	0,72	0,7
	-0,440	1,0	0,69	0,7
	-0,450	1,0	0,67	0,6
-0,460	1,0	0,64	0,6	
-0,470	1,0	0,62	0,6	
-0,480	1,0	0,60	0,6	
-0,490	1,1	0,58	0,5	
-0,500	1,1	0,56	0,5	

Tabela A.9 – Análise DIANA: distribuições das tensões ao longo da estrutura de RCD+3% cimento

Camadas	RCD + 3% cim.			
	z [m]	σ_d/σ_3	σ_d (kgf/cm ²)	σ_3 (kgf/cm ²)
CBUQ	0	1,08	12,8	11,9
	-0,02	0,94	10,1	10,7
RAP Espumado	-0,12	0,81	3,7	4,5
	-0,14	0,82	3,4	4,1
	-0,16	0,82	3,1	3,7
	-0,18	0,81	2,7	3,4
	-0,2	0,78	2,4	3,1
	-0,22	0,74	2,1	2,8
	-0,24	0,74	1,9	2,6
RCD + 3% cim.	-0,26	0,78	1,8	2,3
	-0,28	0,87	1,9	2,1
	-0,3	0,89	1,7	1,9
	-0,32	0,91	1,6	1,7
	-0,34	0,92	1,4	1,5
	-0,36	0,94	1,3	1,4
	-0,38	0,96	1,2	1,3
	-0,4	0,98	1,1	1,1
	-0,42	1,01	1,0	1,0
	-0,44	1,04	1,0	0,9
	-0,46	1,08	0,9	0,8
	-0,48	1,12	0,8	0,7
	-0,5	1,18	0,8	0,7
Rachão	-0,52	1,24	0,7	0,6
	-0,54	1,31	0,7	0,5
	-0,56	1,39	0,7	0,5
	-0,58	1,50	0,7	0,4
	-0,6	1,65	0,6	0,4
	-0,62	1,82	0,6	0,3
	-0,64	2,05	0,6	0,3
	-0,66	2,33	0,6	0,3
	-0,68	2,68	0,6	0,2
	-0,7	3,15	0,6	0,2
	-0,72	3,70	0,6	0,2
	-0,74	4,41	0,7	0,1
	-0,76	4,87	0,6	0,1
	-0,78	4,89	0,5	0,1
-0,8	4,93	0,4	0,1	
Subleito	-0,82	4,89	0,4	0,1
	-0,84	4,85	0,4	0,1
	-0,86	4,81	0,4	0,1
	-0,88	4,77	0,4	0,1
	-0,9	4,72	0,4	0,1
	-0,92	4,68	0,4	0,1
	-0,94	4,63	0,4	0,1
	-0,96	4,59	0,4	0,1
-0,98	4,54	0,4	0,1	

Tabela A.10 – Análise DIANA: distribuições das tensões ao longo da camada de RCD + 3% cimento

Camada	Deflexão no topo: $15,2 \times 10^{-2} \text{mm}$			
	RCD + 3% cim.			
	z [m]	σ_d/σ_3	σ_d (kgf/cm ²)	σ_3 (kgf/cm ²)
RCD + 3% cim.	-0,260	0,8	1,83	2,3
	-0,270	0,8	1,84	2,2
	-0,280	0,9	1,85	2,1
	-0,290	0,9	1,78	2,0
	-0,300	0,9	1,71	1,9
	-0,310	0,9	1,63	1,8
	-0,320	0,9	1,56	1,7
	-0,330	0,9	1,49	1,6
	-0,340	0,9	1,43	1,5
	-0,350	0,9	1,37	1,5
	-0,360	0,9	1,31	1,4
	-0,370	1,0	1,26	1,3
	-0,380	1,0	1,21	1,3
	-0,390	1,0	1,16	1,2
	-0,400	1,0	1,11	1,1
	-0,410	1,0	1,07	1,1
	-0,420	1,0	1,03	1,0
	-0,430	1,0	0,99	1,0
	-0,440	1,0	0,96	0,9
	-0,450	1,1	0,92	0,9
-0,460	1,1	0,89	0,8	
-0,470	1,1	0,86	0,8	
-0,480	1,1	0,83	0,7	
-0,490	1,2	0,80	0,7	
-0,500	1,2	0,78	0,7	

Tabela A.11 – Análise DIANA: distribuições das tensões ao longo da estrutura de RCD+3% cal

Camadas	RCD + 3% cal			
	z [m]	σ_d/σ_3	σ_d (kgf/cm ²)	σ_3 (kgf/cm ²)
CBUQ	0	1,05	13,8	13,1
	-0,02	0,94	10,0	10,7
RAP Espumado	-0,12	0,81	3,6	4,4
	-0,14	0,82	3,3	4,0
	-0,16	0,81	3,0	3,7
	-0,18	0,80	2,7	3,4
	-0,2	0,76	2,4	3,1
	-0,22	0,72	2,0	2,8
	-0,24	0,72	1,9	2,6
RCD + 3% cal	-0,26	0,76	1,80	2,36
	-0,28	0,86	1,8	2,1
	-0,3	0,88	1,7	1,9
	-0,32	0,90	1,6	1,7
	-0,34	0,91	1,4	1,6
	-0,36	0,66	0,94	1,42
	-0,38	0,68	0,87	1,27
	-0,4	0,70	0,8	1,2
	-0,42	0,72	0,7	1,0
	-0,44	0,74	0,7	0,9
	-0,46	0,76	0,6	0,8
	-0,48	0,79	0,6	0,8
	-0,5	0,84	0,56	0,67
Rachão	-0,52	0,87	0,5	0,6
	-0,54	0,90	0,5	0,6
	-0,56	0,94	0,5	0,5
	-0,58	1,00	0,4	0,4
	-0,6	1,07	0,4	0,4
	-0,62	1,14	0,4	0,3
	-0,64	1,24	0,4	0,3
	-0,66	1,35	0,4	0,3
	-0,68	1,47	0,3	0,2
	-0,7	1,64	0,3	0,2
	-0,72	1,78	0,3	0,2
	-0,74	1,98	0,3	0,1
	-0,76	2,15	0,3	0,1
	-0,78	2,28	0,2	0,1
-0,8	2,48	0,2	0,1	
Subleito	-0,82	2,47	0,2	0,1
	-0,84	2,46	0,2	0,1
	-0,86	2,45	0,2	0,1
	-0,88	2,44	0,2	0,1
	-0,9	2,43	0,2	0,1
	-0,92	2,42	0,2	0,1
	-0,94	2,41	0,2	0,1
	-0,96	2,40	0,2	0,1
-0,98	2,39	0,2	0,1	

Tabela A.12 – Análise DIANA: distribuições das tensões ao longo da camada de RCD + 3% cal

Camada	Deflexão no topo: 17,6 $\times 10^{-2}$ mm			
	Camada de RCD + 3% cal			
	z [m]	σ_d/σ_3	σ_d (kgf/cm ²)	σ_3 (kgf/cm ²)
RCD + 3% cal	-0,280	0,9	1,84	2,1
	-0,290	0,9	1,78	2,0
	-0,300	0,9	1,70	1,9
	-0,310	0,9	1,63	1,8
	-0,320	0,9	1,56	1,7
	-0,330	0,9	1,49	1,7
	-0,340	0,9	1,43	1,6
	-0,350	0,9	1,37	1,5
	-0,360	0,9	1,32	1,4
	-0,370	0,9	1,26	1,34
	-0,380	1,0	1,21	1,3
	-0,390	1,0	1,17	1,2
	-0,400	1,0	1,12	1,2
	-0,410	1,0	1,08	1,1
	-0,420	1,0	1,04	1,0
	-0,430	1,0	1,00	1,0
	-0,440	1,0	0,96	0,9
	-0,450	1,0	0,93	0,9
	-0,460	1,1	0,90	0,8
	-0,470	1,1	0,87	0,8
	-0,480	1,1	0,84	0,8
-0,490	1,1	0,81	0,7	
-0,500	1,2	0,79	0,67	

APÊNDICE B – RETROANÁLISE DAS BACIAS
DEFLECTOMÉTRICAS POR SEGMENTO HOMOGÊNEO

Retroanálise

Com os dados coletados de FWD foi realizada a normalização das deflexões eq. **(18)**, procedimento tal descrito na norma guia D 5858 (ASTM, 2008), para definição dos segmentos homogêneos.

Deflexão normalizada= deflexão atual x (carga de referência / carga atual) **(18)**

Com isso, foi possível definir para cada segmento homogêneo a sua bacia de deflexão média, com os respectivos desvios em cada ponto e coeficiente de variação.

Tabela B.1 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 1 – RCD, sentido bairro – T=4M

Material	Análise	Estaca	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS				
			Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7								
			0	20	30	45	65	90	120								
RCD	eixo	Bairro 213	33,4	19,1	14,2	11,1	7,1	5,2	3,7	33,8	5,7	17,0	0,07				
		Bairro 214	41,0	25,4	18,9	15,3	10,1	7,7	5,1				1,25				
		Bairro 215	44,6	23,7	17,0	13,0	8,7	5,7	4,2				1,89				
		Bairro 216	34,6	17,7	12,4	9,8	6,4	5,4	3,9				0,14				
		Bairro 217	35,3	17,8	13,3	10,8	7,3	6,1	4,7				0,26				
		Bairro 218	25,9	15,9	11,9	11,3	8,7	7,6	5,6				1,37				
	Trilha externa	Bairro 213	36,3	22,2	17,1	13,6	9,0	6,5	4,5				0,44				
		Bairro 214	33,2	21,9	16,8	14,2	9,7	7,9	5,2				0,10				
		Bairro 215	37,0	21,4	15,5	12,7	9,2	6,1	4,3				0,56				
		Bairro 216	30,8	17,7	12,8	10,3	6,8	5,4	3,6				0,52				
		Bairro 217	26,2	16,8	12,5	10,8	7,6	6,3	4,7				1,32				
		Bairro 218	27,1	17,7	14,1	12,6	9,3	8,1	6,0				1,16				
	Média RCD			33,8	19,8	14,7	12,1	8,3	6,5				4,6				n= 12
	Desvio Padrão			5,7	3,0	2,3	1,7	1,2	1,0				0,8				N.S= 2,5%
CV(%)			17,0	15,3	15,5	14,1	14,7	15,9	16,4				T= 2,285				

Tabela B.2 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 2 – RCD, sentido centro – T=4M

Material	Análise	Estaca	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS				
			Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7								
			0	20	30	45	65	90	120								
RCD	eixo	Centro 213	22,9	15,3	10,9	7,8	4,6	3,6	2,6	28,7	5,4	18,8	1,08				
		Centro 214	27,9	15,5	11,3	9,8	6,9	6,2	4,1				0,13				
		Centro 215	40,1	24,8	17,0	11,6	7,4	6,1	4,9				2,14				
		Centro 216	31,0	17,0	12,0	9,6	6,8	5,8	4,3				0,43				
		Centro 217	28,4	15,8	11,2	9,4	6,5	5,3	4,0				0,05				
		Centro 218	23,3	15,7	11,8	10,1	7,0	6,3	4,7				0,99				
	Trilha externa	Centro 213	27,2	14,4	10,6	8,8	5,8	5,0	3,7				0,26				
		Centro 214	30,9	17,4	12,8	10,2	7,0	6,1	4,2				0,42				
		Centro 215	35,5	22,7	16,6	12,6	7,8	6,3	4,0				1,28				
		Centro 216	29,9	17,2	12,9	10,3	7,2	5,7	4,0				0,23				
		Centro 217	24,9	14,9	11,2	9,3	6,4	5,3	4,0				0,70				
		Centro 218	21,8	14,3	10,8	9,1	6,8	5,7	4,4				1,28				
	Média RCD			28,7	17,1	12,4	9,9	6,7	5,6				4,1				n= 12
	Desvio Padrão			5,4	3,3	2,2	1,2	0,8	0,8				0,6				N.S= 2,5%
CV(%)			18,8	19,3	17,6	12,6	12,6	13,7	13,6				T= 2,285				

Tabela B.3 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 3 – RCD+3% cim., sentido bairro – T=4M

Material	Análise	Estaca	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS				
			Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7								
			0	20	30	45	65	90	120								
RCD + 3% cim.	Eixo	Bairro 219	16,7	10,2	8,3	7,9	6,1	5,7	4,1	15,8	1,8	11,5	0,54				
		Bairro 220	14,0	8,4	6,5	6,4	4,7	4,3	3,7				0,97				
		Bairro 221	17,1	11,4	9,0	8,2	6,1	5,5	4,1				0,76				
		Bairro 222	13,9	8,1	7,2	6,7	5,5	5,1	4,2				1,05				
		Bairro 223	19,2	10,6	8,3	7,3	5,7	5,1	3,8				1,90				
	Trilha externa	Bairro 219	14,9	9,8	8,1	7,5	6,0	5,0	4,0				0,46				
		Bairro 220	13,3	8,3	6,8	6,5	5,0	4,9	3,5				1,37				
		Bairro 221	16,8	11,4	9,3	8,7	6,6	6,0	4,3				0,55				
		Bairro 222	15,4	10,0	8,4	8,1	6,6	5,9	4,6				0,17				
		Bairro 223	16,2	11,9	9,3	8,6	6,5	5,7	4,9				0,25				
	Média RCD + 3%cim.			15,8	10,0	8,1	7,6	5,9	5,3				4,1				n= 10
	Desvio Padrão			1,8	1,4	1,0	0,9	0,7	0,5				0,4				N.S= 2,5%
CV(%)			11,5	13,8	12,3	11,2	11,3	10,1	9,8				T= 2,176				

Tabela B.4 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 4 – RCD+3% cim., sentido centro – T=4M

Material	Análise	Estaca	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS
			Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7				
			0	20	30	45	65	90	120				
RCD + 3% cim.	Eixo	Centro 219	23,5	13,1	10,8	10,4	8,4	7,5	5,8	18,3	2,8	15,0	1,86
		Centro 220	15,5	8,6	6,8	6,7	5,0	5,0	3,5				1,05
		Centro 221	16,1	9,1	7,8	7,7	5,7	5,5	4,1				0,83
		Centro 222	19,3	8,2	6,3	5,8	4,8	4,7	3,9				0,35
		Centro 223	19,2	9,5	7,4	7,2	5,6	5,5	3,5				0,31
	Trilha externa	Centro 219	22,1	13,0	10,7	10,1	8,0	6,9	5,3				1,38
		Centro 220	15,3	9,1	7,7	7,2	5,4	5,4	3,2				1,10
		Centro 221	16,6	9,2	7,7	7,6	6,1	5,9	4,2				0,63
		Centro 222	18,1	8,7	6,8	6,6	5,3	5,0	3,8				0,10
		Centro 223	17,8	9,1	7,4	7,1	5,5	5,2	3,3				0,20
Média RCD + 3%cim.			18,3	9,8	7,9	7,6	6,0	5,7	4,1				n= 10
Desvio Padrão			2,8	1,8	1,5	1,5	1,2	0,9	0,8				N.S= 2,5%
CV(%)			15,0	18,2	19,5	19,2	20,4	16,0	20,8				T= 2,176

Tabela B.5 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 5 – RCD+3% cal., sentido bairro – T=4M

Material	Análise	Estaca	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS
			Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7				
			0	20	30	45	65	90	120				
RCD + 3% cal	Eixo	Bairro 224	15,8	9,9	7,9	7,8	5,8	4,5	4,5	19,0	2,4	12,8	1,33
		Bairro 225	20,9	11,3	9,3	9,2	7,6	6,8	5,2				0,77
		Bairro 226	20,5	11,4	9,2	8,6	6,6	6,2	4,2				0,60
		Bairro 227	18,9	10,8	8,8	8,5	6,7	5,7	4,1				0,08
		Bairro 228											
	Trilha externa	Bairro 224	15,3	11,1	9,1	8,8	7,1	6,3	4,9				1,52
		Bairro 225	22,4	12,8	10,8	10,8	8,6	7,7	5,9				1,39
		Bairro 226	19,2	11,7	9,9	9,3	7,3	6,3	4,6				0,06
		Bairro 227	19,3	12,6	10,0	9,2	7,1	6,3	4,2				0,10
		Bairro 228											
Média RCD			19,0	11,5	9,4	9,0	7,1	6,2	4,7				n= 10
Desvio Padrão			2,4	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,6				N.S= 2,5%
CV(%)			12,8	8,2	9,3	9,6	11,7	14,6	12,8				T= 2,176

Tabela B.6 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 6 – RCD+3% cal., sentido centro – T=4M

Material	Análise	Estaca	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS
			Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7				
			0	20	30	45	65	90	120				
RCD + 3% cal	Eixo	Centro 224	20,7	8,9	7,3	7,1	5,5	5,7	4,1	20,2	1,7	8,4	0,34
		Centro 225	21,1	9,5	7,8	7,7	6,3	5,6	4,5				0,58
		Centro 226	19,1	9,3	7,7	7,5	5,7	5,5	4,1				0,60
		Centro 227	23,2	11,7	9,4	9,2	7,1	6,0	3,9				1,79
		Centro 228											
	Trilha externa	Centro 224	19,0	8,5	7,2	7,0	5,8	5,4	4,2				0,66
		Centro 225	19,8	10,3	8,4	8,3	7,1	6,3	4,7				0,19
		Centro 226	17,5	9,4	8,0	7,9	6,1	6,0	4,3				1,56
		Centro 227	20,7	12,0	9,7	9,1	7,1	6,6	3,6				0,30
		Centro 228											
Média RCD			20,2	10,0	8,2	8,0	6,3	5,9	4,2				n= 10
Desvio Padrão			1,7	1,3	0,9	0,8	0,7	0,4	0,3				N.S= 2,5%
CV(%)			8,4	13,0	11,5	10,4	10,5	6,9	8,0				T= 2,176

Tabela B.7 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 1 – RCD, sentido bairro – T=10M

Material	Análise	Estaca	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS				
			Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7								
			0	20	30	45	65	90	120								
RCD	eixo	Bairro 213	25,0	16,2	13,2	9,9	6,9	5,7	4,1	27,3	4,8	17,6	0,49				
		Bairro 214	33,3	24,2	19,1	15,0	10,8	8,4	5,0				1,25				
		Bairro 215	36,3	24,7	18,2	13,3	9,1	6,5	4,9				1,86				
		Bairro 216	28,2	18,0	13,0	9,8	7,1	5,6	4,4				0,18				
		Bairro 217	26,5	17,4	13,2	10,3	7,8	6,3	5,2				0,16				
		Bairro 218	18,3	13,9	11,8	10,1	8,7	7,7	6,3				1,88				
	Trilha externa	Bairro 213	26,1	18,8	14,9	11,5	8,6	6,6	4,4				0,25				
		Bairro 214	27,7	21,5	16,7	12,9	9,9	7,9	5,8				0,08				
		Bairro 215	30,4	21,7	16,5	12,4	8,9	6,7	4,8				0,65				
		Bairro 216	27,9	19,4	14,3	10,5	7,4	5,6	4,5				0,12				
		Bairro 217	27,0	19,9	15,1	11,8	8,7	6,8	5,7				0,07				
		Bairro 218	21,1	15,9	12,8	11,3	9,7	8,0	6,3				1,29				
	Média RCD			27,3	19,3	14,9	11,6	8,6	6,8				5,1				n= 12
	Desvio Padrão			4,8	3,3	2,3	1,6	1,2	1,0				0,7				N.S= 2,5%
CV(%)			17,6	17,1	15,4	13,8	13,8	14,1	14,4				T= 2,285				

Tabela B.8 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 2 – RCD, sentido centro – T=10M

Material	Análise	Estaca	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS
			Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7				
			0	20	30	45	65	90	120				
RCD	eixo	Centro 213	22,7	15,3	10,3	7,5	5,8	4,5	3,8	25,6	4,7	18,5	0,62
		Centro 214	32,0	16,4	12,4	9,9	7,7	5,8	5,1				1,36
		Centro 215	30,7	21,2	15,0	10,7	8,0	6,3	5,0				1,08
		Centro 216	26,6	17,7	12,0	9,2	6,9	5,3	4,7				0,22
		Centro 217	21,4	14,9	10,8	7,8	5,9	5,0	4,5				0,88
		Centro 218	20,0	14,6	11,3	9,5	8,0	6,6	5,7				1,18
	Trilha externa	Centro 213	24,1	14,7	11,5	7,9	6,4	4,8	3,9				0,31
		Centro 214	27,1	17,9	13,4	9,9	7,6	6,5	4,9				0,32
		Centro 215	33,9	22,4	15,9	11,7	8,4	6,6	5,6				1,76
		Centro 216	26,3	17,2	12,6	9,4	7,3	5,8	4,9				0,16
		Centro 217	22,6	15,0	11,6	9,3	7,3	6,1	5,1				0,62
		Centro 218	19,5	14,0	11,4	8,7	7,2	6,2	5,2				1,29
	Média RCD			25,6	16,8	12,3	9,3	7,2	5,8				4,9			n= 12
Desvio Padrão			4,7	2,7	1,7	1,2	0,8	0,7	0,6			N.S= 2,5%	
CV(%)			18,5	16,1	13,5	13,1	11,6	12,9	12,0			T= 2,285	

Tabela B.9 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 3 – RCD+3%cim., sentido bairro – T=10M

Material	Análise	Estaca	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS				
			Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7								
			0	20	30	45	65	90	120								
RCD + 3% cim.	Eixo	Bairro 219	13,8	9,8	8,8	7,8	7,2	6,1	5,1	12,4	1,5	11,9	0,95				
		Bairro 220	10,3	7,0	6,3	5,2	5,0	4,2	4,2				1,38				
		Bairro 221	11,7	8,8	7,3	6,7	5,8	5,2	4,1				0,47				
		Bairro 222	10,0	7,1	6,3	5,8	5,2	4,6	4,5				1,61				
		Bairro 223	12,4	8,2	6,9	6,1	5,3	4,6	3,9				0,05				
	Trilha externa	Bairro 219	13,2	9,5	7,9	7,0	6,3	5,3	4,4				0,54				
		Bairro 220	12,1	8,5	7,3	6,6	5,8	4,8	4,8				0,17				
		Bairro 221	12,7	10,1	8,7	7,5	6,5	5,7	4,6				0,19				
		Bairro 222	12,6	9,7	8,4	7,6	6,7	6,0	4,8				0,16				
		Bairro 223	14,9	10,5	8,9	7,4	6,2	5,5	4,1				1,73				
	Média RCD + 3%cim.			12,4	8,9	7,7	6,8	6,0	5,2				4,4				n= 10
	Desvio Padrão			1,5	1,2	1,0	0,9	0,7	0,6				0,4				N.S= 2,5%
CV(%)			11,9	13,8	13,2	12,7	11,8	12,0	8,3				T= 2,176				

Tabela B.10 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 4 – RCD+3%cim., sentido centro – T=10M

Material	Análise	Estaca	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS
			Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7				
			0	20	30	45	65	90	120				
RCD + 3% cim.	Eixo	Centro 219	18,5	12,3	9,8	9,0	8,0	7,6	6,1	13,0	3,1	24,0	1,77
		Centro 220	10,5	6,8	6,2	5,0	4,7	4,2	3,6				0,80
		Centro 221	11,8	7,5	6,1	5,5	5,5	4,7	4,1				0,37
		Centro 222	12,3	7,0	5,6	4,6	4,3	4,2	3,5				0,23
		Centro 223	10,5	6,4	5,1	4,5	4,4	4,2	3,6				0,80
	Trilha externa	Centro 219	19,0	12,4	10,3	9,3	8,1	7,0	5,8				1,92
		Centro 220	12,2	7,6	6,2	5,5	5,1	4,9	4,2				0,26
		Centro 221	12,6	8,6	6,9	5,8	5,7	5,0	4,5				0,13
		Centro 222	11,3	7,5	6,0	5,4	4,9	4,4	3,9				0,55
		Centro 223	11,3	7,1	5,4	5,3	4,7	4,2	3,8				0,55
Média RCD + 3%cim.			13,0	8,3	6,8	6,0	5,5	5,0	4,3				n= 10
Desvio Padrão			3,1	2,2	1,8	1,7	1,4	1,2	0,9				N.S= 2,5%
CV(%)			24,0	26,5	26,6	28,5	25,0	24,3	21,4				T= 2,176

Tabela B.11 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 5 – RCD+3%cal., sentido bairro – T=10M

Material	Análise	Estaca	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS
			Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7				
			0	20	30	45	65	90	120				
RCD + 3% cal	Eixo	Bairro 224	13,0	9,3	7,3	7,1	6,1	5,3	5,0	15,9	1,6	10,3	1,76
		Bairro 225	15,8	9,9	8,1	7,4	6,6	5,9	5,0				0,09
		Bairro 226	15,1	9,7	8,4	7,6	6,7	5,7	4,8				0,50
		Bairro 227	15,4	11,0	9,2	8,0	6,9	5,8	4,6				0,33
		Bairro 228											
	Trilha externa	Bairro 224	16,2	12,4	10,7	8,8	7,9	7,0	5,8				0,17
		Bairro 225	18,8	12,9	10,7	9,7	8,8	7,9	6,4				1,78
		Bairro 226	16,8	12,3	10,4	9,2	7,8	6,6	4,1				0,53
		Bairro 227	16,2	11,4	9,6	8,3	6,7	5,8	4,8				0,21
		Bairro 228											
Média RCD			15,9	11,1	9,3	8,2	7,2	6,3	5,1				n= 10
Desvio Padrão			1,6	1,4	1,3	0,9	0,9	0,9	0,7				N.S= 2,5%
CV(%)			10,3	12,2	13,8	11,1	12,3	13,6	14,2				T= 2,176

Tabela B.12 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 6 – RCD+3%cal., sentido centro – T=10M

Material	Análise	Estaca	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS
			Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7				
			0	20	30	45	65	90	120				
RCD + 3% cal	Eixo	Centro 224	13,8	8,6	7,6	6,4	6,0	5,2	4,5	15,3	1,8	12,0	0,82
		Centro 225	12,8	7,9	6,8	6,1	5,7	4,9	4,3				1,36
		Centro 226	14,8	8,5	6,8	6,7	6,1	5,4	4,7				0,26
		Centro 227	17,9	12,4	9,5	7,9	6,9	5,9	4,7				1,45
		Centro 228											
	Trilha externa	Centro 224	15,5	9,3	7,6	6,5	5,9	5,3	4,6				0,10
		Centro 225	15,2	9,8	8,0	7,1	6,3	5,4	4,6				0,02
		Centro 226	14,3	9,3	8,0	6,9	6,6	5,5	5,0				0,52
		Centro 227	17,9	11,3	10,4	7,3	6,6	6,0	4,8				1,42
		Centro 228											
Média RCD			15,3	9,6	8,1	6,8	6,3	5,4	4,6				n= 10
Desvio Padrão			1,8	1,5	1,3	0,6	0,4	0,3	0,2				N.S= 2,5%
CV(%)			12,0	15,7	15,6	8,1	6,3	6,4	4,3				T= 2,176

Tabela B.13 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 1 – RCD sentido bairro – T=16M

Material	Análise	Estaca	Força (kgf)	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS				
				Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7								
				0	20	30	45	65	90	120								
RCD	eixo	Bairro 213	4.284	17,6	13,7	10,8	8,4	6,8	4,9	3,8	19,8	2,7	13,7	0,79				
		Bairro 214	4.277	25,2	20,6	16,4	12,5	9,8	6,8	5,0				2,00				
		Bairro 215	4.305	21,0	15,9	12,7	9,7	7,8	5,4	4,0				0,45				
		Bairro 216	4.326	19,8	14,1	10,7	8,3	6,4	4,8	3,7				0,02				
		Bairro 217	4.298	20,8	15,9	12,1	9,2	7,5	5,7	4,6				0,39				
		Bairro 218	4.291	15,1	12,3	10,4	9,0	7,9	6,9	5,7				1,72				
	Trilha externa	Bairro 213	4.375	19,5	16,1	12,6	9,9	7,8	5,5	3,9				0,10				
		Bairro 214	4.354	20,7	17,5	14,3	11,2	9,0	6,5	4,9				0,33				
		Bairro 215	4.368	21,1	16,6	13,5	10,2	8,2	5,9	4,4				0,48				
		Bairro 216	4.340	21,1	16,3	12,6	9,6	7,3	5,0	4,0				0,50				
		Bairro 217	4.326	19,7	15,9	12,3	9,6	7,4	5,8	4,7				0,02				
		Bairro 218	4.333	15,5	13,3	11,4	10,0	9,0	7,4	6,1				1,56				
	Média RCD				19,8	15,7	12,5	9,8	7,9	5,9				4,6				n= 12
	Desvio Padrão				2,7	2,2	1,7	1,2	1,0	0,8				0,8				N.S= 2,5%
CV(%)				13,7	14,0	13,5	11,8	12,2	14,5	16,8				T= 2,285				

Tabela B.14 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 2 – RCD sentido centro – T=16M

Material	Análise	Estaca	Força (kgf)	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS			
				Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7							
				0	20	30	45	65	90	120							
RCD	eixo	Centro 213	4.262	16,3	11,8	9,0	6,7	5,1	3,9	3,2	18,5	4,0	21,8	0,54			
		Centro 214	4.234	17,7	13,9	10,9	8,7	6,7	5,4	4,4				0,19			
		Centro 215	4.319	24,1	18,8	14,8	10,8	8,3	5,8	4,3				1,38			
		Centro 216	4.277	17,7	14,2	11,1	8,3	6,3	4,9	4,0				0,20			
		Centro 217	4.305	15,3	11,7	9,1	7,7	5,7	4,6	4,1				0,79			
		Centro 218	4.241	14,2	10,7	8,7	7,6	7,0	5,3	4,7				1,07			
	Trilha externa	Centro 213	4.284	15,8	11,4	9,1	7,0	5,7	4,7	3,8				0,66			
		Centro 214	4.262	22,3	16,5	12,9	10,9	8,4	6,1	4,9				0,95			
		Centro 215	4.298	26,9	19,8	15,1	11,4	8,9	6,3	4,9				2,09			
		Centro 216	4.312	20,2	15,8	12,5	9,9	7,7	5,7	4,3				0,42			
		Centro 217	4.312	16,4	12,3	10,9	8,8	7,1	5,7	4,6				0,52			
		Centro 218	4.277	14,9	11,5	9,4	8,3	6,5	5,4	4,4				0,90			
	Média RCD				18,5	14,0	11,1	8,8	7,0	5,3				4,3			n= 12
	Desvio Padrão				4,0	3,1	2,3	1,6	1,2	0,7				0,5			N.S= 2,5%
CV(%)				21,8	21,8	20,3	17,7	17,3	12,8	11,3			T= 2,285				

Tabela B.15 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 3 – RCD+3% cim., sentido bairro – T=16M

Material	Análise	Estaca	Força (kgf)	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS			
				Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7							
				0	20	30	45	65	90	120							
RCD + 3% cim.	Eixo	Bairro 219	4.269	10,3	8,3	7,2	6,5	5,5	4,7	3,9	10,5	0,9	8,8	0,27			
		Bairro 220	4.255	9,3	7,4	6,1	5,3	4,7	4,1	3,4				1,31			
		Bairro 221	4.241	10,1	8,8	7,5	6,7	5,9	4,9	4,1				0,52			
		Bairro 222	4.262	9,0	7,6	6,4	5,7	5,1	4,6	3,7				1,65			
		Bairro 223	4.298	10,9	8,8	7,1	6,0	5,2	4,5	3,8				0,40			
	Trilha externa	Bairro 219	4.340	10,9	9,2	7,7	6,7	6,0	4,9	4,0				0,39			
		Bairro 220	4.284	10,8	9,0	7,3	6,3	5,8	5,0	4,1				0,23			
		Bairro 221	4.305	11,7	10,0	8,8	7,7	6,7	5,4	4,6				1,23			
		Bairro 222	4.340	10,5	8,8	7,8	7,0	6,5	5,5	4,5				0,03			
		Bairro 223	4.383	12,0	9,7	8,1	6,8	5,9	5,0	4,3				1,53			
	Média RCD + 3%cim.				10,5	8,8	7,4	6,5	5,7	4,9				4,0			n= 10
	Desvio Padrão				0,9	0,8	0,8	0,7	0,6	0,4				0,4			N.S= 2,5%
	CV(%)				8,8	9,4	10,5	10,7	11,0	8,7				8,9			T= 2,176

Tabela B.16 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 4 – RCD+3% cim., sentido centro – T=16M

Material	Análise	Estaca	Força (kgf)	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS
				Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7				
				0	20	30	45	65	90	120				
RCD + 3% cim.	Eixo	Centro 219	4.234	13,9	10,9	9,3	8,2	7,0	6,0	5,0	12,1	2,3	18,7	0,82
		Centro 220	4.298	8,9	6,6	5,5	5,1	4,6	4,1	3,6				1,38
		Centro 221	4.284	10,3	8,2	6,1	5,4	4,9	4,5	3,8				0,80
		Centro 222	4.269	10,5	7,0	5,5	5,2	4,5	3,8	3,4				0,69
		Centro 223	4.312	12,5	8,8	7,1	6,3	5,5	4,7	4,2				0,18
	Trilha externa	Centro 219	4.277	16,9	12,5	10,5	9,4	8,0	6,9	5,9				2,12
		Centro 220	4.284	10,3	7,6	7,0	6,1	5,2	5,0	4,2				0,80
		Centro 221	4.262	12,2	9,0	8,3	7,5	6,5	5,1	4,5				0,07
		Centro 222	4.255	12,7	8,6	7,1	5,9	5,5	4,9	4,0				0,30
		Centro 223	4.269	12,5	9,5	8,3	7,5	6,7	5,8	4,8				0,19
Média RCD + 3%cim.				12,1	8,9	7,5	6,6	5,8	5,1	4,3			n= 10	
Desvio Padrão				2,3	1,8	1,6	1,4	1,2	0,9	0,7			N.S= 2,5%	
CV(%)				18,7	19,9	21,9	21,5	19,9	18,4	17,3			T= 2,176	

Tabela B.17 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 5 – RCD+3% cal, sentido bairro – T=16M

Material	Análise	Estaca	Força (kgf)	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS				
				Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7								
				0	20	30	45	65	90	120								
RCD + 3% cal	Eixo	Bairro 224	4.255	10,7	8,9	7,3	6,6	5,8	5,0	4,2	14,1	4,3	30,7	0,79				
		Bairro 225	4.248	10,9	8,4	7,3	6,6	6,1	5,5	4,5				0,74				
		Bairro 226	4.227	10,9	8,5	7,1	6,1	5,4	4,5	3,6				0,75				
		Bairro 227	4.234	11,4	9,4	7,9	6,5	6,0	4,8	4,1				0,64				
		Bairro 228	4.277	19,4	16,8	14,0	11,4	9,3	7,0	5,4				1,22				
	Trilha externa	Bairro 224	4.326	10,6	9,1	8,1	7,1	6,5	5,5	4,7				0,81				
		Bairro 225	4.319	17,5	12,0	10,9	9,8	9,0	7,0	5,5				0,77				
		Bairro 226	4.241	12,7	10,5	9,2	8,1	7,2	5,8	4,8				0,32				
		Bairro 227	4.248	14,4	11,8	9,9	8,4	7,1	5,8	4,6				0,05				
		Bairro 228	4.291	22,9	19,5	16,0	12,9	10,3	7,4	5,6				2,01				
	Média RCD				14,1	11,5	9,8	8,4	7,3	5,8				4,7				n= 10
	Desvio Padrão				4,3	3,8	3,0	2,3	1,7	1,0				0,6				N.S= 2,5%
	CV(%)				30,7	32,9	31,2	27,6	23,1	16,8				13,7				T= 2,176

Tabela B.18 – Definição da bacia média do seg. homogêneo 6 – RCD+3% cal, sentido centro – T=16M

Material	Análise	Estaca	Força (kgf)	DEFLEXÃO NORMALIZADA(0,01mm)							Média Do	Desv. Pad	CV (%)	GRUBBS
				Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7				
				0	20	30	45	65	90	120				
RCD + 3% cal	Eixo	Centro 224	4.255	11,4	7,2	6,4	6,2	4,6	4,5	3,9	12,1	1,6	12,9	0,45
		Centro 225	4.248	11,2	8,7	7,2	5,9	5,5	4,9	4,0				0,57
		Centro 226	4.255	9,7	7,7	6,4	5,8	5,1	4,5	3,9				1,54
		Centro 227	4.312											7,75
		Centro 228	4.284	12,7	10,5	9,2	8,0	6,7	5,4	4,3				0,38
	Trilha externa	Centro 224	4.255	11,8	7,5	7,1	6,1	5,1	5,1	4,4				0,19
		Centro 225	4.305	12,9	9,0	7,6	6,6	6,2	5,3	4,6				0,48
		Centro 226	4.298	11,1	8,6	7,1	6,3	5,5	4,8	4,0				0,65
		Centro 227	4.269	15,2	11,7	8,8	7,3	6,3	4,9	3,6				1,99
		Centro 228	4.284	13,0	10,9	9,4	8,0	6,9	5,5	4,4				0,57
Média RCD				12,1	9,1	7,7	6,7	5,8	5,0	4,1				n= 10
Desvio Padrão				1,6	1,6	1,1	0,9	0,8	0,4	0,3				N.S= 2,5%
CV(%)				12,9	17,5	14,9	12,9	13,8	7,5	7,9				T= 2,176

Para todos os seis segmentos homogêneos propostos para retroanálise foram realizadas interações nas bacias médias e calculados seus respectivos erros absolutos e raízes médias quadráticas.

Bacias médias e seus respectivos RMSE – T=4M

Tabela B.19 – Bacia média do seg. homogêneo 1 – RCD, sentido bairro – T=4M

Distâncias (cm)		d ₀	d ₂₀	d ₃₀	d ₄₅	d ₆₀	d ₉₀	d ₁₂₀	RMSE (%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões (x10 ⁻² mm)	Média	33,8	19,8	14,7	12,1	8,3	6,5	4,6	11,5
	σ	5,7	3,0	2,3	1,7	1,2	1,0	0,8	
	Bakfaa	33,0	20,6	15,2	11,1	8,7	6,1	4,6	
	Erro (%)	2,3	4,3	3,3	8,8	4,6	6,7	0,6	11,4
	Elsym5	33,0	20,6	15,2	11,1	8,7	6,1	4,6	
	Erro (%)	2,4	4,2	3,3	8,4	4,6	6,7	0,6	

Tabela B.20 – Bacia média do seg. homogêneo 2 – RCD, sentido centro – T=4M

Distâncias (cm)		d ₀	d ₂₀	d ₃₀	d ₄₅	d ₆₀	d ₉₀	d ₁₂₀	RMSE (%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões (x10 ⁻² mm)	Média	28,7	17,1	12,4	9,9	6,7	5,6	4,1	9,7
	σ	5,4	3,3	2,2	1,2	0,8	0,8	0,6	
	Bakfaa	28,5	17,1	12,5	9,3	7,6	5,5	4,2	
	Erro (%)	0,4	0,3	0,3	5,9	13,4	2,1	3,5	9,8
	Elsym5	28,5	17,1	12,5	9,3	7,6	5,5	4,2	
	Erro (%)	0,5	0,1	0,5	5,9	13,2	2,1	3,5	

Tabela B.21 – Bacia média do seg. homogêneo 3 – RCD+3%cim., sentido bairro. – T=4M

Distâncias (cm)		d ₀	d ₂₀	d ₃₀	d ₄₅	d ₆₀	d ₉₀	d ₁₂₀	RMSE (%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões (x10 ⁻² mm)	Média	15,8	10,0	8,1	7,6	5,9	5,3	4,1	8,0
	σ	1,8	1,4	1,0	0,9	0,7	0,5	0,4	
	Bakfaa	15,8	10,1	8,2	7,1	6,4	5,1	4,2	
	Erro (%)	0,0	0,4	1,3	6,2	8,1	3,9	1,3	8,0
	Elsym5	15,7	10,0	8,2	7,1	6,4	5,1	4,2	
	Erro (%)	0,4	0,2	1,2	6,2	8,1	3,9	1,3	

Tabela B.22 – Bacia média do seg. homogêneo 4 – RCD+3%cim., sentido centro. – T=4M

Distâncias (cm)		d_0	d_{20}	d_{30}	d_{45}	d_{60}	d_{90}	d_{120}	RMSE (%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões ($\times 10^{-2}$ mm)	Média	18,3	9,8	7,9	7,6	6,0	5,7	4,1	16,6
	σ	2,8	1,8	1,5	1,5	1,2	0,9	0,8	
	Bakfaa	18,3	10,8	8,3	7,0	6,2	4,9	3,9	
	Erro (%)	0,0	10,0	4,1	8,7	3,6	13,7	3,8	16,5
	Elsym5	18,3	10,7	8,3	7,0	6,2	4,9	3,9	
	Erro (%)	0,2	9,5	4,0	8,7	3,6	13,7	3,8	

Tabela B.23 – Bacia média do seg. homogêneo 4 – RCD+3%cal., sentido bairro. – T=4M

Distâncias (cm)		d_0	d_{20}	d_{30}	d_{45}	d_{60}	d_{90}	d_{120}	RMSE (%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões ($\times 10^{-2}$ mm)	Média	19,0	11,5	9,4	9,0	7,1	6,2	4,7	10,3
	σ	2,4	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,6	
	Bakfaa	18,8	11,9	9,6	8,3	7,4	6,0	4,8	
	Erro (%)	1,1	4,0	2,7	8,0	4,8	4,1	2,5	9,9
	Elsym5	18,8	11,8	9,6	8,3	7,4	6,0	4,8	
	Erro (%)	1,3	3,0	2,6	7,9	4,8	4,1	2,5	

Tabela B.24 – Bacia média do seg. homogêneo 6 – RCD+3%cal., sentido centro. – T=4M

Distâncias (cm)		d_0	d_{20}	d_{30}	d_{45}	d_{60}	d_{90}	d_{120}	RMSE (%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões ($\times 10^{-2}$ mm)	Média	20,2	10,0	8,2	8,0	6,3	5,9	4,2	18,2
	σ	1,7	1,3	0,9	0,8	0,7	0,4	0,3	
	Bakfaa	19,9	11,5	8,7	7,3	6,6	5,3	4,3	
	Erro (%)	1,0	15,8	6,8	8,0	3,8	10,6	2,1	18,1
	Elsym5	19,9	11,5	8,7	7,3	6,6	5,3	4,3	
	Erro (%)	1,2	15,5	6,7	8,0	3,8	10,6	2,1	

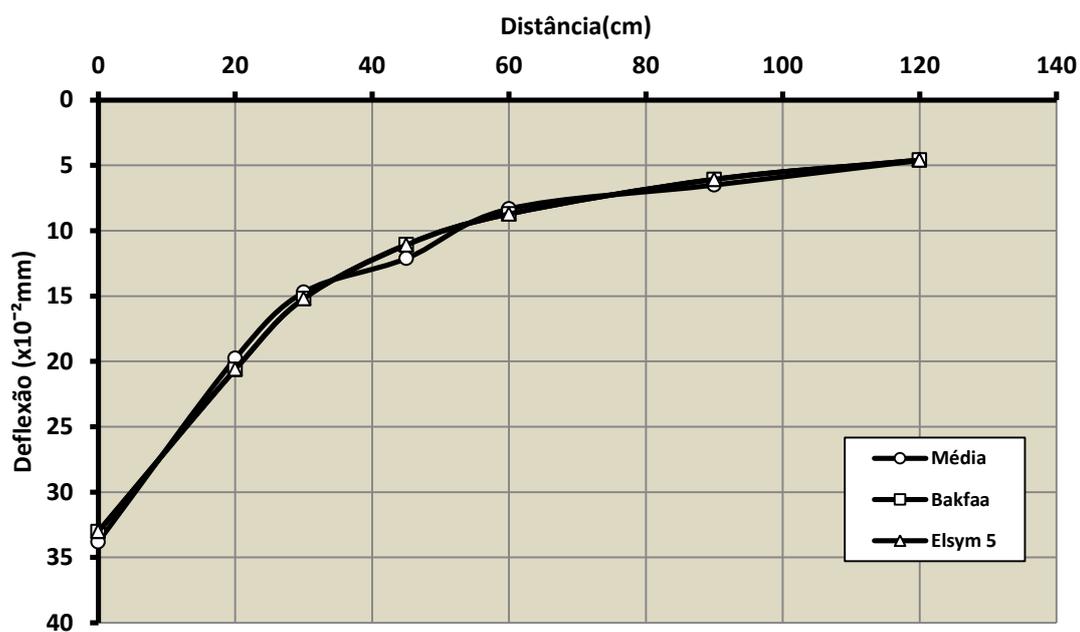


Figura B.1 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 1 – T=4M

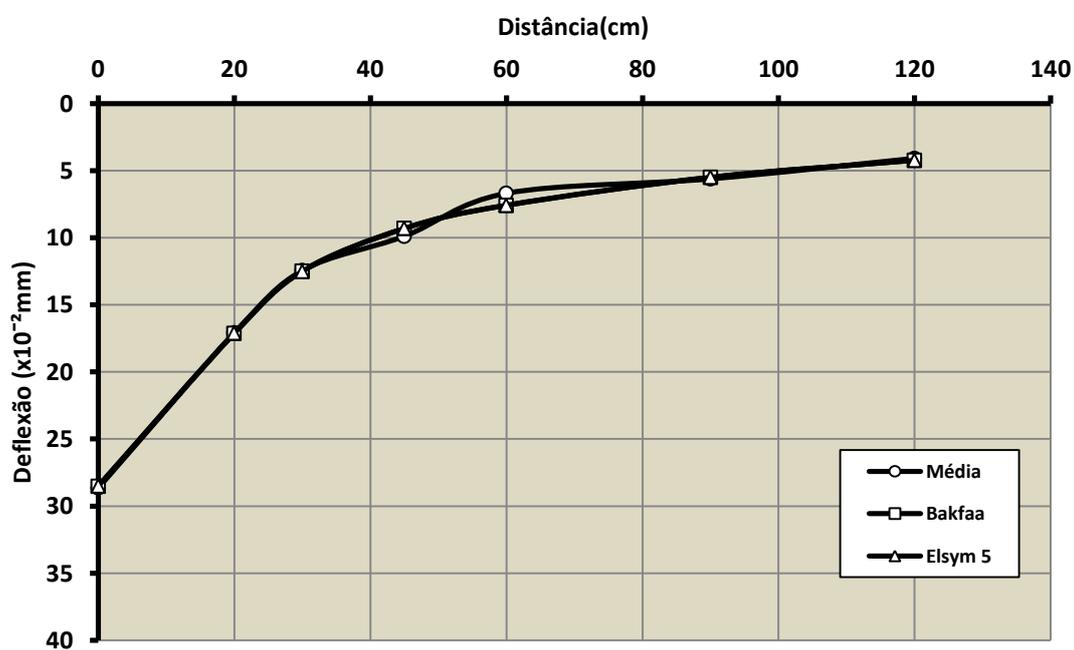


Figura B.2 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 2 – T=4M

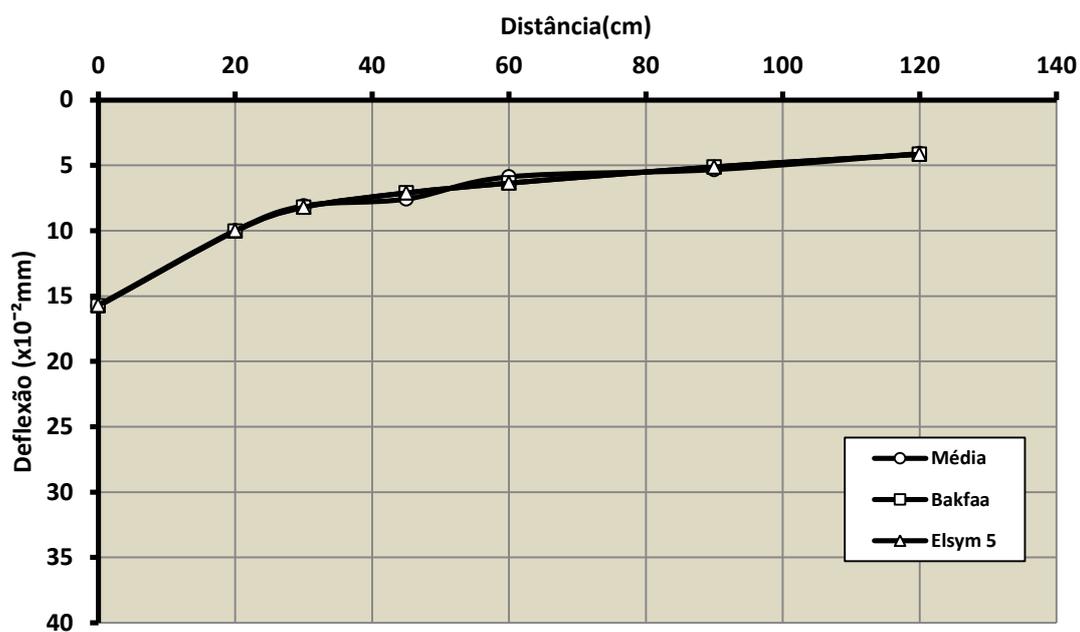


Figura B.3 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 3 – T=4M

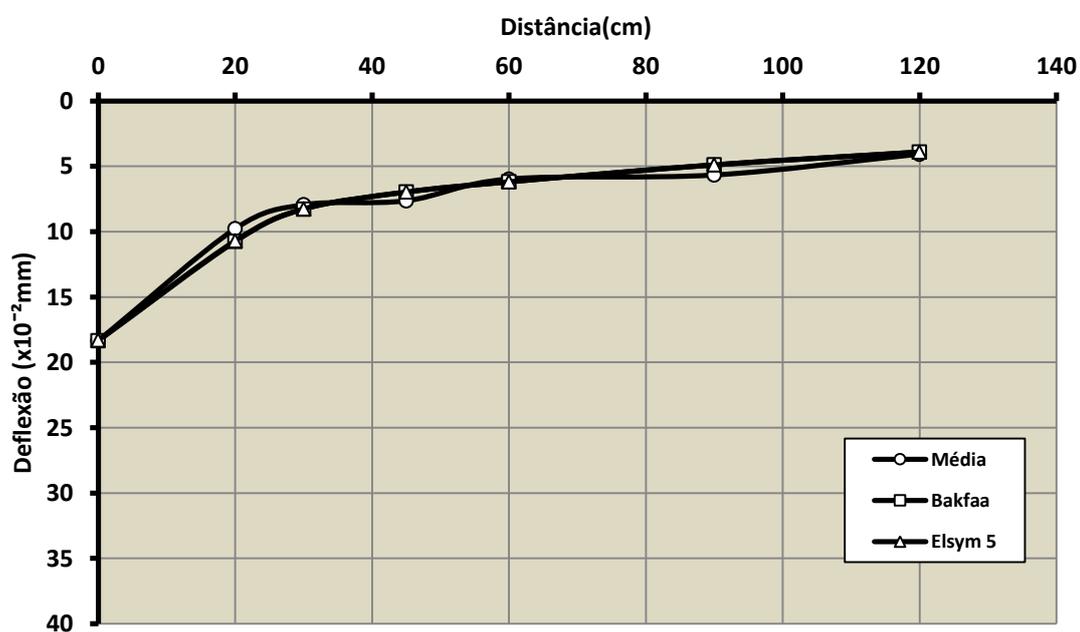


Figura B.4 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 4 – T=4M

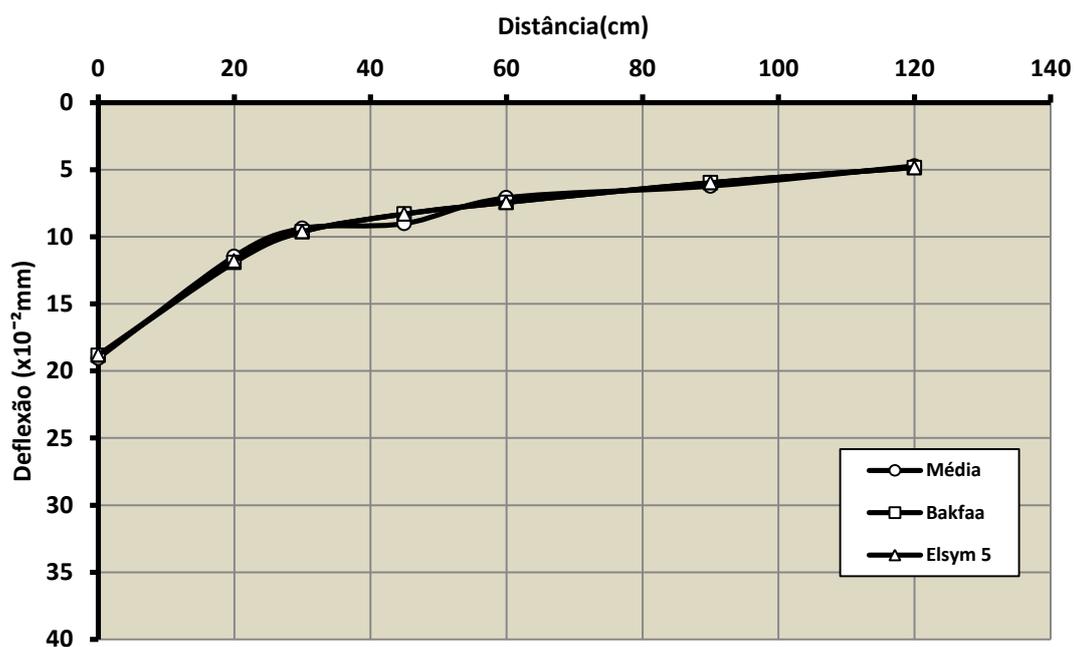


Figura B.5 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 5 – T=4M

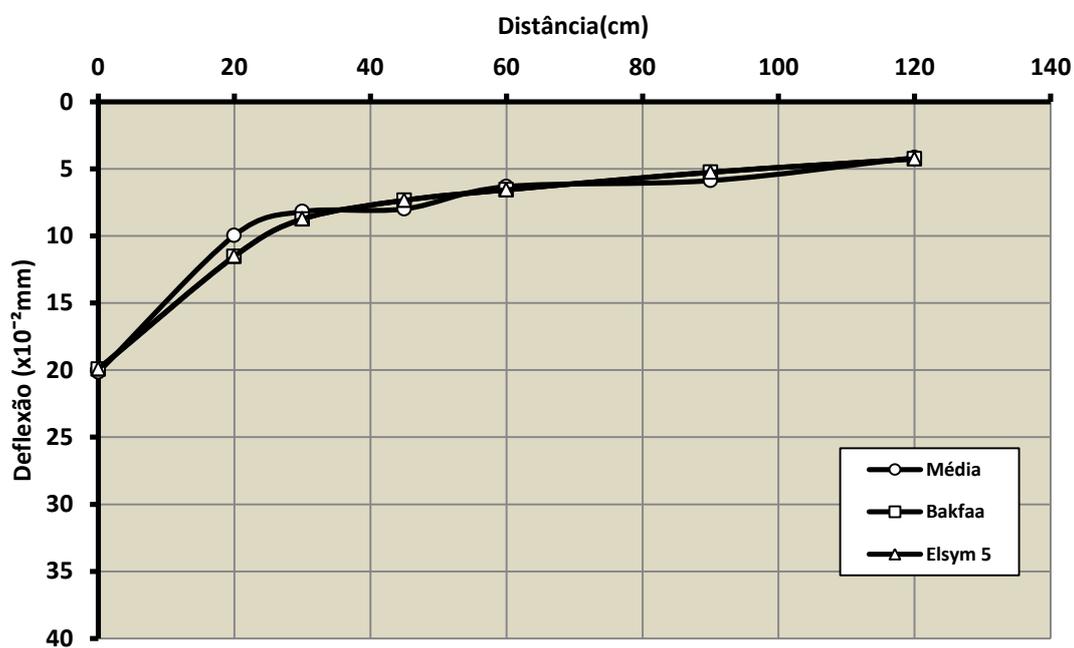


Figura B.6 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 6 – T=4M

Bacias médias e seus respectivos RMSE – T=10M

Tabela B.25 – Bacia média do seg. homogêneo 1 – RCD, sentido bairro. – T=10M

Distâncias (cm)		d ₀	d ₂₀	d ₃₀	d ₄₅	d ₆₀	d ₉₀	d ₁₂₀	RMSE (%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões (x10 ⁻² mm)	Média	27,3	19,3	14,9	11,6	8,6	6,8	5,1	7,9
	σ	4,8	3,3	2,3	1,6	1,2	1,0	0,7	
	Bakfaa	27,3	18,5	14,6	11,4	9,3	6,6	5,0	
	Erro (%)	0,2	4,4	1,7	1,5	7,5	3,1	2,5	8,2
	Elsym5	27,2	18,4	14,6	11,4	9,3	6,6	5,0	
	Erro (%)	0,4	4,6	1,9	1,5	7,5	3,1	2,5	

Tabela B.26 – Bacia média do seg. homogêneo 2 – RCD, sentido centro. – T=10M

Distâncias (cm)		d ₀	d ₂₀	d ₃₀	d ₄₅	d ₆₀	d ₉₀	d ₁₂₀	RMSE (%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões (x10 ⁻² mm)	Média	25,6	16,8	12,3	9,3	7,2	5,8	4,9	9,8
	σ	4,7	2,7	1,7	1,2	0,8	0,7	0,6	
	Bakfaa	25,8	16,3	12,4	9,5	7,8	5,7	4,4	
	Erro (%)	0,8	3,0	0,2	2,0	8,0	2,1	9,8	10,0
	Elsym5	25,8	16,2	12,4	9,5	7,8	5,7	4,4	
	Erro (%)	0,8	3,3	0,4	2,0	8,0	2,1	9,8	

Tabela B.27 – Bacia média do seg. homogêneo 3 – RCD+3%cim., sentido bairro. – T=10M

Distâncias (cm)		d ₀	d ₂₀	d ₃₀	d ₄₅	d ₆₀	d ₉₀	d ₁₂₀	RMSE (%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões (x10 ⁻² mm)	Média	12,4	8,9	7,7	6,8	6,0	5,2	4,4	4,2
	σ	1,5	1,2	1,0	0,9	0,7	0,6	0,4	
	Bakfaa	12,4	8,8	7,7	6,8	6,2	5,2	4,3	
	Erro (%)	0,6	1,5	0,2	0,9	3,2	1,1	3,5	4,7
	Elsym5	12,5	8,7	7,6	6,8	6,2	5,2	4,3	
	Erro (%)	1,1	2,2	0,5	0,9	3,2	1,1	3,5	

Tabela B.28 – Bacia média do seg. homogêneo 4 – RCD+3%cim., sentido centro. – T=10M

Distâncias (cm)		d ₀	d ₂₀	d ₃₀	d ₄₅	d ₆₀	d ₉₀	d ₁₂₀	RMSE (%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões (x10 ⁻² mm)	Média	13,0	8,3	6,8	6,0	5,5	5,0	4,3	14,9
	σ	3,1	2,2	1,8	1,7	1,4	1,2	0,9	
	Bakfaa	12,7	8,6	7,4	6,6	6,0	4,9	4,1	
	Erro (%)	2,4	3,5	9,0	9,3	7,3	2,7	5,3	14,4
	Elsym5	12,7	8,5	7,4	6,6	6,0	4,9	4,1	
	Erro (%)	2,2	2,7	8,7	9,3	7,3	2,7	5,3	

Tabela B.29 – Bacia média do seg. homogêneo 5 – RCD+3%cal, sentido bairro. – T=10M

Distâncias (cm)		d ₀	d ₂₀	d ₃₀	d ₄₅	d ₆₀	d ₉₀	d ₁₂₀	RMSE (%)	
		0	20	30	45	60	90	120		
Deflexões (x10 ⁻² mm)	Média	15,9	11,1	9,3	8,2	7,2	6,3	5,1	3,0	
	σ	1,6	1,4	1,3	0,9	0,9	0,9	0,7		
	Bakfaa	15,9	10,9	9,3	8,2	7,5	6,1	5,1		
		Erro (%)	0,2	1,7	0,0	0,2	3,8	1,9	0,2	3,5
		Elsym5	15,9	10,8	9,3	8,2	7,5	6,1	5,1	
		Erro (%)	0,1	2,8	0,3	0,2	3,8	1,9	0,2	

Tabela B.30 – Bacia média do seg. homogêneo 6 – RCD+3%cal, sentido centro. – T=10M

Distâncias (cm)		d ₀	d ₂₀	d ₃₀	d ₄₅	d ₆₀	d ₉₀	d ₁₂₀	RMSE (%)	
		0	20	30	45	60	90	120		
Deflexões (x10 ⁻² mm)	Média	15,3	9,6	8,1	6,8	6,3	5,4	4,6	8,9	
	σ	1,8	1,5	1,3	0,6	0,4	0,3	0,2		
	Bakfaa	15,2	10,0	8,3	7,2	6,5	5,3	4,4		
		Erro (%)	0,3	3,5	2,3	5,6	4,3	2,0	5,7	8,7
		Elsym5	15,2	9,9	8,3	7,2	6,5	5,3	4,4	
		Erro (%)	0,5	2,7	2,2	5,6	4,3	2,0	5,7	

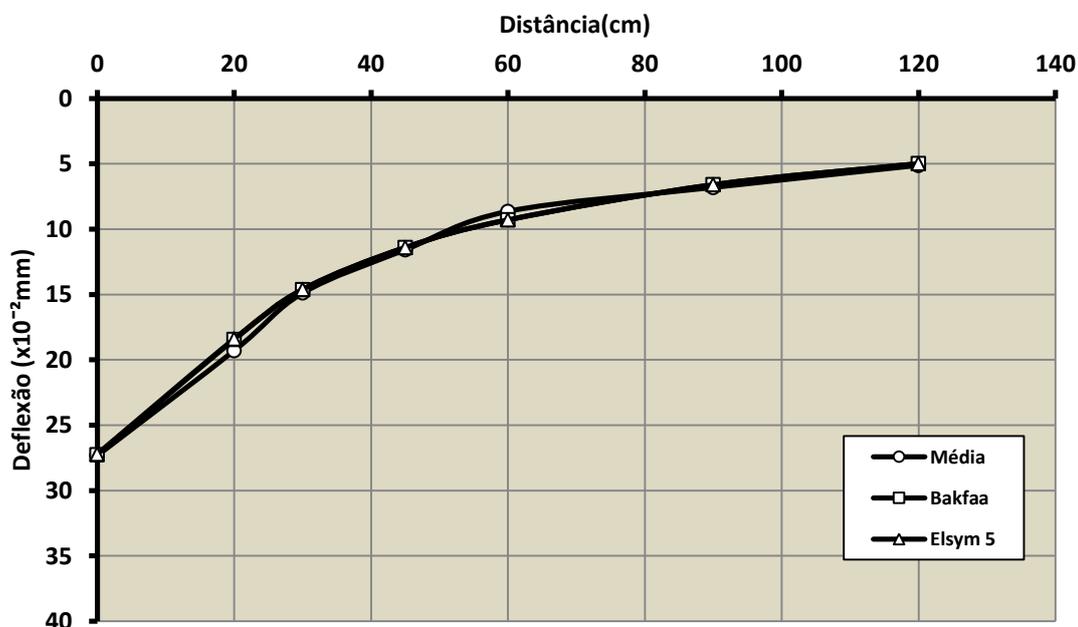


Figura B.7 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 1 – T=10M

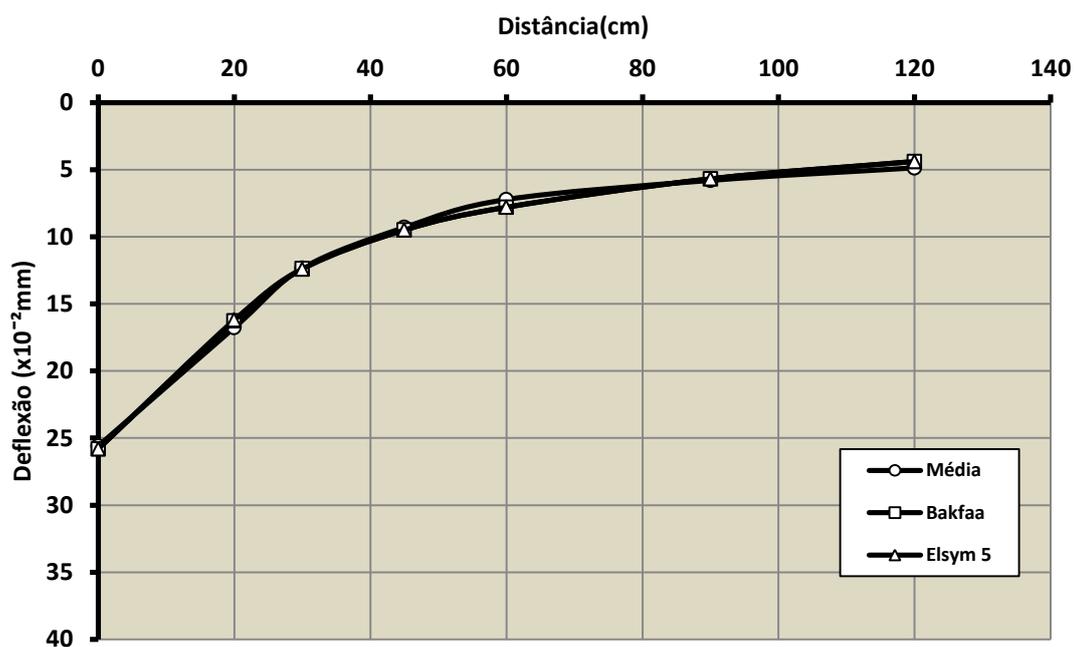


Figura B.8 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 2 – T=10M

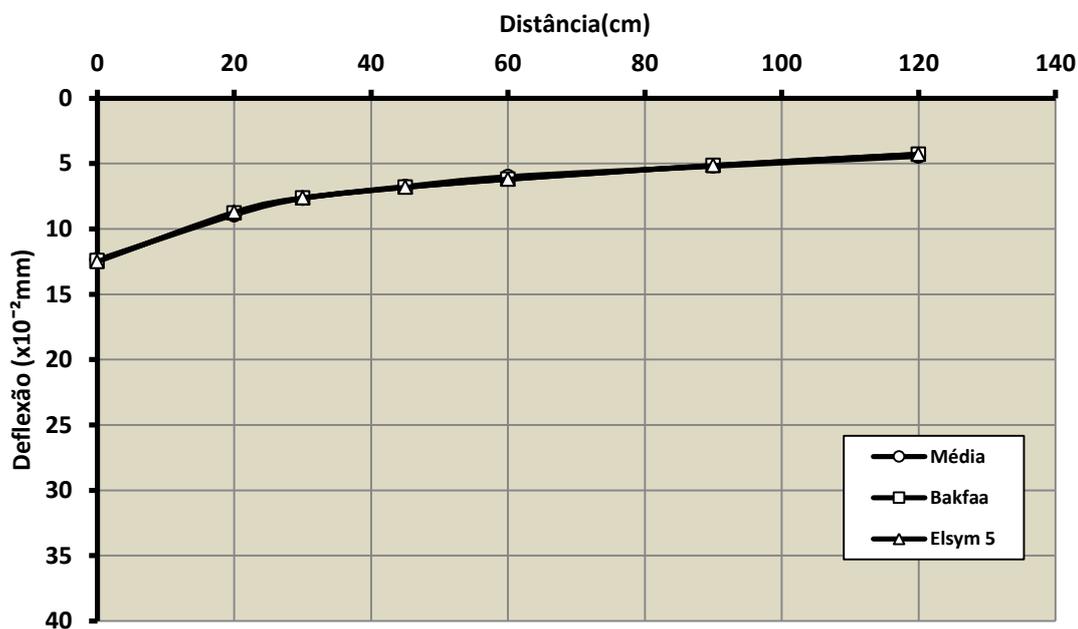


Figura B.9 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 3 – T=10M

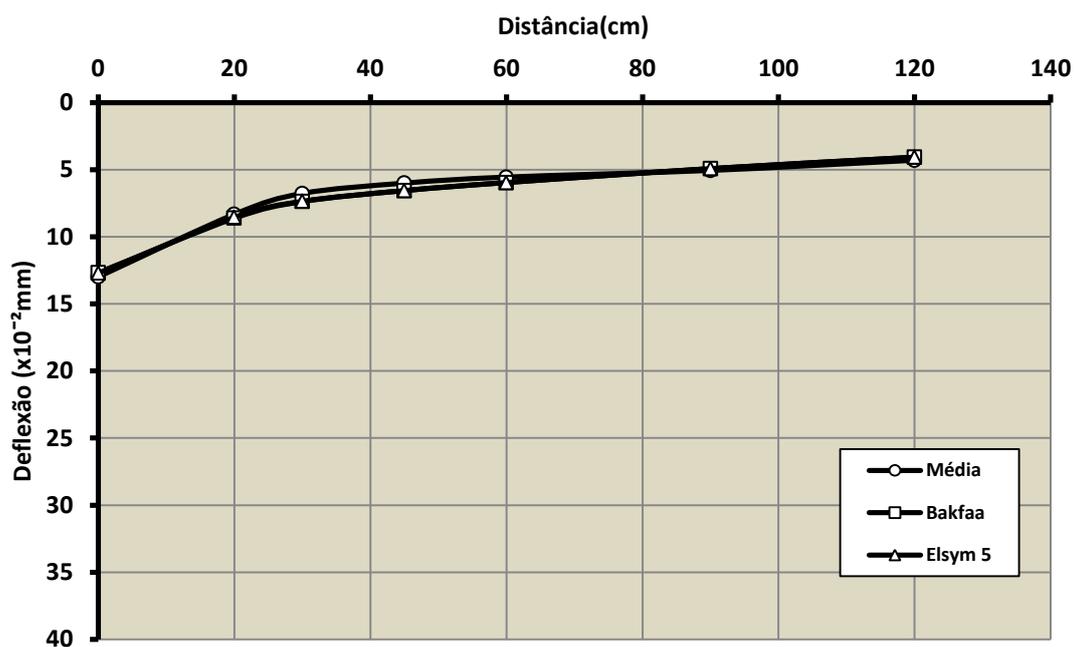


Figura B.10 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 4 – T=10M

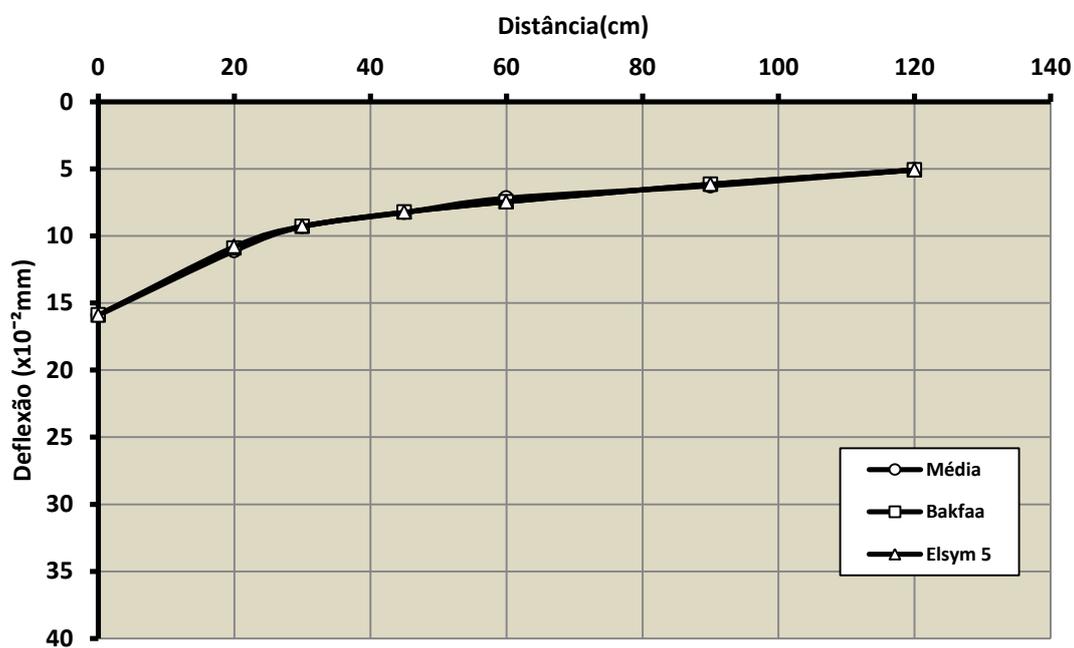


Figura B.11 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 5 – T=10M

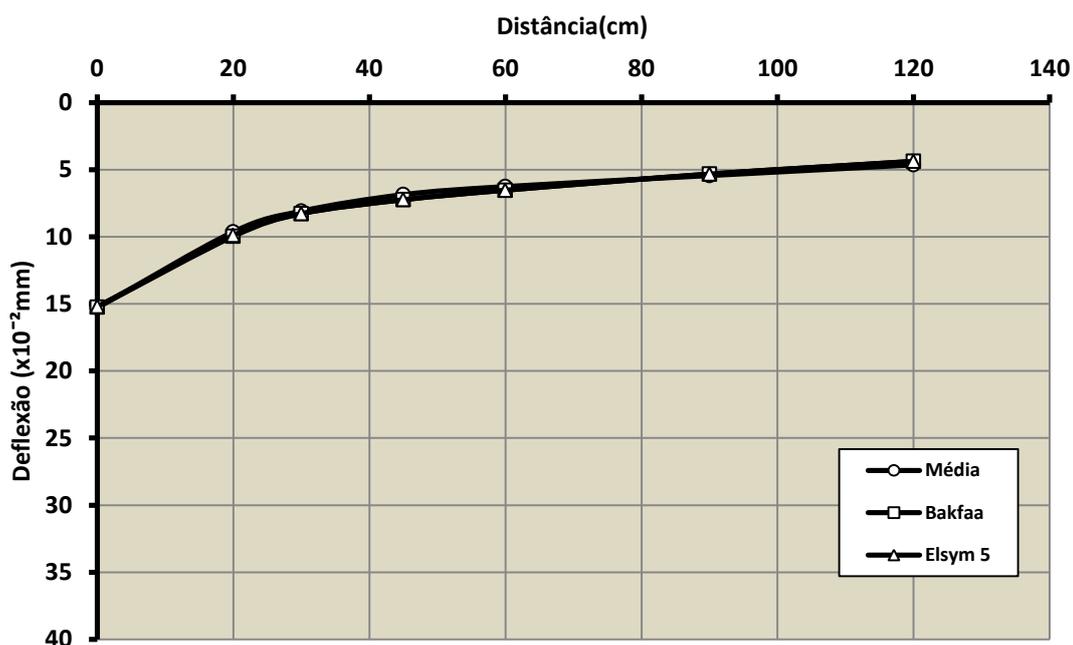


Figura B.12 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 6 – T=10M

Bacias médias e seus respectivos RMSE – T=16M

Tabela B.31 – Bacia média do seg. homogêneo 1 – RCD, sentido bairro. – T=16M

Distâncias (cm)		d ₀	d ₂₀	d ₃₀	d ₄₅	d ₆₀	d ₉₀	d ₁₂₀	RMSE (%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões (x10 ⁻² mm)	Média	19,8	15,7	12,5	9,8	7,9	5,9	4,6	7,0
	σ	2,7	2,2	1,7	1,2	1,0	0,8	0,8	
	Bakfaa	19,8	14,7	12,4	10,1	8,4	6,0	4,5	
	Erro (%)	0,3	6,3	0,6	2,8	5,7	2,2	0,5	7,0
	Elsym 5	19,8	14,7	12,4	10,1	8,4	6,0	4,5	
	Erro (%)	0,3	6,3	0,6	2,8	5,7	2,2	0,5	

Tabela B.32 – Bacia média do seg. homogêneo 2 – RCD, sentido centro. – T=16M

Distâncias (cm)		d ₀	d ₂₀	d ₃₀	d ₄₅	d ₆₀	d ₉₀	d ₁₂₀	RMSE (%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões (x10 ⁻² mm)	Média	18,5	14,0	11,1	8,8	7,0	5,3	4,3	10,5
	σ	4,0	3,1	2,3	1,6	1,2	0,7	0,5	
	Bakfaa	18,7	13,4	11,1	9,0	7,6	5,7	4,5	
	Erro (%)	1,3	4,7	0,3	2,2	9,2	6,8	3,2	11,1
	Elsym 5	18,8	13,3	11,1	9,1	7,6	5,7	4,5	
	Erro (%)	1,8	5,2	0,2	2,5	9,5	7,0	3,2	

Tabela B.33 – Bacia média do seg. homogêneo 3 – RCD+3%cim., sentido bairro. – T=16M

Distâncias (cm)		d ₀	d ₂₀	d ₃₀	d ₄₅	d ₆₀	d ₉₀	d ₁₂₀	RMSE (%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões (x10 ⁻² mm)	Média	10,5	8,8	7,4	6,5	5,7	4,9	4,0	8,4
	σ	0,9	0,8	0,8	0,7	0,6	0,4	0,4	
	Bakfaa	11,3	8,1	7,2	6,5	5,9	4,9	4,1	
	Erro (%)	7,4	7,4	3,1	0,2	2,6	0,8	0,8	8,4
	Elsym 5	11,3	8,1	7,2	6,5	5,9	4,9	4,1	
	Erro (%)	7,2	7,4	3,1	0,2	2,6	0,8	0,8	

Tabela B.34 – Bacia média do seg. homogêneo 4 – RCD+3%cim., sentido centro. – T=16M

Distâncias (cm)		d ₀	d ₂₀	d ₃₀	d ₄₅	d ₆₀	d ₉₀	d ₁₂₀	RMSE (%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões (x10 ⁻² mm)	Média	12,1	8,9	7,5	6,6	5,8	5,1	4,3	6,9
	σ	2,3	1,8	1,6	1,4	1,2	0,9	0,7	
	Bakfaa	12,3	8,5	7,4	6,6	6,0	4,9	4,1	
	Erro (%)	2,1	3,6	0,9	0,8	2,6	2,7	5,6	7,3
	Elsym 5	12,3	8,5	7,4	6,6	6,0	4,9	4,1	
	Erro (%)	2,0	4,4	1,0	0,8	2,6	2,7	5,6	

Tabela B.35 – Bacia média do seg. homogêneo 5 – RCD+3%cal, sentido bairro. – T=16M

Distâncias (cm)		d ₀	d ₂₀	d ₃₀	d ₄₅	d ₆₀	d ₉₀	d ₁₂₀	RMSE (%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões (x10 ⁻² mm)	Média	14,1	11,5	9,8	8,4	7,3	5,8	4,7	9,8
	σ	4,3	3,8	3,0	2,3	1,7	1,0	0,6	
	Bakfaa	14,6	10,6	9,3	8,2	7,4	6,0	4,9	
	Erro (%)	3,1	7,6	5,1	2,1	1,1	2,7	4,1	10,2
	Elsym 5	14,6	10,5	9,3	8,2	7,4	6,0	4,9	
	Erro (%)	3,2	8,6	5,2	2,1	1,1	2,7	4,1	

Tabela B.36 – Bacia média do seg. homogêneo 6 – RCD+3%cal, sentido bairro. – T=16M

Distâncias (cm)		d ₀	d ₂₀	d ₃₀	d ₄₅	d ₆₀	d ₉₀	d ₁₂₀	RMSE (%)
		0	20	30	45	60	90	120	
Deflexões (x10 ⁻² mm)	Média	12,1	9,1	7,7	6,7	5,8	5,0	4,1	5,1
	σ	1,6	1,6	1,1	0,9	0,8	0,4	0,3	
	Bakfaa	12,2	8,7	7,6	6,8	6,1	5,0	4,1	
	Erro (%)	0,5	4,3	0,8	1,3	6,1	0,3	0,1	5,5
	Elsym 5	12,2	8,7	7,6	6,8	6,1	5,0	4,1	
	Erro (%)	0,6	5,1	0,9	1,3	6,1	0,3	0,1	

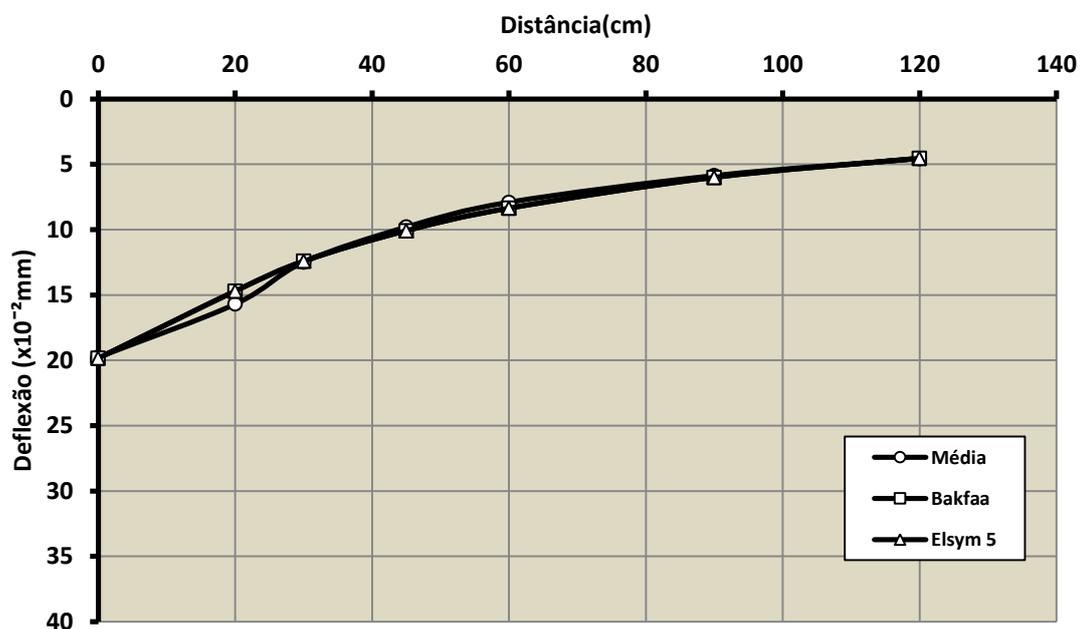


Figura B.13 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 1 – T=16M

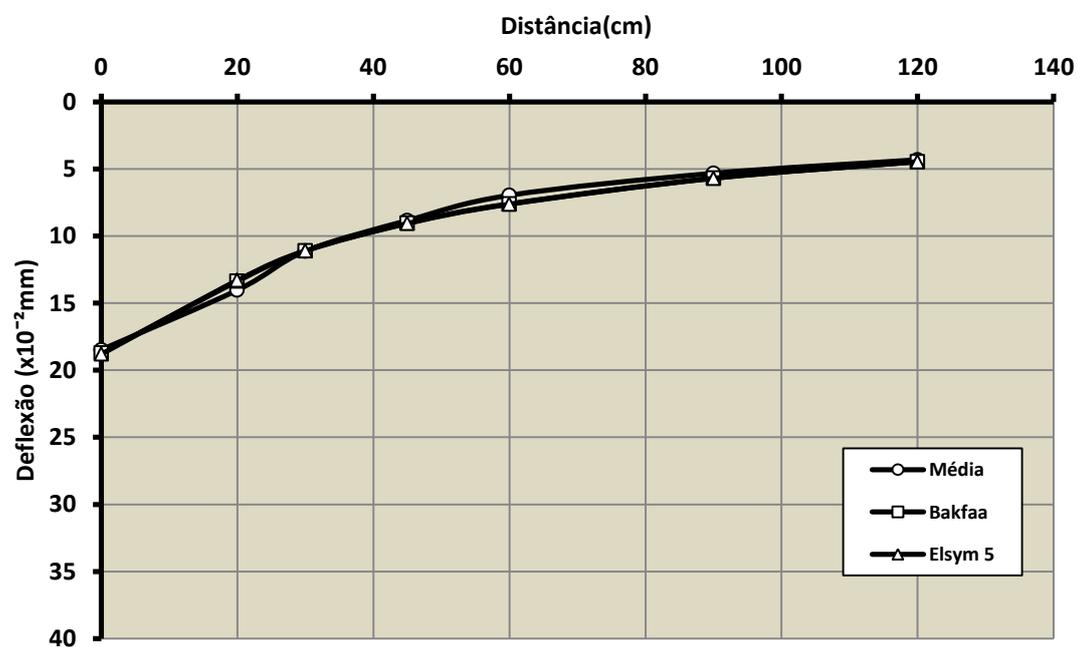


Figura B.14 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 2 – T=16M

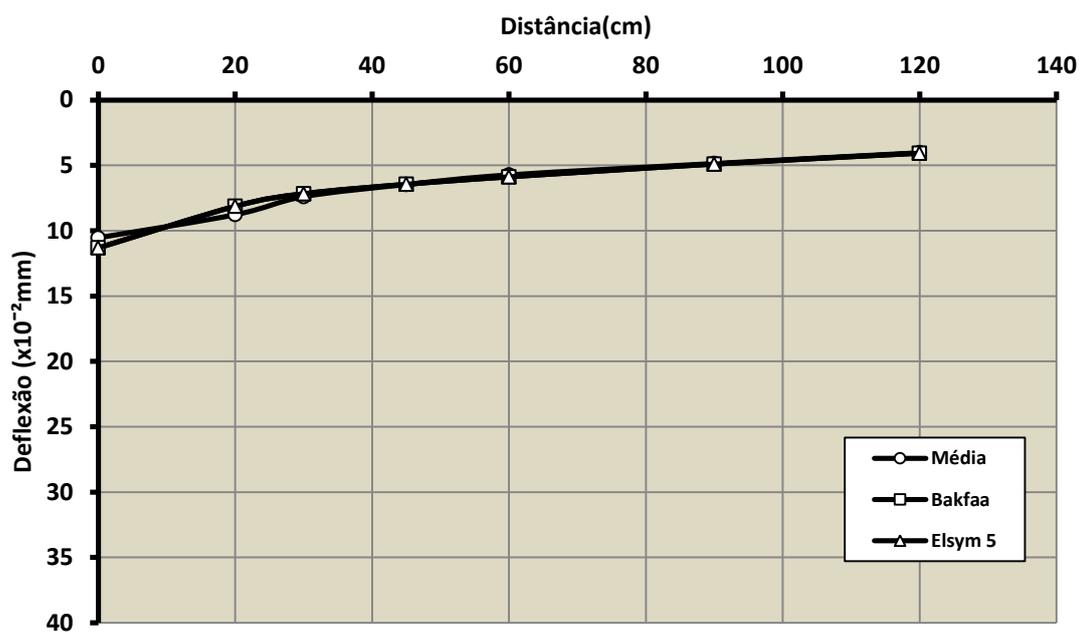


Figura B.15 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 3 – T=16M

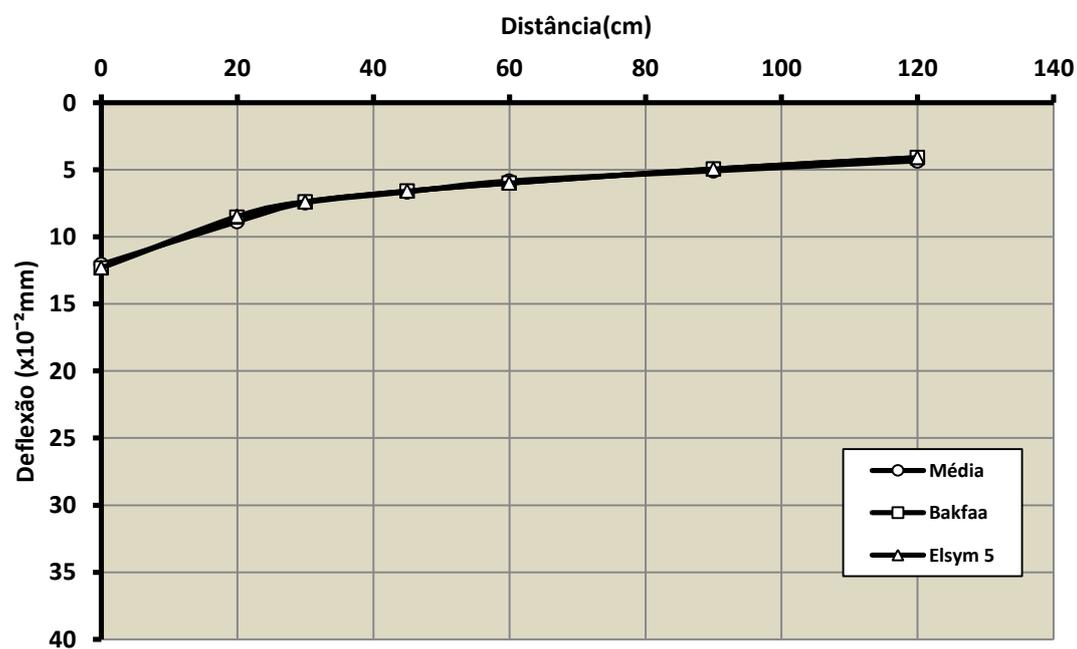


Figura B.16 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 4 – T=16M

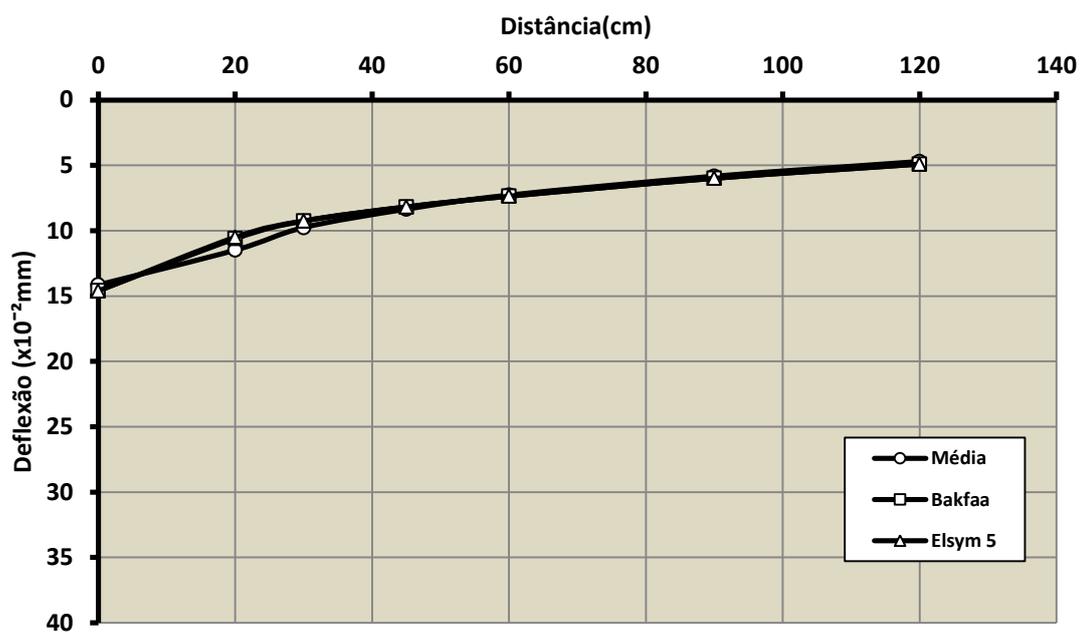


Figura B.17 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 5 – T=16M

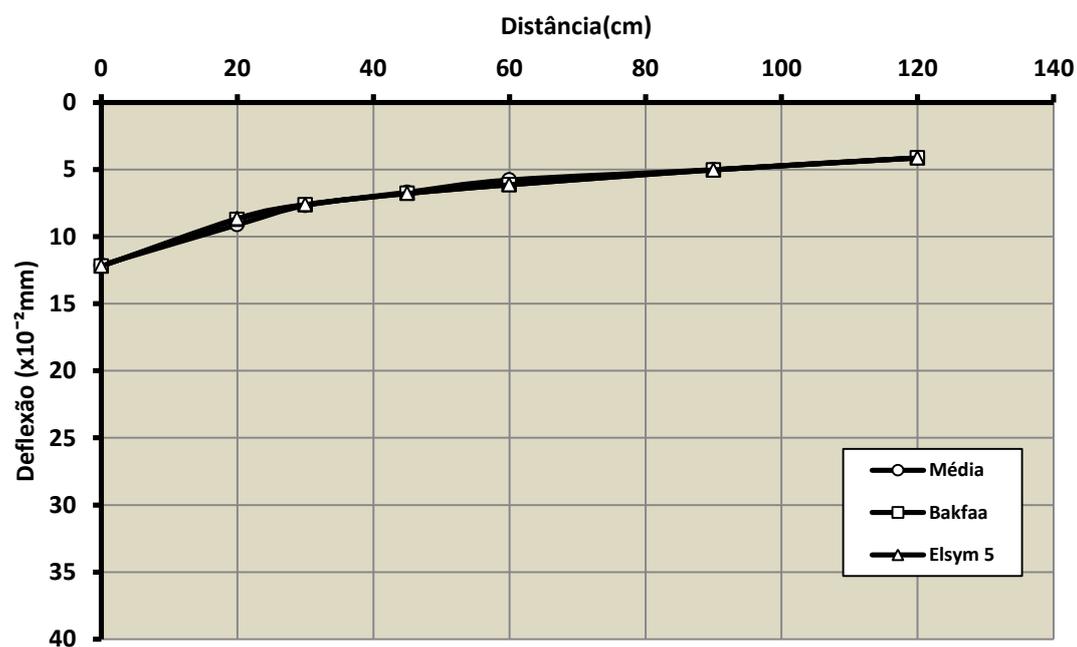


Figura B.18 – Bacia média delineada de campo e retroanalizada – seg. homogêneo 6 – T=16M