LUCAS RODRIGUES DE ANDRADE

COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS COM CAMADAS DE BASE GRANULAR, TRATADA COM
CIMENTO E COM ESTABILIZANTES ASFÁLTICOS PARA TRÁFEGO
MUITO PESADO

SÃO PAULO

2017

LUCAS RODRIGUES DE ANDRADE

COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS COM CAMADAS DE BASE GRANULAR, TRATADA COM
CIMENTO E COM ESTABILIZANTES ASFÁLTICOS PARA TRÁFEGO
MUITO PESADO

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

SÃO PAULO

2017

LUCAS RODRIGUES DE ANDRADE

COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS COM CAMADAS DE BASE GRANULAR, TRATADA COM
CIMENTO E COM ESTABILIZANTES ASFÁLTICOS PARA RODOVIAS DE
TRÁFEGO MUITO PESADO

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

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador: Prof^a. Titular
Liedi Legi Bariani Bernucci

SÃO PAULO

2017

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

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Andrade, Lucas Rodrigues de

Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado / L. R. Andrade -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

178 p.

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

1 Pavimentação 2 Pavimentação [Reciclagem] 3 Asfalto 4 Cimento

*A minha Mãe Edilcy e ao meu Pai
Reginaldo por todo amor, apoio e saudade.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me abençoado com saúde, proteção, sabedoria e conforto para conseguir desenvolver este trabalho.

Gostaria de agradecer em especial à minha orientadora Professora Liedi por todas as orientações profissionais e pessoais, por ter confiado no meu trabalho e sempre ter me incentivado a encarar novos desafios.

Agradeço a minha Mãe, Edilcy, por ter me trazido a vida e por ter me dado o melhor Pai, Reginaldo, que juntos me educaram e nunca mediram esforços para me incentivar nessa trajetória, sempre me apoiando nas minhas decisões.

À minha irmã, Letícia, que me inspira desde o seu nascimento e que com seu carinho me fez seguir em frente nos momentos difíceis.

Agradeço à professora Kamilla por me acompanhar no dia-a-dia dessa pesquisa, sendo a melhor coordenadora de projeto, e me ensinando mais que coisas que apenas pavimentos.

Agradeço ao André Kazuo, que teoricamente foi meu aluno de Iniciação Científica, mas que se tornou um verdadeiro Amigo, com todo apoio, discussões e ajudas em inúmeros momentos.

Ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentação em nome de toda a equipe, professoras Liedi, Kamilla e Rosângela, a secretária Diomaria e aos técnicos Edson, Erasmo, Robson e Vanderlei.

Agradeço à Universidade de São Paulo e à Escola Politécnica pela oportunidade de realizar o mestrado e passar por momentos de grande aprendizagem. Aos professores Suzuki, Liedtke, Kamilla, e Balbo por todo conhecimento repassado nas disciplinas.

Gostaria de agradecer a todos os amigos que fiz no LTP/USP, por terem compartilhados bons momentos de aprendizagem e descontração (em ordem alfabética para não cometer injustiças) André, Antônio, Bruno, Caio, Camargo, Claudio, Daniel, Deise, Domenico, Eric, Fernando, Frank, Fred, Igor, Ingrid, Iuri, Jean, Jennifer, Kazuo, Letícia, Luciana, Manuela, Marcia, Matheus, Paulo, Sara, Santi, Sergio, Talita, Tiago e Zila, e a todos que conheci em São Paulo.

À família Andrade e aos meus amigos de Goiânia, em nome da minha afilhada Ana e vó Maria, pelo apoio que mesmo a distância me deram força para continuar minha jornada.

À ARTERIS pela construção do trecho experimental que proporcionou a realização deste trabalho. Aos colaboradores do CDT que acompanharam a obra e os ensaios realizados periodicamente.

Ao CNPQ e à CAPES pela ajuda financeira que contribuiu substancialmente no período de realização desta pesquisa.

À Petrobras que financiou o acompanhamento da obra, os ensaios e os monitoramentos realizados nesta pesquisa.

À empresa Dynatest que realizou os ensaios que contribuíram para os resultados apresentados neste trabalho.

É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.

Theodore Roosevelt (1989)

RESUMO

A engenharia rodoviária emprega pistas-teste para avaliação de materiais, do dimensionamento estrutural e de métodos executivos de pavimentos, de modo a submeter a estrutura de pavimentos a condições reais de clima e de tráfego. Há no mundo numerosos programas de monitoramento de pistas-teste que vêm contribuindo significativamente para o avanço da tecnologia dos pavimentos. Neste contexto, o presente trabalho se propõe a avaliar o desempenho de quatro segmentos asfálticos sequenciais de um trecho experimental executado na Rodovia Fernão Dias (BR-381), que liga as cidades de São Paulo a Belo Horizonte, sob concessão pela empresa ARTERIS, sujeita a tráfego muito pesado. As estruturas de pavimentos construídas para este estudo são: pavimento flexível executado com base de Brita Graduada Simples (BGS), pavimento semirrígido executado com base de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), pavimento com base asfáltica constituída de material fresado (RAP) estabilizado com emulsão asfáltica e pavimento com base asfáltica constituída de material fresado (RAP) estabilizado com espuma de asfalto. A avaliação do desempenho foi realizada a partir de análises dos resultados de monitoramentos funcionais e estruturais realizados em campo periodicamente até a idade de 15 meses. Em laboratório, realizou-se a caracterização dos materiais empregados na construção utilizando o módulo de resiliência como parâmetro para avaliar a rigidez dos mesmos. A partir de análises funcionais, procedeu-se à avaliação da progressão de defeitos, dentre eles a irregularidade longitudinal, afundamentos em trilha de roda e características de superfície. Como foco principal, foram analisados o comportamento mecânico de cada segmento. As bacias de deslocamentos foram avaliadas por meio de indicadores estruturais e utilizadas para realização de retroanálises com o objetivo de estudar a variação destes indicadores e dos módulos das camadas, a depender do volume de tráfego acumulado e condições climáticas. Estes dados foram também empregados para relacionar as estruturas com os defeitos de superfície, além de alimentar um modelo computacional em elementos finitos que descreve o comportamento mecânico dessas estruturas. Os resultados obtidos nos monitoramentos periódicos e nas análises realizadas mostraram que o pavimento flexível não é adequado ao tráfego muito

pesado e a partir dos 12 meses não atendia os limites da ANTT para rodovias sob concessão federal, enquanto o pavimento semirrígido mostrou-se adequado e estável ao longo do período estudado e os pavimentos reciclados apresentaram um ganho nos parâmetros estudados, devido ao processo de cura dos materiais utilizados, além de comportamento adequado ao tráfego submetido.

Palavras-Chave: Pavimentação, Pavimentação [Reciclagem], Asfalto, Cimento, Rodovias.

ABSTRACT

The highway engineering adopts road tests to evaluate pavement materials, structural design methods and pavement construction characteristics, with the goal of subjecting the pavement structure to real climate and traffic conditions. There are several road test monitoring programs worldwide, which significantly contribute to pavement technology development. The present study evaluates the performance of four pavement sections within a road test located in Rodovia Fernão Dias (BR-381), that connects São Paulo and Belo Horizonte cities under concession of Arteris, and is subjected to heavy traffic. The pavement structures built can be described as follows: flexible pavement with crushed stone base layer, semirigid pavement with cement-treated crushed stone base layer, pavement with base layer of RAP stabilized with emulsion asphalt and pavement with base layer of RAP stabilized with foamed asphalt. The pavement performance was evaluated by means of a functional and structural periodic field monitoring during 15 months. In laboratory, the materials stiffness was characterized from resilient modulus tests. The functional analysis was conducted to study the progression of pavement distresses, such as roughness, rutting and surface characteristics. Furthermore, as the main focus structural aspects were analyzed. Deflection basins were evaluated from its parameters and used for backcalculated moduli analysis, with the objective of comprehend the susceptibility of these parameters and layers moduli to climate and traffic conditions. These results were used to compare the structures with surface distresses, and were also used as input of a computational finite element model to describe the mechanical behavior of these structures. The results obtained from the periodic monitoring and analysis showed that the flexible pavement is not suitable for very heavy traffic and from the 12 months it did not meet the ANTT limits required for highways under federal concession, while the semi-rigid pavement proved to be adequate and stable during the studied period and the recycled pavements with presented an improvement in the studied parameters, due to the curing process of the materials used, and also presented adequate behavior to the submitted traffic.

Key words: Pavement, Pavement [Recycling], Asphalt, Cement, Roads

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aspecto do cimento na estabilização de agregados em uma amostra de BGTC	32
Figura 2 – Aspecto da dispersão da Emulsão Asfáltica nos agregados em uma amostra de RAP+Emulsão	41
Figura 3 - Ganho de rigidez pela perda da umidade interna com o tempo (Adaptado de(WIRTGEN, 2013)).....	45
Figura 4 - Aspecto da dispersão da Espuma de asfalto nos agregados em uma amostra de RAP+Espuma.....	46
Figura 5 - Produção da espuma de asfalto (WIRTGEN, 2013)	47
Figura 6 – Exemplo gráfico de avaliação taxa de expansão x meia vida (WIRTGEN, 2004b)	48
Figura 7 - Realização do ensaio de Viga Benkelman.....	58
Figura 8 - Execução do ensaio de FWD, (a) Prato e Geofones, (b) Detalhe do equipamento, (c) Veículo em operação.....	59
Figura 9 - Representação gráfica esquemática da bacia deflectométrica e os respectivos índices de curvatura (FERRI, 2013)	61
Figura 10 - Fotos do trecho experimental em operação, (a) placa de identificação, (b) vista do trecho	69
Figura 11 - Localização do Trecho Experimental (Google, 2015)	70
Figura 12 - Seções do trecho experimental.....	71
Figura 13 - Processo de execução da fresagem, (a) início da fresagem da camada de revestimento; (b) esteira de carregamento do material fresado, (c) pilhas de estocagem do material fresado, (d) fresagem da camada de revestimento	72
Figura 14 - Camada remanescente de solo, (a) camada remanescente no segmento 1, (b) camada remanescente no segmento 2.....	73
Figura 15 - Processo de execução da camada de base do segmento 1 - BGS, (a) descarregamento do material, (b) espalhamento do material, (c) compactação com rolo pé de carneiro, (d) compactação com rolo pneumático.....	74

Figura 16 - Processo de execução da camada de base do segmento 2 - BGTC, (a) usinagem do material, (b) descarregamento do material (c) espalhamento do material, (d) compactação com rolo liso.....	75
Figura 17 - Processo de execução da camada de base do segmento 3 - RAP + Emulsão Asfáltica, (a) usinagem do material, (b) carregamento do material (c) espalhamento do material, (d) compactação com rolo pé de carneiro	76
Figura 18 - Processo de execução da camada de base do segmento 4 - RAP + Espuma de Asfalto, (a) usinagem do material, (b) descarregamento do material (c) espalhamento do material, (d) compactação com rolo pneumático.....	77
Figura 19 - Processo de execução da camada de revestimento asfáltico, (a) execução da pintura de ligação, (b) espalhamento do material (c) compactação da camada, (d) compactação da camada	79
Figura 20- Distribuição Granulométrica da Brita Graduada Simples (BGS)	81
Figura 21 - Distribuição Granulométrica da Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC).....	82
Figura 22 - Distribuição Granulométrica da Mistura Reciclada com Emulsão Asfáltica .	83
Figura 23 - Distribuição Granulométrica da Mistura Reciclada com Espuma de Asfalto	85
Figura 24 - Granulometria da mistura de Concreto Asfáltico.....	86
Figura 25 - Resultados dos ensaios de MR em função da tensão de confinamento para a BGS.....	88
Figura 26 - Resultados dos ensaios de MR em função da tensão de desvio para a BGTC	89
Figura 27 - Resultados dos ensaios de MR em função da tensão de confinamento para o RAP estabilizado com emulsão.....	90
Figura 28 - Resultados dos ensaios de MR em função da tensão de confinamento para o RAP estabilizado com espuma.....	91
Figura 29 - Ensaio de LWD sobre a base de BGS	92
Figura 30 - Resultados de Módulo da camada remanescente obtidos pelo LWD	93
Figura 31 - Resultados de Módulo da camada de BGS obtidos pelo LWD	94
Figura 32 - Índice pluviométrico para a região segundo INMET.....	95

Figura 33 - Número N de repetições de carga do eixo padrão acumulado ao longo do tempo de monitoramento	96
Figura 34 - Trincas no revestimento do Segmento 1, (a) trincas interligadas, (b) trinca isolada transversal curta	97
Figura 35 - Evolução da área trincada do segmento 1	98
Figura 36 - Evolução da área trincada em função do Número N.....	98
Figura 37 - Levantamento de ATR com o uso da treliça	100
Figura 38 - Afundamento da trilha de roda por estaca	100
Figura 39 - Evolução do ATR com o tempo.....	101
Figura 40 - Evolução do ATR em função do número N.....	101
Figura 41 - Execução do levantamento de Irregularidade longitudinal com uso do MERLIN.....	102
Figura 42 - Evolução do IRI com o tempo	103
Figura 43 - Evolução de D_0 nos diferentes levantamentos.....	107
Figura 44 - Delimitação de segmento homogêneo pelo método das diferenças acumuladas (AASHTO,1993).....	109
Figura 45 - Delimitação de segmento homogêneo pelo método das somas acumuladas (CUSUM).....	109
Figura 46 - Evolução das bacias de deflexão do segmento 1 - BGS	110
Figura 47 - Evolução das bacias de deflexão do segmento 2 - BGTC	111
Figura 48 - Evolução das bacias de deflexão do segmento 3 - RAP+Emulsão.....	111
Figura 49 - Evolução das bacias de deflexão do segmento 4 - RAP+Espuma	112
Figura 50 - Valores médios do RC	113
Figura 51 - Valores do parâmetro AREA	115
Figura 52 - Parâmetros Índices para o Segmento 1 - BGS	116
Figura 53 - Parâmetros Índices para o Segmento 2 - BGTC.....	117
Figura 54 - Parâmetros Índices para o Segmento 3 - RAP+ mulsão.....	117
Figura 55 - Parâmetros Índices para o Segmento 4 - RAP+Espuma	118
Figura 56 - Bacia medida x bacia teórica	122
Figura 57 - Evolução do parâmetro "A"	123
Figura 58 - Evolução do parâmetro "B"	124

Figura 59 - Representação das bacias médias com o desvio padrão	125
Figura 60 - Módulos retroanalizados para o Segmento 1 - BGS nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses.....	127
Figura 61 - Módulos retroanalizados para o Segmento 2 - BGTC nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses.....	129
Figura 62 - Módulos retroanalizados para o Segmento 3 - RAP + Emulsão nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses.....	131
Figura 63 - Módulos retroanalizados para o Segmento 4 - RAP + Espuma nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses.....	133
Figura 64 - Correlação entre deflexão e espessura equivalente do subleito.....	137
Figura 65 - Evolução da deflexão com o número N	138
Figura 66 - (a) Geometria do modelo; (b) Condições de contorno imposta ao modelo; (c) Malha de elementos finitos.....	140
Figura 67 - Deflexão (mm) resultante da modelagem do segmento 1 (a) idade 0, (b) idade 15 meses	141
Figura 68 - Tensão horizontal (MPa) resultante da modelagem do segmento 1 (a) idade 0, (b) idade 15 meses.....	142
Figura 69 - Deformação horizontal (ϵ) resultante da modelagem do segmento 1 (a) idade 0, (b) idade 15 meses.....	143
Figura 70 - Deflexão (mm) resultante da modelagem do segmento 2 (a) idade 0, (b) idade 15 meses	144
Figura 71 - Tensão horizontal (MPa) resultante da modelagem do segmento 2 (a) idade 0, (b) idade 15 meses.....	145
Figura 72 - Deflexão (mm) resultante da modelagem do segmento 4 (a) idade 0, (b) idade 15 meses	146
Figura 73 - Tensão horizontal (MPa) resultante da modelagem do segmento 2 (a) idade 0, (b) idade 15 Meses.....	147
Figura 74 - Deformação horizontal (ϵ) resultante da modelagem do segmento 4 (a) idade 0, (b) idade 15 meses	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixas granulométricas sugeridas para execução de BGS.....	27
Tabela 2 - Comparativo entre as especificações de execução de BGS.....	28
Tabela 3 - Comparativo entre as especificações de execução de BGTC	34
Tabela 4 - Faixas granulométricas sugeridas para execução de BGTC	35
Tabela 5 - Faixas granulométricas sugeridas para estabilização com Emulsão Asfáltica	43
Tabela 6 - Parâmetros para o material estabilizado com emulsão asfáltica.....	44
Tabela 7 - Faixas granulométricas sugeridas para estabilização com Espuma de Asfalto	50
Tabela 8 - Parâmetros para o material estabilizado com espuma de asfalto	51
Tabela 9 - Faixas do parâmetro AREA segundo WSDOT (2005)	64
Tabela 10 - Composição granulométrica da mistura de BGS.....	81
Tabela 11 - Composição granulométrica da Brita Graduada Tratada com Cimento	82
Tabela 12 - Composição granulométrica do Reciclado com Emulsão Asfáltica	83
Tabela 13 - Composição granulométrica do Reciclado com Espuma de Asfalto	84
Tabela 14 - Composição granulométrica do Concreto Asfáltico.....	86
Tabela 15 - Demonstrativo de <i>Outlier</i> para os grupos de deflexão	104
Tabela 16 - Exemplo de aplicação da curva de Agnesi.....	122
Tabela 17 - Parâmetros para a bacia de exemplo.....	122
Tabela 18 - Parâmetros para retroanálise	125
Tabela 19 - Módulos retroanalisados do Segmento 1 - BGS nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses.....	128
Tabela 20 - Módulos retroanalisados do Segmento 2 - BGTC nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses.....	130
Tabela 21 - Módulos retroanalisados do Segmento 3 - RAP + Emulsão nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses.....	132
Tabela 22 - Módulos retroanalisados do Segmento 4 - RAP + Espuma nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses.....	134
Tabela 23 - Cálculo da espessura equivalente.....	136

Tabela 24 - calculo da vida remanescente para o segmento 1	139
Tabela 25 - Bacias do segmento 1 - BGS	166
Tabela 26 - Bacias do segmento 2 - BGTC.....	167
Tabela 27 - Bacias do segmento 3 - RAP+Emsulsão.....	168
Tabela 28 - Bacias do segmento 4 - RAP+Espuma	169
Tabela 29 - Bacias retroanalizadas do segmento 1 - BGS nas idades de 0 a 9 meses	171
Tabela 30 - Bacias retroanalizadas do segmento 1 - BGS nas idades de 12 e 15 meses	172
Tabela 31 - Bacias retroanalizadas do segmento 2 - BGTC nas idades de 0 a 9 meses	173
Tabela 32 - Bacias retroanalizadas do segmento 2 - BGTC nas idades de 12 e 15 meses.....	174
Tabela 33 - Bacias retroanalizadas do segmento 3 - RAP+Emsulsão nas idades de 0 a 9 meses.....	175
Tabela 34 - Bacias retroanalizadas do segmento 3 - RAP+Emulsão nas idades de 12 e 15 meses.....	176
Tabela 35 - Bacias retroanalizadas do segmento 4 - RAP+Esmputa nas idades de 0 a 9 meses.....	177
Tabela 36 - Bacias retroanalizadas do segmento 4 – RAP+Espuma nas idades de 12 e 15 meses.....	178

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xv
1. INTRODUÇÃO.....	20
1.1. Objetivo.....	22
1.2. Estrutura da dissertação	22
2. CAMADAS DE BASE DE PAVIMENTOS	24
2.1. Base Granular - Brita Graduada Simples.....	24
2.1.1. Especificações de características físicas, químicas, de resistência e de deformabilidade.....	26
2.1.2. Produção, transporte e execução	30
2.2. Base Cimentada de Brita Graduada Tratada com Cimento.....	31
2.2.1. Especificações de características físicas, químicas, de resistência e de deformabilidade.....	34
2.2.2. Produção, Transporte e Execução	35
2.3. Bases Recicladas com Asfalto.....	36
2.4. Reciclagem com Emulsão Asfáltica	40
2.4.1. Especificações de características físicas, químicas, de resistência e de deformabilidade.....	42
2.4.2. Produção, Transporte e execução.....	44
2.5. Reciclagem com Espuma de Asfalto	46
2.5.1. Especificações de características físicas, químicas, de resistência e de deformabilidade.....	49
2.5.2. Produção, Transporte e Execução	51
2.6. Trechos Experimentais	51
3. AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS	55
3.1. Comportamento estrutural e ocorrência de defeitos	56
3.2. Levantamento deflectométrico.....	57
3.3. Parâmetros de análise da bacia de deflexão	60
3.3.1. Raio de Curvatura (RC)	61

3.3.2. Parâmetro AREA	62
3.3.3. Índice de Curvatura da Superfície	64
3.3.4. Índice de Danos na Base.....	65
3.3.5. Índice de Curvatura da Base	65
3.3.6. Fator de Curvatura.....	66
3.4. Processo de retroanálise	66
4. TRECHO EXPERIMENTAL: CONSTRUÇÃO E CONTROLE TECNOLÓGICO ..	68
4.1. Localização do trecho experimental	68
4.2. Concepção estrutural.....	70
4.3. Acompanhamento da execução	71
4.3.1. Primeira Etapa - Execução da fresagem	71
4.3.2. Segunda Etapa - Execução das camadas de base	73
4.3.3. Terceira Etapa - Execução do revestimento	78
4.4. Ensaios de acompanhamento	80
4.4.1. Subleito - Camada de infraestrutura remanescente	80
4.4.2. Base do Segmento 1 - Brita Graduada Simples	80
4.4.3. Base do Segmento 2 - BGTC	81
4.4.4. Base do Segmento 3 - RAP com emulsão.....	82
4.4.5. Base do Segmento 4 - RAP com espuma	84
4.4.6. Camada de revestimento.....	85
4.5. Ensaios de caracterização mecânica	86
4.5.1. Mistura de BGS	87
4.5.2. Mistura de BGTC	88
4.5.3. Mistura de RAP+Emulsão.....	89
4.5.4. Mistura de RAP+Espuma	90
4.6. Controle deflectométrico por LWD	92
5. TRECHO EXPERIMENTAL: MONITORAMENTOS PERIÓDICOS	95
5.1. Monitoramento pluviométrico.....	95
5.2. Monitoramento do Tráfego.....	96
5.3. Monitoramento Funcional	97
5.3.1. Levantamento de defeitos.....	97

5.3.2. Afundamento em trilha de roda.....	99
5.3.3. Irregularidade longitudinal.....	102
5.4. Controle deflectométrico por meio de FWD	104
5.4.1. Tratamento dos dados	104
5.4.2. Correção da temperatura.....	105
5.4.3. Discussão dos dados de deflexão	106
5.5. Parâmetros de bacia.....	113
5.5.1. Raio de Curvatura (RC)	113
5.5.2. Parâmetro AREA	114
5.5.3. Parâmetros Índices para o Primeiro Segmento	116
5.6. Equação da Bacia de Deflexão.....	120
5.6.1. Curva de Agnesi	120
5.6.2. Aplicação da curva de Agnesi.....	121
5.6.3. Generalização da curva de Agnesi	122
5.7. Retroanálises.....	125
5.7.1. Retroanálise do segmento 1 - base BGS.....	126
5.7.2. Retroanálise do segmento 2 - base BGTC	129
5.7.3. Retroanálise do segmento 3 - base RAP + Emulsão.....	131
5.7.4. Retroanálise do segmento 4 - base RAP + Espuma.....	133
5.8. Análises Conclusivas	135
5.8.1. Espessura equivalente.....	135
5.8.2. Vida remanescente	138
5.9. Modelagens em Elementos Finitos	139
5.9.1. Modelagem do pavimento flexível	140
5.9.2. Modelagem do pavimento semirrígido	143
5.9.3. Modelagem do pavimento com base reciclada	145
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	149
6.1. Sugestões de pesquisas.....	152
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
APÊNDICE A – RESUMO DE BACIAS POR SEGMENTOS HOMOGÊNEOS	165
APÊNDICE B – BACIAS RETROANALISADAS.....	170

1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores experimentos da história da pavimentação foi a pista experimental da *American Association of State Highway Officials* (AASHO), nos 50 Estados Unidos, à qual promoveu pesquisa aprofundada sobre diversos materiais de pavimentação, com o objetivo de se observar o comportamento e os danos causados pelo clima e pelas cargas do tráfego. Um dos mais notáveis resultados foi o desenvolvimento de um método de dimensionamento empírico de estruturas de pavimentos que levasse em consideração os aspectos estrutural e funcional. Outro resultado relevante foi a concepção de vários equipamentos de auscultação de pavimentos, que serviram de base para aperfeiçoamentos futuros dos equipamentos hoje existentes. Na pista teste da AASHO foram realizados testes com materiais granulares, cimentados e estabilizados com asfalto, para se verificar formas de se considerar e se desenvolver procedimentos que mensurassem as influências destes materiais no projeto dos pavimentos (HAYNES e YORDER, 1963).

A crescente demanda de tráfego de veículos comerciais tem levado os pavimentos a processos de deterioração acelerado, principalmente os pavimentos asfálticos flexíveis com base granular. As bases granulares, principalmente de Brita Graduada Simples (BGS), são empregadas desde a década de 60 no Brasil e constituem-se um dos materiais mais empregados na construção de pavimentos.

Dado, portanto, o aumento do volume de tráfego e das cargas dos veículos comerciais, a engenharia rodoviária procurou desenvolver novas técnicas para prolongar a vida de fadiga dos revestimentos asfálticos, adotando o uso de bases ou de sub-bases de maior rigidez, de maneira a reduzir as tensões atuantes nos revestimentos, diminuindo, portanto, as deflexões. Na década de 70 no Brasil, em algumas obras principalmente no Estado de São Paulo, optou-se pelo uso de bases de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) em projetos de rodovias sujeitas a tráfego pesado e muito pesado (SUZUKI, 1992). Estes pavimentos com base cimentada são designados de pavimentos semirrígidos.

Após alguns experimentos realizados na década anterior, na década de 90 iniciou-se o emprego da BGTC na sub-base dos pavimentos, com a execução de base granular, interposta entre a camada cimentada e o revestimento asfáltico, de maneira a evitar a reflexão de trincas de retração da base cimentada para os revestimentos asfálticos. Estas estruturas são designadas por pavimentos semirrígidos invertidos.

Outra possibilidade de aumentar a rigidez, mas evitar trincamento da base por retração é o uso de estabilização de materiais granulares por ligantes asfálticos. Esta não é uma técnica recente. A estabilização por ligante asfáltico já foi aplicada em solos para redução drástica da expansão e aumento da resistência (SANT'ANA, 2009).

Mais recentemente, há cerca de 10 a 15 anos, a necessidade de reabilitação dos pavimentos abriu a possibilidade de reciclar os pavimentos asfálticos deteriorados, aproveitando este material nobre denominado de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Duas técnicas de reciclagem asfálticas serão aqui ressaltadas: o RAP com emulsão asfáltica e o RAP com espuma de asfalto. O RAP pode ou não receber adições de materiais granulares virgens. Dependendo da técnica, adiciona-se ligante hidráulico (cimento ou cal) em pequenas proporções e em ambos acrescenta-se água. Estas técnicas levam as bases a possuírem uma certa coesão e um módulo de resiliência intermediário entre a base granular e a base estabilizada com cimento. Uma vez que estas bases não apresentaram retrações hidráulicas, não ocasionam a reflexão de trincas para os revestimentos asfálticos. Além disso, por também terem uma maior rigidez que as bases granulares, as tensões nos revestimentos asfálticos, principalmente as de tração, são diminuídas, levando a uma maior vida de fadiga destes revestimentos por comparação com as estruturas flexíveis, com bases granulares.

Neste contexto, a presente dissertação foca-se nestes quatro materiais: BGS, BGTC, RAP com emulsão asfáltica e RAP com espuma de asfalto, fazendo um comparativo

entre os materiais e a sua influência na estrutura de pavimentos asfálticos sujeitos a tráfego muito pesado.

1.1. Objetivo

Esta pesquisa tem por objetivo estabelecer uma análise comparativa entre comportamentos mecânicos de pavimentos asfálticos, empregando diferentes tipos de base: (i) granular; (ii) granular tratado com cimento; (iii) fresado de camada asfáltica reciclado e estabilizado com emulsão asfáltica; e (iv) fresado de camada asfáltica reciclado e estabilizado com espuma de asfalto. O trabalho baseia-se em resultados obtidos por meio da caracterização em laboratório das misturas usadas em campo, e de ensaios de monitoramentos da superfície (área trincada, afundamentos em trilha de roda e outros defeitos) e deflectométricos realizados periodicamente em 4 segmentos de pavimentos asfálticos executados em rodovia de tráfego muito pesado, cuja diferenciação entre segmentos se dá exclusivamente pelo material de base. A partir de retroanálises realizadas com base nas bacias de deslocamentos recuperáveis, comparam-se os materiais de base e sua influência no desempenho estrutural dos pavimentos estudados através de indicadores estruturais e modelagens em elementos finitos.

1.2. Estrutura da dissertação

Este trabalho é composto por 6 capítulos, referências bibliográficas, dois apêndices segundo o que segue.

O primeiro capítulo destina-se à introdução do tema a ser abordado pela pesquisa e sua relevância, e à definição dos principais objetivos a serem alcançados.

No segundo capítulo encontra-se a revisão bibliográfica dos materiais estudados nesta pesquisa que delimita o tema definido e a evolução das pesquisas em pistas testes que vem sendo realizadas. Definindo os materiais, bem como o seu comportamento em

camada de base, abordando o desenvolvimento histórico, os principais documentos normativos, e seus processos construtivos.

No terceiro capítulo é complementado a revisão bibliográfica descrevendo os processos de avaliação de pavimentos, com foco principal na avaliação estrutural, e as formas de análise do comportamento da estrutura do pavimento.

No quarto capítulo são descritas a concepção estrutural, e execução do trecho experimental, os materiais usados nas camadas aplicadas nos segmentos, e ensaios de acompanhamentos e de caracterização da rigidez realizados.

No quinto capítulo são apresentados os resultados dos monitoramentos funcionais e estruturais no trecho experimental, bem como o tratamento de dados adotado, e as análises realizadas com base nos indicadores estruturais, e os resultados das modelagens computacionais.

No sexto capítulo são expostos as considerações finais acerca do tema abordado, bem como os resultados obtidos, as conclusões propostas pela pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas no desenvolvimento do trabalho. E ao final, como apêndice, estão o resumo de bacias obtidas nos levantamentos de FWD no Apêndice A, e no Apêndice B estão as retroanálises realizadas.

2. CAMADAS DE BASE DE PAVIMENTOS

Os pavimentos são estruturas constituídas por múltiplas camadas de espessuras finitas, construídas sobre a terraplanagem, com a função principal de fornecer aos usuários segurança e conforto, garantindo a trafegabilidade em qualquer época do ano, em diferentes condições climáticas.

Com a função de resistir e transmitir as tensões verticais e horizontais oriundas do tráfego, de forma economicamente viável, a estrutura do pavimento é composta por diferentes camadas, de acordo com os níveis de esforços que cada uma está submetida. Assim, tradicionalmente, os materiais mais nobres e resistentes estão mais próximos da superfície e os menos nobres e menos resistentes estão mais próximos da camada de terraplanagem. De modo amplo pode-se dividir a estrutura dos pavimentos asfálticos nas seguintes camadas: camada de rolamento, binder ou intermediária (ambas a de rolamento e a intermediária constituem o revestimento asfáltico), base, sub-base, reforço do subleito, assentadas sobre o final de terraplanagem, (denominado de subleito).

A camada de base, que corresponde ao objeto deste trabalho, é a camada situada imediatamente abaixo da camada de revestimento asfáltico. Possui a função de resistir às cargas atuantes devido ao tráfego e minimizar as deformações de consolidação e os esforços cisalhantes nas camadas subjacentes. Para a camada de revestimento, as características mecânicas da base são essenciais para garantir o controle da magnitude das tensões no revestimento asfáltico, de maneira que não cause trincamento prematuro da camada de superfície (PINTO e PREUSSLER, 2002).

2.1. Base Granular - Brita Graduada Simples

A base granular é comumente empregada nos pavimentos de comportamento flexível, que quando bem compactados e confinadas possuem elevada resistência aos esforços verticais gerados pela atuação das cargas e capacidade drenante adequada.

Segundo Yoder e Witczak (1975), o comportamento flexível dos pavimentos caracteriza-se pela forma como a carga se distribui de forma concentrada na proximidade do local de aplicação e, assim, transmite ao subleito uma carga pontual de área muito reduzida. Estudos realizados na Califórnia, a partir do ano de 1938, determinaram uma série de medidas de deslocamentos verticais em pavimentos, quando estes estavam sujeitos à ação de uma carga de roda. A parcela dos deslocamentos verticais que é elástica (recuperável ao cessar o carregamento) foi denominada deflexão. Ao cessar a solicitação, a parcela das deformações que se recuperou de forma elástica foi chamada de resiliente, enquanto a outra, não recuperável, foi denominada por plástica (HVEEM, 1955). A necessidade de conhecer as magnitudes dos deslocamentos recuperáveis e sua variação com o estado de tensão proporcionou o desenvolvimento do ensaio triaxial de cargas repetidas nos anos 50, resultando na determinação do Módulo de Resiliência. A denominação de Módulo de Resiliência, ao invés de Módulo de Elasticidade, foi escolhida para se poder diferenciar a elasticidade (ou resiliência) dos solos e dos materiais granulares dos tradicionais materiais como aço e concreto.

O início da utilização dos materiais granulares em estradas remonta a milhares de anos, pela necessidade de se estabelecer, por vias comerciais, a comunicação entre as comunidades. Os materiais granulares são empregados há mais de 2 mil anos, desde as primeiras estradas do Império Romano, que de forma racional já construía pavimentos divididos em camadas. O método romano de pavimentos foi utilizado até que Tresaguet na França, a partir de 1775, modificou o método introduzindo uma camada para drenar a camada de superfície. O engenheiro escocês Mac-Adam (1756-1836) é considerado o precursor dos pavimentos modernos, e seu método baseia-se na compactação das camadas, embricamento das partículas granulares e preservação de camada drenante. Entre nós, este material foi denominado de macadame. Embora Mac-Adam procurasse a densificação dos materiais, o primeiro compactador de rolo só veio a ser utilizado na cidade de Nova York no ano de 1869 (Haas, 1994).

Telford na Inglaterra, em 1816, utilizou materiais granulares bem graduados para obter pavimentos impermeáveis e assim evitar a perda de resistência (LAY, 1992). Ou seja, procurou aumentar o travamento e o preenchimento por finos do macadame. Dada a não existência de usinas e de equipamentos de campo, por décadas foram empregadas as bases tipo Macadame que permitiam uma execução manual. Com o surgimento de melhores processos de desmonte de rocha sã e de usinas para revestimentos asfálticos, os materiais granulares para as bases tiveram seu diâmetro máximo reduzido.

No Brasil, o uso da brita graduada simples difundiu-se nos anos 60. Atualmente, uma parcela muito elevada de projetos de pavimentos brasileiros ainda indicam o uso de BGS em camadas de base e sub-base para tráfegos menores que $N=5 \times 10^5$ USACE. A boa resistência da BGS, quando bem graduada e densificada, forma um esqueleto mineral intertravado, que trabalha à compressão e que tem sua rigidez intrinsecamente variável pelo confinamento.

2.1.1. Especificações de características físicas, químicas, de resistência e de deformabilidade

A grande maioria das especificações que normatizam a execução de base e sub-base de BGS estabelecem critérios de qualidade do material, envolvendo características físicas, químicas e de propriedades mecânicas.

A qualidade do material é avaliada com base em critérios físicos, como a forma dos agregados DNER-ME 086/1994, o desgaste por meio do ensaio de abrasão Los Angeles DNER-ME 035/1998, a equivalência de areia da fração fina DNER-ME 054/1997 e a durabilidade em solução de sulfato de Sódio DNER-ME 089/1994. Acrescente-se, ainda, a graduação, que é um dos critérios mais importantes, pois é a característica responsável por parte do intertravamento granular, sendo expressa em geral por faixas granulométricas. A Tabela 1 traz as faixas granulométricas apresentadas nas especificações EP-DE-P00-008 do DER-SP, a ES-P05-05 do DER-ES e a ES-003 Rev.04 da ARTERIS.

Tabela 1 - Faixas granulométricas sugeridas para execução de BGS

Peneira de malha quadrada		% em Massa, Passando									
		DER-SP				DER-ES			ARTERIS		
ASTM	mm	A	B	C	D	Faixa I	Faixa II	Faixa III	Faixa I	Faixa II	Faixa III
2"	50,0	100	100	-	-	100	-	-	100	100	100
1 1/2"	37,5	90-100	-	-	-	90-100	100	100	-	-	-
1"	25,0	-	82-90	100	100	-	-	77-100	75-90	100	95-100
3/4"	19,0	50-68	-	-	-	50-85	60-95	66-88	65-85	85-100	75-100
3/8"	9,5	30-46	60-75	50-85	60-100	35-65	40-75	46-71	40-75	50-85	45-65
Nº 4	4,8	20-34	45-60	35-65	50-85	25-45	25-60	30-56	30-60	35-65	30-45
Nº 10	2,0	21-34	32-45	25-50	40-70	18-35	15-45	20-44	20-45	25-50	20-35
Nº 40	0,42	4-12	22-30	15-30	25-45	8-22	8-25	8-25	15-30	15-30	5-20
Nº 200	0,075	1-4	10-15	5-15	5-20	3-9	2-10	5-10	5-15	5-15	0-5

As faixas granulométricas são baseadas nos estudos de Fuller e Thompson (1907) e Talbot e Richard (1923), que desenvolveram as granulometrias com elevada densidade para Concreto de Cimento Portland, e que obedecem à Equação 1, além de critérios de proporção entre a quantidade de material passante entre determinadas peneiras, como a razão entre o material passante na peneira #200 (0,074 mm) pelo passante na #40 (0,42 mm) ser inferior a 2/3.

$$p = 100 \times \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

p é a porcentagem de fração com grãos de diâmetro menor que d ;

d é o diâmetro do grão;

D é o diâmetro máximo dos grãos constituintes do material;

n coeficiente que varia em função das peculiaridades do material (0,33 e 0,50);

A Tabela 2 apresenta um comparativo entre algumas das principais especificações dos materiais usados para execução da BGS, a especificação EP-DE-P00-008 do DER-SP, a ES-P05-05 do DER-ES e a ES-003 Rev.04 da ARTERIS.

Tabela 2 - Comparativo entre as especificações de execução de BGS

Ensaio	DER-SP	DER-ES	ARTERIS
Lamelaridade	< 10%	< 20%	-
Abrasão Los Angeles	< 50%	< 50%	≤ 55%
Equivalência de Areia	> 55%	> 40%	≥ 30%
Durabilidade:			
Sulfato de sódio	< 20%	Agr. graúdo 12% Agr. miúdo 15%	-
Sulfato de Magnésio	< 30%	-	-
CBR	≥ 100%	≥ 100%	≥ 80%
Expansão	≤ 0,3%	-	-

A qualidade dos materiais granulares como a BGS, para uso em projetos de pavimentação, deve ser expressa em termos de resistência. No Brasil em geral ainda se emprega o ensaio *California Bearing Ratio* (CBR), traduzido no país como Índice de Suporte Califórnia, ISC, (DNER-ME 049/1994), como critério de aceitabilidade dos materiais granulares. A BGS pode apresentar a resistência expressa no CBR variando em geral entre 60% e 120%.

Nas últimas décadas no Brasil, uma vez que em vários projetos de pavimentos são realizadas as análises mecanicistas, tem-se realizado ensaios de deformabilidade no lugar dos ensaios de resistência, e em geral é determinado o módulo de resiliência (MR) DNIT-ME 134/2010 (que se encontra atualmente em modificação de procedimento). Valores típicos de MR da BGS estão na faixa de 100 a 400 MPa (BERNUCCI *et al* 2008).

A variação do MR é em função da graduação, da natureza do material, do peso específico aparente, do grau de saturação e, principalmente, do estado de tensões. Os ensaios de resiliência são realizados em câmara triaxial e o corpo-de-prova cilíndrico é submetido a cargas repetidas, com frequência de 1,0 Hz, sob carregamento semi-senoidal durante 0,1 s e descarregamento (em repouso) durante 0,9 s. A expressão do MR é realizada em função da pressão confinante (σ_3) Equação 2, ou da somatória das tensões principais (θ) Equação 3.

$$MR = K_1 \times \sigma_3^{K_2} \quad \text{Equação 2}$$

$$MR = K_3 \times \theta^{K_4} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

MR é o módulo de resiliência;

σ_3 é a pressão confinante;

θ é o somatório das tensões principais;

K_1 , K_2 , K_3 , e K_4 são constantes de regressão obtidas experimentalmente;

Embora a maior parte das bases granulares de BGS busquem uma distribuição granulométrica próxima à máxima densidade, há situações onde se buscam bases granulares de graduação mais aberta, de modo a serem mais permeáveis. Virgiliis (2009) realizou um estudo com um pavimento permeável, onde se optou por uma base com graduação aberta de BGS com finalidade de retenção e amortecimento de picos de enchentes em zonas urbanas. Com a função de ser um reservatório, na base foi utilizada uma BGS com granulometria aberta com poucos finos e que atua como um recipiente de coleta de água, permitindo que o líquido permaneça nos vazios até que seja encaminhado a um sistema de coleta ou infiltre no solo. O DER-SP tem em sua especificação uma faixa de BGS aberta, geralmente indicada para base de pavimentos semirrígidos invertidos de maneira a propiciar a drenagem subsuperficial da estrutura de pavimento, preservando a BGTC da sub-base.

Recentemente, vem se desenvolvendo uma tendência de estudos acerca do comportamento quanto a deformações permanentes dos materiais granulares. No Brasil iniciou com Guimarães (2001) com o estudo de respostas plásticas e elásticas dos solos lateríticos e argilas, e a ocorrência de *shakedown*, ou o rompimento por deformações plásticas. É possível mencionar, ainda, trabalhos como o de Malysz (2004) para misturas de materiais britados com diversas granulometrias, entre outros.

Pereira (2003) mostra a influência da graduação das BGS na capacidade drenante das mesmas como camada de drenagem subsuperficial. Mostra também a importância desta propriedade na redução da variação deflectométrica dos pavimentos.

2.1.2. Produção, transporte e execução

O procedimento de execução de camadas de BGS é normatizado em algumas normas brasileiras como ABNT NBR 12264-1991, EP-DE-P00-008 do DER-SP, entre outras. A BGS é utilizada em diversos tipos de pavimentos e em diferentes camadas, seja de base ou sub-base. O processo de execução se inicia com o desmonte da rocha sã, que deve ser britada e reduzida em frações compatíveis com a faixa granulométrica desejada. Deve-se então iniciar o peneiramento do material britado para separar as diferentes frações granulométricas. Geralmente esta fase ainda é realizada na pedreira onde se fez o processo de britagem.

O uso de uma usina para se realizar a mistura dos agregados e a adição de água é fundamental para a formação e controle da curva granulométrica desejada com material homogêneo. No transporte para o local da obra, podem ser usados caminhões basculantes comuns, devendo-se tomar cuidado para que não ocorra segregação do material, tanto no momento de carga destes caminhões, quanto no transporte e descarga.

A superfície para receber a BGS precisa estar seca, desempenada, limpa, isenta de pó ou demais substâncias. O espalhamento pode ser executado em múltiplas camadas, que não devem ser inferiores a 10,0 cm e superiores a 20,0 cm, por meio de vibroacabadora, sempre que possível, pois minimiza a segregação e a perda de umidade. Embora a norma EP-DE-P00-008 do DER-SP indique o uso de vibroacabadora, grande parte das obras utiliza motoniveladora. Os problemas são a densificação diferenciada decorrente dos pneus da motoniveladora, a irregularidade superficial causada, que acaba por se refletir no revestimento asfáltico, principalmente quando este tem apenas uma camada. A compactação é executada por rolos de pneus e/ou lisos, com ou sem vibração.

Após a conclusão da compactação, a umidade da camada deve ser preservada. Opta-se por realizar o umedecimento da superfície constantemente até que se execute a camada subsequente ou se realize a imprimação.

2.2. Base Cimentada de Brita Graduada Tratada com Cimento

Um pavimento semirrígido é aquele que possui a camada de revestimento asfáltico com a camada de base composta de material estabilizado com aglomerante hidráulico. A estabilização da camada de base com ligante hidráulico faz com que a camada de base passe a resistir a maiores níveis de tensões de tração e de compressão, mas não apresente características de rigidez semelhantes a do concreto Portland (BALBO, 2007).

A mistura de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) é composta por uma mistura de material britado com granulometria bem graduada, semelhante a uma BGS, em que se adiciona uma fração de 3% a 5% em peso de cimento Portland. A água além de ter a função de facilitar a compactação, tem a função de hidratar o cimento que se mistura à fração granular fina, formando uma argamassa que se liga pontualmente aos agregados graúdos, tendo em vista que a estabilização não é suficiente para envolver completamente os agregados como ocorre no concreto, formando somente pontes entre os agregados, Figura 1.

Figura 1 - Aspecto do cimento na estabilização de agregados em uma amostra de BGTC

O uso de aglomerantes hidráulicos iniciou-se juntamente com as construções das primeiras estradas. Na antiguidade, utilizavam-se cal e cinzas pozolânicas misturadas à areia e à argila para aglomerar materiais granulares e servir de base para as estradas construídas na Roma Antiga (BOLIS e DI RENZO¹, 1949 *apud* BALBO, 2007).

O uso atual da aglomeração de materiais granulares se deu a partir de 1917 com o uso de cimento para estabilizarem solos no Reino Unido (ANDREWS², 1955 *apud* BALBO,

¹ BOLIS, B. DI RENZO, A. Pavimentazioni stradali. Milano: Antonio Vallardi Editore, 1950.

² ANDREWS, W. P., Soil cement roads. Cement and Concrete Association, second edition, London, 1955.

1993), mas só em 1944 foi feita a primeira especificação para execução de concreto magro como base de pavimentos (CCA³, 1962 *apud* BALBO, 1993).

No Brasil, os pavimentos com base granular tratada com cimento começaram a ser projetados na década de 70 a partir de obras no estado de São Paulo, como a Rodovia dos Imigrantes (1974), a Rodovia dos Bandeirantes (1978) e a Rodovia dos Trabalhadores (1982) – hoje denominada Rodovia Ayrton Senna (BALBO, 1993). Para estas obras, os dimensionamentos foram feitos a partir de método semi-empírico, e não havia método de análise de fadiga próprio para este material. Tais métodos só foram desenvolvidos em 1980, por Pinto e Preussler com experiência na pista de Imbituba-SC (SUZUKI, 1992) e mais tarde por Balbo, em 1993, através de modelos empíricos-teóricos.

Tradicionalmente as camadas do pavimento são dispostas de tal forma que os módulos das camadas vão decrescendo com o aumento da profundidade, mas nas estruturas chamadas Pavimentos Semirrígidos Invertidos (em inglês denominados de *Upside-down*) utiliza-se uma camada de BGS com boa capacidade drenante como base e a camada de BGTC como sub-base, mudando assim a lógica de que os materiais mais nobres ou mais resistentes estejam posicionados nas camadas superiores. Esta utilização visa evitar a reflexão de trincas de retração e de fadiga da camada cimentada para o revestimento asfáltico. Como consequência da rigidez da sub-base ser bem superior à da base, ocorre uma maior tensão confinante (σ_3) sobre a BGS e, como a deformabilidade deste material é muito sensível ao confinamento, a camada de base passa a apresentar um MR superior aqueles em estruturas convencionais, passando da faixa de 100 a 400 MPa para 300 a 700 MPa (SUZUKI, 1992).

³ CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. CCA, Lean Concrete Bases for Roads, London, 1962.

2.2.1. Especificações de características físicas, químicas, de resistência e de deformabilidade

As especificações para execução de camada composta por mistura de BGTC descrevem características mínimas tanto para os agregados quanto para o cimento Portland e água.

A classificação dos agregados segue os mesmos critérios das normas BGS, observando critérios físicos-químicos como forma dos agregados DNER-ME 086/1994, desgaste por meio do ensaio de abrasão Los Angeles DNER-ME 035/1998, equivalência de areia da fração fina DNER-ME 054/1997 e durabilidade em solução de sulfato de Sódio DNER-ME 089/1994. Os critérios de avaliação adotados pelas normas ABNT NB 11803-2013, a ET-DE-P00/009-2005 do DER-SP, a ES-P 16/05 – 2005 do DER-PR e a ES-002 da ARTERIS são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Comparativo entre as especificações de execução de BGTC

Ensaio	ABNT	DER-SP	DER-ES	ARTERIS
Lamelaridade	-	< 10%	-	-
Índice de forma	≤ 2 (ABNT 7809)	-	-	-
Abrasão Los Angeles	< 40%	< 50%	< 50%	≤ 40%
Equivalência de Areia	> 35%	> 55%	-	≥ 35%
Durabilidade:				
Sulfato de sódio	< 20 %	< 20%	Agr. graúdo 12% Agr. miúdo 15%	≤ 12%
Sulfato de Magnésio	< 30%	< 30%	-	-

A Tabela 4 apresenta comparativamente as faixas granulométricas das normas ABNT NB 11803-2013, a ET-DE-P00/009-2005 do DER-SP, a ES-P 16/05 – 2005 do DER-PR e a ES-002 da ARTERIS para execução de camada de BGTC.

Tabela 4 - Faixas granulométricas sugeridas para execução de BGTC

Peneira de malha quadrada		% em Massa, Passando						
		ABNT		DER-SP	DER-PR			ARTERIS
		A	B		Faixa I	Faixa II	Faixa III	
2"	50	100	-	-	100	-	-	-
1 1/2"	37,5	90-100	-	100	90-100	100	-	-
1"	25	-	100	90-100	-	-	100	100
3/4"	19	50-85	90-100	75-95	50-85	60-95	88-100	90-100
3/8"	9,5	34-60	80-100	45-64	35-65	40-75	55-75	55-80
Nº 4	4,8	25-45	35-55	30-45	25-45	25-60	41-56	35-55
Nº 10	2	-	-	18-33	18-35	15-45	30-44	20-45
Nº 40	0,42	8-22	8-25	7-17	8-22	8-25	15-25	10-30
Nº 80	0,18	-	-	1-11	-	-	-	-
Nº 200	0,075	2-9	2-9	0-8	3-9	2-10	2-7	2-9

O cimento Portland para execução da BGTC deve atender o estabelecido na DNER-ME 036/1994 e nas normas ABNT NBR 5732 quando utilizado cimento comum, ABNT NBR 5733 quando empregado cimento de alta resistência inicial, ABNT NBR 5735 quando empregado cimento de alto forno (CP-III), ABNT 5736 para utilização de cimento pozolânico (CP-IV) e ABNT NBR 11578 para o emprego de cimento composto.

A água para ser misturada na BGTC, e não prejudicar a hidratação do cimento, deve ser considerada potável, estando isenta de matéria orgânica. O pH deve ser situado entre 5,8 e 8,0; e a concentração de sulfatos e cloretos deve ser inferior a 300mg/L e 500mg/L respectivamente.

2.2.2. Produção, Transporte e Execução

O processo de execução da BGTC é muito similar à execução da BGS em termos de desmonte da rocha, britagem e peneiramento. A mistura dos agregados deve ser executada em usina apropriada com pelo menos 3 silos, e posterior adição do cimento e água em um *pugmill*.

O transporte pode ser realizado por caminhões basculantes, devendo ser feito cuidadosamente para se evitar a segregação, diminuindo a altura de queda da mistura no momento do carregamento e descarregamento do caminhão. Deve-se tomar

especial cuidado para evitar a formação de pilhas em formatos cônicos quando descarregados sobre a pista, no caso de espalhamento por motoniveladora, pois isto favorece a segregação.

O espalhamento deve ser executado em camada única, necessitando assim, preferencialmente de uma vibroacabadora capaz de soltar grandes espessuras.

A camada de BGTC deve ser compactada em uma única camada, assim, a depender do projeto, ela deverá ser executada em grande espessura, necessitando de rolos mais robustos que os usados para a compactação das pequenas espessuras da camada de BGS ($10 < h < 20$ cm). Além disso, a compactação deve ser executada antes do fim do tempo de hidratação do cimento. Para os casos em que o tempo de transporte, espalhamento e compactação for superior, pode-se optar por aditivo retardador de pega da mistura. Porém, tem-se especificado o tempo de no máximo 2 horas, podendo atingir 3 horas entre a mistura e a compactação.

Com a conclusão da compactação, e com a superfície acabada, deve-se executar imprimação da camada, para que não haja perda de umidade por evaporação, garantindo a cura da mistura. Em um período de sete dias o trânsito de máquinas e equipamentos sobre a camada deve ser evitado, garantindo o máximo ganho de resistência da BGTC e evitando a ruptura das ligações. Existem técnicas para liberação ao tráfego com menor tempo de cura, porém não é uma prática largamente aceita.

2.3. Bases Recicladas com Asfalto

A reciclagem de pavimentos consiste no processo de reutilização de misturas asfálticas envelhecidas provenientes de camadas deterioradas, para produção de novas misturas. Dessa forma, aproveita-se o material proveniente da fresagem de pavimentos deteriorados, denominado de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), como agregado mineral recoberto, em parte, por mástique asfáltico. Segundo a ARRA (2001) há cinco categorias de processos de reciclagem de pavimentos: (i) reciclagem a quente em usina

e (ii) *in situ*; (iii) reciclagem a frio em usina e (iv) *in situ*; e a (v) reciclagem profunda de pavimentos (*full depth reclamation*), e mais recentemente vem se desenvolvendo a reciclagem morna (em usina, com redução de temperatura).

O processo de reciclagem se iniciou com o antigo processo de escarificação dos pavimentos e posterior rebitagem, geralmente empregada por causa da formação de pedaços muito grandes de pavimentos que impossibilitam o uso imediato. No fim da década de 70, surgiram novos equipamentos chamados de fresadoras, que iniciaram a técnica de fresagem. Segundo o DNIT-700 (1997), a fresagem consiste em desbastar mecanicamente uma superfície de um pavimento asfáltico nivelando e perfilando, para assim receber uma nova camada. As modernas fresadoras são veículos motores compostos de tambores rígidos chamados de cilindro fresador, onde são fixados ordenadamente dentes de corte (*bites*). Este tambor gira sobre alta rotação chocando os *bites* sobre a superfície de corte, causando o desbaste do pavimento e a redução da granulometria, produzindo assim o RAP (BONFIM, 1999). Uma correia posicionada coleta este material e encaminha para o seu devido carregamento.

Na reciclagem a quente em usina, o RAP é levado para uma usina onde pode passar ou não pelo processo de beneficiamento, peneiramento e rebitagem (se necessário para se obter maiores quantidades de determinada granulometria), e é adicionado aos agregados no processo de usinagem das misturas asfálticas a quente convencionais. Usinas gravimétricas convencionais podem ser utilizadas. O local onde o RAP é misturado aos agregados virgens influenciará na proporção de RAP/Agregado. Segundo Brosseaud (2011), se a mistura for realizada na base do elevador a quente, a proporção de RAP adicionado na mistura pode variar entre 5 e 15%. Caso a mistura seja feita no tambor secador misturador, a proporção varia entre 30 e 50%. Por fim, caso sejam utilizados dois tambores para mistura, um somente para o RAP e outro para os agregados minerais, este valor varia entre 65 e 75%.

As reciclagens a quente *in situ* devem ser executas com recicladoras apropriadas que fresam o revestimento e aquecem o RAP, adicionam os agregados e os materiais de

enchimento (fíler), o ligante adicional e os aditivos necessários, usina-se esta mistura e, através de uma vibroacabadora acoplada, faz-se o espalhamento para em seguida realizar-se a compactação como uma mistura de CA convencional. Este procedimento é normatizado no Brasil pela norma DNIT-ES 034/2005. Entretanto, esta técnica vem caindo em desuso no Brasil e no mundo devido à heterogeneidade da mistura resultante, que se deve à variabilidade de condições do revestimento fresado, e assim a necessidade de constantes calibrações do processo e dificuldade de controle de qualidade.

As reciclagens a frio em usina e *in situ* são processos que em o RAP é reutilizado sem a adição de energia térmica. Este assunto será discutido com mais detalhes nos próximos itens. A reciclagem profunda é realizada com a fresagem incluindo as camadas inferiores ao revestimento. Nesse processo o RAP pode ser incorporado à base fresada, formando um novo material, com a possibilidade de se adicionar estabilizadores hidráulicos ou betuminosos para uma melhora nas características mecânicas do material.

Mais recentemente, vem sendo estudada e usada a reciclagem morna, na qual é incorporado cerca de 10 a 40% de RAP a uma mistura asfáltica morna (WMA – *Warm Mix Asphalt*). Vários aspectos ainda precisam ser respondidos para a consolidação desta nova técnica como (i) o desenvolvimento de um método de dosagem para estas misturas (ii) durabilidade e desempenho mecânico (iii) efeito da remobilização do ligante envelhecido e (iv) a influência dos aditivos para a produção das misturas mornas, entre outras questões. Maiores detalhes desta técnica podem ser vistos em Genesseeux (2015).

A reutilização do RAP vem sendo largamente difundida, tanto pela questão ambiental, através da necessidade de se dar uma destinação sustentável a este resíduo, por exemplo como exigido na Lei 14.015/2005 da Prefeitura de São Paulo, quanto pela questão econômica, já que este material é composto por materiais minerais nobres e ligante asfáltico envelhecido.

O RAP proveniente de uma fresagem não possui a granulometria homogênea, sendo diferente da granulometria utilizada para os agregados da mistura de concreto asfáltico do pavimento original. Esta variação é dependente do tipo de equipamento utilizado na fresagem, espessura de fresagem e velocidade de avanço da fresadora (BONFIM, 1999). Em alguns casos, em que o RAP proveniente da fresagem possui alta quantidade de grumos ($\varnothing \geq 25,0$ mm), a Asphalt Academy (2009) recomenda que estas partículas devem ser retiradas da composição da mistura, podendo ser britadas para obtenção de material de menor dimensão. Metodologias para classificação do RAP pode ser observado em Tebaldi *et al* (2012) e Hajj *et al* (2014).

A reciclagem de pavimentos a frio é definida como o processo no qual a mistura asfáltica é executada sem a adição de calor *in situ* ou em usina. Geralmente as misturas são compostas com a predominância de RAP, a adição de agregado virgem de granulometria mais fina para adequação granulométrica. Para estabilização dos agregados, faz-se a adição de emulsão ou espuma de asfalto, podendo ainda ser tratada com ligantes hidráulicos como cimento Portland ou cal hidratada ou estabilizantes químicos, além de água para a hidratação e lubrificação.

As misturas a frio podem ser executadas no campo ou em usina, mas deve-se sempre preferir pelo processo em usina, pois este agrega inúmeros benefícios, tais como: (i) visualização do fundo da caixa, que permite a avaliação da camada inferior, necessidade de dreno e correção de defeitos existentes, (ii) beneficiamento do material fresado, correção granulométrica, rebitagem se necessário, (iii) processo de dosagem preciso, e (iv) maior controle da mistura resultante.

Os primeiros registros da execução de reciclagem de pavimentos são de 1900 nos Estados Unidos, onde se utilizava um processo de reciclagem a frio (ARRA, 2001), sendo até hoje um dos métodos preferidos para recuperação de estradas devido ao menor custo comparado aos demais métodos (WIRTGEN, 2004a). Segundo a ARRA, a reciclagem a frio possui inúmeras vantagens; dentre elas podemos citar: (i) a economia de energia comparada aos outros métodos de reconstrução, (ii) a correção de

problemas de granulometria e/ou ligante asfáltico, (iii) ganho estrutural significativo, (iv) altas taxas de produtividade; entre outras.

O primeiro registro da utilização de reciclagem de revestimentos betuminosos foi na cidade do Rio de Janeiro em 1960 (CASTRO, 2003). Nos anos 80 e 90 foram executados vários trechos monitorados com a utilização do RAP em reciclagens nas rodovias Anhanguera (SP-330), Dutra (BR-116) e Anchieta (SP-150) (DAVID, 2006). Nos anos 90, com o uso de recicladoras móveis iniciou-se a realização de reciclagem a frio *in situ*, no Brasil a primeira experiência foi realizada na BR-393 com o uso de emulsão asfáltica como estabilizante.

Há duas formas de se considerarem os materiais estabilizados com agentes betuminosos de acordo com o seu comportamento em campo. Em uma delas, considera-se que a emulsão betuminosa aplicada interage com o ligante asfáltico envelhecido que está aderido ao redor das partículas de agregados do RAP. Nesse caso, as considerações para os projetos de mistura seguem o método Marshall tradicional (com corpos de prova com diâmetro de 100 mm). No segundo caso, considera-se que o processo de estabilização se assemelha à tecnologia aplicável a materiais granulares, com o emprego da compactação tipo Proctor. Os procedimentos do projeto de mistura utilizam as propriedades de resistência, pois considera-se o material como sendo essencialmente um material granular. Nessa situação, as camadas dos pavimentos executadas com materiais estabilizados com ligante asfáltico são preferencialmente mais espessas que 100 mm (WIRTGEN, 2004b).

2.4. Reciclagem com Emulsão Asfáltica

A reciclagem a frio com emulsão asfáltica consiste no uso da emulsão como agente estabilizador do RAP. Como a emulsão é líquida na temperatura ambiente e não necessita de aquecimento do agregado para a sua utilização, essa reciclagem é chamada de reciclagem a frio.

A emulsão asfáltica quando em contato com os agregados se dispersa entre os agregados finos, mas também envolve, de certa forma, os agregados graúdos, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Aspecto da dispersão da Emulsão Asfáltica nos agregados em uma amostra de RAP+Emulsão

A Emulsão Asfáltica é o produto da dispersão de água em Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e agente emulsificante. O processo de emulsificação ocorre a partir da quebra por cisalhamento das partículas de asfalto em pequenos glóbulos enquanto um agente estabilizador dissolvido em água é adicionado, mantendo as duas fases em equilíbrio e conferindo assim estabilidade à emulsão. O agente emulsificante é uma substância química tensoativa que diminui a energia superficial e aumenta a área interfacial entre as fases, conferindo cargas elétricas entre as moléculas (ADEBA, 2010).

Quando a emulsão asfáltica entra em contato com o agregado mineral ocorre a ruptura da emulsão, que passa da cor marrom para cor preta. A ruptura da emulsão pode ser fruto de uma reação química gerada durante a atração eletrostática entre o

emulsificante e o agregado, nas emulsões catiônicas, ou da evaporação da água nas emulsões aniônicas e não iônicas (ADEBA, 2010).

Em campo a mistura estabilizada com emulsão asfáltica apresenta uma boa coesão inicial, o que permite a liberação ao tráfego em poucas horas depois de se verificar a quebra da emulsão na superfície da camada e o aumento da coesão. Cuidados devem ser tomados para não desgastar a superfície da camada, executando-se, por exemplo, como o salgamento com material fino ou execução de tratamento superficial.

2.4.1. Especificações de características físicas, químicas, de resistência e de deformabilidade

A reciclagem a frio com emulsão asfáltica não é normatizada nacionalmente, embora numerosas obras estejam sendo realizadas. As aplicações nacionais da reciclagem com emulsão têm sido embasadas na experiência da África do Sul, através da aplicação dos conceitos constantes no TG-2 (ASPHALT ACADEMY, 2009), e do Manual da Wirtgen (2013).

Pode-se estabilizar agregados virgens, cascalhos, solos, camadas granulares recicladas, e RAP. A Tabela 5 apresenta as granulometrias recomendadas pela Asphalt Academy (2009) e a faixa de uso da Wirtgen (2013). A Asphalt Academy (2009) ainda indica uma faixa menos adequada para uso, pois é mais fina, mas que ainda assim pode ser aplicada.

Tabela 5 - Faixas granulométricas sugeridas para estabilização com Emulsão Asfáltica

Peneira de malha quadrada		% em Massa, Passando	
ASTM	mm	Asphalt Academy	Wirtgen
2"	50,0	100	100
1 1/2"	37,5	87-100	87-100
1"	26,5	77-100	76-100
3/4"	19,5	66-99	65-100
0,530"	13,2	67-87	55-90
3/8"	9,6	49-74	48-80
0,265"	6,7	40-60	41-70
Nº 4	4,75	35-56	35-62
Nº 8	2,36	25-42	25-47
Nº 16	1,18	18-33	18-36
Nº 30	0,6	12-27	12-27
Nº 40	0,425	10-24	10-24
Nº 50	0,3	8-21	8-21
Nº 100	0,15	3-16	3-16
Nº 200	0,075	2-9	2-10

Pela forma com que a emulsão se dispersa nos agregados, as faixas granulométricas para a estabilização com emulsão asfáltica exigem ao menos 2,0% de fíler, entendido aqui como o material passante na peneira Nº200 (0,075 mm). Cuidado deve ser tomado com o aumento de finos em demasia pois demandará maior quantidade de emulsão.

A emulsão utilizada deve ser compatível ao pH do agregado, pois há incompatibilidade entre emulsão aniônica e alguns tipos de agregados.

O TG-2 (ASPHALT ACADEMY, 2009) adota: a resistência à tração indireta (ITS do inglês *Indirect Tensile Strength*); DUI (Dano por Umidade Induzida) chamado de ITS_{wet}; o triaxial monotônico (STT do inglês *Simple Triaxial Test*), como forma de avaliação das condições físicas de resistência do material (coesão e ângulo de atrito); e a coesão remanescente (MIST - *Moisture Induction Simulation Test*), que é a razão entre a coesão húmida, obtida no ensaio monotônico triaxial úmido, e pela coesão seca. A Tabela 6 mostra os parâmetros de análise dos ensaios e as categorias de aplicação.

Tabela 6 - Parâmetros para o material estabilizado com emulsão asfáltica

Parâmetro	Corpo de Prova (mm)	BSM-1	BSM-2	BSM-3
ITS (kPa)	100 x 63,5	> 225	175 a 225	125 a 175
ITSwet (kPa)	100 x 63,5	>100	75 a 100	50 a 75
Coesão (kPa)	150 x 300	> 250	100 a 250	50 a 100
Ângulo de atrito (°)		> 40	30 a 40	< 30
Coesão Remanescente (MIST)		> 150	50 a 150	< 50

O BSM-1 é aplicável em rodovias com tráfego superior a 6 MESA (*Million Equivalent Standard Axels*), o BSM-2 para menores que 6 MESA e o BSM-3 para rodovias com tráfego menor que 1 MESA. Para aplicação nas rodovias nacionais recomenda-se que se aplique os parâmetros para a categoria BSM-1.

2.4.2. Produção, Transporte e execução

O processo de execução de misturas estabilizadas com emulsão asfáltica é feito com a seleção dos agregados e a adequação da granulometria. No processo de reciclagem com emulsão asfáltica é necessário avaliar a granulometria do RAP, observando a quantidade mínima de fíler ($\geq 2,0\%$). A correção granulométrica pode ser executada em usina misturadora e a adição de fíler e a da emulsão asfáltica em um *pugmill*.

No transporte do material da usina ao local da obra deve-se tomar cuidado para que não ocorra a ruptura da emulsão asfáltica antes da execução da compactação. O transporte pode ser realizado por caminhões basculantes, devendo ser feito cuidadosamente para se evitar a segregação da mistura, diminuindo a altura de queda da mistura no momento do carregamento e descarregamento do caminhão. Deve-se tomar especial cuidado para evitar a formação de pilhas em formatos cônicos quando o material é descarregado sobre a pista, pois isto favorece a desagregação.

O espalhamento pode ser executado em múltiplas camadas através de vibroacabadora, sempre que possível, pois minimiza a segregação e a perda de umidade, entretanto ainda se utilizada corriqueiramente a motoniveladora. A compactação é executada por rolos de pneus e/ou lisos, com ou sem vibração.

Com a conclusão da compactação e com a superfície acabada, é recomendável que não se sele a camada de superfície, pois o material é dependente da perda de água para obter ganho de rigidez. O tráfego sob a superfície acabada não é recomendado, e só pode ser liberado com a realização do tratamento da camada superficial, como o salgamento da superfície ou a execução de tratamento superficial.

Estudos demonstram que o processo de cura e ganho de resistência das misturas estabilizadas com emulsão e espuma de asfalto acontecem ao longo do tempo com a redução da umidade interna. Estes materiais ganham resistência desde o momento da compactação até o momento que a umidade interna se estabiliza. Na construção de uma nova camada, o tráfego inicial poderá causar deformações permanentes precoces, mas esta solicitação é importante para diminuir o teor de umidade e aumentar o grau de compactação como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Ganho de rigidez pela perda da umidade interna com o tempo (Adaptado de(WIRTGEN, 2013))

Este efeito já foi abordado por Jenkins (2000), onde o ganho de rigidez e resistência foi atribuído como sendo causado pela evapotranspiração da água e o aumento da

pressão negativa, ou tensão de sucção, devido à poro-pressão. Existem outras teorias para a explicação do fenômeno da cura, mas esta abordada por Jenkins é uma das mais aceitas (ASPHALT ACADEMY, 2008).

2.5. Reciclagem com Espuma de Asfalto

A reciclagem com espuma de asfalto é o processo em que o CAP é espumado para que se consiga uma dispersão homogênea em temperatura ambiente ao ser misturado ao RAP. A espuma ao entrar em contato com os agregados entra em colapso e se espalha em pequenas gotículas de ligante na mistura. Essas gotículas se ligam às partículas finas e formam um mástique (agregados miúdos, fíler, ligante e água), que quando compactado funcionará como pequenas pontes de ligação entre os agregados, como pode ser verificado na Figura 4.

Figura 4 - Aspecto da dispersão da Espuma de asfalto nos agregados em uma amostra de RAP+Espuma

A formação da espuma de asfalto acontece através da injeção de água, cerca 2,0 a 3,0% em peso, e ar sob pressão de 4,0 bars ao CAP aquecido (entre 160°C e 180°C), aumentando a área de superfície e reduzindo a viscosidade do asfalto, Figura 5.

Figura 5 - Produção da espuma de asfalto (WIRTGEN, 2013)

Quando a água sob pressão entra em contato com o CAP aquecido ocorre uma evaporação instantânea das gotas de água, o vapor de água e o asfalto se misturam, e sob pressão são direcionados à câmara de expansão. Na câmara de expansão a mistura se expande, formando bolhas de asfalto contidas pela tensão superficial do ligante asfáltico. A perda de temperatura das bolhas de asfalto em contato no momento em que a mistura entra em contato com o ar externo, faz com que haja a condensação das gotículas de água internamente, causando o rompimento das bolhas e fazendo com que a espuma se espalhe em micro gotículas de asfalto.

A determinação do teor de água adicionada é em função de duas propriedades do asfalto espumado: a Taxa de Expansão (ER, do inglês *Expansion Ratio*), que é a medida de quantas vezes o CAP expandiu em forma de espuma, de seu volume

original; e o Tempo de Meia-vida ($T_{1/2}$, do inglês *Half-life*), que é o tempo em que a espuma de asfalto diminui pela metade de seu volume máximo de expansão.

Essas duas propriedades são fundamentais para a avaliação da qualidade da espuma de asfalto. Com o aumento da taxa de expansão, a viscosidade do asfalto diminui, melhorando a aglutinação do asfalto nas partículas de agregado. Um maior valor de meia-vida, por sua vez, implica em garantir mais tempo disponível para a realização da mistura entre a espuma de asfalto e os agregados.

Uma maior quantidade de água usada para espumar o asfalto implica no aumento da taxa de expansão, pois diminuirá a viscosidade do asfalto, reduzindo o tempo de meia-vida. Isto ocorre pois com menor viscosidade, menos estável tende a ser a espuma. Dessa forma busca-se o equilíbrio entre a maior taxa de expansão e o maior tempo de meia-vida. A Figura 6 ilustra uma avaliação de um CAP.

Figura 6 – Exemplo gráfico de avaliação taxa de expansão x meia vida (WIRTGEN, 2004b)

2.5.1. Especificações de características físicas, químicas, de resistência e de deformabilidade

A norma Brasileira, DNIT-ES 169/2014, para utilização de espuma de asfalto na execução de camadas de base, somente prevê uso em reciclagem de pavimentos, não permitindo a utilização para estabilização de outros materiais como a TG-2 (ASPHALT ACADEMY, 2009).

A norma do DNIT especifica que o CAP usado para produção da espuma deve ser dos tipos CAP 50/70, 85/100 ou 150/200. A bibliografia da Wirtgen (2013) recomenda que o CAP utilizado para produção de espuma de asfalto possua penetração entre 60 e 200, enquanto pela Asphalt Academy (2009) deve possuir penetração entre 80 e 100. Ambos concordam que quanto mais duro é o asfalto, pior será a qualidade da espuma, não sendo recomendada a utilização de CAP modificado por polímeros, pois muitos agentes modificantes são geralmente antiespumantes.

A taxa de expansão deve ser de no mínimo 8,0 vezes, e o tempo de meia-vida deve ser superior a 6,0 segundos.

Quando a espuma de asfalto é misturada aos agregados, as micro gotículas de asfalto se ligam às partículas finas (< #200) da mistura de agregados formando o masticue. Dessa forma, para correção granulométrica usualmente recomenda-se ao menos 4% em massa de material passante na peneira #200 (0,075 mm). A Tabela 7 apresenta as faixas granulométricas para estabilização de materiais reciclados com espuma de asfalto do DNIT DNIT-ES 169/2014, da Wirtgen (2013) e da Asphalt Academy (2009).

Tabela 7 - Faixas granulométricas sugeridas para estabilização com Espuma de Asfalto

Peneira de malha quadrada		% em Massa, Passando		
ASTM	mm	DNIT	Asphalt Academy	Wirtgen
2"	50,0	100	100	100
1 1/2"	37,5	88-100	87-100	87-100
1"	26,5	75-100	77-100	76-100
3/4"	19,5	66-99	66-99	65-100
0,530"	13,2	-	67-87	55-90
1/2"	12,7	55-87	-	-
3/8"	9,6	49-74	49-74	48-80
0,265"	6,7	-	40-62	41-70
1/4"	6,3	40-62	-	-
Nº 4	4,75	35-56	35-56	35-62
Nº 8	2,36	25-42	25-42	25-47
Nº 16	1,18	18-33	18-33	18-36
Nº 30	0,6	14-28	14-28	13-28
Nº 40	0,425	12-26	12-26	11-25
Nº 50	0,3	10-24	10-24	9-22
Nº 100	0,15	7-17	7-17	6-17
Nº 200	0,075	5-20	4-10	4-12

Observe-se que a norma do DNIT recomenda uma fração passante na peneira #200 de 5% a 20% em massa, o que é um equívoco, pois na peneira #100 a porcentagem passante está entre 7% e 17%.

Normalmente o RAP, resultante somente de fresagem sem nenhum beneficiamento, não apresenta uma granulometria que se encaixe nas faixas apresentadas na Tabela 7 (ambas com o mesmo limite inferior 4%), assim é convencionalmente empregada a adição de agregados miúdos e de fíler para corrigir a granulometria da mistura.

A norma do DNIT somente adota a resistência à tração indireta seca e úmida em corpo de prova Marshall para avaliação da qualidade da mistura, enquanto a TG-2 (ASPHALT ACADEMY, 2009) adota parâmetro do ensaio triaxial monotônico. A Tabela 8 apresenta os parâmetros destas diferentes normas.

Tabela 8 - Parâmetros para o material estabilizado com espuma de asfalto

Parâmetro		Corpo de Prova (mm)	Parâmetro
DNIT	RT seco (Mpa)	100 x 63,5	>0,25
	RT saturado (Mpa)		>0,15
TG-2	ITS (kPa)	100 x 63,5	> 225
	ITSwet (kPa)	100 x 63,5	>100
	Coesão (kPa)	150 x 300	> 250
	Ângulo de atrito (°)		> 40
	Coesão Remanescente (MIST)		> 150

2.5.2. Produção, Transporte e Execução

O processo de execução de misturas estabilizadas com espuma de asfalto é bem semelhante ao processo de execução da camada de emulsão asfáltica. O que se altera no processo é a quantidade de fíler necessário, que deve ser superior a 4%, e o *pugmill*, que deve possuir os bicos adequados para produção da espuma de asfalto.

2.6. Trechos Experimentais

Ao longo dos anos, diversas pistas experimentais, como a da AASHO, foram construídas com o objetivo de avaliar o desempenho de pavimentos. A partir desses projetos, diversos estudos (LEANDRI *et al*, 2013, TIMM, 2009, FRITZEN, 2016), foram desenvolvidos, permitindo formular novos conceitos e metodologias que hoje fundamentam muitos aspectos da infraestrutura de transportes, como o conceito de serventia e métodos de dimensionamento de pavimentos, entre outros.

Um dos maiores experimentos da história da pavimentação, como já mencionado, foi a pista experimental da *American Association of State Highway Officials* (AASHO), construída na década de 1960, na cidade de Ottawa, Illinois, EUA (Roberts et al., 1996). A execução desta pista promoveu a realização de inúmeros estudos, que avaliaram a influência de diferentes materiais de pavimentação, a atuação do clima nos mesmos, o efeito das cargas do tráfego sobre os danos aos pavimentos, além da concepção dos fatores de equivalência de carga.

Para a pista experimental da AASHO, seis circuitos foram construídos, dos quais apenas o primeiro foi destinado à avaliação dos efeitos climáticos, enquanto os outros cinco foram utilizados para atuação do tráfego. Foram executadas diferentes seções variando a combinação entre tipos de material de revestimento, base e subbase. Dentre os revestimentos foram executados trechos com revestimento asfáltico (flexível) e de concreto (rígido). Quatro tipos de camada de base foram construídas: BGS, base composta de agregado natural não britado e bases tratadas com cimento e com ligante asfáltico. Para a camada de subbase, por sua vez, foi utilizada uma mistura de areia com agregado natural não britado (Benkelman et al., 1962). A pista experimental da AASHO permitiu o desenvolvimento do conceito de serventia, bem como um método de dimensionamento empírico das estruturas de pavimentos que levasse em consideração o aspecto estrutural e funcional dos mesmos, método este bastante difundido.

Em 1989, o *Strategic Highway Research Program* (SHRP) foi aprovado no Congresso dos EUA, correspondendo a um programa de US\$ 150 milhões voltado para a melhoria da infraestrutura rodoviária. Dentre as quatro áreas de pesquisa envolvidas, destaca-se o *Long-Term Pavement Performance* (LTPP), com o objetivo de formular um banco de dados sobre o desempenho de pavimentos no âmbito nacional norte-americano. O LTPP, que desde 1992 é de responsabilidade da *Federal Highway Administration* (FHWA), conta com a participação de 15 países, com a coleta de dados de mais de 1000 seções de pavimento ao longo de todo os EUA e o Canadá. Diversas informações são levantadas continuamente, tais como bacias de deflexão por *Falling Weight Deflectometer* (FWD), seções transversais de pavimento, aderência, manutenção, reabilitação, clima, tráfego, entre outras. Além disso, diversos tipos de pavimento são avaliados, a saber: concreto asfáltico sobre base granular, concreto asfáltico sobre base estabilizada, concreto continuamente armado, concreto simples com junta de transferência, entre outros (HUANG, 2004).

Em Atenas, estudos desenvolvidos por Papavasiliou e Loizos (2013) investigaram os efeitos da cura em camadas de base estabilizadas com espuma de asfalto ao longo de dois anos de monitoramento *in situ* da rigidez a partir do FWD. Com o decorrer do

tempo, observou-se em campo um aumento significativo da rigidez como resultado da cura e consequente diminuição das bacias de deflexão obtidas pelo FWD. Mesmo quatro anos após a execução da camada, a rigidez da camada ainda era crescente. Este estudo vem colaborar com o apresentado por Jenkins (2000), que engloba a utilização de espuma de asfalto e emulsão.

Em 2013, duas pistas experimentais foram construídas na Itália a partir do projeto de pesquisa “*Leopold Research Project*”, porém em locais diferentes. Ambas as pistas possuem um sistema de instrumentação composto por *strain gauges*, células de pressão, termômetros além de um sistema de pesagem em movimento, denominado *Weigh in Motion* (WIM). Por outro lado, tais pistas diferem principalmente em relação ao tipo de material de base utilizado. A primeira, localizada na cidade de Lucca, é composta por agregado reciclado a frio e estabilizada com emulsão. A segunda, por sua vez, está situada na cidade de Pisa e corresponde a uma base de agregado reciclado a frio, mas estabilizado com espuma asfáltica. Considerando o caráter viscoelástico na modelagem desses materiais no software *ViscoRoute 2.0*, Leandri *et al.* (2014) observaram que ambas as misturas, com emulsão e espuma, não apresentaram uma correlação satisfatória entre as medidas provenientes da instrumentação e da modelagem. Constatou-se que a rigidez desses materiais possui menor dependência da variação de temperatura e frequência de carregamento quando comparados com misturas asfálticas convencionais, sendo assim, mais elásticas e menos viscosas.

No Brasil, o exemplo mais representativo da utilização de pistas experimentais é o Projeto Rede Temática de Asfalto financiado pela Petrobras e que conta com o auxílio de diversas universidades nacionais, abrangendo 19 estados brasileiros. O projeto teve início em 2006, sendo concebido com o objetivo de projetar, construir e monitorar diversos trechos experimentais espalhados pelo território nacional, permitindo a coleta de dados de maneira sistemática para a elaboração de um banco de dados que possibilitaria a correlação com resultados de ensaios laboratoriais, desenvolvimento de novos modelos de desempenho e equações de dimensionamento, entre outros.

Diversos estudos vêm sendo elaborados em função dos dados da Rede Temática. Santiago e Soares (2015) avaliaram novas considerações a serem realizadas para o desenvolvimento de um novo método de dimensionamento. Dentre as principais considerações destacam-se: representações mais completas dos dados de tráfego (espectros de carga), inserção de dados do clima (temperatura, umidade do ar, pluviometria) e necessidade do melhor entendimento do módulo dinâmico em todo o meio rodoviário brasileiro.

Dentro do Projeto da Rede Temática, a Estrada do Leite foi construída, sob coordenação do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP. O primeiro trecho construído é composto de 3 segmentos distintos, variando o material da camada de base. Dentre os tipos de material utilizados é possível mencionar o solo-brita, solo-brita-cimento e solo-cimento. O segundo trecho, por sua vez, é constituído de apenas 2 segmentos, com variação no tipo de ligante empregado (CAP 30/45 e CAP 50/70) na camada de revestimento asfáltico (Fritzen, 2016).

A COPPE/UFRJ executou três trechos experimentais com utilização de diferentes misturas asfálticas: (i) concreto asfáltico convencional, (ii) concreto asfáltico de alto módulo e (iii) concreto asfáltico morno. Diversos levantamentos foram realizados a fim de monitorar o desempenho funcional e estrutural dos trechos em questão, como levantamentos deflectométricos (FWD), levantamento visual de defeitos, irregularidade (Perfilômetro a laser), atrito, afundamento em trilha de roda, macrotextura e extração de corpos de prova. Essas medidas permitiram calibrar e validar um modelo de previsão do dano por fadiga (Função de Transferência) proposto no trabalho de Fritzen (2016).

3. AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS

Os pavimentos, quando bem dimensionados, executados, e compostos por materiais de boa qualidade, não sofrem rupturas frágeis e súbitas. Porém sofrem degradação contínua e acumulativa em função da aplicação de carga devido à ocorrência de tráfego e atuação do clima. Assim, os programas de gerência de pavimentos se baseiam em avaliações contínuas de pavimentos, que fornecem informações sobre os estados de conservação, monitorando critérios funcionais, como a ocorrência de defeitos, e parâmetros estruturais, que estão associados aos danos ligados à capacidade de carga do pavimento (HAAS, 1994).

A avaliação continuada de pavimentos visa subsidiar o planejamento e a tomada de decisões para execução de intervenções assertivas, visando um melhor desempenho do pavimento, além de promover padrões de conforto, segurança e capacidade estrutural da estrutura. As opções de intervenção que podem ser indicadas pelos programas de gerência de pavimentos são: (i) Não intervir, (ii) Manutenção preventiva ou corretiva, (iii) Reforço estrutural, e (iv) Reconstrução (DNIT, 2011). A tomada de decisões por uma das opções é subsidiada por avaliações funcionais e estruturais.

As avaliações funcional e estrutural têm igual importância e se complementam. Um pavimento com baixo nível de serventia indica a necessidade de uma avaliação funcional, podendo estar estruturalmente fraco com necessidade de substituição ou sobreposição de determinada camada.

A avaliação funcional tem o objetivo de quantificar a capacidade do pavimento, de proporcionar conforto ao rolamento aos usuários, de forma rápida, segura e confortável, resultado da interação entre a condição de superfície do pavimento e a dinâmica do veículo. Uma das primeiras avaliações funcionais sistemáticas foi desenvolvida na pista de teste da AASHO, em que se utilizou o índice PSR e a irregularidade longitudinal por meio do perfilômetro CHLOE (*Carey, Huckins, Leathers and Others Engineers*).

Atualmente, os métodos para quantificar as características funcionais consideram o levantamento de defeitos, a irregularidade da superfície nos perfis longitudinal e transversal e a ocorrência de deformações plásticas em trilha de roda.

No Brasil a avaliação funcional é normatizada pela norma DNIT-PRO 007/1994, que estabelece a avaliação subjetiva, atribuindo uma nota ao pavimento, e pela norma DNIT-PRO 008/1994, em que se quantifica numericamente os defeitos e a sua severidade, visíveis na superfície do pavimento.

A execução de uma avaliação estrutural possui vários objetivos, entre eles se destaca a determinação da rigidez e a vida remanescente do pavimento sob as condições de tráfego esperadas. Esse tipo de avaliação consiste na adoção de métodos para se conhecer características de rigidez e deformabilidade das camadas que compõem o pavimento, além das espessuras e os materiais que compõem as respectivas camadas. Pode ser executada de forma destrutiva, com a abertura de janelas e retirada de corpos de prova, e não destrutiva, com a realização de ensaios defletoométricos. Pode-se realizar a avaliação das espessuras e naturezas das camadas por meio do *Ground Penetration Radar (GPR)*.

3.1. Comportamento estrutural e ocorrência de defeitos

Segundo Balbo (2007), os pavimentos apresentaram, durante sua vida de serviço, diversas manifestações patológicas, funcionais e estruturas, que estão diretamente ligadas aos materiais componentes das estruturas e as respostas mecânicas ocorrentes. O material empregado na camada de base exerce grande influência no comportamento do pavimento, imputando à camada de revestimento o seu comportamento.

Nos pavimentos flexíveis, a camada de revestimento asfáltico está sujeita à flexão, com a linha neutra separando a parcela que trabalha sob compressão máxima e sob tração máxima (máxima aqui quer dizer quando a carga de roda está sobre o ponto de

análise). Tem-se, nestas condições compressão no topo e tração no fundo da camada. Repetições das tensões de tração pode levar à ocorrência do processo de trincamento por fadiga do revestimento asfáltico. A base granular fica submetida à compressão por confinamento em toda a sua profundidade. Além disso, ocorrem as tensões verticais de compressão em todas as camadas do pavimento, que podem acarretar a ocorrência de afundamento por acúmulo de deformação permanente.

Nos pavimentos semirrígidos, ou nas estruturas em que a camada de revestimento está apoiada e aderida a uma camada de base de elevada rigidez, não há a existência de linha neutra no revestimento asfáltico. A alta rigidez da camada de base de elevada espessura, aderida ao revestimento asfáltico de espessura em geral inferior à da base, faz com que o revestimento trabalhe à compressão submetendo a camada de revestimento somente a esforços de compressão. Na camada de base, as fibras superiores encontram-se comprimidas enquanto as inferiores estão tracionadas.

Nestes pavimentos ocorrerá inicialmente fadiga da camada de base, e formação de trincas em formato de blocos, com respectiva reflexão destas para a camada de revestimento. A medida em que estas trincas evoluem, a rigidez da camada decresce, pois a camada cimentada tende a trabalhar em forma de blocos. Isto faz com que a linha neutra se desloque e possa até chegar na camada de revestimento, iniciando outro processo de dano que é a fadiga do revestimento asfáltico.

3.2. Levantamento deflectométrico

Viga Benkelmam

O ensaio deflectométrico de Alvim Benkelman, do *Bureau of Public Roads*, resultou no desenvolvimento do ensaio de Viga Benkelman, sendo utilizada pela primeira vez nas pistas experimentais da WASHO, no Oeste dos EUA.

A Viga Benkelman é uma estrutura composta por duas partes e três apoios reguláveis. A primeira é uma sustentação fixa que deve se apoiar na superfície do pavimento,

sendo equipada por um extensômetro e um vibrador. A segunda é uma parte móvel, que funciona como um braço de alavanca, com uma ponta que se apoia na superfície do pavimento. Para a realização do ensaio, a ponteira da viga é posicionada entre um par de rodas do semi-eixo, de um veículo padrão estacionado, sem o eixo traseiro do tipo ESRD (Eixo Simples Roda Dupla), com lastro de 80 kN (8,2 tf) e pressão de pneus de 0,55 MPa (5,6 kgf/cm² ou 80 psi). A Figura 7 mostra um teste em andamento. Mede-se então a deformação inicial ou total, após o veículo se locomover por uma distância de 25,0 cm, e então realiza-se uma nova leitura. Este procedimento é repetido até que a viga não registre mais deslocamentos, pois o veículo estará em uma posição que não mais gera tensões e deslocamentos no ponto de leitura.

Figura 7 - Realização do ensaio de Viga Benkelman

Nos anos 60, os engenheiros rodoviários Nestor José Aratangy e Luiz Paulo Vicente Andreatini do DER/SP iniciaram a utilização da Viga Benkelmam no Brasil, divulgando seus primeiros resultados de medidas de deflexão em 1962 e Francisco Bolívar Lobo Carneiro em 1965. Ainda hoje esse equipamento é largamente utilizado, sendo normatizado pela norma DNER-ME 024/1994, e aplicada para avaliação de pavimentos através dos métodos DNER-PRO 010/1979, DNER-PRO 011/1979 e DNER-PRO 269/1997 (TECNAPAV).

FWD

O FWD é um equipamento deflectométrico de impacto, que registra os deslocamentos recuperáveis verticais que ocorrem na superfície do pavimento devido à ação de carga, e simula a passagem de um veículo com eixo padrão de 80 kN trafegando a uma velocidade entre 60 e 80 km/h. A carga pode ser alterada para verificação do seu efeito na linearidade de respostas e para simular outras condições.

Este equipamento submete o pavimento a uma determinada pressão dada pela queda de um conjunto de pesos de uma altura conhecida, sobre um prato circular, que pode ser de 30,0 ou 45,0 cm de diâmetro. A carga gerada pelo impacto dos pesos é registrada por uma célula de carga instalada no centro do prato. A partir deste carregamento mensuram-se os deslocamentos recuperáveis, deflexões ocorridas na superfície do pavimento, por meio de geofones posicionados no centro do prato e ao longo de uma haste de sustentação, como pode ser visto na Figura 8.

(a)

(b)

(c)

Figura 8 - Execução do ensaio de FWD, (a) Prato e Geofones, (b) Detalhe do equipamento, (c) Veículo em operação

O início da aplicação do FWD no meio rodoviário e aeroviário se deu na década de 80, mas no Brasil a utilização se iniciou nos anos 90, sendo normalizado pela DNER-PRO 273/1996. Hoje é largamente utilizado, pois obtém dados de toda a bacia deflectométrica, além de possuir boa acurácia e repetibilidade dos resultados, grande produtividade, possibilidade de variação de cargas, possuindo também um processo completamente automatizado, no qual a influência do operador é praticamente nula.

3.3. Parâmetros de análise da bacia de deflexão

A evolução da análise dos ensaios deflectométricos pode ser dividida em três fases, que são aplicadas a depender do nível de exigência do projeto. Na primeira fase avalia-se a deflexão máxima do pavimento e se aplicam métodos para determinação da vida remanescente da estrutura. A segunda fase se desenvolve a partir da observação de pavimentos com mesma deflexão máxima e comportamentos distintos. Por isso incrementaram-se análises de indicadores de capacidade estrutural, como o Raio de Curvatura (RC). Na terceira fase, avalia-se toda a bacia de deflexão juntamente com a adoção de teorias que avaliam o comportamento dos pavimentos *in situ* (WITCZAK, 1989 apud⁴ MACEDO, 1996).

Há na literatura diferentes parâmetros de bacia que complementam o já consagrado RC adotado pelo DNER-PRO/11-79, que foram desenvolvidos de forma a obter uma melhor indicação das propriedades das camadas dos pavimentos, como: (i) o parâmetro AREA da AASHTO (1993); (ii) os indicadores *Structural Curvature Index* (SCI); o *Base Damage Index* (BDI) e o *Base Curvature Index* (BCI) da África do Sul (SAPEN, 2014); e (iii) o *Curvature Factor* (CF) da AUSTROADS (2008), que podem ser observados pela Figura 9, entre outros parâmetros descritos em XU *et al.* (2002) e Kim e Park (2002).

⁴ WITCZAK, M. W., Uses And Misuses Of Pavement Deflection Data, 2nd International Symposium On Pavement Evaluation And Overlay Design, Brasil, 1989.

Figura 9 - Representação gráfica esquemática da bacia deflectométrica e os respectivos índices de curvatura (FERRI, 2013)

3.3.1. Raio de Curvatura (RC)

O raio de curvatura é definido como o ponto de arqueamento da bacia de deflexão que, em geral, em pavimentos flexíveis é o ponto mais crítico. No Brasil este é o único parâmetro adotado para verificação da integridade estrutural dos pavimentos flexíveis através da norma DNER-PRO 011/1979. O RC complementa a análise do D_0 na análise da capacidade estrutural do pavimento, os quais são grandezas inversamente proporcionais. Assim pavimentos com boa condição estrutural apresentam valores de deflexão máxima baixos e valores de raio de curvatura elevados.

O raio de curvatura é um parâmetro que indica a situação da capacidade da estrutura de pavimentos flexíveis em distribuir os esforços solicitantes para as camadas subjacentes. Horac (1987) propôs ainda um método para se estimar a tensão de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico de pavimentos flexíveis através da determinação do raio de curvatura.

A norma DNER-ME 024/1994, que determina a execução do ensaio de Viga Benkelman, apresenta a Equação 4 para o cálculo do RC, considerando que o ponto de arqueamento ocorre a uma distância de 25,0 cm do ponto de aplicação da carga.

$$RC = \frac{6250}{2 \times (D_0 - D_{25})}$$

Equação 4

Onde:

RC é o raio de curvatura (m);

D_0 é a deflexão máxima (0,01 mm);

D_{25} é a deflexão a 25,0 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

O raio de curvatura tem bastante sensibilidade à grande parte das mudanças nos parâmetros estruturais das camadas dos pavimentos. Entretanto, para variações no módulo do subleito, o raio de curvatura não apresenta boa correlação. Segundo Dehlen⁵ (1962) *apud* Horak (1987), o RC é dependente dos módulos das camadas superiores do pavimento, principalmente dos da base e sub-base.

3.3.2. Parâmetro AREA

O parâmetro AREA foi desenvolvido por Hoffman e Thompson (1981) que utilizaram a regra de Simpson para formular o parâmetro em função da localização dos sensores e de suas leituras na Equação 5.

$$AREA = 15 \times \left(1 + 2 \times \frac{D_{30}}{D_0} + 2 \times \frac{D_{60}}{D_0} + \frac{D_{90}}{D_0} \right)$$

Equação 5

Onde:

$AREA$ é o valor do parâmetro (cm);

D_0 é a deflexão máxima (0,01 mm);

D_{30} é a deflexão a 30,0 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

D_{60} é a deflexão a 60,0 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

D_{90} é a deflexão a 90,0 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

⁵ DEHLEN, G. L., (1961) The use of benkelman beam for the measurement of deflection and curvatures of a road surfasse between dual wheels. CSIR Special report. 1961.

A Equação 5 é expressa de acordo com a configuração do FWD americano. Como o FWD brasileiro possui geofones intermediários aos americanos (D_{20} , e D_{45}), propõe-se neste trabalho a Equação 6 para cálculo do parâmetro AREA para os levantamentos realizados com o FWD brasileiro.

$$AREA = 10 \times \left(1 + 1,5 \times \frac{D_{20}}{D_0} + 1,25 \times \frac{D_{30}}{D_0} + 1,5 \times \frac{D_{45}}{D_0} + 2,25 \times \frac{D_{60}}{D_0} + 1,5 \times \frac{D_{90}}{D_0} \right) \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

$AREA$ é o valor do parâmetro (cm);

D_0 é a deflexão máxima (0,01 mm);

D_{20} é a deflexão a 20,0 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

D_{25} é a deflexão a 25,0 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

D_{30} é a deflexão a 30,0 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

D_{45} é a deflexão a 45,0 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

D_{60} é a deflexão a 60,0 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

D_{90} é a deflexão a 90,0 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

Os resultados obtidos com a utilização das duas equações são bem próximos, havendo uma pequena variação, que indica a maior sensibilidade aos resultados do FWD brasileiro.

O parâmetro AREA é adotado no manual de AASHTO (1993) como forma de avaliar os pavimentos de concreto e, a partir de um ábaco em que se combina D_0 e o AREA, é possível determinar o valor do módulo de reação do subleito ($k-value$), e do módulo de elasticidade do concreto (E_{pcc}). Long e Shatnawi (2011) usam a metodologia apresentada pela AASHTO e um método algébrico apresentado por Hal *et al* (1997) para estipular o $k-value$ do subleito de pavimentos rígidos.

Para os pavimentos flexíveis o parâmetro AREA pode ser utilizado para determinar o módulo do subleito e o S_{Neff} (*Effective Structural Number* da AASTHO). Livneh (2010)

compara os métodos YONAPAVE, desenvolvido por Hoffman (2003), e o de método EVALIV. Este último usa o parâmetro AREA modificado, que acrescenta as leituras dos geofones D₁₂₀, D₁₅₀ e D₁₈₀ para o cálculo. Livneh chegou à conclusão de que o segundo método apresenta uma melhor confiabilidade que o primeiro.

A Tabela 9 apresenta os parâmetros de avaliação segundo o WSDOT (2005) para avaliação dos valores do AREA (LOPES *et al*, 2010).

Tabela 9 - Faixas do parâmetro AREA segundo WSDOT (2005)

Tipo de Pavimento	Parâmetro AREA (cm)
Pavimento de Concreto - CCP	60 - 90
Asfálticos espessos - CA > 12 cm	55 - 75
Asfálticos delgados	40 - 55
Flexíveis "fracos"	28 - 40

3.3.3. Índice de Curvatura da Superfície

O Índice de Curvatura da Superfície (SCI do inglês *Surface Curvature Index*) é definido como a diferença entre D₀ e D₃₀ (Equação 7). Este valor segundo Kim e Park (2002) e Kim e Ranjithan (2002) é o indicador mais sensível para evidenciar a situação da rigidez da camada de revestimento asfáltico.

$$SCI = D_0 - D_{30} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

SCI é o valor do parâmetro (0,01 mm);

D₀ é a deflexão máxima (0,01 mm);

D₃₀ é a deflexão a 30,0 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

Os valores de SCI superiores a 25×10⁻²mm indicam que a camada de revestimento é pouco resistente ou é de pequena espessura, pois é muito deformável. Kim e Park (2002) utilizam equações para determinar o módulo da camada de revestimento asfáltico através do SCI e da espessura conhecida do revestimento asfáltico.

3.3.4. Índice de Danos na Base

O Índice de Danos da Base (BDI do inglês *Base Damage Index*) é definido como a diferença entre D_{30} e D_{60} (Equação 8). Este valor, segundo Kim e Park (2000) e Kim e Ranjithan (2002) este indicador mostra a condição da base.

$$BDI = D_{30} - D_{60} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

BDI é o valor do parâmetro (0,01 mm);

D_{30} é a deflexão a 30,0 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

D_{60} é a deflexão a 60,0 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

Valores de BDI superiores a 40×10^{-2} mm indicam pavimentos pouco resistentes ou pavimentos com problemas estruturais. Kim e Park (2002) utilizam equações para determinar a tensão de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico de pavimentos flexíveis, e as tensões de compressão no topo da camada de base granular e no topo do subleito através do BDI e da espessura conhecida do revestimento asfáltico.

3.3.5. Índice de Curvatura da Base

O Índice de Curvatura da Base (BCI do inglês *Base Curvature Index*) é definido como a diferença entre D_{60} e D_{90} (Equação 9). Este valor, segundo Kim e Park (2000) e Kim e Ranjithan (2002) é o indicador para verificar a condição do subleito.

$$BCI = D_{60} - D_{90} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

BCI é o valor do parâmetro (0,01 mm);

D_{60} é a deflexão a 60,0 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

D_{90} é a deflexão a 90,0 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

Valores de BCI superiores a 10×10^{-2} mm indicam que o subleito possui CBR menor que 10% e indicam problemas estruturais no subleito. Kim e Park (2002) utilizam equações que através do BCI determinam o CBR do subleito.

3.3.6. Fator de Curvatura

O Fator de Curvatura (CF do inglês *Curvature Function*), preconizado pela AUSTROADS, é definido como a diferença entre D_0 e D_{20} (Equação 10). Segundo a AUSTROADS (2008), este é o melhor indicativo para prever a probabilidade de fissuração da camada de revestimento asfáltico de um pavimento flexível.

$$CF = D_0 - D_{20} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

CF é o valor do parâmetro (0,01 mm);

D_0 é a deflexão máxima (0,01 mm);

D_{20} é a deflexão a 20,0 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm);

3.4. Processo de retroanálise

O processo de retroanálise é o método que permite inferir os módulos de elasticidade (ou de resiliência em alguns casos) das camadas do pavimento e do subleito por interpretação das bacias de deflexões (Bernucci *et al*, 2008). Este procedimento é feito por meio de softwares capazes de formular análises mecanicistas que modelam as cargas e as estruturas, determinando assim as tensões, deslocamentos e deformações com a aplicação da Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE) proposta por Burmister no ano de 1945 (Balbo, 2007).

Para a realização de retroanálises das bacias deflectométricas levantadas por FWD, pode-se utilizar o software BAKFAA 2.0 (Gopalakrishnan e Manik, 2010). Trata-se de um programa desenvolvido pela FAA (*Federal Aviation Administration*) para a realização de retroanálises em pavimentos aeroportuários norte americanos, mas que pode ser

aplicado com mesma precisão em pavimentos rodoviários. O BAKFAA se baseia na TSCE e utiliza a função de mínimos quadrados para diminuir os desvios entre as bacias mensuradas e as calculadas, visando minimizar os erros do processo de retroanálise.

O processo de retroanálise resume-se em estimar o comportamento mecânico das camadas do pavimento através da comparação com modelos teóricos de sistema de camadas elásticas à luz da mecânica dos pavimentos. As espessuras reais das camadas executadas, o coeficiente de Poisson e as deflexões são dados de entrada necessários para a realização da retroanálise (FERRI, 2013).

4. TRECHO EXPERIMENTAL: CONSTRUÇÃO E CONTROLE TECNOLÓGICO

Por mais que os avanços tecnológicos permitam executar em laboratório a reprodução de fenômenos cada vez mais condizentes com a realidade, ainda há numerosas variáveis que, sozinhas ou em conjunto, são difíceis de serem reproduzidas de forma fidedigna. Na área dos pavimentos não é diferente, os fatores naturais do processo de construção e utilização das estruturas rodoviárias influenciam como um todo na eficiência do pavimento. Dessa forma, os modelos de dimensionamento e previsão de vida útil modernos são empírico-mecanicistas, isto é, casam o empirismo de análises de pistas testes e de testes laboratoriais, com avaliações teóricas baseadas na Teoria de Camadas Elásticas.

A utilização de pistas-teste é uma tendência, pois permite avaliar, em escala e condições reais de clima e tráfego, os materiais e métodos usados para execução dos pavimentos. Atualmente há na Europa (LEANDRI *et al*, 2013), nos Estados Unidos (TIMM, 2009), e inclusive no Brasil (FRITZEN, 2016), numerosos programas de monitoramento de pavimentos, para apoiarem o desenvolvimento de métodos de dimensionamento, modelos de previsão de vida útil e para testarem novos produtos.

4.1. Localização do trecho experimental

O Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da EPUSP participa de uma pesquisa, com apoio da ANTT e da Concessionária Autopista Fernão Dias - Arteris, na qual foi prevista a execução de um trecho experimental com 4 segmentos diferentes. O trecho experimental, Figura 10, foi executado na Rodovia Fernão Dias (BR-381) que faz a ligação entre os municípios de Guarulhos-SP, na região metropolitana de São Paulo-SP, e Confins-MG, na região metropolitana de Belo Horizonte-MG. Essa rodovia conta com 561,1km de extensão, constituindo-se em um importante corredor rodoviário que interliga dois grandes polos industriais do Brasil.

(a)

(b)

Figura 10 - Fotos do trecho experimental em operação, (a) placa de identificação, (b) vista do trecho

A rodovia Fernão Dias BR-381 é chamada assim em homenagem ao bandeirante paulista que explorou o território do atual estado de Minas Gerais em busca de esmeraldas, com traçado ainda muito próximo ao caminho à época percorrido. Com sua construção iniciada no segundo mandato de Getúlio Vargas (1950 a 1954), nomeada pela sigla BR-55 (BENATTI e ROCHA, 2011), só teve sua inauguração do trecho mineiro realizada em 1959 por Juscelino Kubitschek (PEREIRA, 2008), e a conclusão do trecho paulista em 1961. Em 2002 foi entregue pelo ex-presidente Fernando Henrique Cardoso à obra de duplicação. Em 2008 foi assinado um contrato de concessão de sua administração e conservação com a empresa OHL Brasil, sendo que há cerca de 4 anos está sob responsabilidade da ARTERIS (AUTOPISTA FERNÃO DIAS, 2015).

O trecho experimental foi executado na faixa dois do km 948 ao km 949 da pista sul da BR-381, sentido Belo Horizonte - São Paulo, no município de Extrema-MG, onde a pista é composta por duas faixas de rolamento por sentido, Figura 11. O trecho possui 400,0 metros, divididos em quatro segmentos de aproximadamente 100,0 metros cada, nos quais foram fixadas as espessuras e foram alterados os materiais de base para: (i) o segmento - 1 é um pavimento flexível composto de base de BGS, (ii) o segmento - 2 é um pavimento semirrígido composto com base de BGTC, (iii) o segmento - 3 é um pavimento com base composta por RAP estabilizado com Emulsão Asfáltica, (iv) e o segmento - 4 é um pavimento com base composta por RAP estabilizado com Espuma Asfáltica.

Figura 11 - Localização do Trecho Experimental (Google, 2015)

Todos os segmentos do trecho foram construídos sobre uma infraestrutura remanescente do pavimento anterior, constituído de camada de solo compactado de alta qualidade. Foi executada fresagem profunda de cerca de 370 mm, incluindo a camada de revestimento asfáltico e a da base. O revestimento asfáltico executado é o mesmo em todos os 4 segmentos tendo sido executado em duas camadas de 60,0 mm de espessura cada uma, composta por uma mistura com mesma distribuição granulométrica que a mistura asfáltica tipo CBUQ, faixa III-SPV 19,0 mm com ligante convencional tipo CAP 30-45 (ANP, 2005) - Figura 12.

4.2. Concepção estrutural

A rodovia Fernão Dias, no local de execução do trecho experimental, tem um tráfego de cerca de 7.000 veículos comerciais diariamente, o que representa aproximadamente 35% do volume de veículos que trafegam na rodovia. Para um período de projeto de 10 anos foi calculado pela *United States Army Corps of Engineers* (USACE) o número N de solicitações de eixo simples de roda dupla equivalente igual a $1,4 \times 10^8$, com base na série histórica de contagem de veículos da praça de pedágio, localizada no município de Vargem-SP, distante 6,0 km à montante do local do trecho experimental.

Os materiais para compor a estrutura do pavimento foram definidos conforme a proposta da pesquisa, sendo um pavimento flexível, um pavimento semirrígido e dois pavimentos com base asfáltica usando materiais reciclados. A espessura do revestimento asfáltico adotada foi de 120mm. O processo executivo não permitia a variação das espessuras dos diferentes materiais de bases. Portanto, as espessuras da base foram fixadas conforme a espessura de fresagem igual a 250mm. A Figura 12 mostra as espessuras das camadas de projeto do Trecho Experimental.

Figura 12 - Seções do trecho experimental

4.3. Acompanhamento da execução

A obra de construção do Trecho Experimental iniciou-se no dia 27 de novembro de 2014, sob a responsabilidade do CDT, Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Arteris. A obra foi subdividida por etapas e constituiu-se de (i) fresagem do pavimento existente; (ii) execução dos 4 tipos de bases em espessura única; e (iii) execução da capa asfáltica em duas camadas.

4.3.1. Primeira Etapa - Execução da fresagem

A etapa inicial consistiu na execução da fresagem (Figura 13) em aproximadamente 370 mm de profundidade na faixa 2, faixa da direita de veículos mais pesados, obtendo-se uma caixa de 370mm de profundidade por 3600mm de largura. Esta seção era

composta por 150 mm de uma mistura de CBUQ denso, 220 mm de um material betuminoso provavelmente resultado de sucessivos recapes, um binder de PMF de granulometria grossa e camadas de solo que não foram fresadas. Por falta de um histórico de construção da rodovia não foi possível determinar se havia camada de base, sub-base ou reforço do subleito, ou se era o próprio subleito. Esta camada se encontrava íntegra, e sem indício de problemas de drenagem. A Figura 14 mostra aspectos do solo remanescente. Dada a elevada rigidez deste solo, optou-se por manter a camada e chama-la de estrutura ou camada remanescente.

Figura 13 - Processo de execução da fresagem, (a) início da fresagem da camada de revestimento; (b) esteira de carregamento do material fresado, (c) pilhas de estocagem do material fresado, (d) fresagem da camada de revestimento

Figura 14 - Camada remanescente de solo, (a) camada remanescente no segmento 1, (b) camada remanescente no segmento 2

Com o intuito de se obter um RAP com boas características, para posteriormente ser usado na constituição das bases recicladas, a fresagem foi executada em 2 fases diferentes. Na primeira foi fresada a camada do revestimento de CBUQ, na segunda foi feita a fresagem da camada de PMF. Os RAPs diferentes foram armazenados no canteiro de obra sem a possibilidade de se misturarem.

4.3.2. Segunda Etapa - Execução das camadas de base

Na segunda etapa foram executadas as quatro diferentes bases de cada segmento do trecho experimental. Primeiramente foi executada a base do segmento 1 composto pela base de BGS. A mistura foi fornecida por uma usina da região já composta e dosada na umidade correta. Esta foi espalhada na caixa por uma motoniveladora, compactada inicialmente por rolos pé de carneiro vibratório e posteriormente por um rolo pneumático em uma única camada de 250mm (Figura 15).

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 15 - Processo de execução da camada de base do segmento 1 - BGS, (a) descarregamento do material, (b) espalhamento do material, (c) compactação com rolo pé de carneiro, (d) compactação com rolo pneumático

Durante a execução da compactação percebeu-se problemas de no grau de compactação do material. Assim a compactação foi refeita, procedendo-se com o umedecimento do material e a execução de nova compactação. Ao final, a camada foi impermeabilizada com emulsão RR2C. para esperar a execução da camada de revestimento.

Para a execução da base de BGTC, foi utilizada uma usina móvel do tipo KMA-220. Esta usina possui um funil com rosca sem fim que é a entrada de material fino e pode ser usada para se acrescentar um estabilizante hidráulico ou um fíler. Ela foi usada para acrescentar cimento à mistura de agregado britado, que foi fornecida já graduada.

A mistura de BGTC foi espalhada na caixa por motoniveladora e compactada por rolo liso e rolo pneumático em uma única camada de 250mm. A Figura 16 mostra as etapas da produção e execução da BGTC. Logo após a conclusão da compactação, a camada também foi impermeabilizada com emulsão RR2C.

Figura 16 - Processo de execução da camada de base do segmento 2 - BGTC, (a) usinagem do material, (b) descarregamento do material (c) espalhamento do material, (d) compactação com rolo liso

Na execução da base do terceiro segmento composto por RAP estabilizado por emulsão asfáltica foi usada a KMA-220, uma usina própria para execução de misturas recicladas que possui uma entrada própria para fazer a adição da emulsão asfáltica. Assim, foram incorporados ao RAP, emulsão asfáltica e o cimento, com a função de fíler. A mistura resultante foi distribuída na caixa por motoniveladora. Porém, devido a

um imprevisto da usina, a camada foi executada em 2 camadas: a primeira de 130mm e a segunda de 120mm, sendo que ambas foram compactadas usando rolo pé de carneiro e rolo liso. A Figura 17 mostra etapas desta execução.

Figura 17 - Processo de execução da camada de base do segmento 3 - RAP + Emulsão Asfáltica, (a) usinagem do material, (b) carregamento do material (c) espalhamento do material, (d) compactação com rolo pé de carneiro

Como os materiais estabilizados com emulsão asfáltica apresentam ganho de resistência com o processo de cura, ao final da compactação, a camada não foi impermeabilizada, de modo a deixá-la exposta por 5 dias para favorecer a saída de umidade e, conseqüentemente, propiciar o ganho de resistência inicial. Posteriormente, foi executada a pintura de ligação para melhorar a adesão à camada de revestimento.

Na camada de base do quarto segmento composto por RAP estabilizado com espuma de asfalto também foi utilizada a KMA-220. Esta usina é própria para execução de misturas com espuma de asfalto e possui 4 bicos geradores de espuma que foram usados para adicionar ao RAP o asfalto espumado e cimento como fíler. A mistura foi distribuída na pista usando motoniveladora e foi compactada por rolo pé de carneiro e rolo liso, sendo que esta foi executada em camada única de 250mm. A Figura 18 mostra algumas etapas da obra.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 18 - Processo de execução da camada de base do segmento 4 - RAP + Espuma de Asfalto, (a) usinagem do material, (b) descarregamento do material (c) espalhamento do material, (d) compactação com rolo pneumático

A camada do segmento 4 também não foi impermeabilizada, pois o material estabilizado com espuma também apresenta ganho de resistência com a perda de umidade. Assim, o material ficou exposto ao tempo por 4 dias até a execução da pintura de ligação e da posterior camada de revestimento.

4.3.3. Terceira Etapa - Execução do revestimento

Na terceira etapa foi executada a camada de revestimento asfáltico com CBUQ, que foi fornecida por usina de asfalto da região. A camada de base foi preparada para a execução da camada de revestimento com a limpeza da superfície e execução da pintura de ligação sobre as camadas de base. O revestimento foi realizado em duas camadas de aproximadamente 60mm cada, compondo uma camada de revestimento asfáltico de 120mm. O espalhamento foi realizado por uma vibroacabadora e a compactação foi feita por rolo liso e rolo pneumático. A Figura 19 mostra algumas das etapas para a execução do revestimento asfáltico.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 19 - Processo de execução da camada de revestimento asfáltico, (a) execução da pintura de ligação, (b) espalhamento do material (c) compactação da camada, (d) compactação da camada

A conclusão da obra de construção do trecho experimental ocorreu no dia 12/12/2014, e foi aberta ao tráfego somente dia 13/12/2014, após execução da sinalização horizontal, sendo que totalizaram: (i) 10 dias de cura para a BGTC do segmento 2; (ii) 8 dias para o material estabilizado com emulsão asfáltica do segmento 3, sendo 5 sem cobertura; e (iii) 7 dias para o material estabilizado com espuma do segmento 4, sendo 4 sem cobertura. Durante todo período da obra o trecho experimental ficou fechado ao tráfego.

4.4. Ensaios de acompanhamento

4.4.1. Subleito - Camada de infraestrutura remanescente

Com a fresagem das camadas de material betuminoso existente na rodovia, chegou-se a uma camada de solo compactado, que provavelmente compunha o pavimento antigo como uma camada de sub-base ou reforço do subleito. A camada estava consolidada e não apresentava problemas de drenagem. Apresentou baixas deflexões, medidas por meio de Viga Benkelman, apresentando valor médio de $28 \times 10^{-2} \text{mm}$, e altos valores de módulo obtidos por meio de *Light Weight Deflectometer* (LWD), com valor médio de 118 MPa. Por este motivo, decidiu-se mantê-la como uma camada de infraestrutura remanescente.

Por não se possuir dados históricos do projeto de construção da camada e por existir a desconfiança de que a camada se tratava de um material estabilizado com um filler ativo, cimento ou cal, não foi possível fazer a caracterização deste material em laboratório.

4.4.2. Base do Segmento 1 - Brita Graduada Simples

O controle da mistura de BGS foi realizado por meio da verificação granulométrica e do teor de umidade da mistura aplicada em campo. A mistura da BGS utilizada foi projetada dentro da Faixa “C” da norma EP-DE-P00-008 do DER-SP. Na Tabela 10 e na Figura 20, apresentam-se a composição da faixa granulométrica da mistura em campo e os limites da faixa de trabalho, e verifica-se a curva granulométrica.

Tabela 10 - Composição granulométrica da mistura de BGS

Peneira de malha quadrada		% em Massa, Passando	
ASTM	mm	BGS	DER-SP
			Faixa C
1"	25,0	-	100
3/4"	19,0	100	-
3/8"	9,5	68,8	50-85
Nº 4	4,8	52,3	35-65
Nº 10	2,0	31,5	25-50
Nº 40	0,42	12,1	15-30
Nº 200	0,075	6,1	5-15

Figura 20- Distribuição Granulométrica da Brita Graduada Simples (BGS)

O teor de umidade foi verificado em campo por meio do método da frigideira: verificou-se o valor de 5,2%.

4.4.3. Base do Segmento 2 - BGTC

O controle da BGTC foi executado por meio da verificação da granulometria que deve atender a faixa B da ABNT NB 11803-2013, e verificação da porcentagem de adição de cimento pela usina. Na Tabela 11, tem-se os dados do controle de campo e os limites da faixa de trabalho.

Tabela 11 - Composição granulométrica da Brita Graduada Tratada com Cimento

Peneira de malha quadrada		% em Massa, Passando	
ASTM	mm	BGTC	ABNT B
1"	25	100	100
3/4"	19	98,9	90-100
3/8"	9,5	70,6	80-100
Nº 4	4,8	54	35-55
Nº 10	2	34,6	-
Nº 40	0,42	19	8-25
Nº 200	0,075	8,2	2-9

Na Figura 21 pode-se observar o atendimento da faixa de trabalho da ABNT-B, estando somente a peneira 3/8" fora do limite inferior.

Figura 21 - Distribuição Granulométrica da Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)

O teor de umidade da camada foi controlado pelo método da frigideira e ficou em 5,7%. O cimento utilizado foi CP-II 32-F e foi adicionado 4,0% em peso pela usina.

4.4.4. Base do Segmento 3 - RAP com emulsão

O controle da mistura reciclada estabilizada com emulsão asfáltica foi feito por meio da verificação da granulometria, controle do teor de emulsão e a umidade da camada. Na

Tabela 12 apresentam-se os dados do controle da granulometria e a faixa de trabalho da Asphalt Academy (2009).

Tabela 12 - Composição granulométrica do Reciclado com Emulsão Asfáltica

Peneira de malha quadrada		% em Massa, Passando	
ASTM	mm	RAP Emulsão	Asphalt Academy
2"	50,0	-	100
1 1/2"	37,5	-	87-100
1"	25,0	-	77-100
3/4"	19,0	100	66-99
3/8"	9,5	97,7	49-74
Nº 4	4,75	56,9	35-56
Nº 8	2,36	36,9	25-42
Nº 16	1,18	21,6	18-33
Nº 30	0,6	10,6	12-27
Nº 40	0,420	8,9	10-24
Nº 100	0,15	4,6	3-16
Nº 200	0,075	3,4	2-9

Na Figura 22, pode-se verificar a granulometria da mistura reciclada com emulsão asfáltica. Para enquadrar a granulometria do material fresado, foi utilizada a adição de 2,0% de cimento em peso como fíler.

Figura 22 - Distribuição Granulométrica da Mistura Reciclada com Emulsão Asfáltica

Pode-se observar que a curva sai da faixa na peneira 3/8", tornando a mistura mais fina do que o proposto pela faixa de controle. A Emulsão Asfáltica aplicada foi uma emulsão denominada comercialmente de Poliflex NTA REC contendo 62,3% de asfalto residual por evaporação, o teor adicionado para estabilizar o material fresado foi de 3,0%. A umidade adicionada pela usina foi de 4,0%.

4.4.5. Base do Segmento 4 - RAP com espuma

O controle da mistura reciclada estabilizada com espuma de asfalto foi realizado por meio da verificação da granulometria, teor de espuma e da umidade. Para enquadrar a granulometria do RAP na faixa de trabalho da Asphalt Academy (2009), adicionaram-se 30,0% de material britado de granulometria miúda (100% passante na N°8), e 2,0% em peso de cimento Portland. A Tabela 13 apresenta a granulometria da mistura e a faixa de trabalho.

Tabela 13 - Composição granulométrica do Reciclado com Espuma de Asfalto

Peneira de malha quadrada		% em Massa, Passando	
ASTM	mm	RAP Espuma	Asphalt Academy
2"	50,0	-	100
1 1/2"	37,5	-	87-100
1"	25,0	-	77-100
3/4"	19,0	100	66-99
3/8"	9,5	96,3	49-74
N° 4	4,75	70,1	35-56
N° 8	2,36	56,1	25-42
N° 16	1,18	34,7	18-33
N° 30	0,6	22	12-26
N° 40	0,420	14,5	10-24
N° 100	0,15	8,5	7-17
N° 200	0,075	5,9	4-10

Na Figura 23, pode-se verificar a curva granulométrica da mistura de RAP estabilizada com espuma de asfalto. Percebe-se que a correção granulométrica foi efetiva para o atendimento da faixa de trabalho nos agregados miúdos, mas tornou a mistura bem mais fina, estando a curva quase que completamente acima da faixa de trabalho, principalmente na parte de agregados graúdos.

Figura 23 - Distribuição Granulométrica da Mistura Reciclada com Espuma de Asfalto

Para obtenção da espuma foi utilizado um cimento asfáltico de petróleo CAP 85/100 e foi adicionado à mistura pela usina no teor de 3,0% em peso, com teor de água adicionada para espumar o ligante de 2,6%.

4.4.6. Camada de revestimento

A mistura de concreto asfáltico para a camada de revestimento é do tipo faixa III-SPV 19,0 mm com 4,4% de teor de ligante convencional tipo CAP 30-45 (ANP, 2005). O controle tecnológico foi realizado com a avaliação do teor de asfalto e da granulometria. A Tabela 14 e a Figura 24 demonstram a granulometria média do controle da mistura de concreto asfáltico.

Tabela 14 - Composição granulométrica do Concreto Asfáltico

Peneira de malha quadrada		% em Massa, Passando	
ASTM	mm	Concreto Asfáltico	Faixa de Trabalho
1"	25	100	100
3/4"	19	98	92 - 100
1/2"	12,5	81	68 - 82
3/8"	9,5	69	56 - 70
Nº 4	4,75	49	38 - 48
Nº 10	2	32	21 - 31
Nº 40	0,42	13	7 - 17
Nº 80	0,18	7	5 - 11
Nº 200	0,075	5	4 - 8

Figura 24 - Granulometria da mistura de Concreto Asfáltico

4.5. Ensaios de caracterização mecânica

A caracterização mecânica dos materiais de base se deu através da realização do ensaio de módulo de resiliência, preconizado pela norma DNIT-ME-134 (2010) para a BGS, considerando que as misturas recicladas como uma resposta granular, utilizando uma câmara triaxial instalada em uma prensa pneumática de cargas cíclicas, com pressão de confinamento dado por ar comprimido.

Para a mistura cimentada foi adotado um ensaio de carga cíclica axial, aplicada em corpo de prova cilíndrico (100mm de diâmetro e 200 de altura mm), usando uma prensa hidráulica do tipo MTS (*Material Testing System*) e LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*) instalados no terço médio do corpo de prova e sem a utilização de confinamento, como uma tentativa de obtenção da resposta elástica mais realística do material.

Os materiais, para reprodução das misturas de campo, foram coletados durante a construção do trecho experimental. As condições de compactação, distribuição granulométrica e de umidade foram reproduzidas, sendo as mesmas daquelas da situação de campo.

4.5.1. Mistura de BGS

Os ensaios de módulo de resiliência da mistura de BGS foram realizados em duas amostras de corpo de provas 100x200 mm, de material coletado em campo no momento da construção da camada. A compactação da BGS foi feita na energia normal do ensaio Proctor de modo a se tentar obter o mesmo grau de compactação daquele de campo, que foi baixo. O corpo de prova compactado nesta energia apresenta baixa resistência. Para o seu manuseio com segurança, após a compactação, o mesmo foi congelado a -10°C. Após o confinamento na prensa hidráulica esperou-se 24 horas para o descongelamento e só depois foi realizado o ensaio. A Figura 25 apresenta os resultados do ensaio de MR da BGS do segmento 1.

Figura 25 - Resultados dos ensaios de MR em função da tensão de confinamento para a BGS

Analisando-se os resultados nota-se uma elevada variabilidade entre os modelos de MR das amostras ensaiadas. Entretanto as curvas apresentam coeficientes angulares semelhantes (K_2) o que indica coerência entre os resultados. A variação encontrada é inerente ao procedimento de ensaio, que tem origem na baixa energia de compactação adotada, e a forma do ensaio com carregamentos cíclicos, que vão densificando o corpo de prova a cada ciclo, obtendo assim cada momento uma condição diferente de compactação e disposição das partículas de agregados ao longo do ensaio. Tentou-se ao final do ensaio mensurar qual seria a deformação permanente acumulada durante o ensaio, para se correlacionar está com a mudança de densidade, mas o corpo de prova se desagregava ao se retirar o confinamento. Contudo, os valores dos parâmetros K_2 dos dois corpos de provas demonstram a dependência do MR com o estado de tensão, principalmente da tensão de confinamento, como esperado.

4.5.2. Mistura de BGTC

Para realização dos ensaios, os corpos de prova de BGTC foram moldados nas mesmas proporções dos materiais de pista, na energia modificada do Proctor, 100x200 mm, adotou-se 7 dias de cura na temperatura de 25°C envelopados com papel filme. Os resultados são apresentados na Figura 26 em função da tensão desvio.

Figura 26 - Resultados dos ensaios de MR em função da tensão de desvio para a BGTC

Os resultados obtidos por meio de tal ensaio aqui, proposto foram muito superiores aos resultados comumente obtidos nos ensaios de cargas repetidas triaxial, sendo que os apresentados possui valor médio de 19.000 MPa. Dada a realização de ensaio em estado de tensão que não condiz com sua forma de trabalho, que é a flexão, os ensaios triaxiais não trazem resultados compatíveis com os reais de campo.

4.5.3. Mistura de RAP+Emulsão

Para as misturas recicladas foram adotados procedimentos de ensaios considerando-se que o material irá se comportar como material granular, com certa coesão e ligação entre agregados, embora essa consideração não seja uma unanimidade.

As misturas de RAP utilizadas nas camadas de base do segmento 3 (RAP com emulsão) foram preparadas com os materiais coletados durante a construção e dosadas nas mesmas proporções daquelas de campo. Foi adotado em laboratório a compactação Proctor em CP 100x200 mm na energia modificada. Para se obter uma resposta mecânica semelhante àquela a qual o material está sujeito em campo, realizou-se a cura acelerada, submetendo-se os corpos de prova dessas misturas a três

dias de cura à temperatura de 60°C, segundo (MARTÍNEZ, 2001) e a quatro dias envelopados em saco plástico para estabilização e homogeneização da umidade remanescente. A Figura 27 mostra os resultados de MR do RAP com emulsão.

Figura 27 - Resultados dos ensaios de MR em função da tensão de confinamento para o RAP estabilizado com emulsão

Analisando os resultados apresentados em função da tensão de confinamento nota-se que a resposta do RAP com emulsão não é dependente das tensões aplicadas. Comparativamente aos outros materiais de base os resultados são intermediários àqueles da BGS e da BGTC. Ou seja, não se observa a ação importante ou dependência da tensão de confinamento, o que demonstra não se tratar de uma mistura com comportamento de material granular.

4.5.4. Mistura de RAP+Espuma

A mistura de RAP com espuma de asfalto foi realizada com material coletado em campo. Para a obtenção da espuma de asfalto em laboratório foi utilizada a WLV 10 S da Wirtgen, que possui os mesmos comandos que a KMA utilizada em campo. Dessa forma obteve-se material espumado para ser compactado e produzir os corpos de prova

com a mesma dosagem da mistura aplicada em campo. Os corpos de prova foram moldados na energia Proctor Modificada em três unidades, nas dimensões 100x200 mm. A cura acelerada do material também foi aplicada com o intuito de se obter uma resposta característica da vida útil do material, mantendo os corpos de prova a uma temperatura de 40°C até que a umidade decaísse 40% (ASPHALT ACADEMY, 2009). E após isso o material foi envelopado com papel filme e assim mantido até a realização do ensaio que tem seu resultado apresentado na Figura 28

Figura 28 - Resultados dos ensaios de MR em função da tensão de confinamento para o RAP estabilizado com espuma

Os resultados das misturas de RAP com espuma de asfalto, assim como o RAP com emulsão asfáltica, também não apresentam variação com as tensões aplicadas, obtendo-se assim um modelo constante. Estes resultados demonstram mais uma vez que a mistura não se comporta como um material granular.

4.6. Controle deflectométrico por LWD

Foi realizado controle das camadas através da realização de ensaios de LWD (*Light Weight Deflectometer*) nos intervalos entre as execuções das camadas.

O LWD é um equipamento que possui uma célula de carga e um geofone capaz de avaliar de forma expedita o módulo de elasticidade das camadas granulares de um pavimento, por meio da aplicação de pulso de carga gerado pela queda de um peso de 10,0 kg, a uma altura de 720 mm, guiados por uma haste metálica ao centro de um prato de 300 mm de diâmetro. O ensaio foi realizado conforme a ASTM E-2583, na camada de infraestrutura de solo remanescente e na camada de BGS construída no segmento 1, conforme se pode ver na foto da Figura 29, que mostra a execução do ensaio sobre a BGS. Para as demais camadas de base, o LWD não possuía sensibilidade capaz de mensurar a deflexão devido à alta rigidez dos demais materiais usados.

Figura 29 - Ensaio de LWD sobre a base de BGS

A Figura 30 mostra os resultados de módulos obtidos pelo LWD da camada remanescente, com valor médio de 118 MPa e desvio padrão de + ou - 47 MPa, o que representa grande variabilidade nos resultados. Os ensaios foram realizados ao longo de todo o trecho e estão referenciados as estacas de construção na Trilha de Roda Externa (TRE) e na Trilha de Roda Interna (TRI). Os ensaios foram realizados na camada remanescente, logo após a conclusão do processo de fresagem da camada de CA, e antes da execução das novas camadas de base. Não foi possível realizar alguns ensaios em determinadas estacas de intercessão dos segmentos.

Figura 30 - Resultados de Módulo da camada remanescente obtidos pelo LWD

A Figura 31 mostra os resultados de módulo da camada de BGS do segmento 1. O LWD foi executado logo após a conclusão da compactação e antes de se executar a emulsão de imprimação. O módulo médio obtido é de 85 MPa com desvio padrão médio de 12 MPa. Constatou-se que os valores encontravam-se baixos, porém não havia possibilidade de retrabalho por diversos motivos.

Figura 31 - Resultados de Módulo da camada de BGS obtidos pelo LWD

5. TRECHO EXPERIMENTAL: MONITORAMENTOS PERIÓDICOS

Para se verificar o desempenho dos pavimentos do trecho experimental, foram realizados monitoramentos periódicos ao longo de um ano e meio. Foram realizados ensaios deflectométricos com a periodicidade de 3,0 meses usando-se FWD conforme a norma DNER-PRO 273/1996, e levantamentos da condição de superfície através do cadastro de defeitos segundo a norma DNIT-TER 005/2003, afundamento em trilha de roda (ATR), e irregularidade longitudinal com o uso do MERLIN (*Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation*). Os monitoramentos das condições funcionais e estruturais foram executados pelas equipes do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (LTP) da EPUSP e do Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CDT) da Arteris. Os ensaios de FWD foram realizados pela DYNATEST.

5.1. Monitoramento pluviométrico

Para verificar influências climáticas foram avaliados os índices pluviométricos da região, coletando dados de uma estação meteorológica localizada no município de Monte Verde-MG distante aproximadamente 32,0 KM do local do trecho experimental. A Figura 32 apresenta os dados de pluviometria mensais fornecidos pelo INMET. Pode-se observar que as estações do ano são diferentes nos diferentes monitoramentos. O período indicado como erro se refere ao tempo que a estação ficou fora do ar, sem registrar leituras no sistema.

Figura 32 - Índice pluviométrico para a região segundo INMET

5.2. Monitoramento do Tráfego

A caracterização do tráfego atuante é essencial para a avaliação do desempenho dos pavimentos empregados no trecho experimental e permite também entender a evolução dos parâmetros de análise em função do tráfego que solicitou o pavimento. Os dados de volume de tráfego foram monitorados por um sistema de pesagem em movimento (*Weigh in Motion* – WIM) instalado no trecho experimental. O sistema WIM é composto por sensores montados no pavimento que possibilitam medir a força de impacto aplicada pelo pneu ao pavimento, e a partir desta medida estimar o peso suportado pelo pneu.

Com os valores de pesagem individuais dos veículos que passaram pelo trecho experimental foi calculado o número N atuante, empregando-se para a determinação do Fator de Equivalência de Carga (FEC) o critério *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) para cada tipo de eixo, e a determinação do Fator de Veículo (FV). A Figura 33 mostra a contagem acumulada do tráfego ao longo do período avaliado. O WIM esteve em pleno funcionamento entre os meses de setembro/2015 e abril/2016. Para o período entre dezembro/2014 e agosto/2015 foi feita uma extrapolação dos dados.

Figura 33 - Número N de repetições de carga do eixo padrão acumulado ao longo do tempo de monitoramento

5.3. Monitoramento Funcional

Foram realizados levantamentos da condição de superfície do pavimento ao longo de 17 meses de operação no trecho experimental. Monitorou-se a evolução dos defeitos de superfície, o afundamento em trilha de roda (ATR) e, a irregularidade longitudinal com o uso do Merlin.

5.3.1. Levantamento de defeitos

Os levantamentos foram realizados através do levantamento visual detalhado segundo a norma DNIT-PRO 008/2003. Dentre os defeitos enumerados na norma DNIT-PRO 005/2003, somente está se verificando a ocorrência de trincas e fissuras, e estas ocorreram somente no segmento 1, constituído por base em BGS, durante o período avaliado. A Figura 34 mostra um exemplo do tipo de trincamento verificado nesse segmento.

Figura 34 - Trincas no revestimento do Segmento 1, (a) trincas interligadas, (b) trinca isolada transversal curta

Por ser o segmento 1 de estrutura com menor rigidez, já se esperava que esse segmento fosse o primeiro a apresentar patologias. Porém, a ocorrência muito precoce de trincamento indica que este tipo de estrutura não é adequada para as condições de tráfego da rodovia na qual o trecho experimental foi construído (tráfego muito pesado). Os defeitos observados foram do tipo trincas interligadas, ou “jacaré” (J) – FC2, trincas

isoladas transversais curtas (TTC) FC1, trincas isoladas transversais longas (TTL) FC1. A Figura 35 e a Figura 36 apresentam o percentual de área trincada, respectivamente ao longo do tempo de operação do segmento.

Figura 35 - Evolução da área trincada do segmento 1

Figura 36 - Evolução da área trincada em função do Número N

Observando-se a Figura 35 e a Figura 36 indica-se que já nos 3 primeiros meses de operação do trecho experimental teve início o aparecimento de fissuras ao longo das trilhas de roda, e que até a idade de 7 meses o segmento apresentou um percentual de área trincada constante em torno de 6%, que se deve ao período de estiagem. A partir do 8º mês, com a volta do período chuvoso, houve um aumento significativo do percentual de área trincada, com a ocorrência de novas trincas e com a interligação de trincas antigas.

O aumento da área trincada se deu de forma exponencial após os levantamentos do decimo mês, setembro de 2015, ultrapassando o patamar de 15% de área trincada com pouco mais de 12 meses de operação do trecho experimental, que segundo a ANTT considera-se que o pavimento está no limite de fadiga. Nos levantamentos de 15 e 17 meses verificou-se que o pavimento apresentava índices elevados de área trincada, mostrando que após o limite de 15%, o processo de fadiga foi generalizado ao longo do segmento.

5.3.2. Afundamento em trilha de roda

O levantamento do ATR foi realizado com a utilização de uma treliça metálica em toda a extensão do trecho experimental por estaca no TRE e TRI. A Figura 37 mostra a realização do ensaio; a Figura 38 mostra a evolução da deformação permanente por estaca ao longo do período de monitoramento, a Figura 39 mostra os resultados médios obtidos por segmento e as barras de erros, que indicam os valores de mais ou menos um desvio padrão, e a Figura 40 a evolução do ATR médio com a evolução do número N.

Figura 37 - Levantamento de ATR com o uso da treliça

Figura 38 - Afundamento da trilha de roda por estaca

Figura 39 - Evolução do ATR com o tempo

Figura 40 - Evolução do ATR em função do número N

Analisando a Figura 38, Figura 39 e Figura 40 percebe-se que a estrutura flexível do segmento 1 apresenta maiores valores de afundamento em trilha de roda e tem evoluído de maneira significativa ao longo do tempo de operação, atingindo o limite de

7,0 mm, usualmente adotado como limite, a partir da idade de 15 meses. E nos demais segmentos o ATR está evoluindo com uma magnitude bem inferior e com valores médios abaixo de 1,0 mm, o que demonstra a alta rigidez e a baixa deformabilidade dessas estruturas.

É importante realçar que o revestimento asfáltico é o mesmo nos 4 segmentos, o que comprova que o afundamento em trilha de roda está sendo causado, em sua grande maioria, pela BGS e que a contribuição do revestimento é muito reduzida.

5.3.3. Irregularidade longitudinal

O levantamento da irregularidade longitudinal do pavimento foi realizado utilizando-se o equipamento MERLIN (*Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation*), mostrado na Figura 41, que permite a determinação do índice de irregularidade internacional (IRI).

Figura 41 - Execução do levantamento de Irregularidade longitudinal com uso do MERLIN

A Figura 42 apresenta os resultados para os quatro segmentos do trecho experimental. Os resultados correspondem às médias calculadas entre os valores obtidos para a trilha de roda interna (TRI) e trilha de roda externa (TRE). Nessa Figura também são apresentadas as barras de erros, que indicam os valores de mais ou menos um desvio padrão.

Figura 42 - Evolução do IRI com o tempo

Os resultados apresentados na Figura 42 mostram que desde o início da operação do trecho experimental com apenas 3 meses o valor de IRI já é considerado alto, entre 2,8 e 3,5 m/km. Ou seja, estão acima de 2,7m/km, que é o limite da ANTT. O fato pode ser explicado pelos métodos construtivos adotados, que utilizaram motoniveladoras para a distribuição dos materiais das camadas de base, resultando em camadas com irregularidades na superfície, o que reflete na camada de revestimento asfáltico. A alteração de soluções em extensões muito pequenas é também responsável pela elevada irregularidade.

O monitoramento do IRI indica que os valores não se alteraram significativamente ao longo do tempo e são semelhantes independentemente do tipo de estrutura adotada. Embora o IRI do primeiro segmento, pavimento flexível, seja levemente superior e o do quarto segmento, base composta por RAP estabilizado com espuma de asfalto, seja um pouco inferior aos demais.

5.4. Controle deflectométrico por meio de FWD

O controle deflectométrico por meio do FWD foi realizado nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses, nas datas 16/12/2014, 16/03/2015, 14/07/2015, 21/09/2015, 09/12/2015 e 25/03/2016 respectivamente, seguindo as orientações da norma DNER-PRO 273/1996, utilizando o equipamento ilustrado na Figura 8.

Os levantamentos foram executados ao longo de todo trecho experimental em pontos com distâncias médias de 5,0 metros, em Trilha de Roda Externa (TRE) e no eixo da faixa de rolamento (EIXO). Não foi possível executar na Trilha de Roda Interna (TRI), pois demandaria a interdição total da pista no sentido sul, e isto era operacionalmente inviável.

5.4.1. Tratamento dos dados

Todos os dados deflectométricos dos levantamentos passaram por uma normalização linear em função da carga padrão de 40,0 KN.

Foi realizado o tratamento estatístico de Grubs (1969) para se determinar os conjuntos de deflexões conforme os segmentos de construção. A Tabela 15 mostra as divisões de grupos e a quantidade de *outliers*.

Tabela 15 - Demonstrativo de *Outlier* para os grupos de deflexão

Localização		Idade 0		Idade 3		Idade 7		Idade 9		Idade 12		Idade 15	
		n	Out.	n	Out.	n	Out.	n	Out.	n	Out.	n	Out.
BGS	TRE	9	0	9	0	13	0	13	0	13	1	13	0
	EIXO	9	0	9	0	13	0	13	1	13	0	13	0
BGTC	TRE	8	0	8	0	12	0	12	0	12	0	12	0
	EIXO	8	1	8	0	12	0	12	0	12	1	12	1
RAP+ Emulsão	TRE	6	0	6	0	9	0	9	0	9	0	9	0
	EIXO	6	0	6	0	9	0	9	0	9	0	9	0
RAP+ Espuma	TRE	6	1	6	0	7	0	9	0	9	1	9	0
	EIXO	6	0	6	0	7	0	9	0	9	0	9	0

5.4.2. Correção da temperatura

Com o intuito de isolar a variável temperatura dos levantamentos deflectométrico adotou-se a metodologia de corrigir somente o módulo da camada asfáltica, e se procedeu com os seguintes passos: (i) realizar a retroanálise das bacias nas temperaturas originais de levantamento usando o software BAKFAA 2.0; (ii) calcular o gradiente térmico na espessura em função da temperatura no topo da camada de revestimento asfáltico através da Equação 11 da SHRP (MOHSENI, 1998), dividindo-se a camada em duas subcamadas, obtendo-se a temperatura no meio da camada, com 6,0 cm de profundidade, e a temperatura do fundo da camada; (iii) fazer a correção do módulo das duas subcamadas pela Equação 12 do TxDOT (FERNANDO e LIU, 2001) para a temperatura de referência de 24°C; e (iv) calcular as bacias para o pavimento através dos módulos do revestimento obtidos pela correção da temperatura e a 24° e os módulos das camadas de base e remanescente através da retroanálise das bacias originais.

$$E' = \frac{E_T \times T^{2,81}}{185.000} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

E' é o módulo do AC corrigido para a temperatura 24°C (PSI)

E_T é o módulo do AC na temperatura original

T é a temperatura do AC no momento do ensaio deflectométrico

$$T_d = T_{surf} \times (1 - 0,063 \times d + 0.007 \times d^2 - 0.0004 \times d^3) \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

T_d é a temperatura do AC na espessura d (°F)

T_{surf} é a temperatura do AC na superfície (°F)

d é a profundidade da camada de AC (“)

5.4.3. Discussão dos dados de deflexão

O valor de D_0 é um importante parâmetro, pois indica o comportamento estrutural como um todo do pavimento, sendo que quanto mais elevado é o seu valor, mais resiliente é a estrutura. A Figura 43 apresenta a evolução de D_0 com o passar do tempo dos diferentes segmentos. Os valores apresentados são as médias entre as medidas de TRE e o EIXO.

Figura 43 - Evolução de D_0 nos diferentes levantamentos

Verificando os valores de D_0 percebe-se a influência da base no comportamento dos pavimentos. O Segmento 1, executado com a base de BGS, apresenta os maiores valores de D_0 já no momento da construção, e este valor aumenta com o passar do tempo. No Segmento 2, em que foi executada a base BGTC, o nível de D_0 é bem inferior, e os valores se mantiveram constantes com o passar do tempo.

Esta diferença de D_0 entre as bases do Segmento 1 - BGS e do Segmento 2 - BGTC evidencia a diferença entre os pavimentos flexíveis e os pavimentos semirrígidos, com a deflexão máxima no Segmento 1 sendo quase 5 vezes a deflexão do Segmento 2 no momento da conclusão da construção do trecho.

Nos Segmentos 3 e 4, em que foram executadas as bases recicladas estabilizadas com emulsão asfáltica (RAP + Emulsão) e com espuma de asfalto (RAP + Espuma), os valores de D_0 se aproximam dos valores do segmento 2, indicando a tendência destes segmentos terem um desempenho semelhante ao do pavimento semirrígido.

Como os valores de D_0 são estatisticamente muito próximos nos Segmento 2, 3 e 4, não é possível diferenciar a mudança do tipo de base pelos métodos de diferenças acumuladas da AASHTO (1993) e das somas acumuladas (CUSUM). A Figura 44 e a Figura 45 mostram, respectivamente, os gráficos destes procedimentos aplicados nos valores de D_0 do segundo levantamento deflectométrico para TRE e EIXO. Os dois métodos só indicam a mudança de segmentos homogêneos no início do trecho experimental na estaca 948+800, a mudança entre os segmentos 1 e 2 na estaca 948+900 e o fim do trecho experimental na estaca 949+200.

Figura 44 - Delimitação de segmento homogêneo pelo método das diferenças acumuladas (AASHTO,1993)

Figura 45 - Delimitação de segmento homogêneo pelo método das somas acumuladas (CUSUM).

A análise das bacias de deflexões médias apresentadas na Figura 46 mostra a influência do acúmulo do volume de tráfego com o passar do tempo na evolução das deflexões e, consequentemente na mudança da bacia no segmento 1. Na idade zero as

bacias na TRE são semelhantes àsquelas do EIXO. Com a atuação do tráfego, aumenta-se a diferença entre EIXO e TRE consideravelmente.

Figura 46 - Evolução das bacias de deflexão do segmento 1 - BGS

Contudo, essa diferença é reduzida com o aumento da distância do ponto de análise em relação ao ponto de aplicação de carga. Para os últimos geofones D_{90} (deflexão a 90 cm do ponto de aplicação da carga) e D_{120} (deflexão a 120 cm do ponto de aplicação da carga) são similares com valores médios, mostrando que o subleito não está sendo afetado pelo tráfego, ou pelas mudanças climáticas no período dos levantamentos. O que se conclui, juntamente com o aumento da área trincada apresentada na Figura 35, é a camada de revestimento está sendo danificada pelo tráfego.

As demais bacias não apresentam as mesmas diferenças entre TRE e EIXO, o que indica que a camada de revestimento permanece íntegra com o acúmulo do volume de tráfego, e por isso a Figura 47, a Figura 48 e a Figura 49 só apresentam os valores médios. As bacias de deflexão do segmento 2 apresentam pequenas variações entre os levantamentos, o que provavelmente se deu pela acomodação ou pela pequena variabilidade dos materiais, ou até mesmo pela própria variabilidade do equipamento.

Figura 47 - Evolução das bacias de deflexão do segmento 2 - BGTC

Figura 48 - Evolução das bacias de deflexão do segmento 3 - RAP+Emulsão

Figura 49 - Evolução das bacias de deflexão do segmento 4 - RAP+Espuma

As bacias de deflexão dos segmentos 3 e 4 apresentam uma ligeira redução nos valores com certa estabilização nos levantamentos das idades 12 e 15 meses, o que se atribui ao processo de cura dos materiais estabilizados com ligantes asfálticos usados nas camadas de base, que segundo a Asphalt Academy (2009) pode durar anos.

Ao se comparar as bacias do Segmento 1 – BGS, Figura 46, com as bacias do Segmento 2 - BGTC, Figura 47, é evidente a diferença do formato entre as bacias do pavimento flexível e o pavimento semirrígido. Segundo Yoder e Witczak (1975), o comportamento flexível do pavimento se caracteriza pela distribuição concentrada da carga na proximidade do local de aplicação, enquanto que o comportamento do pavimento semirrígido se aproxima ao comportamento do pavimento rígido, e possui o efeito de placa que se caracteriza por não haver um ponto definido de inflexão na bacia (BALBO, 2007).

Os valores dos últimos geofones D_{90} e D_{120} apresentados nas figuras: Figura 46, Figura 47, Figura 48 e Figura 49, são muito próximos entre as bacias dos diferentes segmentos e com acúmulo número N, o que se conclui que o subleito é homogêneo em toda a extensão da pista experimental e não está sendo danificado com as solicitações.

5.5. Parâmetros de bacia

Os dados obtidos através do monitoramento deflectométrico foram utilizados para analisar o comportamento dos segmentos do trecho experimental através do cálculo dos parâmetros de bacia apresentados no subitem 3.3. Os resultados encontram-se apresentados nos subitens a seguir.

5.5.1. Raio de Curvatura (RC)

A norma DNER-PRO 011/79 estabelece que, para pavimentos flexíveis, raios menores que 100,0 m indicam pavimentos com baixa capacidade estrutural. Na Figura 50 são indicado as médias dos resultados dos cálculos do raio de curvatura para o trecho experimental. O valor do D_{25} para aplicação da equação 1 foi obtido através da interpolação entre os valores de D_{20} e D_{30} .

Figura 50 - Valores médios do RC

Os valores de RC para o segmento 1 de BGS apresenta uma diminuição com a idade de serviço do trecho, indicando que a camada de revestimento está sofrendo processo de redução de rigidez por fadiga, que acarreta a diminuição do RC até que este chegue

ao valor de 100,0 m, que é quando a norma DNER-PRO 011/1979 preconiza a recomposição da camada. Observa-se que o limite de 100 metros indica que o revestimento asfáltico realmente deve ser refeito.

Para os demais segmentos, os valores apresentados de RC estão muito longe do valor de limite de 100,0 m. Este valor não é indicado para avaliação das bacias de pavimentos semirrígidos. O mesmo pode ser observado para a bacia dos pavimentos de base estabilizada com ligante asfáltico (emulsão e espuma de asfalto), que se encontram entre os valores das bacias dos pavimentos flexíveis e semirrígidos. Observe-se que há claramente 3 universos diferentes de parâmetros: o segmento 1, flexível com raio muito baixo, o segmento 2 com base cimentada e raio de curvatura muito elevado, e os segmentos 3 e 4 que apresentam um valor intermediário, o que demonstra que Raio de Curvatura consegue mostrar as naturezas das bases.

5.5.2. Parâmetro AREA

Os valores médios dos valores do parâmetro AREA calculados, conforme a configuração do FWD brasileiro apresentado na Equação 6, para os segmentos do trecho experimental nos diferentes levantamentos deflectométricos, são apresentados na Figura 51 juntamente com as faixas de avaliação de acordo com o WSDOT (2005).

Figura 51 - Valores do parâmetro AREA

Como os limites de análise adotados pelo WSDOT não foram calibrados para os pavimentos brasileiros, a adoção desses limites não mostra o comportamento diferenciado para os segmentos do trecho experimental. Tais limites somente diferenciam os pavimentos do tipo semirrígido do flexível. Para a diferenciação dos pavimentos flexíveis daqueles com base asfáltica os limites não possuem sensibilidade.

Analisando-se somente os valores do parâmetro AREA, mostram-se três patamares de valores, o que indica o desempenho diferenciado entre os pavimentos do trecho experimental. O valor apresenta uma diminuição para o segmento 1, para o segmento 2 o valor é sempre elevado, e para os 3 e 4, o valor possui um pequeno incremento, o que se deve ao ganho de rigidez dos materiais estabilizados com asfalto. Outro fator importante de análise é que o pavimento flexível com base de BGS não é classificado como fraco, demonstrando que a classificação em classes deveria ser atrelada ao volume de tráfego esperado. Realmente, o pavimento flexível com 12cm de revestimento asfáltico e base granular não é fraco para um tráfego (número N) que não seja pesado ou muito pesado.

5.5.3. Parâmetros Índices para o Primeiro Segmento

Os valores dos parâmetros índices SCI, BDI, BCI e CF, calculados respectivamente pelas equações: Equação 7, Equação 8, Equação 9 e Equação 10, e as figuras: Figura 52, Figura 53, Figura 54 e Figura 55, mostram a evolução dos parâmetros em função do tráfego (Número N).

Figura 52 - Parâmetros Índices para o Segmento 1 - BGS

Figura 53 - Parâmetros Índices para o Segmento 2 - BGTC

Figura 54 - Parâmetros Índices para o Segmento 3 - RAP+ mulsão

Figura 55 - Parâmetros Índices para o Segmento 4 - RAP+Espuma

Os valores de SCI acima de 25×10^{-2} mm indicam camadas de revestimento asfáltico pouco resistentes. Os valores do primeiro segmento (BGS) apresentam um aumento entre as idades de 0 e 9 meses, e a tendência de estabilização em um valor superior aos 25×10^{-2} mm nas demais idades, o que indica queda de rigidez da camada de revestimento neste segmento devido aos danos da camada de revestimento. Para o segundo segmento há uma tendência de permanecerem constantes sem apresentar variações consideráveis. Nos segmentos 3 e 4 os valores iniciais são baixos e há uma pequena queda com o tempo. Observa-se que este é um bom indicador para a análise em questão, pois demonstra que o pavimento flexível com base granular apresentaria problemas em poucos meses. Este indicador também evidencia o efeito da cura das camadas com emulsão asfáltica e com espuma de asfalto,

Os valores de BDI indicam que as bases executadas no trecho experimental estão íntegras, e devem ser inferiores ao limite de 40×10^{-2} mm. Entretanto, os valores do parâmetro para a base de BGS do segmento 1 estão bem superiores aos resultados dos demais segmentos e apresentam a tendência de elevação, mas ainda está bem inferior ao limite de 40×10^{-2} mm, o que evidencia que a base de BGS não é a mais

apropriada para o elevado tráfego da rodovia, e que este valor de análise não é adequado aos pavimentos asfálticos espessos com base granular, sujeitos a tráfego comercial pesado. Os valores para os demais segmentos não variam com o tempo e ficam em dois patamares distintos, o que indica a diferença de rigidez entre as camadas de base dos segmentos.

Os valores médios dos resultados de BCI superiores a 10×10^{-2} mm indicam camadas de subleito pouco resistentes e com CBR inferior a 10%. Embora o subleito de todo o trecho experimental seja o mesmo, o estado de tensões atuantes nos diferentes segmentos fazem com que cada camada apresente comportamento distinto. Dessa forma, os valores de BCI para o segmento 1 são bem superiores aos dos demais segmentos, pois a menor rigidez da camada de base faz com que um elevado nível de tensões chegue na camada do subleito, aumentando dessa forma sua deformação. Entretanto, os valores são inferiores ao limite de análise, mostrando que o subleito é adequado ao projeto.

Nos demais segmentos, os valores são bem inferiores e apresentam a tendência de permanecerem constantes, pois como nesses segmentos as camadas de base possuem alta rigidez, o nível de tensões atuantes no subleito é bem inferior. Dado o comportamento elástico não linear do solo do subleito, quanto menor a tensão desvio, maior o módulo de resiliência do mesmo.

Os valores de curvatura CF indicam a probabilidade do aparecimento de fissuras na camada de revestimento asfáltico. Os valores de CF apresentam resultados semelhantes aos resultados obtidos no cálculo do SCI, com o aumento do valor do parâmetro para o segmento 1, pois o aumento da tendência de aparecimento de fissuras acompanham a redução de rigidez da camada de revestimento. Há a tendência em permanecerem constantes os valores para os demais segmentos, indicando a integridade da camada asfáltica dos segmentos 2, 3 e 4.

5.6. Equação da Bacia de Deflexão

Os levantamentos de FWD são realizados com posicionamentos dos geofones constantes. No Brasil os equipamentos de FWD costumam possuir a configuração de geofones com 0, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 cm de distância da célula de aplicação de carga, em outros países essas distâncias são de -30, 0, 30, 60, 90, 120 e 150 cm.

A obtenção da equação das bacias de deflexão pode auxiliar na solução de numerosos problemas, entre os quais: (i) para compatibilizar levantamentos realizados com equipamentos que possuem diferentes configurações de geofones; (ii) na obtenção obter leituras de geofones que por ventura apresentaram problemas; (iii) para se aplicar parâmetros para os quais não se tem o valor de leitura, como por exemplo o RC que é calculado no Brasil a distância de 25,0 cm, (iv) na modelagem das deflexões ocorridas, (v) entre outros usos.

As bacias deflectométricas podem ser obtidas através de numerosos métodos de regressões numéricas, nos quais os valores de leituras de deflexão lidas são usados para se obter as equações das curvas deflectométricas, em função das distâncias de leituras. As equações podem ser na forma (i) polinomial quadrática, (ii) exponencial, (iii) curva de Gauss, (iv) curva de Agnesi, (v) entre outras. Para este trabalho foi aplicada a regressão logarítmica para expressar a equação da curva deflectométrica no formato da curva de Agnesi.

5.6.1. Curva de Agnesi

Maria Gaetana Agnesi (1718-1779) foi uma das primeiras matemáticas mulheres. Ela estudou a equação proposta por Pierre de Fermat (1601-1665), que acabou recebendo o seu nome e posteriormente, por um erro de tradução, ficou conhecida por “Bruxa de Agnesi”.

A curva de Agnesi possui uma demonstração geométrica de um ponto $P(x, y)$ a partir de um círculo de raio a , e é descrita analiticamente pela Equação 13.

$$y = \frac{8 \times a^3}{x^2 + 4 \times a^2}$$

Equação 13

Onde:

y é a ordenada do ponto P;

x é a abcissa do ponto P;

a é o raio da circunferência;

A “*Bruxa de Agnesi*” pode ser aplicada em diversas áreas como na física para a distribuição espectral da linha óptica e raios-x, correção do Efeito Doppler, na estatística em distribuições de Gauss, e na engenharia para a descrição de bacias deflectométricas.

5.6.2. Aplicação da curva de Agnesi

Foi determinada a curva de Agnesi, Equação 14, para uma bacia deflectométrica aleatória levantada pelo FWD no segmento 1 na idade de 0. A Tabela 16 apresenta os valores da bacia real medida e de uma bacia teórica calculada. A Tabela 17 apresenta os parâmetros obtidos pela regressão, o valor de D_{25} calculado para a bacia, e o RMSE entre a bacia medida e a calculada. Percebe-se que os valores são estatisticamente próximos, o que se conclui pelo baixo valor de RMSE.

$$D_i = \frac{D_0}{1 + 10^{-3,2} \times d_i^{2,0}}$$

Equação 14

Onde:

D_i é o valor da deflexão calculado para o ponto i (0,01 mm);

D_0 é a deflexão máxima medida (0,01 mm);

d_i é o valor da distância do ponto de aplicação da carga (cm);

Tabela 16 - Exemplo de aplicação da curva de Agnesi

Bacia	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
Medida	38,5	30,0	23,6	17,5	11,6	5,3	3,8
Teórica	38,5	30,3	23,9	16,3	11,3	6,0	3,7

Tabela 17 - Parâmetros para a bacia de exemplo

Parâmetros	Valores
A	-3,2
B	2,0
D25	27,0
RMSE	5,8

A Figura 56 apresenta a curva real obtida pelo levantamento e a curva teórica obtida pela curva de Agnesi, Equação 14. Com esta equação é possível extrapolar o levantamento e verificar o ponto em que a deflexão se torna próximo a zero.

Figura 56 - Bacia medida x bacia teórica

5.6.3. Generalização da curva de Agnesi

Generalizou-se o cálculo da curva de Agnesi para as bacias dos levantamentos realizados nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses, para o TRE e EIXO. As equações obtidas são expressas na Equação 15 genérica.

$$D_i = \frac{D_0}{1 + 10^A \times d_i^B}$$

Equação 15

Onde:

D_i é o valor da deflexão calculado para o ponto i (0,01 mm);

D_0 é a deflexão máxima medida (0,01 mm);

A e B são parâmetros de regressão;

d_i é o valor da distância do ponto de aplicação da carga (cm);

A Figura 57 e a Figura 58 apresentam as médias dos valores dos parâmetros de regressão A e B para cada idade de levantamento e por segmento.

Figura 57 - Evolução do parâmetro "A"

Figura 58 - Evolução do parâmetro "B"

Os valores dos parâmetros "A" e "B" para os diferentes segmentos não apresentam variação entre os valores. Isto indica que, no período analisado, as bacias não mudam de formato. Além disso, a diferença entre os valores para cada segmento demonstra a diferença entre os pavimentos empregados e seus diferentes comportamentos e formatos das bacias deflectométricas.

Como os valores dos parâmetros A e B tendem a permanecerem constantes ao longo do período estudado, obtiveram-se: a Equação 16, Equação 17, Equação 18 e Equação 19, que descrevem a bacia de deflexão dos pavimentos para cada um dos segmentos.

Segmento 1 -
BGS

$$D_i = \frac{D_0}{1 + 10^{-2,63} \times d_i^{1,67}}$$

Equação 16

Segmento 2 -
BGTC

$$D_i = \frac{D_0}{1 + 10^{-1,97} \times d_i^{1,05}}$$

Equação 17

Segmento 3 -
RAP+Espuma

$$D_i = \frac{D_0}{1 + 10^{-2,09} \times d_i^{1,26}}$$

Equação 18

$$D_i = \frac{D_0}{1 + 10^{-2,12} \times d_i^{1,24}}$$

5.7. Retroanálises

O processo de retroanálise foi realizado com as bacias de deflexão obtidas nos levantamentos realizados nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses. As bacias foram separadas por segmento de construção, calculada a bacia média, a bacia média somada ao desvio padrão e a bacia média menos o desvio padrão. A Tabela 18 mostra os parâmetros adotados para a retroanálise. A Figura 59 demonstra que a análise resumida destas 3 bacias engloba grande parte do espectro de bacias, para o levantamento do segmento 1, TRE, na idade de 3 meses.

Tabela 18 - Parâmetros para retroanálise

Camada/Material		Espessura (mm)	Poisson
Revestimento	CA	120	0,35
Base	BGS	250	0,45
	BGTC	250	0,20
	RAP+Emulsão	250	0,35
	RAP+Espuma	250	0,35
Remanescente	Solo	-	0,45

Figura 59 - Representação das bacias médias com o desvio padrão

O software BAKFAA 2.0 foi utilizado para a realização do procedimento de retroanálise. O programa foi desenvolvido pela FAA (*Federal Aviation Administration*) para realizar retroanálises com os dados de deflexão dos levantamentos por FWD. Baseia-se na Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE) e utiliza a função de mínimos quadrados para diminuir os desvios entre as bacias mensuradas e calculadas para minimizar os erros do processo de retroanálise.

5.7.1. Retroanálise do segmento 1 - base BGS

A Figura 60 e a Tabela 19 mostram respectivamente os módulos retroanalizados para as idades de 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses para o Segmento 1 - BGS. Pode-se perceber: (i) a queda do módulo de resiliência da camada de revestimento, que pode ser correlacionada com o aumento da área trincada apresentada na Figura 35; (ii) um módulo de resiliência baixo para a camada de BGS, de 115,0 MPa no momento da construção, e variando dentro dessa faixa de valores ao longo do tempo de operação do trecho experimental. Esses valores são próximos e coerentes com o valor médio de 85,0 MPa obtido pelo LWD realizado durante a execução da obra, Figura 31; e (iii) um valor médio de 155,0 MPa para a estrutura remanescente que também é coerente com o valor de 118,0 MPa do LWD.

Figura 60 - Módulos retroanalizados para o Segmento 1 - BGS nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses

Tabela 19 - Módulos retroanalisados do Segmento 1 - BGS nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses

Idade	Parâmetro	Módulo Retroanalizado		
		Capa	BGS	Remanescente
		MPa	MPa	MPa
MÊS 0	Média	5.004,14	116,00	146,63
	σ	411,84	18,92	25,19
	C.V (%)	8,23	16,31	17,18
3 MESES	Média	3.729,72	99,17	111,65
	σ	1.164,53	16,86	14,70
	C.V (%)	31,22	17,00	13,17
7 MESES	Média	2.672,95	103,33	106,13
	σ	976,71	9,83	14,46
	C.V (%)	36,54	9,51	13,62
9 MESES	Média	1.672,90	95,80	94,58
	σ	284,13	12,00	12,35
	C.V (%)	16,98	12,52	13,06
12 MESES	Média	1.640,65	100,05	89,19
	σ	503,27	13,21	12,89
	C.V (%)	30,67	13,20	14,46
15 MESES	Média	1.435,12	97,09	110,40
	σ	187,34	10,32	17,13
	C.V (%)	13,05	10,62	15,52

5.7.2. Retroanálise do segmento 2 - base BGTC

Os módulos retroanalizados para o segmento 2 são apresentados na Figura 61 e na Tabela 20, podendo ser feitas as seguintes considerações: (i) o módulo da camada de revestimento está variando na casa dos 5.000,0 MPa, e indica que a camada se encontra íntegra no período analisado, (ii) o módulo da base de BGTC mostra um valor médio de 9.500 MPa, demonstrando também um estado íntegro da camada, e (iii) apesar da estrutura remanescente ser a mesma do primeiro segmento, o valor retroanalizado é superior neste segmento, sendo o valor médio de 350 MPa, podendo ser justificado pelo menor nível de tensões-desvio (sendo um solo fino dependente das tensões desvio) que chegam nesta camada devido à alta rigidez da base. Outro fator que pode influenciar é a entrada de água no solo pelo revestimento trincado.

Figura 61 - Módulos retroanalizados para o Segmento 2 - BGTC nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses

Tabela 20 - Módulos retroanalisados do Segmento 2 - BGTC nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses

Idade	Parâmetro	Módulo Retroanalizado		
		Capa	BGTC	Remanescente
		MPa	MPa	MPa
MÊS 0	Média	5.031,61	9.934,41	398,55
	σ	431,33	935,43	82,85
	C.V (%)	8,57	9,42	20,79
3 MESES	Média	4.832,35	10.130,36	278,44
	σ	698,04	1.862,97	28,77
	C.V (%)	14,45	18,39	10,33
7 MESES	Média	5.401,63	10.187,29	363,96
	σ	738,32	1.005,72	66,50
	C.V (%)	13,67	9,87	18,27
9 MESES	Média	4.670,64	9.841,67	262,02
	σ	579,89	614,34	34,76
	C.V (%)	12,42	6,24	13,27
12 MESES	Média	4.647,32	9.416,67	433,99
	σ	985,01	970,40	32,13
	C.V (%)	21,20	10,31	7,40
15 MESES	Média	5.356,78	9.875,00	409,46
	σ	691,01	627,50	88,11
	C.V (%)	12,90	6,35	21,52

5.7.3. Retroanálise do segmento 3 - base RAP + Emulsão

Os módulos retroanalizados do segmento 3 são apresentados na Figura 62 e na Tabela 21, onde observa-se que: (i) assim como no segmento 2 a base está íntegra e não apresenta área trincada, estando o módulo retroanalizado variando no valor médio de 5.000 MPa de acordo com os levantamentos; (ii) na camada de base executada com o material reciclado estabilizado com emulsão asfáltica, pode-se perceber um incremento no módulo de aproximadamente 55% no período de 0 a 3 meses, e de aproximadamente 15% no período de 3 a 7 meses e a estabilização dos valores na casa dos 2.100 MPa. Esta elevação é justificada pelo efeito da cura deste material, que em campo pode durar até um ano (Asphalt Academy, 2009); e (iii) na estrutura remanescente o valor está aparentemente crescendo. Com o aumento do ganho de resistência e rigidez da base, um menor nível de tensões está chegando na estrutura remanescente, levando a um ganho de rigidez do remanescente.

Figura 62 - Módulos retroanalizados para o Segmento 3 - RAP + Emulsão nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses

Tabela 21 - Módulos retroanalisados do Segmento 3 - RAP + Emulsão nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses

Idade	Parâmetro	Módulo Retroanalisado		
		Capa	RAP+Emulsão	Remanescente
		MPa	MPa	MPa
MÊS 0	Média	4.989,22	1.150,28	350,22
	σ	365,93	222,73	52,21
	C.V (%)	7,33	19,36	14,91
3 MESES	Média	4.610,64	1.813,51	331,00
	σ	715,67	439,18	70,81
	C.V (%)	15,52	24,22	21,39
7 MESES	Média	4.523,71	2.083,33	375,26
	σ	552,67	312,52	89,08
	C.V (%)	12,22	15,00	23,74
9 MESES	Média	4.710,13	2.022,96	268,66
	σ	449,77	204,09	72,60
	C.V (%)	9,55	10,09	27,02
12 MESES	Média	4.848,37	2.170,50	378,57
	σ	638,72	372,91	86,88
	C.V (%)	13,17	17,18	22,95
15 MESES	Média	5.090,13	2.325,00	401,00
	σ	453,14	419,23	119,15
	C.V (%)	8,90	18,03	29,71

5.7.4. Retroanálise do segmento 4 - base RAP + Espuma

Os valores de módulos de resiliência retroanalizados do segmento 4 são mostrados na Figura 63 e na Tabela 22, nas quais se observa que: (i) há a mesma constância para a camada de revestimento dos Segmentos 2 e 3 na ordem de 5.000 MPa; (ii) e que houve um considerável incremento do módulo de resiliência da base, executada com material reciclado estabilizado com espuma de asfalto, assim como no trecho 3, sendo que os ganhos são 60% nos três primeiros meses e de mais 15% nos três meses seguintes a estabilização na casa dos 2.500 MPa; (iii) e para a camada remanescente, há a mesma imprecisão para se retroanalisar o módulo desta. Como o ganho de rigidez da camada de base foi menor no segundo trimestre, o valor do módulo do remanescente mostrou tendência de ficar constante.

Figura 63 - Módulos retroanalizados para o Segmento 4 - RAP + Espuma nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses

Tabela 22 - Módulos retroanalisados do Segmento 4 - RAP + Espuma nas idades 0, 3, 7, 9, 12 e 15 meses

Idade	Parâmetro	Módulo Retroanalizado		
		Capa	RAP+Espuma	Remanescente
		MPa	MPa	MPa
MÊS 0	Média	4.975,02	1.307,25	323,98
	σ	381,79	159,52	25,39
	C.V (%)	7,67	12,20	7,84
3 MESES	Média	5.033,95	2.071,67	279,43
	σ	337,11	291,58	31,22
	C.V (%)	6,70	14,07	11,17
7 MESES	Média	5.057,24	2.441,67	281,18
	σ	902,87	438,65	39,76
	C.V (%)	17,85	17,97	14,14
9 MESES	Média	5.114,98	2.266,67	238,23
	σ	837,67	294,39	36,16
	C.V (%)	16,38	12,99	15,18
12 MESES	Média	5.136,00	2.637,37	382,48
	σ	503,15	582,69	54,74
	C.V (%)	9,80	22,09	14,31
15 MESES	Média	5.003,13	2.741,67	368,97
	σ	551,79	352,73	73,45
	C.V (%)	11,03	12,87	19,91

5.8. Análises Conclusivas

5.8.1. Espessura equivalente

O conceito de Espessura Equivalente de Camada estabelece uma espessura hipotética de um material homogêneo que substitui a espessura real do pavimento que é constituído geralmente por material de maior rigidez. O modelo de espessura equivalente adotado foi desenvolvido por Odemark (1947) e é calculado de acordo com a Equação 20, sendo determinada a espessura que a estrutura do pavimento equivale em termos de subleito.

$$h_e = 0,9 * \left(h_{rev} * \sqrt[3]{\frac{E_{rev}}{E_{sub}}} + h_{base} * \sqrt[3]{\frac{E_{base}}{E_{sub}}} \right) \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

h_e é a espessura equivalente (cm);

h_{rev} é a espessura da camada de revestimento (cm);

E_{rev} é o módulo de resiliência da camada de revestimento (MPa);

E_{sub} é o módulo de resiliência do subleito (MPa);

h_{base} é a espessura da camada de base (cm);

E_{base} é o módulo de resiliência da camada de base (MPa);

Os valores de h_e indicados na Tabela 23 representam os resultados obtidos no cálculo de espessura equivalente para os pavimentos que constituem o trecho experimental ao longo do período de monitoramento. Foram adotados os valores médios dos módulos obtidos nas retroanálises apresentadas no item 5.7 e as espessuras de construção das camadas. Os valores de h_{es} (Tabela 23) foram determinados para um subleito padrão com módulo igual a 100,0 MPa, a fim de eliminar a influência do módulo do subleito na análise. Procurou-se estabelecer uma correlação entre espessura equivalente obtida para um mesmo subleito (h_{es}) e D_0 e obtiveram-se as Equação 21, Equação 22, Equação 23, e Equação 24, para cada segmento, e descrevem pela deflexão máxima a espessura equivalente do pavimento, como parâmetro indireto de correlação estrutural.

Tabela 23 - Cálculo da espessura equivalente

Segmento	Idades	h_{rev}	h_{base}	E_{rev}	E_{base}	E_{sub}	h_e	h_{es}	D_0
BGS	Média 0	12,0	25,0	5.004	116	147	56	63	39
	Média 3	12,0	25,0	3.730	99	112	56	59	52
	Média 7	12,0	25,0	2.673	103	106	54	55	59
	Média 9	12,0	25,0	1.673	99	95	51	50	68
	Média 12	12,0	25,0	1.641	100	89	52	50	74
	Média 15	12,0	25,0	1.470	97	110	47	49	71
BGTC	Média 0	12,0	25,0	5.032	9.934	399	91	144	7
	Média 3	12,0	25,0	4.832	10.130	278	103	144	9
	Média 7	12,0	25,0	5.402	10.187	364	95	146	8
	Média 9	12,0	25,0	4.671	9.842	262	104	143	8
	Média 12	12,0	25,0	4.647	9.417	434	87	141	7
	Média 15	12,0	25,0	5.357	9.875	409	90	145	7
RAP+ Emulsão	Média 0	12,0	25,0	4.989	1.150	350	60	91	15
	Média 3	12,0	25,0	4.611	1.814	331	66	98	13
	Média 7	12,0	25,0	4.524	2.083	375	65	100	11
	Média 9	12,0	25,0	4.710	2.023	269	72	100	14
	Média 12	12,0	25,0	4.848	2.171	379	66	102	11
	Média 15	12,0	25,0	5.090	2.325	401	66	104	11
RAP+ Espuma	Média 0	12,0	25,0	4.975	1.307	324	63	93	14
	Média 3	12,0	25,0	5.034	2.072	278	72	102	13
	Média 7	12,0	25,0	5.057	2.442	281	75	105	13
	Média 9	12,0	25,0	5.115	2.267	238	78	104	14
	Média 12	12,0	25,0	5.136	2.637	382	68	107	10
	Média 15	12,0	25,0	5.003	2.742	269	77	108	11

Segmento 1 $hes = 320,94 \times D_0^{-0,437}$ Equação 21
 $R^2 = 0,95$

Segmento 2 $hes = 137,16 \times D_0^{0,023}$ Equação 22
 $R^2 = 0,04$

Segmento 3 $hes = 233,50 \times D_0^{-0,339}$ Equação 23
 $R^2 = 0,79$

$$h_{es} = 210,42 \times D_0^{0,284}$$

$$R^2 = 0,47$$

O alto valor do R^2 apresentado pela Equação 21 indica que este é um bom parâmetro para avaliar os pavimentos flexíveis. Entretanto, para o pavimento semirrígido os grandes valores de módulos e baixos valores de D_0 fizeram com que a Equação 22 não tivessem boa correlação fazendo com que o R^2 se aproximasse de zero. Já as misturas recicladas dos segmentos 3 e 4 apresentaram R^2 com valores intermediários mostrando que o parâmetro tem uma correlação razoável para estes materiais.

Na Figura 64 são apresentados os resultados de deflexão máxima (D_0) por espessura equivalente (h_{es}) independente do segmento construtivo apresentados na Tabela 23, na qual foi realizado a regressão e obteve-se a Equação 25 que descreve h_{es} a partir do valor de D_0 .

Figura 64 - Correlação entre deflexão e espessura equivalente do subleito

$$h_{es} = 329,83 \times D_0^{-0,449}$$

$$R^2 = 0,96$$

5.8.2. Vida remanescente

A estimativa de vida remanescente pode ser realizada utilizando o modelo de fadiga defletométrico do DNER-PRO 011/1979, conforme a equação

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \log N$$

Onde:

D_{adm} é a deflexão admissível para um determinado N (0,01 mm);

N é o tráfego de projeto;

Como somente o segmento 1 apresentou evolução nos valores de D_0 , conforme pode ser observado na Figura 65, só foi realizada a análise do consumo de vida remanescente para o primeiro segmento, que é apresentada na Tabela 24.

Figura 65 - Evolução da deflexão com o número N

Tabela 24 - calculo da vida remanescente para o segmento 1

Idade	N Real	D (0,01 mm)	N Calculado	D adm (0,01 mm)	N Remanescente
0 Meses	1,0E+00	40	1,0E+08	106	1,0E+08
3 Meses	1,1E+06	52	2,2E+07	89	2,1E+07
7 Meses	2,3E+06	59	1,1E+07	77	9,1E+06
9 Meses	3,0E+06	70	4,3E+06	74	1,3E+06
12 Meses	4,0E+06	73	3,2E+06	71	-7,6E+05
15 Meses	5,0E+06	70	4,2E+06	68	-8,1E+05

O aumento do D_0 ao longo do tempo faz com que o N calculado através do método DNRP-PRO 011/1979 caia e a vida remanescente do pavimento se esgote no período entre 9 e 12 meses. A deflexão admissível calculada com o N real atuante aumenta com o tempo, fazendo com que a D_{adm} se iguale à deflexão real aos 15 meses. Observa-se que o método do PRO 011 demonstra de forma adequada que o pavimento apresentaria problemas antes de completar um ano.

5.9. Modelagens em Elementos Finitos

O cálculo das tensões e deformações dos pavimentos que ocorrem nos pavimentos do trecho experimental foi realizado por um modelo em três dimensões em elementos finitos utilizando o software ABAQUS/CAE 6.13. O Modelo é simétrico quadrado com dimensões 6,0 x 6,0 m, constituído por duas camadas nas espessuras de projeto do trecho experimental e um subleito com 6,0 metros de profundidade, que segundo (LOIZOS *et al.*, 2012) esta é uma espessura capaz de tornar as tensões desprezíveis do ponto de vista da pavimentação, Figura 66 (a).

Os materiais foram parametrizados como elásticos lineares com os mesmos coeficientes da retroanálise (espessura e coeficiente Poisson, Tabela 18), nas condições iniciais e finais do período de monitoramento do trecho experimental por meio dos módulos retroanalizados nas idades 0 e 15 meses. Devido ao tempo computacional para análise das estruturas, optou-se por analisar apenas os segmentos

1, 2 e 4, uma vez que o segmento 3 apresenta comportamento muito semelhante ao segmento 4.

As condições de contorno impostas impedem os movimentos horizontais nas bordas do modelo e no fundo do modelo todos os movimentos foram eliminados através de um engaste, Figura 66 (b). Foi simulada a carga padrão do FWD de 40 KN com raio padrão de 150 mm no centro do modelo. A malha de elementos finitos gerada possui 83.759 nós na camada de revestimento, 36.864 nós na camada de base e 6.800 nós no subleito, Figura 66 (c). Os valores de deflexão, tensão e deformação reportados nos itens a seguir são todos referentes ao eixo do centro de aplicação da carga.

Figura 66 - (a) Geometria do modelo; (b) Condições de contorno imposta ao modelo; (c) Malha de elementos finitos

5.9.1. Modelagem do pavimento flexível

Para a modelagem do pavimento flexível foram utilizados os módulos de resiliência apresentados na Tabela 19. Para validação do modelo foi imposto o valor de deflexão máxima D_0 . A modelagem indicou o valor inicial de $40,8 \times 10^{-2}$ mm enquanto o valor medido foi $39,5 \times 10^{-2}$ mm na idade 0. Os valores calculados foram de $70,2 \times 10^{-2}$ mm enquanto foi determinado em campo a média de $70,6 \times 10^{-2}$ mm para a idade 15 meses. A Figura 67 apresentam as deflexões obtidas na modelagem para ambas as idades, representadas com mesma escala.

(a)

(b)

Figura 67 - Deflexão (mm) resultante da modelagem do segmento 1 (a) idade 0, (b) idade 15 meses

A Figura 68 e a Figura 69 apresentam os resultados de análise de tensão e deformação vertical, respectivamente, nas idades 0 e 15 meses em mesma escala. Nota-se que a queda do módulo da camada de revestimento fez a tensão de tração no fundo da camada diminuir de 1,2 MPa para 0,7 MPa, entre as idades 0 e 15 meses, e a deformação no fundo da camada de revestimento passar de 168 $\mu\epsilon$ na idade 0 para 396 $\mu\epsilon$ na idade 15. Esses valores de deformação são bem superiores as 70 $\mu\epsilon$, que segundo Carpenter *et al.* (2003) seria um valor limite a partir do qual o material estaria submetido ao processo de trincamento por fadiga.

(a)

(b)

Figura 68 - Tensão horizontal (MPa) resultante da modelagem do segmento 1 (a) idade 0, (b) idade 15 meses

Observa-se também na Figura 69 os valores de deformação horizontal na camada de base, de 250 $\mu\epsilon$ na idade 0 e 543 $\mu\epsilon$ na idade 15. Essa deformação na camada granular é responsável pela tensão de confinamento do material. Embora na Figura 68 a escala não permita a visualização, o valor é da ordem de 0,35 MPa.

(a)

(b)

Figura 69 - Deformação horizontal (ϵ) resultante da modelagem do segmento 1 (a) idade 0, (b) idade 15 meses

5.9.2. Modelagem do pavimento semirrígido

A modelagem do segmento 2 - BGTC, foi realizada com base nos valores da Tabela 20. Avaliando a deflexão do modelo para o pavimento semirrígido obtém-se os valores de D_0 igual a $7,0 \times 10^{-2}$ mm e $6,8 \times 10^{-2}$ mm, através da modelagem para a idade 0 e 15 meses respectivamente, e a leitura do FWD foi de $7,4 \times 10^{-2}$ mm e $7,1 \times 10^{-2}$ mm. A Figura 70 apresenta os valores de deflexão obtidos na estrutura semirrígida.

(a)

(b)

Figura 70 - Deflexão (mm) resultante da modelagem do segmento 2 (a) idade 0, (b) idade 15 meses

A Figura 71 mostra o arranjo de tensões horizontais na estrutura do pavimento. Nas duas idades simuladas os valores de tensão estão na mesma ordem de grandeza, com 0,22 MPa de tração no fundo da camada de base, e 0,45 MPa de compressão no topo da camada de revestimento, demonstrando que o pavimento está íntegro no período estudado.

Figura 71 - Tensão horizontal (MPa) resultante da modelagem do segmento 2 (a) idade 0, (b) idade 15 meses

5.9.3. Modelagem do pavimento com base reciclada

Como os valores de módulo retroanalizados das misturas dos segmentos 3 e 4 são próximos, só foi realizada a modelagem para a mistura de RAP+Espuma (segmento 4) apresentados na Tabela 22. Os valores de deflexão máxima obtidos pela modelagem foram de $13,7 \times 10^{-2}$ mm e $10,2 \times 10^{-2}$ mm, respectivamente para as idades 0 e 15 meses. Conforme ilustrado na Figura 72, os valores decaem pois a cura das misturas presentes na camada base que provoca aumento no módulo de resiliência da base.

(a)

(b)

Figura 72 - Deflexão (mm) resultante da modelagem do segmento 4 (a) idade 0, (b) idade 15 meses

A Figura 73 mostra a influência da cura do material reciclado no arranjo de tensões horizontais do pavimento e o comportamento das camadas de base e de revestimento. A Figura 74 mostra como a variação da rigidez da camada de base influencia nas deformações horizontais das camadas do pavimento.

(a)

(b)

Figura 73 - Tensão horizontal (MPa) resultante da modelagem do segmento 2 (a) idade 0, (b) idade 15 Meses

Com valores de módulo elevados, esta base está sujeita a tensões de tração no fundo da camada. Na idade 0 o valor de tensão horizontal é 0,10 MPa e a deformação horizontal de 67 $\mu\epsilon$. O ganho de rigidez, devido ao processo de cura do material, fez com que a tensão aumentasse na idade 15 meses para o valor de 0,14 MPa e a sua deformação caísse para 42 $\mu\epsilon$. Deve-se realçar que é ainda debatido na literatura o processo de degradação de materiais reciclados a frio. Diante dos valores obtidos até o período de 15 meses, observa-se que a base reciclada com espuma ainda não apresenta deformação horizontal elevada no fundo da camada, podendo-se assumir que ainda é pequeno o potencial danos.

(a)

(b)

Figura 74 - Deformação horizontal (ϵ) resultante da modelagem do segmento 4 (a) idade 0, (b) idade 15 meses

O processo de cura também influencia nas tensões atuantes na camada de revestimento. Na idade 0 o revestimento está submetido a uma tensão de tração de 0,54 MPa no fundo da camada e deformação horizontal de 49 $\mu\epsilon$. Na idade de 15 meses essa tensão cai para o 0,02 MPa e a deformação cai para 24 $\mu\epsilon$. Para o revestimento asfáltico, as tensões e deformações são bastante reduzidas pelo efeito da cura na base.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo estabelecer uma análise comparativa dos comportamentos mecânicos de pavimentos asfálticos, empregando diferentes tipos de base: (i) granular; (ii) granular tratada com cimento; (iii) fresado de camada asfáltica reciclado e estabilizado com emulsão asfáltica; e (iv) fresado de camada asfáltica reciclado e estabilizado com espuma de asfalto.

Os pavimentos estudados foram construídos na faixa da direita, mais carregada, em uma rodovia de tráfego muito pesado com número N (USACE) de projeto estimado em $1,4 \times 10^8$ para o período de 10 anos. Graças a um sistema de passagem WIN registrou-se o tráfego (veículos, eixos e suas respectivas cargas), entre o período estudado, acumulando N igual a $2,1 \times 10^7$, ou seja um valor 20% superior ao projetado para o período. Foi acompanhado o processo executivo de todo o trecho experimental *in loco*, e em laboratório foi realizado o controle das misturas aplicadas nas camadas de base e revestimento asfáltico. O ensaio de LWD realizado na camada de solo remanescente indicou que a camada se encontrava em bom estado, sem problemas de drenagem e altos valores de módulo de resiliência, com valor médio de 118 MPa.

A caracterização mecânica foi realizada por ensaios de módulos de resiliência que demonstraram a diferença da natureza dos materiais estudados. A BGS apresenta o efeito do confinamento esperado para os materiais granulares, mas os resultados obtidos foram abaixo do esperado em projeto, dada a baixa energia de compactação empregada na obra corroborando o indicado pelo ensaio de LWD feito sobre a camada executada. Para a mistura de BGTC, o ensaio de módulo de resiliência não apresentou resultados compatíveis com o de campo, pois este material em campo possui solicitação diferente da que em ensaio triaxial normalmente empregado no Brasil. Os ensaios devem ser feitos à flexão nos materiais desta natureza. Para as misturas recicladas de RAP com emulsão asfáltica e com espuma de asfalto constatou-se que os materiais não apresentam dependência da tensão de confinamento, o que demonstra não se tratarem de materiais granulares.

O trecho experimental foi monitorado ao longo de um 15 meses por meio de ensaios funcionais e estruturais. O acompanhamento da evolução de defeitos na superfície mostrou o surgimento de trincas e deformação permanente precoces, já na idade de três meses no segmento com pavimento flexível. Na idade de 12 meses a porcentagem de área trincada e a deformação permanente ultrapassaram os limites aceitáveis pela ANTT para os pavimentos brasileiros asfálticos concessionados. Já o monitoramento de irregularidade longitudinal mostrou que os processos construtivos influenciaram na irregularidade de todos os segmentos.

As bacias deflectométricas obtidas pelo ensaio de FWD indicam comportamentos distintos entre os pavimentos estudados. O uso de parâmetros de bacia deflectométrica para avaliação do comportamento estrutural mostrou ser um bom critério de compreensão dos diferentes comportamentos dos pavimentos asfálticos estudados. E indicam onde ou em que camada há problemas ou são resistentes. Entretanto, alguns dos valores limites dos parâmetros encontrados na bibliografia para qualificar as camadas da estrutura do pavimento ou do subleito, ou para avaliar riscos de fadiga precoce do revestimento asfáltico necessitam ser calibrados para os pavimentos brasileiros. A maior parte dos parâmetros analisados demonstra a rigidez inadequada do pavimento do primeiro segmento, asfáltico flexível com base granular, para tráfego muito pesado, fazendo com que a camada de revestimento tenha iniciado processo de fadiga precocemente, após alguns meses de operação. Para o segundo segmento com base cimentada, os parâmetros indicam a alta rigidez da base, e a integridade da camada perante o tráfego atuante. Nos pavimentos compostos pelas bases asfálticas recicladas (com emulsão e com espuma de asfalto, segmentos três e quatro, respectivamente), os parâmetros indicam o processo de ganho de rigidez nos primeiros meses de operação, o que é de se esperar em materiais desta natureza, devido à “cura” ou saída da água destas camadas estabilizadas.

A utilização da curva de Agnesis para se determinar a equação da bacia de deflexão mostra-se uma ferramenta de análise de bacia de deflexões muito promissora para

estudos futuros. As equações obtidas por este método indicam a diferença estrutural de cada pavimento.

Os valores obtidos pelas retroanálises no segmento com base granular de BGS indicam que houve dificuldade de compactação, e que isso refletiu em um baixo módulo de resiliência retroanalizado, mostrando que desde a idade 0 apresentava um baixo valor. Todas as observações corroboram para a fadiga precoce do revestimento asfáltico. Os módulos de resiliência retroanalizados da base de BGTC encontram-se com valores compatíveis com os apresentados na bibliografia. Os módulos de resiliência das bases com RAP com Emulsão e com Espuma de Asfalto apresentam uma elevação com o tempo, demonstrando o ganho de rigidez devido à cura do material. As bases estabilizadas com emulsão ou com espuma de asfalto mostram-se com rigidez intermediária entre uma base granular e uma cimentada.

O cálculo de espessura equivalente apresentou boa correlação para o pavimento flexível, apresentando boa correlação entre a deflexão registrada em campo e este parâmetro. Já para os demais pavimentos, o cálculo não apresentou boa precisão, entretanto analisando o resultado do parâmetro independentemente do tipo de material empregado na construção, obteve-se boa correlação entre a deflexão e a espessura equivalente.

A análise de vida remanescente só foi possível ser realizada para o primeiro segmento, pois este foi o único que sofreu diferenças consideráveis nos níveis deflectométricos, e o método de cálculo pela norma DNER PRO11/89 mostrou que o fim da vida remanescente foi justamente quando o pavimento atingiu os limites da ANTT para reabilitação.

A modelagem por método dos elementos finitos mostrou-se ser uma ferramenta adequada que indica as variações de tensões e deformações com a evolução do processo de dano nos pavimentos flexíveis. Esta ferramenta também mostrou a estabilidade de camadas cimentadas com ao acúmulo do tráfego e o aumento de

rigidez de camadas estabilizadas por ligante asfáltico, ora emulsão, ora espuma de asfalto. Nestes últimos casos, pode-se observar que a camada de revestimento asfáltico é beneficiada pelo aumento de rigidez da base, aliviando tensões e deformações no revestimento.

Esta dissertação mostrou vários aspectos estruturais de bases granulares, estabilizadas por ligante asfáltico e cimentadas, sugerindo os benefícios das soluções mais indicadas para tráfego muito pesado.

6.1. Sugestões de pesquisas

Como sugestão para novas pesquisas a serem realizadas destaca-se a continuidade deste monitoramento para se acompanhar o desempenho dos pavimentos que ainda se encontram íntegros. E se enumera as seguintes sugestões:

- Replicar este monitoramento para pavimentos compostos por outros materiais, espessuras e em outros subleitos, a fim de se alimentar um banco de dados e calibrar os parâmetros aqui estudados.
- Realizar medições de temperatura ao longo da profundidade da camada de revestimento asfáltico para se descrever o gradiente térmico da camada de revestimento.
- Utilizar o ensaio de FWD com variação de temperatura para se estabelecer uma equação de correção da temperatura.
- Refinar o modelo de elementos finitos para obter resultados de tensão e deformação mais realistas com o campo, utilizando cargas dinâmicas, aplicando elasticidade não linear para as camadas.
- Investigar o efeito da tensão e deformação de tração nas camadas recicladas e a potencialidade de dados ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO Guide for Pavement Structures. AASHTO, Washington, D.C., 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. ABNT NBR 11578, Cimento Portland composto – Especificação.

_____. ABNT NBR 11803. Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento, 2013.

_____. ABNT NBR 12264 Sub-base ou base de brita graduada- Procedimento, 1991.

_____. ABNT NBR 5732 Cimento Portland comum, 1991.

_____. ABNT NBR 5733 Cimento Portland de alta resistência inicial. 1991.

_____. ABNT NBR 5735, Cimento Portland de alto-forno, 1991.

_____. ABNT NBR 5736, Cimento Portland pozolânico, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO, ADEBA, Manual Básico de Emulsões Asfálticas. Rio de Janeiro, 2º Edição, 2010.

ANP (2005) Resolução ANP Nº 19, de 11.7.2005 DOU 12.7.2005. Regulamento Técnico Nº 3/2005. Agência Nacional do Petróleo 2005.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION, ARRA (2001) - Basic Asphalt Recycling Manual 2001.

ARTERIS, ES-002. Especificação particular para execução de Brita Graduada Simples - BGS. CDT - Centro de Desenvolvimento Tecnológico. Revisão 04. 2014.

ARTERIS, ES-003. Especificação particular para execução de Brita Graduada Tratada com Cimento - BGTC. CDT - Centro de Desenvolvimento Tecnológico. Revisão 07. 2014.

ASPHALT ACADEMY (2009) Technical Guideline: Bitumen Stabilized Materials. 2ª edition 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM. ASTM E2583 Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD) 2005.

ASSOCIATION OF AUSTRALIAN AND NEW ZEALAND ROADS. AUSTROADS. Technical Basis of the Austroads Design procedures for flexible overlays on flexible pavements. Sydney, 2008.

AUTOPISTA FERNÃO DIAS, Disponível em:
<<http://www.autopistafernao.com.br/?link=institucional>> Acessado 15 agosto 2015.

BALBO, J. T. Estudos das propriedades Mecânicas das misturas de Brita e Cimento e sua Aplicação aos Pavimentos Semirrígidos. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

BALBO, J. T. Pavimentação Asfáltica – materiais, projeto e restauração. Oficina de Textos, São Paulo, 2007.

BENATTI, M. M. A., ROCHA, E., “Maison Canadá” Alta costura e consumo de luxo no Brasil, Pontifícia Universidade Católica deo Rio de Janeiro, 2011.

BENKELMAN, A. C., Ian KINGHAM, R., SCHMITT, H. M., (1962) Performance of treated and untreated aggregate bases. Conference on the AASHO Road Test, 1962.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros. ABEDA, Petrobras, Rio de Janeiro, 2008.

BONFIM, V. Estudo da granulometria resultante da fresagem de revestimentos asfálticos com vistas à reciclagem “in situ” a frio. 1999. (Dissertação de Mestrado). Engenharia de Transportes EPUSP, São Paulo, 1999.

BONZANO, U. (1950) Pratica e tecnica delle pavimentazionani stradali. Milano: Antonio Vallardi Editore, 1950.

BROSSEAUD, Y., Reciclagem de Misturas Asfálticas: Evolução após 20 anos e a situação atual na França. 3º Salão da Inovação ABCR – 7º Congresso de Rodovias e Concessões – Foz do Iguaçu – Brasil, 2011.

CARPENTER, S.H., GHUZLAN, K. A., SHEN, S. A., Fatigue endurance limit for highway and airport pavements. Proceedings Highway Reserch Board, Washinton, 2003.

CASTRO, L. N., Reciclagem a frio “in situ” com espuma de asfalto. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003

DAVID, D., (2006) Misturas asfálticas recicladas a frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. DER-PR ES-P 05/05, Pavimentação: Brita Graduada, 2005.

_____. DER-PR ES 16/05, Pavimentação: Brita Graduada Tratada com Cimento, 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO. DER-SP EP-DE-P00-008, Sub-base ou base de brita graduada, São Paulo, 2006.

_____. DER-SP ET-DE-P00/009, Sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento - BGTC, São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. DNER-ME 024/1994. Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman, Rio de Janeiro: IPR, 1994.

_____. DNER-ME 035/1998, Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro: IPR, 1998.

_____. DNER-ME 036/1994, Solo – Determinação da massa específica aparente, “in situ”, com o emprego do balão de borracha. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

_____. DNER-ME 049/1994. - Solos - Determinação do “índice de suporte califórnia” utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

_____. DNER-ME 054/1997. Equivalente de areia, Rio de Janeiro, IPR, 1997.

_____. DNER-ME 086/1994. Agregado – determinação do índice de forma, Rio de Janeiro, IPR, 1994.

_____. DNER-ME 089/1994. Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio, Rio de Janeiro, IPR, 1994.

_____. DNER-PRO 010/1979. Avaliação estrutural dos Pavimentos Flexíveis, procedimento A, Rio de Janeiro, IPR, 1979.

_____. DNER-PRO 011/1979. Avaliação estrutural dos Pavimentos Flexíveis, Procedimento B, Rio de Janeiro, IPR, 1979.

_____. DNER-PRO 269/1994. Projeto de restauração de pavimentos flexíveis: Tecnapav, Rio de Janeiro, IPR, 1994.

_____. DNER-PRO 273/1996. Determinação de deflexão utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD), Rio de Janeiro, IPR, 1996.

Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes. DNIT Manual de Pavimentação. Publicação IPR 719. Rio de Janeiro, 2006.

_____. DNIT 2011. Manual de Gerência de Pavimentos. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Publicação IPR 745, Rio de Janeiro, 2011.

_____. DNIT-700. Glossário de Termos Técnicos rodoviários. Rio de Janeiro: IPR, 1997.

_____. DNIT-ES 034/2005. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local – especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2005.

_____. DNIT-ES 169/2014. Pavimentação - Reciclagem de pavimento em usina com espuma de asfalto - Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2005.

_____. DNIT-ME 134/2010, Pavimentação - Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2005.

_____. DNIT-PRO 007/1994, Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos Procedimento. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

_____. DNIT-PRO 008/1994, Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos: procedimento. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

_____. DNIT-TER 005/2003, Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos: terminologia. Rio de Janeiro: IPR, 2003.

Fernando, E. G., W. Liu. (2001) Development of a Procedure for Temperature Correction of Backcalculated AC Modulus. Research Report 1863-1, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, Tex., 2001.

FERRI, S. Critérios de aceitação e controle da qualidade da execução de camadas de fundação de pavimentos novos através de métodos deflectométricos. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. -- ed.rev. -- São Paulo, 2013. 331 p.

FRITZEN, M. A., (2016) Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos. Tese (Doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2016.

FULLER, W. B., THOMPSON, S. E., (1907) The laws of proportioning concrete. Trans. Am. Soc. Civ. Eng. New York, 1907.

GENNESSEAUX, M. M. L., Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. -- São Paulo, 2015.

GOOGLE (2016) Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-22.873642,-46.3648532,17.58z>>, acessado 12 de maio de 2016.

Gopalakrishnan, K.; Manik, A. Co-variance matrix adaptation evolution strategy for pavement backcalculation. Construction and Building Materials, 24, 2177-2187, 2010.

GRUBBS, F. E., Procedure for detecting outlying observations in samples. Technometrics, v. 11, 1969.

GUIMARÃES, A. C. R., (2001) Estudo de deformação permanente em solo e a teoria do shakedown aplicada a pavimentos flexíveis. Tese (Mestrado) COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2001.

HASS, R., Modern Pavement Management, Florida, 1994

HAJJ, et al., Recommendations for the characterization of RAP aggregate properties using traditional testing and mixture volumetrics. Road Materials and Pavement Design. 2014.

Hal K. T., Darter M. I., Hoerner T. E., Khazanovich L., (1971), LTPP Data Analysis Phase 1 : Validation of Guidelines for K-Values Selection and Concrete Pavement Performance Prediction, Federal Highway Administration, McLean, (1997).

HAYNES, J. H. and YODER, E. J. Effects os Repeated Loading on Gravel and Crushed Stone Base Course Materials Used in The AASHO Road Test. Purdue University Lafayette, Indiana, EUA, 1963.

Hoffman M.S., (2003). Direct Method for Evaluating Structural Needs of Flexible Pavements with Falling-Weight Deflectometer Deflections, Transportation Research Record, 2003.

HOFFMAN, M. S.; THOMPSON, M. R. Mechanistic interpretation of nondestructive pavement testing deflections. Transportation Engineering Series: Civil Engineering Studies, n. 32. Illinois Cooperative Highway and Transportation, Series, n.190, Illinois: University of Illinois, 1981.

Horak, E., (1987). Aspects of deflection basin parameters used in a mechanistic rehabilitation design procedure for flexible pavements in South Africa. Tese (Philosophiae Doctor), University of Pretoria – 1987.

HUANG, Y. A., (2004) Pavement Analysis and Design, second edition, University of Kentucky, 2004.

Hveem, F. N., (1955). Pavement deflection and fatigue failures. IN: Annual Meeting – 1955.

JENKINS, K. J. (2000) Mix Design Considerations for Cold and Half-warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen. PhD Dissertation, University of Stellenbosch, South Africa.

KIM, Y.R.; PARK, H. Use of Falling Weight Deflectometer multi-load data for pavement strength estimation. Final Report FHWA/NC-2002-006, Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, 2002.

Kim, Y.R.; park, H. (2002), Use of Falling Weight Deflectometer multi-load data for pavement strength estimation. Final Report FHWA/NC-2002-006, Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, 2002.

KIM, Y.R.; RANJITHAN, R.S. Assessing pavement layer condition using deflection data. NCHRP 10-48, National Cooperative Highway Research Program, Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, 2002.

Lay, M. G. Ways of the World – A History of the World's Roads and of the Vehicles that used them. Rutgers University Press, EUA, 1992.

LEANDRI, P. LOSA, M. DI NATALE, A., Field validation of recycled cold mixes viscoelastic properties. Construction and Building Materials, 2014.

LEANDRI, P.; BACCI, R.; DI NATALE, A.; ROCCHIO, P. e LOSA, M. (2013) Appropriate and Reliable Use of Pavement Instrumentation on In-Service Roads. Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements, ASCE.

Livneh M., 2011. On the Reliability of Excluding Thickness in Forward-Calculating Pavement Parameters, Journal, Road Materials and Pavement Design, Volume 11, 2010.

LOIZOS, A and PAPAVALIOU, V, 2007. Assessment of In-Situ CIPR Performance using the Foam Asphalt Technique. International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials. Athens, Greece.

LOPES, F. M.; SANTOS, C. R. G.; FORTES. T.M; FERRI. S.; SUZUKI. C. Y. Proposta de metodologia para avaliação e pavimentos asfálticos utilizando características da bacias deflectométrica. In: 4º Congresso de Infraestrutura de Transportes – Coninfra 2010. SÃO PAULO, SP, 2010. ISSN 1983-3903.

Macêdo, J. A. G., (1996). Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis. Tese (Doutorado). Universidade do Rio de Janeiro – 1996.

MALYSZ, R., (2004), Comportamento mecânico de britas empregadas em pavimentação. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2004.

MARTÍNEZ, A. H., MIRÓ, R., PÉREZ-JIMÉNEZ, F., (2001) Spanish Experience with Gyrotory Compactor and Indirect Tensile Test in Design and Control of Cold Recycled Asphalt Pavement. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2014.

MOHSENI, A., (1998). LTPP seasonal asphalt concrete (AC) pavement temperature models. Federal Highway Administration, Georgetown (1998).

ODEMARK, N. (1949) Investigation on the elastic properties of soils and the design of pavements according to the theory of elasticity, Statens Veagstitute, Stockholm. 1949.

PEREIRA, L. A., A tensa inauguração da Fernão Dias, Revista Carga Pesada, Edição 145, 2008 disponível em: <<http://www.cargapesada.com.br/edicoesanteriores/edicao145/edicao145.php?id=069>> Acessada em: 14 agosto 2015

PEREIRA, A. C. O., (2003). Influência da drenagem subsuperficial no desempenho de pavimentos asfálticos. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PINTO, S. PREUSSLER, E. Pavimentação Rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Editora Copiarte, ISBN: 85-902537-1-6. Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. PMSP, Lei n. 14.015/2005 – Dispõe sobre o descarte e reciclagem de misturas asfálticas retiradas dos pavimentos urbanos municipais. 2005.

ROBERTS, F. F., (1996) Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction, Second edition, NAPA Education Foundation, Lanham, Maryland. 1996.

SANT'ANA, W. C., (2009) Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de vias de baixo volume de tráfego para o Estado do Maranhão / Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo W.C. Sant Ana. – ed. rev. – São Paulo, 2009. 341 p.

SANTIAGO, L. S., SOARES, J. B., (2015) Contribuição ao desenvolvimento do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos no Brasil, XXIX congresso nacional de pesquisa em transporte da ANPET, Ouro Preto. 2015.

South African Pavement Engineering Manual, SAPEN (2014). South African Pavement Engineering Manual. South Africa – (2014).

SUZUKI, C. Y. Contribuição ao estudo de pavimentos rodoviários com estrutura invertida (Sub-base Cimentada). Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

TALBOT A. M., RICHARD, F. E., (1923) The strength of concrete: its relation to the cement, aggregates, and water. Bulletin, Engineering Experiment Station. Urbana, Illinois, USA.

TEBALDI, G. et al., Classification of Recycled Asphalt (RA) Material. 2nd International Symposium on Asphalt Pavement and Environment, France. 2012

TIMM, D. H. (2009) Design, Construction and Instrumentation of the 2006 Test Track Structural Study. NCAT Report 09-01.

VILLIBOR, D. F., Estabilização Granulométrica ou Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 1982.

VIRGILIIS, A. L. C., Procedimento de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. -- ed.rev. São Paulo, 2009.

WIRTGEN, GMBH (2004a) Cold Recycling Manual. Wirtgen Publication. Germany, 2^o edition.

WIRTGEN, GMBH (2004b) Manual de reciclagem a frio. Wirtgen Publication. Alemanha, 2^o edição.

WIRTGEN, GMBH (2013) Cold Recycling Technology. Wirtgen Publication. Germany.

WSDOT EVERSERIES USER GUIDE. Pavement Analysis Computer Software and Case Studies. Washington State Department of Transportation, 2005.

Xu, B., S. R. Ranjithan, and Y. R. Kim. New Relationships Between Falling Weight Deflectometer Deflections and Asphalt Pavement Layer Condition Indicators. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1806, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2002, pp. 48-56.

YODER, E.; WITCZAK, M. Principles of pavement design. 2^a edição, Nova Iorque, EUA, John Wiley & Sons, 1975.

APÊNDICE A – RESUMO DE BACIAS POR SEGMENTOS HOMOGÊNEOS

Tabela 25 - Bacias do segmento 1 - BGS

Trecho	Idade	Posição	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm) Médias						
			Df1 0,0	Df2 20,0	Df3 30,0	Df4 45,0	Df5 60,0	Df6 90,0	Df7 120,0
BGS	Mês 0	EIXO	38,8	30,8	25,4	18,7	13,9	8,5	6,0
	Mês 0	TRE	40,2	31,6	25,6	18,4	13,3	7,8	5,5
	Mês 0	Média	39,5	31,2	25,5	18,5	13,6	8,1	5,8
	3 Meses	EIXO	49,0	39,1	32,3	24,0	18,0	11,2	7,9
	3 Meses	TRE	55,3	42,4	34,0	24,2	17,7	10,8	7,5
	3 Meses	Média	52,1	40,7	33,1	24,1	17,8	11,0	7,7
	7 Meses	EIXO	55,9	43,5	35,3	25,6	18,9	11,6	8,3
	7 Meses	TRE	61,6	45,3	35,4	24,7	18,0	11,2	8,2
	7 Meses	Média	58,7	44,4	35,3	25,1	18,4	11,4	8,2
	9 Meses	EIXO	67,7	49,7	38,5	26,5	19,0	11,6	8,5
	9 Meses	TRE	67,4	51,1	40,9	29,4	21,8	13,7	9,9
	9 Meses	Média	67,5	50,4	39,7	28,0	20,4	12,7	9,2
	12 Meses	EIXO	67,9	48,9	37,8	26,1	19,0	11,9	8,8
	12 Meses	TRE	79,5	58,3	45,6	32,0	23,5	14,7	10,8
	12 Meses	Média	73,7	53,6	41,7	29,1	21,2	13,3	9,8
	15 Meses	EIXO	65,2	44,8	33,0	21,1	14,4	8,7	6,5
	15 Meses	TRE	75,9	53,4	40,6	27,6	19,9	12,5	9,2
	15 Meses	Média	70,6	49,1	36,8	24,4	17,2	10,6	7,9

Tabela 26 - Bacias do segmento 2 - BGTC

Trecho	Idade	Posição	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm) Médias						
			Df1 0,0	Df2 20,0	Df3 30,0	Df4 45,0	Df5 60,0	Df6 90,0	Df7 120,0
BGTC	Mês 0	EIXO	7,5	5,9	5,4	4,8	4,3	3,3	2,6
	Mês 0	TRE	7,4	5,8	5,3	4,8	4,2	3,3	2,6
	Mês 0	Média	7,4	5,8	5,3	4,8	4,3	3,3	2,6
	3 Meses	EIXO	8,9	7,2	6,7	6,0	5,4	4,3	3,5
	3 Meses	TRE	9,1	7,4	6,9	6,2	5,6	4,5	3,6
	3 Meses	Média	9,0	7,3	6,8	6,1	5,5	4,4	3,5
	7 Meses	EIXO	7,1	5,6	5,1	4,6	4,0	3,2	2,5
	7 Meses	TRE	7,9	6,4	5,9	5,4	4,8	3,8	3,1
	7 Meses	Média	7,5	6,0	5,5	5,0	4,4	3,5	2,8
	9 Meses	EIXO	9,1	7,4	6,8	6,2	5,6	4,5	3,6
	9 Meses	TRE	7,0	5,4	4,9	4,4	3,9	3,0	2,3
	9 Meses	Média	8,1	6,4	5,9	5,3	4,7	3,7	2,9
	12 Meses	EIXO	6,6	5,1	4,6	4,1	3,6	2,8	2,1
	12 Meses	TRE	7,2	5,5	5,0	4,4	3,9	3,0	2,3
	12 Meses	Média	6,9	5,3	4,8	4,2	3,7	2,9	2,2
	15 Meses	EIXO	6,4	5,0	4,5	4,0	3,5	2,8	2,1
	15 Meses	TRE	7,7	6,2	5,7	5,1	4,6	3,6	2,9
	15 Meses	Média	7,1	5,6	5,1	4,5	4,0	3,2	2,5

Tabela 27 - Bacias do segmento 3 - RAP+Emsulsão

Trecho	Idade	Posição	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm) Médias						
			Df1 0,0	Df2 20,0	Df3 30,0	Df4 45,0	Df5 60,0	Df6 90,0	Df7 120,0
RAP + Emulsão	Mês 0	EIXO	15,9	11,6	9,4	7,2	5,7	3,9	2,9
	Mês 0	TRE	14,8	10,2	8,2	6,3	5,0	3,4	2,5
	Mês 0	Média	15,3	10,9	8,8	6,7	5,3	3,6	2,7
	3 Meses	EIXO	13,5	10,0	8,2	6,7	5,5	3,9	2,9
	3 Meses	TRE	12,5	9,4	8,0	6,6	5,5	4,0	3,0
	3 Meses	Média	13,0	9,7	8,1	6,6	5,5	4,0	3,0
	7 Meses	EIXO	12,1	9,1	7,8	6,4	5,4	3,9	2,9
	7 Meses	TRE	10,8	7,6	6,2	4,9	4,0	2,8	2,1
	7 Meses	Média	11,5	8,4	7,0	5,7	4,7	3,4	2,5
	9 Meses	EIXO	14,1	11,0	9,5	8,0	6,8	5,1	3,9
	9 Meses	TRE	13,1	10,1	8,7	7,2	6,1	4,5	3,4
	9 Meses	Média	13,6	10,5	9,1	7,6	6,5	4,8	3,6
	12 Meses	EIXO	11,6	8,7	7,5	6,2	5,2	3,8	2,8
	12 Meses	TRE	11,0	8,0	6,7	5,5	4,6	3,3	2,5
	12 Meses	Média	11,3	8,4	7,1	5,8	4,9	3,5	2,7
	15 Meses	EIXO	10,1	7,2	6,0	4,8	4,0	2,8	2,1
	15 Meses	TRE	12,0	9,1	7,8	6,4	5,4	3,9	3,0
	15 Meses	Média	11,0	8,2	6,9	5,6	4,7	3,4	2,5

Tabela 28 - Bacias do segmento 4 - RAP+Espuma

Trecho	Idade	Posição	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm) Médias						
			Df1 0,0	Df2 20,0	Df3 30,0	Df4 45,0	Df5 60,0	Df6 90,0	Df7 120,0
RAP + ESPUMA	Mês 0	EIXO	14,0	10,4	8,6	6,8	5,6	3,9	2,9
	Mês 0	TRE	13,8	10,3	8,6	6,8	5,6	3,9	2,9
	Mês 0	Média	13,9	10,3	8,6	6,8	5,6	3,9	2,9
	3 Meses	EIXO	12,8	9,8	8,4	7,0	5,9	4,3	3,2
	3 Meses	TRE	13,6	10,6	9,1	7,6	6,5	4,8	3,6
	3 Meses	Média	13,2	10,2	8,8	7,3	6,2	4,5	3,4
	7 Meses	EIXO	13,3	10,3	8,9	7,5	6,4	4,7	3,6
	7 Meses	TRE	12,4	9,7	8,6	7,3	6,3	4,8	3,7
	7 Meses	Média	12,8	10,0	8,8	7,4	6,4	4,8	3,6
	9 Meses	EIXO	13,5	10,6	9,3	7,9	6,7	5,0	3,9
	9 Meses	TRE	14,5	11,5	10,2	8,7	7,5	5,6	4,3
	9 Meses	Média	14,0	11,1	9,7	8,3	7,1	5,3	4,1
	12 Meses	EIXO	11,1	8,3	7,1	5,8	4,9	3,5	2,7
	12 Meses	TRE	9,7	7,3	6,3	5,2	4,4	3,2	2,4
	12 Meses	Média	10,4	7,8	6,7	5,5	4,7	3,4	2,5
	15 Meses	EIXO	9,6	7,1	6,0	5,0	4,2	3,0	2,3
	15 Meses	TRE	11,6	8,9	7,8	6,6	5,6	4,2	3,2
	15 Meses	Média	10,6	8,0	6,9	5,8	4,9	3,6	2,7

APÊNDICE B – BACIAS RETROANALISADAS

Tabela 29 - Bacias retroanalizadas do segmento 1 - BGS nas idades de 0 a 9 meses

Material de Base	Idade	Faixa	Bacia	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Módulo Retroanalizado		
				Df0	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Capa	BGS	Reman.
				0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	MPa	MPa	MPa
BGS	0 Meses	TRE	M	40,2	31,6	25,6	18,4	13,3	7,8	5,5	4.827,65	100,98	151,62
			M+ σ	48,5	38,8	32,0	23,6	17,5	10,6	7,5	4.413,85	90,00	114,99
			M- σ	35,0	27,2	21,9	15,6	11,3	6,7	4,8	5.092,41	130,00	176,33
		EIXO	M	38,8	30,8	25,4	18,7	13,9	8,5	6,0	5.202,38	125,00	142,63
			M+ σ	44,0	35,3	29,2	21,7	16,3	10,0	7,1	4.853,09	110,00	122,13
			M- σ	33,8	26,6	21,7	15,7	11,5	7,0	5,0	5.635,47	140,00	172,10
		Média		40,0	31,7	26,0	18,9	14,0	8,4	6,0	5.004,14	116,00	146,63
	3 Meses	TRE	M	55,3	42,4	34,0	24,2	17,7	10,8	7,5	2.847,34	100,00	109,72
			M+ σ	66,7	50,3	39,8	27,8	20,0	12,0	8,7	2.206,36	80,00	97,00
			M- σ	43,6	34,4	28,2	20,6	15,3	9,3	6,6	4.425,31	115,00	128,64
		EIXO	M	49,0	39,1	32,3	24,0	18,0	11,2	7,9	4.097,65	100,00	109,19
			M+ σ	59,0	46,7	38,3	28,0	20,7	12,6	8,9	3.361,26	80,00	95,85
			M- σ	40,6	32,8	27,3	20,4	15,4	9,5	6,7	5.440,39	120,00	129,48
		Média		52,4	41,0	33,3	24,2	17,8	10,9	7,7	3.729,72	99,17	111,65
	7 Meses	TRE	M	61,6	45,3	35,4	24,7	18,0	11,2	8,2	1.944,16	110,00	104,89
			M+ σ	71,5	52,3	40,7	28,2	20,5	12,7	9,3	1.625,38	95,00	92,42
			M- σ	51,4	38,5	30,3	21,2	15,3	9,4	6,8	2.652,91	115,00	125,24
		EIXO	M	55,9	43,5	35,3	25,6	18,9	11,6	8,3	3.076,03	100,00	103,17
			M+ σ	65,9	50,6	40,6	29,2	21,4	13,2	9,5	2.367,66	90,00	90,02
			M- σ	45,6	36,2	29,8	21,9	16,3	10,0	7,1	4.371,53	110,00	121,03
		Média		58,6	44,4	35,3	25,1	18,4	11,3	8,2	2.672,95	103,33	106,13
	9 Meses	TRE	M	67,4	51,1	40,9	29,4	21,8	13,7	9,9	1.432,07	103,06	86,74
			M+ σ	85,2	61,5	47,5	32,9	23,9	15,0	11,0	1.241,13	85,63	78,03
			M- σ	62,8	46,4	36,5	25,8	19,0	11,9	8,7	1.909,42	116,11	98,53
		EIXO	M	67,7	49,7	38,5	26,5	19,0	11,6	8,5	1.806,60	90,00	100,41
			M+ σ	73,6	54,2	42,3	29,3	21,1	12,9	9,4	1.683,23	85,00	90,25
			M- σ	61,4	44,8	34,5	23,5	16,7	10,1	7,4	1.964,95	95,00	113,54
		Média		69,7	51,3	40,0	27,9	20,3	12,5	9,2	1.672,90	95,80	94,58

Tabela 30 - Bacias retroanalizadas do segmento 1 - BGS nas idades de 12 e 15 meses

Material de Base	Idade	Faixa	Bacia	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Módulo Retroanalizado		
				Df0	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Capa	BGS	Reman.
				0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	MPa	MPa	MPa
BGS	12 Meses	TRE	M	79,5	58,3	45,6	32,0	23,5	14,7	10,8	1.440,23	92,27	80,00
			M+ σ	89,9	64,5	49,6	34,2	24,8	15,6	11,4	1.140,84	81,92	75,00
			M- σ	71,6	52,6	41,1	28,7	20,9	13,0	9,5	1.645,54	97,27	90,00
		EIXO	M	67,9	48,9	37,8	26,1	19,0	11,9	8,8	1.536,05	108,85	98,09
			M+ σ	76,4	56,0	43,9	31,0	22,8	14,4	10,5	1.472,49	100,00	82,40
			M- σ	54,4	41,3	32,9	23,5	17,4	10,8	7,8	2.608,72	120,00	109,67
		Média		73,3	53,6	41,8	29,3	21,4	13,4	9,8	1.640,65	100,05	89,19
	15 Meses	TRE	M	75,9	53,4	40,6	27,6	19,9	12,5	9,2	1.373,45	101,36	95,96
			M+ σ	85,3	56,5	41,3	27,2	19,5	12,4	9,2	1.236,10	89,52	87,74
			M- σ	65,2	46,0	34,9	23,5	16,7	10,4	7,7	1.648,14	109,14	107,09
		EIXO	M	65,2	44,8	33,0	21,1	14,4	8,7	6,5	1.451,00	87,74	128,31
			M+ σ	72,1	49,3	36,4	23,5	16,3	10,0	7,4	1.243,72	86,82	112,71
			M- σ	58,6	40,9	30,6	20,2	14,2	8,7	6,4	1.658,29	107,97	130,60
		Média		70,4	48,5	36,1	23,9	16,8	10,4	7,7	1.435,12	97,09	110,40

Tabela 31 - Bacias retroanalizadas do segmento 2 - BGTC nas idades de 0 a 9 meses

Material de Base	Idade	Faixa	Bacia	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Módulo Retroanalizado		
				Df0	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Capa	BGS	Reman.
				0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	MPa	MPa	MPa
BGTC	0 Meses	TRE	M	7,4	5,8	5,3	4,8	4,2	3,3	2,6	4.883,11	10.871,91	372,67
			M+ σ	8,4	6,5	6,0	5,3	4,7	3,7	2,9	4.308,63	9.000,00	337,34
			M- σ	6,6	5,1	4,6	4,1	3,7	2,9	2,2	5.313,97	11.224,06	438,63
		EIXO	M	7,5	5,9	5,4	4,8	4,3	3,3	2,6	5.125,00	9.648,93	375,00
			M+ σ	8,3	6,6	6,1	5,5	4,9	3,9	3,1	4.984,38	9.000,00	321,44
			M- σ	5,9	4,4	4,0	3,5	3,1	2,3	1,8	5.574,57	9.861,53	546,20
		Média		7,3	5,7	5,2	4,7	4,1	3,2	2,5	5.031,61	9.934,41	398,55
	3 Meses	TRE	M	9,1	7,4	6,9	6,2	5,6	4,5	3,6	4.746,33	10.000,00	268,81
			M+ σ	10,1	8,1	7,5	6,7	6,1	4,8	3,9	4.255,33	8.000,00	254,39
			M- σ	8,2	6,6	6,2	5,6	5,1	4,1	3,3	5.073,66	11.500,00	300,45
		EIXO	M	8,9	7,2	6,7	6,0	5,4	4,3	3,5	4.972,93	9.191,56	282,88
			M+ σ	10,2	8,3	7,6	6,9	6,3	5,0	4,0	3.978,35	9.000,00	243,74
			M- σ	7,4	6,1	5,7	5,2	4,7	3,8	3,1	5.967,52	13.090,57	320,39
		Média		9,0	7,3	6,7	6,1	5,5	4,4	3,5	4.832,35	10.130,36	278,44
	7 Meses	TRE	M	7,9	6,4	5,9	5,4	4,8	3,8	3,1	5.571,83	10.000,00	320,00
			M+ σ	9,2	7,4	6,9	6,2	5,6	4,5	3,6	4.812,04	9.123,75	272,73
			M- σ	6,7	5,4	5,0	4,5	4,0	3,2	2,5	6.620,55	11.000,00	390,00
		EIXO	M	7,1	5,6	5,1	4,6	4,0	3,2	2,5	5.210,64	10.500,00	394,10
			M+ σ	8,2	6,4	5,8	5,2	4,6	3,6	2,9	4.530,99	9.000,00	343,69
			M- σ	6,2	4,8	4,4	3,9	3,5	2,7	2,1	5.663,74	11.500,00	463,24
		Média		7,6	6,0	5,5	5,0	4,4	3,5	2,8	5.401,63	10.187,29	363,96
	9 Meses	TRE	M	7,0	5,4	4,9	4,4	3,9	3,0	2,3	4.930,69	9.750,00	242,29
			M+ σ	10,7	8,9	8,2	7,5	6,8	5,6	4,5	4.437,62	9.100,00	215,91
			M- σ	8,6	7,0	6,5	5,9	5,4	4,3	3,5	5.423,76	10.200,00	281,33
		EIXO	M	9,1	7,4	6,8	6,2	5,6	4,5	3,6	4.372,56	10.000,00	274,78
			M+ σ	10,3	8,3	7,6	6,9	6,3	5,0	4,0	3.802,23	9.250,00	244,12
			M- σ	8,1	6,5	6,0	5,4	4,9	3,9	3,1	5.056,96	10.750,00	313,70
		Média		9,0	7,2	6,7	6,1	5,5	4,4	3,5	4.670,64	9.841,67	262,02

Tabela 32 - Bacias retroanalizadas do segmento 2 - BGTC nas idades de 12 e 15 meses

Material de Base	Idade	Faixa	Bacia	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Módulo Retroanalizado		
				Df0	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Capa	BGS	Reman.
				0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	MPa	MPa	MPa
BGTC	12 Meses	TRE	M	7,2	5,5	5,0	4,4	3,9	3,0	2,3	4.781,87	9.000,00	418,96
			M+ σ	7,8	6,0	5,4	4,8	4,2	3,2	2,5	4.202,25	8.500,00	391,05
			M- σ	6,6	5,1	4,6	4,1	3,6	2,8	2,2	5.204,22	10.000,00	456,96
		EIXO	M	6,6	5,1	4,6	4,1	3,6	2,8	2,1	4.979,71	9.500,00	431,70
			M+ σ	8,3	5,9	5,2	4,6	4,0	3,0	2,3	2.935,45	8.500,00	422,08
			M- σ	6,1	4,7	4,3	3,8	3,4	2,6	2,0	5.780,42	11.000,00	483,16
		Média		7,1	5,4	4,8	4,3	3,8	2,9	2,3	4.647,32	9.416,67	433,99
	15 Meses	TRE	M	7,7	6,2	5,7	5,1	4,6	3,6	2,9	5.337,89	10.000,00	343,90
			M+ σ	8,8	7,0	6,5	5,8	5,2	4,2	3,3	4.495,07	9.250,00	297,96
			M- σ	6,8	5,4	5,0	4,4	4,0	3,1	2,5	5.899,78	10.500,00	399,91
		EIXO	M	6,4	5,0	4,5	4,0	3,5	2,8	2,1	5.869,00	10.000,00	457,52
			M+ σ	7,4	5,7	5,1	4,6	4,0	3,1	2,4	4.537,31	9.000,00	407,72
			M- σ	5,7	4,3	3,9	3,4	3,0	2,3	1,8	6.001,61	10.500,00	549,75
		Média		7,2	5,6	5,1	4,6	4,1	3,2	2,5	5.356,78	9.875,00	409,46

Tabela 33 - Bacias retroanalizadas do segmento 3 - RAP+Emsulsão nas idades de 0 a 9 meses

Material de Base	Idade	Faixa	Bacia	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Módulo Retroanalizado		
				Df0	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Capa	BGS	Reman.
				0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	MPa	MPa	MPa
RAP+Emsulsão	0 Meses	TRE	M	14,8	10,2	8,2	6,3	5,0	3,4	2,5	5.037,03	1.000,19	368,18
			M+ σ	16,5	11,9	9,5	7,2	5,7	3,9	2,8	4.444,44	825,00	321,00
			M- σ	12,0	8,5	6,8	5,2	4,1	2,8	2,1	5.333,32	1.233,00	442,03
		EIXO	M	15,9	11,6	9,4	7,2	5,7	3,9	2,9	4.943,26	1.293,50	321,25
			M+ σ	18,6	14,0	11,6	9,0	7,3	5,0	3,7	4.749,40	1.100,00	293,98
			M- σ	13,2	9,3	7,3	5,3	4,1	2,7	2,0	5.427,89	1.450,00	354,87
		Média		15,2	10,9	8,8	6,7	5,3	3,6	2,7	4.989,22	1.150,28	350,22
	3 Meses	TRE	M	12,5	9,4	8,0	6,6	5,5	4,0	3,0	4.756,42	1.989,62	315,39
			M+ σ	15,4	11,5	9,8	8,2	6,9	5,0	3,8	3.432,19	1.757,70	254,21
			M- σ	10,0	7,4	6,2	5,1	4,3	3,1	2,3	5.216,72	2.565,96	408,95
		EIXO	M	13,5	10,0	8,2	6,7	5,5	3,9	2,9	4.726,13	1.500,00	324,06
			M+ σ	13,7	9,7	7,9	6,2	5,0	3,5	2,6	4.165,41	1.300,00	262,41
			M- σ	11,0	8,0	6,6	5,2	4,3	3,0	2,2	5.366,97	1.767,75	421,00
		Média		12,7	9,3	7,8	6,3	5,2	3,7	2,8	4.610,64	1.813,51	331,00
	7 Meses	TRE	M	10,8	7,6	6,2	4,9	4,0	2,8	2,1	4.449,55	1.900,00	446,35
			M+ σ	13,6	10,0	8,4	6,9	5,7	4,1	3,0	4.045,05	1.700,00	310,00
			M- σ	9,3	6,7	5,6	4,5	3,7	2,6	2,0	5.056,31	2.500,00	480,64
		EIXO	M	12,1	9,1	7,8	6,4	5,4	3,9	2,9	4.727,42	2.100,00	325,02
			M+ σ	14,7	11,1	9,5	7,9	6,7	4,9	3,7	3.742,54	1.900,00	258,52
			M- σ	10,0	7,2	6,1	4,9	4,1	2,9	2,2	5.121,38	2.400,00	431,00
		Média		11,8	8,6	7,3	5,9	4,9	3,5	2,7	4.523,71	2.083,33	375,26
	9 Meses	TRE	M	13,1	10,1	8,7	7,2	6,1	4,5	3,4	4.811,66	2.037,77	281,82
			M+ σ	17,6	14,1	12,4	10,6	9,1	6,9	5,3	4.226,46	1.800,00	182,45
			M- σ	10,8	8,1	6,9	5,6	4,7	3,4	2,6	5.201,79	2.300,00	371,96
		EIXO	M	14,1	11,0	9,5	8,0	6,8	5,1	3,9	4.815,24	2.000,00	248,66
			M+ σ	16,7	13,2	11,5	9,7	8,3	6,2	4,8	4.107,12	1.800,00	201,79
			M- σ	11,8	8,9	7,7	6,3	5,3	3,9	2,9	5.098,49	2.200,00	325,25
		Média		14,0	10,9	9,4	7,9	6,7	5,0	3,8	4.710,13	2.022,96	268,66

Tabela 34 - Bacias retroanalizadas do segmento 3 - RAP+Emulsão nas idades de 12 e 15 meses

Material de Base	Idade	Faixa	Bacia	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Módulo Retroanalizado		
				Df0	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Capa	BGS	Reman.
				0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	MPa	MPa	MPa
RAP+Emulsão	12 Meses	TRE	M	11,0	8,0	6,7	5,5	4,6	3,3	2,5	4.657,6	2.200,0	385,2
			M+ σ	13,3	9,8	8,3	6,8	5,7	4,1	3,1	3.929,8	1.900,0	308,4
			M- σ	8,8	6,3	5,2	4,1	3,4	2,4	1,8	5.385,3	2.500,0	526,8
		EIXO	M	11,6	8,7	7,5	6,2	5,2	3,8	2,8	5.097,7	2.223,0	335,4
			M+ σ	14,1	10,5	8,9	7,2	6,0	4,3	3,2	4.394,6	1.600,0	294,2
			M- σ	9,7	7,2	6,1	5,0	4,2	3,0	2,3	5.625,1	2.600,0	421,5
		Média		11,4	8,4	7,1	5,8	4,8	3,5	2,6	4.848,37	2.170,50	378,57
	15 Meses	TRE	M	12,0	9,1	7,8	6,4	5,4	3,9	3,0	5.166,85	2.100,00	322,04
			M+ σ	14,0	10,8	9,3	7,7	6,6	4,8	3,6	4.736,28	1.900,00	261,83
			M- σ	9,3	6,9	4,9	4,9	4,1	3,0	2,2	5.597,42	2.900,00	427,30
		EIXO	M	10,1	7,2	6,0	4,8	4,0	2,8	2,1	5.013,41	2.200,00	449,27
			M+ σ	12,0	8,8	7,5	6,1	5,1	3,7	2,7	4.456,37	2.050,00	346,20
			M- σ	7,9	5,6	4,6	3,7	3,0	2,1	1,6	5.570,46	2.800,00	599,37
		Média		10,9	8,1	6,7	5,6	4,7	3,4	2,5	5.090,13	2.325,00	401,00

Tabela 35 - Bacias retroanalizadas do segmento 4 - RAP+Esmuma nas idades de 0 a 9 meses

Material de Base	Idade	Faixa	Bacia	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Módulo Retroanalizado		
				Df0	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Capa	BGS	Reman.
				0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	MPa	MPa	MPa
RAP+Espuma	0 Meses	TRE	M	13,8	10,3	8,6	6,8	5,6	3,9	2,9	5.063,28	1.350,00	318,89
			M+ σ	15,4	11,3	9,3	7,3	6,0	4,2	3,1	4.372,84	1.150,00	301,83
			M- σ	12,6	9,3	7,8	6,2	5,1	3,6	2,6	5.293,43	1.500,00	353,06
		EIXO	M	14,0	10,4	8,6	6,8	5,6	3,9	2,9	4.943,26	1.293,50	321,25
			M+ σ	15,5	11,5	9,5	7,5	6,1	4,3	3,2	4.749,40	1.100,00	293,98
			M- σ	12,7	9,4	7,8	6,2	5,0	3,5	2,6	5.427,89	1.450,00	354,87
		Média		14,0	10,4	8,6	6,8	5,6	3,9	2,9	4.975,02	1.307,25	323,98
	3 Meses	TRE	M	13,6	10,6	9,1	7,6	6,5	4,8	3,6	4.930,36	2.000,00	263,97
			M+ σ	14,9	11,7	10,1	8,5	7,2	5,4	4,1	4.786,70	1.850,00	234,90
			M- σ	12,0	9,3	8,1	6,9	5,9	4,4	3,4	5.440,39	2.530,00	286,78
		EIXO	M	12,8	9,8	8,4	7,0	5,9	4,3	3,2	5.045,46	2.000,00	294,46
			M+ σ	14,2	10,8	9,3	7,7	6,5	4,6	3,5	4.594,97	1.750,00	269,41
			M- σ	11,5	8,8	7,5	6,3	5,3	3,9	2,9	5.405,85	2.300,00	327,08
		Média		13,2	10,2	8,8	7,3	6,2	4,6	3,5	5.033,95	2.071,67	279,43
	7 Meses	TRE	M	12,4	9,7	8,6	7,3	6,3	4,8	3,7	5.016,82	2.800,00	290,36
			M+ σ	14,1	11,0	9,6	8,1	7,0	5,2	4,0	4.351,30	2.300,00	240,54
			M- σ	10,9	8,6	7,5	6,4	5,5	4,2	3,2	6.103,66	3.000,00	349,11
		EIXO	M	13,3	10,3	8,9	7,5	6,4	4,7	3,6	5.219,86	2.300,00	260,32
			M+ σ	14,8	11,2	9,6	8,0	6,8	5,0	3,8	3.742,54	1.750,00	251,03
			M- σ	11,6	9,0	7,9	6,7	5,8	4,3	3,3	5.909,28	2.500,00	295,69
		Média		12,8	10,0	8,7	7,4	6,3	4,7	3,6	5.057,24	2.441,67	281,18
	9 Meses	TRE	M	14,5	11,5	10,2	8,7	7,5	5,6	4,3	5.078,15	2.200,00	222,39
			M+ σ	16,9	13,5	11,9	10,2	8,8	6,6	5,1	4.422,90	1.900,00	189,23
			M- σ	12,0	9,5	8,2	7,1	6,2	4,6	3,6	6.061,02	2.600,00	270,82
		EIXO	M	13,5	10,6	9,3	7,9	6,7	5,0	3,9	4.906,31	2.300,00	250,15
			M+ σ	15,8	12,4	10,8	9,2	7,9	5,9	4,5	4.088,59	2.000,00	213,21
			M- σ	11,7	9,2	8,1	6,9	5,9	4,4	3,4	6.132,89	2.600,00	283,56
		Média		14,1	11,1	9,7	8,3	7,2	5,4	4,1	5.114,98	2.266,67	238,23

Tabela 36 - Bacias retroanalizadas do segmento 4 – RAP+Espuma nas idades de 12 e 15 meses

Material de Base	Idade	Faixa	Bacia	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Módulo Retroanalizado		
				Df0	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Capa	BGS	Reman.
				0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	MPa	MPa	MPa
RAP+Espuma	12 Meses	TRE	M	9,7	7,3	6,3	5,2	4,4	3,2	2,4	5.495,8	2.900,0	392,8
			M+ σ	11,1	8,2	7,0	5,8	4,9	3,6	2,7	4.710,7	2.500,0	353,8
			M- σ	8,6	6,4	5,5	4,5	3,8	2,8	2,1	5.809,8	3.200,0	457,5
		EIXO	M	11,1	8,3	7,1	5,8	4,9	3,5	2,7	5.028,1	2.324,2	357,7
			M+ σ	13,5	10,1	8,5	6,9	5,8	4,1	3,1	4.458,9	1.700,0	306,1
			M- σ	9,1	6,8	5,8	4,8	4,1	3,0	2,2	5.312,7	3.200,0	426,9
		Média		10,5	7,8	6,7	5,5	4,6	3,4	2,5	5.136,00	2.637,37	382,48
	15 Meses	TRE	M	11,6	8,9	7,8	6,6	5,6	4,2	3,2	5.031,1	2.700,0	303,0
			M+ σ	13,1	9,9	8,6	7,2	6,2	4,5	3,4	4.268,8	2.300,0	279,1
			M- σ	10,2	7,8	6,8	5,7	4,9	3,6	2,8	5.488,5	3.050,0	347,7
		EIXO	M	9,6	7,1	6,0	5,0	4,2	3,0	2,3	5.076,8	2.800,0	422,0
			M+ σ	10,8	7,8	6,6	5,4	4,5	3,3	2,4	4.472,4	2.400,0	388,8
			M- σ	8,5	6,3	5,3	4,4	3,7	2,7	2,0	5.681,2	3.200,0	473,3
		Média		10,6	8,0	6,9	5,7	4,8	3,6	2,7	5.003,13	2.741,67	368,97