MARCELO OLIVEIRA DA COSTA

Considerações sobre os métodos de dimensionamento estrutural de pavimentos com camadas recicladas a frio com espuma de asfalto

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Carlos Yukio Suzuki

São Paulo

2016

MARCELO OLIVEIRA DA COSTA

Considerações sobre os métodos de dimensionamento estrutural de pavimentos com camadas recicladas a frio com espuma de asfalto

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Área de Concentração: Engenharia de
Transportes

Orientador: Prof. Dr. Carlos Yukio Suzuki

São Paulo

2016

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

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Costa, Marcelo Oliveira

Considerações sobre os métodos de dimensionamento estrutural de pavimentos com camadas recicladas a frio com espuma de asfalto / M. O. Costa -- versão corr. -- São Paulo, 2016.

177 p.

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

1.Pavimentos flexíveis 2.Dimensionamento estrutural 3.Reciclagem profunda 4.Espuma de asfalto I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha amada esposa Amanda por todo o carinho, suporte, apoio e compreensão neste desafio concomitante à nossa nova jornada.

Ao Professor Doutor Carlos Suzuki pela orientação e ensino, e por compartilhar muito de seu conhecimento, tanto acadêmico como profissional.

Aos membros da banca de qualificação, Professora Doutora Rosângela Motta e Doutor André Vale, e da banca de defesa, Professora Doutora Kamilla Vasconcelos e Professor Doutor Glauco Tulio Pessa Fabbri, pela disposição em avaliar o trabalho e contribuir com sugestões.

Aos Professores Doutores José Tadeu Balbo e Liedi Bernucci pelos ensinamentos ministrados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação.

Aos amigos que trabalharam comigo na Planservi Engenharia: Gabriel, Claudioni, Vinícius, Antônio Leite, Jorge, Antônio França e Raphael. E em especial ao Caio Rubens e Flaviane, pelas recomendações e ajuda na fase final deste estudo.

Ao eng.^o Valmir Bonfim pela oportunidade de acompanhar a execução do trecho experimental e levantamentos deflectométricos na Rodovia SP 070.

À minha família, de quem sempre recebi incentivo ao estudo, em especial a meus pais e irmãos.

E a todos, amigos e colegas, que de alguma forma contribuíram para a conclusão de mais uma etapa da minha formação.

Para todos vocês, gigantes, deixo meu muito obrigado.

Somos como anões aos ombros de gigantes.
Podemos ver mais, e mais longe do que
eles, não devido à acuidade da nossa visão
ou à altura do nosso corpo, mas porque
somos mantidos e elevados pela estatura de
gigantes.

Bernardo de Chartres

RESUMO

A reciclagem profunda com espuma de asfalto tem sido uma alternativa de sucesso para a restauração de pavimentos degradados. Em relação às soluções tradicionais de reabilitação, como os recapeamentos, tem a vantagem de proporcionar a correção de defeitos em camadas inferiores, com a manutenção ou pequena elevação do greide da pista, além de ganhos ambientais, como um menor consumo de materiais virgens da natureza e redução do volume de material descartado. Entretanto, no Brasil não há método para dimensionamento estrutural para esta tecnologia, o que dificulta seu emprego. Para o desenvolvimento de um procedimento de dimensionamento que contemple este tipo de solução, foram estudados métodos presentes na bibliografia internacional: guia da AASHTO de 1993 e Caltrans, dos EUA, TRL386 e TRL611, da Inglaterra, as duas versões do guia sul-africano TG2 e os métodos oriundos do Austroads, tanto o procedimento interino de 2011 como adaptações de órgãos da Austrália e Nova Zelândia. Observou-se divergência de opiniões quanto ao comportamento do material reciclado com espuma de asfalto. Alguns órgãos e autores consideram o comportamento do mesmo mais próximo às misturas asfálticas, sendo o mecanismo de falha o trincamento, e outros o definem como semelhante a um material granular modificado com alta coesão e ruptura devido às deformações permanentes. Correlaciona-se tal associação ao teor de espuma usualmente utilizado nas obras rodoviárias. Outros aspectos que se destacam para este tipo de base são o ganho de resistência ao longo do tempo devido à cura, mesmo com início da operação da rodovia e a importância da infraestrutura remanescente no dimensionamento. Tais fatos foram corroborados pelos estudos de caso e resultados do trecho experimental construído na Rodovia Ayrton Senna – SP 070, monitorado por meio de ensaios deflectométricos com FWD durante um ano. Como resultado do trabalho, foi proposto um procedimento para o dimensionamento estrutural de pavimentos com camadas recicladas a frio com espuma de asfalto utilizando dados deflectométricos que atende o método do Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e incorpora diferentes aspectos na análise mecanicista. Outras conclusões são a viabilidade técnica a longo prazo da solução mencionada e a importância do controle tecnológico, com ênfase para o monitoramento deflectométrico nos primeiros meses de operação do pavimento para averiguar a evolução da cura do material.

Palavras-chave: Pavimentos flexíveis. Dimensionamento estrutural. Reciclagem profunda. Espuma de asfalto.

ABSTRACT

Full-depth pavement reclamation with foamed asphalt has been a successful alternative for the rehabilitation of degraded pavements. In relation to the traditional rehabilitation methods, such as overlays, it has the advantage of provide the correction of the lower layer's defects considering the maintenance of the road grade or slight increase of it. Besides that, there are environmental gains, with less consumption for virgin materials and reduction of discarded material volume. However, in Brazil there is no structural design method for this technology, which hinders its use. To develop a design procedure which includes this kind of solution, several international methods were studied, like AASHTO (1993) and CALTRANS, from the USA; TRL386 and TRL611, from England; TG2 guide, from South Africa; and methods derived from the Austroads were studied, both, the interim procedure 2011 and local departments adaptations from Australia and New Zealand. There are divergent opinions of the behavior of the recycled material with foamed bitumen. Some agencies and authors consider the behavior of it similar to the asphalt mixtures, and the failure mechanism cracking due to fatigue. Others define it as similar to modified granular material with high cohesion and disruption due to permanent deformation. Such association is related to the foamed asphalt content usually used in road works. Other aspects that stand for such basecourse material are the gain of strength over time due to cure, even with the beginning of the highway operation and the importance of the remaining pavement's layers in design process. These facts were corroborated by case studies and results of the test section built in Ayrton Senna Highway – SP 070, which was monitored through falling weight deflectometer (FWD) measurements for a year. As result of this work, it is proposed a procedure for the structural design of cold recycled pavements with foamed asphalt using deflectometer data that meets the method of paving manual of the Brazilian National Department of Transport Infrastructure (DNIT). Other findings are the technical long-term viability of that solution and the importance of technological control, with emphasis on the deflection monitoring in early pavement operation to ascertain the evolution of the curing process.

Keywords: Flexible pavements. Structural design. Full-Depth reclamation. Foamed asphalt.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Distribuição da matriz de transportes brasileira em 2011, em bilhões de toneladas-quilometro-úteis (Ministério dos Transportes, 2012).....	19
Figura 1.2 – Densidade da malha rodoviária do Brasil e outros países, em km/1.000 km ² (CNT, 2014).....	20
Figura 2.1 – Tipos de reciclagem de pavimento.....	27
Figura 2.2 – Ponto da camada cimentada remanescente danificada, identificado após fresagem.....	29
Figura 2.3 – Esquema do trem para reciclagem profunda com espuma de asfalto e cimento Portland (adaptado de Wirtgen GmbH, 2004).....	30
Figura 2.4 – Caminhão basculante abastecendo mesa de vibroacabadora com mistura reciclada com espuma de asfalto	31
Figura 2.5 – Esquema do processo de produção da espuma (Bernucci, Motta, Soares, & Ceratti, 2008).....	35
Figura 2.6 – Determinação do teor de água através de curva Expansão x Meia-vida (adaptado de Asphalt Academy, 2009)	36
Figura 2.7 – Ilustração do Índice de Espuma (adaptado de Jenkins, Molennar, de Groot, & van de Ven, 2000).....	36
Figura 2.8 – Ligações pontuais formadas pelo asfalto espumado e a fração fina nas misturas recicladas (Asphalt Academy, 2009).....	39
Figura 2.9 – Faixas granulométricas para agregados a serem tratados com espuma de asfalto.....	40
Figura 2.10 – Condição do pavimento e métodos indicados de reciclagem in-situ (adaptado de NCHRP, 2011)	43
Figura 2.11 – Exemplo de análise gráfica de retroanálise do subleito proposta pelo Caltrans (2012).....	45
Figura 2.12 – Linhas de igualdade de deflexão vertical ao longo da estrutura do pavimento (Noureldin, 1993)	47
Figura 2.13 – Realização de levantamento deflectométrico com a caixa de pavimentação aberta no processo de reciclagem profunda	48
Figura 2.14 – Relação entre vida remanescente e fator de condição (adaptado de AASHTO, 1993)	55

Figura 3.1 – Identificação de famílias dos materiais (adaptado de Merrill, Nunn, & Carswell, 2004)	62
Figura 3.2 – Avaliação da possibilidade de reciclagem profunda in-situ (adaptado de Milton & Earland, 1999)	64
Figura 3.3 – Roteiro para dimensionamento de pavimentos com bases recicladas com espuma de asfalto pelo método do TRL386 (adaptado de Milton & Earland, 1999)	66
Figura 3.4 – Ábacos do TRL386 para determinação das espessuras das camadas do pavimento na reciclagem a frio in-situ utilizando espuma de asfalto para rodovias de tráfego elevado (adaptado de Milton & Earland, 1999)	68
Figura 3.5 – Ábaco de dimensionamento de camada reciclada com emulsão ou espuma de asfalto e 100 mm de revestimento em concreto asfáltico para rodovia classe 2 ou superior e fundação tipo 1 (adaptado de Merrill, Nunn, & Carswell, 2004)	71
Figura 3.6 – Ábaco de dimensionamento de camada reciclada com emulsão ou espuma de asfalto e 100 mm de revestimento em concreto asfáltico para rodovia classe 2 ou superior e fundação tipo 2 (adaptado de Merrill, Nunn, & Carswell, 2004)	71
Figura 3.7 – Ábaco de dimensionamento de camada reciclada com emulsão ou espuma de asfalto e 100 mm de revestimento em concreto asfáltico para rodovia classe 2 ou superior e fundação tipo 3 (adaptado de Merrill, Nunn, & Carswell, 2004)	72
Figura 3.8 – Ábaco de dimensionamento de camada reciclada com emulsão ou espuma de asfalto e 100 mm de revestimento em concreto asfáltico para rodovia classe 2 ou superior e fundação tipo 4 (adaptado de Merrill, Nunn, & Carswell, 2004)	72
Figura 3.9 – Localização dos pontos críticos para dimensionamento da camada tratada com espuma de asfalto na fase eficaz à fadiga	77
Figura 3.10 – Localização dos pontos críticos para análise mecanicista da camada tratada com espuma de asfalto na fase de equivalência granular.....	78
Figura 3.11 – Modelagem linear típica para comportamento de material resistente à tração e à compressão (Theyse, de Beer, & Rust, 1996).....	80
Figura 3.12 – Adaptação na modelagem para comportamento puramente granular (sem tração) (Theyse, de Beer, & Rust, 1996)	81

Figura 3.13 – Catálogo de estruturas de pavimentos com camada estabilizada com espuma de asfalto para rodovias de baixo tráfego Classe C (adaptado de Asphalt Academy, 2009)	83
Figura 3.14 – Fluxograma de dimensionamento do TG2 (2009)	84
Figura 3.15 – Revestimento mínimo para pavimentos com base estabilizada com asfalto (adaptado de Asphalt Academy, 2009)	85
Figura 3.16 – Zonas climáticas sul-africanas (adaptado de Department of Transport, 1996)	87
Figura 3.17 – Fator de ajuste para cálculo da resistência efetiva a longo prazo do subleito (adaptado de Asphalt Academy, 2009)	88
Figura 3.18 – Ábaco para verificação do tráfego admissível com base no <i>Pavement Number</i> (adaptado de Asphalt Academy, 2009)	91
Figura 3.19 – Roteiro de dimensionamento interino da Austroads (adaptado de Austroads, 2011b)	94
Figura 3.20 – Variação do módulo com a temperatura (adaptado de Austroads, 2011b, 2012)	96
Figura 3.21 – Variação do módulo da camada reciclada devido à velocidade de operação (adaptado de Austroads, 2011b, 2012)	97
Figura 3.22 – Modelagem do pavimento para análise mecanicista	98
Figura 3.23 – Localização dos pontos críticos para análise mecanicista	102
Figura 3.24 – Faixa de valores de coeficiente estrutural em função da espessura da base reciclada (adaptado de Van Wyk, Yoder, & Wood, 1983)	108
Figura 4.1 – Seção transversal antes da reciclagem	112
Figura 4.2 – Bacia deflectométrica do pavimento antes da reciclagem	113
Figura 4.3 – Estrutura projetada pelo método da AASHTO (1993)	115
Figura 4.4 – Estruturas projetadas pelo método do CALTRANS: reciclagem (a) de toda a base e revestimento e (b) na espessura mínima de corte	117
Figura 4.5 – Estrutura projetada pelo método TG2 (2009)	119
Figura 4.6 – Estrutura projetada pelo método do TRL386	120
Figura 4.7 – Estruturas projetadas pelo método do TRL611 para base reciclada de categoria: (a) B1, (b) B2 e (c) B3	121
Figura 4.8 – Resumo de soluções encontradas	122
Figura 4.9 – Solução de restauração proposta	124

Figura 4.10 – Avaliação estrutural do trecho experimental com emprego de equipamento FWD	125
Figura 4.11 – Coeficiente de variação dos parâmetros defletores	127
Figura 4.12 – Variação de parâmetros com o tempo na Rodovia SP 070.....	131
Figura 4.13 – Precipitações diárias na região de estudo. Fonte: INMET (2014)	132
Figura 4.14 – Taxa de variação relativa dos parâmetros defletores	133
Figura 5.1 – Representação do comportamento de materiais da pavimentação (adaptado de Asphalt Academy, 2009)	137
Figura 5.2 – Evolução do módulo de resiliência médio (adaptado de Nunn & Thom, 2002)	139
Figura 5.3 – Evolução do número estrutural (SN) efetivo de rodovia estadual americana tratada com material asfáltico: (a) faixa sentido leste e (b) faixa sentido oeste (adaptado de Diefenderfer & Apeagyei, 2011b)	140
Figura 5.4 – Diferença da localização do ponto de análise na verificação mecanicista nas situações: (a) considerando a estrutura remanescente e (b) desconsiderando-a	145
Figura 5.5 – Procedimento de retroanálise do subleito	149
Figura 5.6 – Estrutura projetada segundo procedimento proposto atendendo o método do DNIT	150
Figura 5.7 Parâmetros utilizados na verificação mecanicista	151
Figura A.6.1 – Exemplo de gráficos para obtenção da distância única e do valor do módulo de resiliência do subleito de acordo com o método de Noureldin (1993) ...	168

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Estimativas da taxa de utilização de RAP na pavimentação, em 2013	21
Tabela 2.1 – Normas nacionais para reciclagem profunda com espuma de asfalto	.34
Tabela 2.2 – Valores mínimos de parâmetros da espuma de asfalto para diferentes aplicações (Jenkins, Molennar, de Groot, & van de Ven, 2000)	37
Tabela 2.3 – Valores mínimos para meia-vida, em segundos, e taxa de expansão, em relação ao volume original, para espuma de asfalto a ser utilizada na reciclagem profunda	38
Tabela 2.4 – Valores de módulos de resiliência para misturas recicladas com espuma de asfalto	41
Tabela 2.5 – Capacidade de suporte mínima do subleito	44
Tabela 2.6 – Critérios de avaliação do subleito por meio de retroanálise (adaptado de Caltrans, 2012)	45
Tabela 2.7 – Valores de deflexão máxima que indicam baixa capacidade estrutural	49
Tabela 2.8 – Valores de raio de curvatura que indicam baixa capacidade estrutural	51
Tabela 2.9 – Valores de SCI que indicam baixa capacidade estrutural	51
Tabela 2.10 – Outros parâmetros deflectométricos (Lopes, 2012)	52
Tabela 2.11 – Valores de SCI que indicam baixa capacidade estrutural	52
Tabela 2.12 – Coeficientes estruturais sugeridos devido à degradação dos materiais AASHTO (1993)	54
Tabela 2.13 – Coeficientes k_1 , k_2 e k_3	57
Tabela 2.14 – Coeficientes para equação (12) (adaptado de Kim, Kim, & Murph, 2013)	58
Tabela 3.1 – Classificação das rodovias (adaptado de Department for Transport, 2010)	65
Tabela 3.2 – Determinação das espessuras das camadas do pavimento na reciclagem profunda in-situ utilizando espuma de asfalto para rodovias de baixo tráfego (adaptado de Milton & Earland, 1999)	66
Tabela 3.3 – Características da infraestrutura remanescente para rodovias Classes 1 e 2 (adaptado de Milton & Earland, 1999)	67
Tabela 3.4 – Classificação das vias segundo o TRL611 (Merril, Nunn, & Carswell, 2004)	69

Tabela 3.5 – Classificação da infraestrutura remanescente (Merril, Nunn, & Carswell, 2004)	69
Tabela 3.6 – Classificação de material da base reciclada com emulsão ou espuma de asfalto (Merril, Nunn, & Carswell, 2004)	70
Tabela 3.7 – Espessura mínima do revestimento (Merril, Nunn, & Carswell, 2004)..	73
Tabela 3.8 – Determinação das espessuras das camadas do pavimento na reciclagem profunda com estabilizante asfáltico para rodovias de classe 2 segundo o TRL 611 (adaptado de Merrill, Nunn, & Carswell, 2004)	73
Tabela 3.9 – Categorização e parâmetros de confiabilidade das rodovias (adaptada de Department of Transport, 1996 e de Long & Theyse, 2002)	76
Tabela 3.10 – Coeficiente de confiabilidade B (adaptada de Long & Theyse, 2002)	79
Tabela 3.11 – Coeficiente de sensibilidade à umidade (Theyse, de Beer, & Rust, 1996)	80
Tabela 3.12 – Classificação de materiais tratados com espuma de asfalto de acordo com o TG2 (2002)	81
Tabela 3.13 – Propriedades de materiais tratados com espuma de asfalto segundo o TG2 (2002)	82
Tabela 3.14 – Limites de espessuras para camadas do pavimento para o TG2 (2009)	84
Tabela 3.15 – Capacidade de suporte do subleito	86
Tabela 3.16 – Fator de ajuste climático para subleito	87
Tabela 3.17 – Limite de razão modular e resistência máxima para materiais de pavimentação (Asphalt Academy, 2009)	89
Tabela 3.18 – Valores para determinação do número N, rodovias categoria A	91
Tabela 3.19 – Valores para determinação do número N, rodovias categoria B	91
Tabela 3.20 – Espessuras mínimas de revestimento (Austroads, 2011b)	99
Tabela 3.21 – Fatores de correção devido à temperatura (Queensland Department of Transport and Main Roads, 2012)	100
Tabela 3.22 – Requisitos mínimos de módulo de resiliência (Queensland Department of Transport and Main Roads, 2012)	100
Tabela 3.23 – Coeficientes de distribuição normal correspondentes a diferentes níveis de confiabilidade	104
Tabela 3.24 – Espessura mínima de revestimento (AASHTO, 1993)	106
Tabela 3.25 – Coeficientes estruturais da AASHTO para camada reciclada a frio .	107

Tabela 3.26 – Fator de distribuição do tráfego nas faixas de rolamento (CALTRANS, 2012)	110
Tabela 3.27 – Fatores de equivalência estrutural (Caltrans, 2008, 2012)	111
Tabela 4.1 – Valores de módulo de resiliência do subleito retroanalizado	113
Tabela 4.2 – Classificação adotada para o subleito	118
Tabela 4.4 – Parâmetros deflectométricos avaliados	125
Tabela 4.5 – Resumo dos Resultados dos Levantamentos Deflectométricos	126
Tabela 4.6 – Resumo dos Resultados dos Parâmetros da Bacia de Deflexão	126
Tabela 4.7 – Valores de parâmetros retroanalizados pelo método da AASHTO (1993)	128
Tabela 4.8 – Previsão de vida útil (Número de repetições de eixo-padrão N_{USACE})	129
Tabela 4.9 – Equações de regressão para variação dos parâmetros da bacia deflectométrica e de capacidade estrutural com o tempo	130
Tabela 5.1 – Resumo das principais características dos métodos de dimensionamento estudados	136
Tabela 5.2 – Coeficientes de equivalência estrutural (DNIT, 2006c)	142
Tabela 5.3 – Espessura mínima de revestimento para bases de comportamento puramente granular (DNIT, 2006c)	142
Tabela 5.4 – Bacia deflectométrica avaliada	148
Tabela 5.5 – Procedimento para estimativa da capacidade de suporte do subleito	148
Tabela 5.6 – Procedimento para estimativa da capacidade de suporte do subleito desconhecendo a espessura do pavimento	149
Tabela 5.7 – Modelos adotados para análise mecanicista	151
Tabela 5.8 – Resultados da análise mecanicista	152
Tabela A.6.1 – Coeficientes para retroanálise de subleito propostos por Rohde (1994)	169

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ARRA – *Asphalt Recycling and Reclaiming Association*

BSM – *Bitumen Stabilised Materials*

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBR – Índice de suporte Califórnia

CNT – Confederação Nacional do Transporte

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EAP – Emulsão Asfáltica de Petróleo

EAPA – *European Asphalt Pavement Association*

FDR – *Full-Depth Reclamation*

FI – *Foam Index*

FWD – *Falling Weight Deflectometer*

HVS – *Heavy Vehicle Simulator*

IGG – Índice de Gravidade Global

ITS – Resistência à Tração por Compressão Diametral

LWD – *Light Weight Deflectometer*

NAPA – *National Asphalt Pavement Association*

NCHRP – *National Cooperative Highway Research Program*

PN – *Pavement Number*

RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*

SN – *Structural Number*

TRL – *Transport Research Laboratory*

UCS – Resistência à Compressão Simples

USACE – *United States Army Corps of Engineers*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivos	23
1.2	Justificativa.....	23
1.3	Estruturação	23
2	RECICLAGEM DE PAVIMENTOS	26
2.1	Tipos de reciclagem	27
2.2	Reciclagem profunda com espuma de asfalto	30
2.3	Experiência brasileira na reciclagem profunda.....	31
2.4	Normatização	33
2.5	Caracterização de materiais para reciclagem profunda com espuma de asfalto	34
2.5.1	Espuma de asfalto	35
2.5.2	Características dos agregados	38
2.5.3	Caracterização para dimensionamento	40
2.6	Critérios para execução da reciclagem profunda	42
2.6.1	Capacidade de suporte mínima do subleito.....	44
2.6.2	Critérios deflectométricos	49
2.6.2.1	Deflexão máxima.....	49
2.6.2.2	Parâmetros da bacia deflectométrica	49
2.6.3	Critérios de avaliação da superfície.....	52
2.6.4	Número estrutural	53
2.6.4.1	Inspeção visual.....	53
2.6.4.2	Expectativa de vida remanescente.....	54
2.6.4.2.1	Avaliação deflectométrica	56
3	DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS COM CAMADA RECICLADA A FRIO ESTABILIZADA COM ESPUMA DE ASFALTO	59
3.1	Inglaterra	60

3.1.1	TRL386	63
3.1.2	TRL611	68
3.2	África do Sul	74
3.2.1	TG2 (2002)	76
3.2.1	TG2 (2009) – Pavement Number.....	82
3.3	Austrália e Nova Zelândia	92
3.3.1	Austroads	93
3.3.2	TMR	99
3.3.3	Cidade de Canning	100
3.3.4	Transit New Zealand.....	101
3.4	Estados Unidos	102
3.4.1	AASHTO 1993.....	103
3.4.2	Caltrans	108
4	ESTUDOS DE CASO – RODOVIA SP 070.....	112
4.1	Estudo de Caso 1 – Dimensionamento por diferentes metodologias	112
4.2	Estudo de Caso 2 – Variação do comportamento da camada reciclada com o tempo.....	124
5	PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL	135
5.1	Aspectos relevantes observados	135
5.1.1	Comportamento da camada reciclada	137
5.1.2	Coeficiente de equivalência estrutural	138
5.1.3	Ganho de resistência com o tempo	139
5.1.4	Revestimento.....	141
5.2	Método do DNIT	141
5.3	Elaboração de procedimento para dimensionamento de pavimentos com base reciclada com espuma de asfalto.....	143
5.3.1	Exemplo de aplicação.....	148

6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	154
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157
	APÊNDICE A – PROCEDIMENTOS SIMPLIFICADOS PARA ESTIMATIVA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DO SUBLEITO A PARTIR DE DADOS DEFLECTOMÉTRICOS	166
	APÊNDICE B – CORREÇÃO DAS DEFLEXÕES MÁXIMAS DEVIDO À TEMPERATURA	172
	ANEXO A – LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS DA RODOVIA SP 070..	174

1 INTRODUÇÃO

Entre outros aspectos, o desenvolvimento econômico de um país depende de sua infraestrutura, em especial de sua capacidade de transporte, a qual deve permitir o escoamento de mercadorias e a circulação de pessoas de forma segura e em tempo adequado. No Brasil, o principal modal da matriz de transporte é o rodoviário, com 52% de participação em 2011, conforme ilustra a Figura 1.1 (Ministério dos Transportes, 2012).

Figura 1.1 – Distribuição da matriz de transportes brasileira em 2011, em bilhões de toneladas-quilômetro-úteis (Ministério dos Transportes, 2012)

O desenvolvimento das rodovias é uma preocupação desde o início da República, como evidencia o lema da campanha para governador do Estado de São Paulo, em 1920, de Washington Luís, presidente do Brasil seis anos depois: “*Governar é abrir estradas*”. Embora a preocupação com as rodovias brasileiras seja antiga, dos 1.691.522 km existentes na malha nacional, apenas 12,0% são pavimentados (CNT, 2014).

Há ainda ampla possibilidade de expansão para o setor rodoviário. Dos seis maiores países do mundo, o Brasil é o que apresenta a menor densidade de malha rodoviária, obtida pela divisão da soma da extensão das rodovias existentes pela área territorial do país. A Figura 1.2 mostra, por exemplo, que a Rússia, país com condição econômica semelhante ao Brasil, tem praticamente o dobro e a Argentina possui mais de três vezes a densidade de malha rodoviária nacional.

Figura 1.2 – Densidade da malha rodoviária do Brasil e outros países, em km/1.000 km² (CNT, 2014)

A extensão e a baixa conservação das rodovias nacionais contribuem para a oferta insuficiente de infraestrutura, ainda um dos fatores que mais inibem o desenvolvimento de negócios no Brasil (Schwab, 2014). As dificuldades financeiras causadas pelos recentes períodos de instabilidade econômica global e a escassez de recursos naturais dificultam os investimentos em infraestrutura, como é o caso da pavimentação, que demanda elevado aporte financeiro e grande volume de materiais extraídos do meio ambiente. Portanto, são fundamentais estratégias inteligentes para ampliação e manutenção das rodovias.

A busca por desenvolvimento financeiro compatível com o equilíbrio sustentável leva às propostas alternativas de técnicas e materiais e, em meio a este cenário, a reciclagem de pavimentos ganha cada vez mais espaço junto às alternativas de reabilitação de pavimentos asfálticos. A utilização do pavimento asfáltico recuperado (*Reclaimed Asphalt Pavement* – RAP) e outros materiais reciclados em camadas componentes da estrutura do pavimento contribui para a menor extração de petróleo e agregados virgens da natureza.

O reaproveitamento dos materiais do pavimento já é prática corrente no mundo. Nos EUA, em 2012 foram utilizadas 62 milhões de toneladas de RAP na produção de misturas asfálticas, gerando uma economia estimada de US\$ 2,04 bilhões e que coloca a indústria da pavimentação asfáltica como a maior recicladora do país (NAPA, 2013).

Do mesmo modo, países europeus consideram importante a reutilização e reciclagem na pavimentação. O governo do Reino Unido introduziu uma taxa no preço dos agregados virgens com intuito de estimular o reuso e reciclagem de materiais. Também há uma taxa para uso de aterros. Na Suécia há bonificação para obras que utilizam materiais reciclados: na segunda maior cidade do país, Gotemburgo, bonifica-se caso haja mais de 10% de RAP na mistura ou penaliza-se caso contrário. Por sua vez, a Holanda dificulta o descarte de materiais passíveis de reuso ou reciclagem e torna mais vantajoso o custo de pavimentos que contenham RAP se comparados a estruturas equivalentes que contenham somente material virgem (Schimmoller, 2000). A título de ilustração, a Tabela 1.1 apresenta estimativas da utilização de material fresado em diversos países.

Tabela 1.1 – Estimativas da taxa de utilização de RAP na pavimentação, em 2013

Localidade	RAP disponível (ton)	Uso do RAP disponível (%)				% de misturas asfálticas produzidas a quente ou mornas que contêm RAP
		Reciclagem a quente e morna	Reciclagem meio-morna	Reciclagem a frio	Utilização como camada granular	
Áustria	750.000	95	s.i.	3	2	s.i.
Bélgica	1.500.000	61	s.i.	s.i.	s.i.	49
Rep. Tcheca	1.400.000	22	0	30	15	10
Croácia	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	2
Dinamarca	580.000	77	s.i.	s.i.	s.i.	47
Finlândia	1.000.000	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	65
França	6.500.000	62	-	-	-	> 60
Alemanha	11.500.000	87	s.i.	s.i.	13	97
Grécia	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	0,02
Grã-Bretanha	4.500.000	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.
Hungria	100.777	93	0	7	0	46
Islândia	15.000	s.i.	s.i.	s.i.	25	2,5
Irlanda	150.000	10	0	0	-	10
Itália	10.000.000	20	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.
Luxemburgo	210.000	90	5	5	0	60
Holanda	4.000.000	80	s.i.	15	s.i.	73
Noruega	787.689	18	-	2,9	66	13
Polônia	~100.000	~4	s.i.	s.i.	s.i.	~0,2
Romênia	20.000	30	15	30	25	5
Eslováquia	33.000	90	0	5	5	0
Eslovênia	10.000	s.i.	30	20	50	s.i.
Espanha	368.000	66	s.i.	11	6	6,4
Suécia	1.000.000	75	5	5	10	70
Suíça	1.575.000	52	19	17	9	24
Turquia	3.816.000	2	s.i.	5	93	1
Austrália	533.000	17	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.
Japão	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	s.i.	70
EUA	64.000.000	95	s.i.	s.i.	5	s.i.
Ontário (Canadá)	3.500.000	80	s.i.	3	17	75

s.i.: sem informação

Fonte: (EAPA, 2013)

Além das questões ambientais, a reciclagem de pavimentos permite a manutenção da geometria da via, especialmente do greide, quesito importante nos túneis e passagens sob viadutos, devido a questão do gabarito vertical mínimo, e para a manutenção dos dispositivos de drenagem superficial existentes.

Embora a reciclagem de pavimentos já existisse em meados de 1910, a maioria das obras ocorreu a partir de 1975 (Epps, 1990). E apesar de não ser uma solução nova, ainda é pouco difundida no Brasil. Não existem métodos de dimensionamento oficiais que contemplem a reciclagem, exceção à reciclagem de revestimentos, abordada no método DNER-PRO 269 (1994).

Outro aspecto que denota a desatualização brasileira nesse ramo da pavimentação são as poucas opções deste tipo de restauração presentes nas tabelas de preços unitários de alguns órgãos públicos, os grandes investidores em infraestrutura. Por exemplo, no Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP), o estado mais rico do país, as opções existentes se resumem a reciclagem com adição de cimento, brita ou a combinação de ambos materiais. Na Prefeitura Municipal de São Paulo há a alternativa de reciclagem em usina móvel utilizando estabilizante asfáltico.

Por outro lado, avanços tem ocorrido. O Sistema de Custos Rodoviários do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) possui opções de reciclagem de concreto asfáltico usinado a quente e de reciclagem profunda, seja por estabilização mecânica, com cimento, brita, combinação de ambos, ou ainda com espuma de asfalto.

Outro aspecto positivo é a existência no Brasil de normas para reciclagem de pavimentos, um importante indício de que a técnica tende a evoluir. Contribui também o surgimento de legislação específica, como é o caso da Lei n.º 14.015 da Prefeitura Municipal de São Paulo, de 2005, que dispõe sobre o descarte e reciclagem de misturas asfálticas retiradas dos pavimentos urbanos municipais. De acordo com a lei, não é permitido o descarte de material asfáltico em bota-foras ou aterros não autorizados, nem a remoção para áreas externas aos limites do município, devendo ser apresentado plano de manejo ambiental sustentável, sendo recomendada a reciclagem por meio da pavimentação no próprio município.

1.1 Objetivos

O objetivo deste estudo é analisar a experiência internacional e métodos de dimensionamento existentes para reabilitação de pavimentos por meio da reciclagem profunda com espuma de asfalto.

Busca-se avaliar os parâmetros, técnicas e metodologias que desempenham papel significativo no comportamento mecânico deste tipo de pavimento. De posse de tais informações, será possível realizar um estudo comparativo das estruturas dimensionadas pelos diferentes métodos encontrados.

Também será escopo do trabalho avaliar, através de estudo de caso, a evolução da cura e do comportamento da camada reciclada. Para tal, serão utilizados dados de trecho experimental da Rodovia SP 070.

Como objetivo final do trabalho, é proposto um método para dimensionamento estrutural de pavimentos reciclados a frio com espuma de asfalto que atende ao método do DNIT.

1.2 Justificativa

Embora a técnica já seja bastante difundida, não há no país um método ou critério consagrado de dimensionamento estrutural para a solução de pavimentação em estudo. Os métodos internacionais mais difundidos, como o australiano ou o sul-africano, utilizam parâmetros não tão corriqueiros para engenheiros de infraestrutura de transportes brasileiros, o que dificulta o emprego dos mesmos no cenário nacional.

Existem diversos trabalhos, tanto nacionais como estrangeiros, sobre o projeto de misturas. Todavia, estudos mais específicos sobre o dimensionamento, com determinação de espessuras e características de resistência para as camadas recicladas, são mais raros e nem sempre se aplicam às condições brasileiras. Este trabalho visa preencher parte desta lacuna.

1.3 Estruturação

A estrutura principal deste trabalho está dividida em seis capítulos, conforme descrição a seguir:

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO: este capítulo tem o objetivo de apresentar a importância do tema da reciclagem de pavimentos e também a justificativa dos estudos.

Capítulo 2 – RECICLAGEM DE PAVIMENTOS: são expostas as principais técnicas de reciclagem de pavimentos, com ênfase para a reciclagem profunda com espuma de asfalto. É abordada a experiência brasileira na área, sendo apresentados os estudos mais recentes elaborados no país e quais normas são aplicadas para este tipo de obra rodoviária. Realiza-se uma breve caracterização dos principais materiais que compõem as bases recicladas com espuma de asfalto, as formas de controle aplicáveis a eles e os critérios existentes para a escolha da reabilitação de pavimentos por meio da reciclagem profunda.

Capítulo 3 – DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS COM CAMADA RECICLADA A FRIO ESTABILIZADA COM ESPUMA DE ASFALTO: este é o capítulo central do trabalho, uma vez que não há material brasileiro a respeito do tema. Trata-se de um compêndio dos principais métodos de dimensionamento de reciclagem profunda com espuma da literatura internacional, bem como de autores que contribuíram para a evolução dos mesmos, especialmente os oriundos da África do Sul, Austrália, Estados Unidos e Inglaterra.

Capítulo 4 – ESTUDOS DE CASO – RODOVIA SP 070: são apresentados dois estudos de caso baseados na obra executada na Rodovia Ayrton Senna, sendo o primeiro relacionado ao dimensionamento de estruturas hipotéticas para a rodovia e o segundo uma análise do comportamento do material no campo através de levantamentos deflectométricos realizados em um trecho experimental localizado próximo ao km 36 da rodovia ao longo de um ano, com a avaliação da evolução do comportamento e da vida útil através de parâmetros da bacia de deflexões.

Capítulo 5 – PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL: com o intuito de se transmitir a experiência obtida com as formulações internacionais avaliadas e com o acompanhamento do trecho experimental na rodovia SP 070, é apresentada uma proposta de dimensionamento de pavimentos reciclados com espuma de asfalto que atenda ao critério do DNIT e utilize dados deflectométricos. O método do DNIT é descrito, bem como os aspectos inerentes ao comportamento estrutural do material que subsidiam o procedimento proposto.

Capítulo 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES: este capítulo sintetiza o trabalho, apresentando as principais observações e conclusões obtidas. Face às dificuldades encontradas, são feitas sugestões para trabalhos futuros que venham a contribuir para o melhor entendimento e desenvolvimento do tema.

No APÊNDICE A – PROCEDIMENTOS SIMPLIFICADOS PARA ESTIMATIVA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DO SUBLEITO A PARTIR DE DADOS DEFLECTOMÉTRICOS, foram catalogados métodos expeditos para retroanálise da capacidade de suporte do subleito através de dados da bacia deflectométrica.

O APÊNDICE B – CORREÇÃO DAS DEFLEXÕES MÁXIMAS DEVIDO À TEMPERATURA indica quais procedimentos foram utilizados neste trabalho para correção dos deslocamentos máximos na superfície do pavimento.

Finalmente, o ANEXO A – LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS DA RODOVIA SP 070 apresenta os dados dos ensaios deflectométricos realizados ao longo de um ano na Rodovia Ayrton Senna.

2 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

Conceitos de sustentabilidade como reúso e reciclagem estão intimamente ligados a origem das técnicas de pavimentação. Pode-se encarar o emprego do concreto asfáltico na pavimentação como o reaproveitamento de uma fração menos nobre do petróleo. A reciclagem também está presente, seja no processo e reaplicação de materiais do próprio pavimento, seja na incorporação e utilização de resíduos oriundos das mais diversas áreas da indústria, como borracha (pneus), escórias de aciaria, resíduos da construção civil e demolição, cinzas volantes e areias de fundição, entre outros.

No caso de reutilização de componentes do próprio pavimento, o material reciclado composto unicamente por revestimento betuminoso é denominado material asfáltico recuperado, sendo esta a alternativa mais conhecida. Entretanto, há processos que reciclam materiais além do revestimento.

O material a ser reciclado possui o inconveniente de ser heterogêneo, porém, se devidamente tratado, pode substituir agregados novos sem perda de qualidade, seja em misturas asfálticas, seja como camada de base ou sub-base. É obtido do pavimento existente ou por meio da fresagem ou através da remoção com pá carregadeira e posterior britagem.

Entende-se por fresagem o desbastamento de uma ou mais camadas do pavimento com controle de espessura e de declividade da operação por meio de processo mecânico, ocorrendo a quente ou a frio, como parte de procedimentos de reabilitação de pavimentos.

Classifica-se em três tipos conforme a profundidade de corte. Denomina-se superficial quando a espessura retirada é suficiente apenas para regularizar o revestimento e corrigir defeitos pequenos superficiais ou alterar a macrotextura. Classifica-se como rasa o processo de fresagem de uma espessura maior do revestimento, podendo chegar na camada de ligação, sendo esta alternativa comumente vinculada a restauração com recapeamentos. Por fim, denomina-se profunda o processo de fresagem no qual o material retirado compreende o revestimento, parte ou totalidade da camada de base e até mesmo da sub-base (Bonfim, 2001).

Bonfim (2001) distingue ainda o processo de fresagem quanto à rugosidade resultante, separando o processo em fresagem padrão, fina e microfresagem. É possível se obter diferentes rugosidades em virtude do espaçamento e das dimensões dos dentes de corte do cilindro fresador.

Em razão da modernização do maquinário de obras rodoviárias, a fresagem é a principal opção para obtenção de material para a reciclagem de pavimentos, definida como a reutilização total ou parcial de materiais existentes no pavimento (revestimento e/ou base e/ou sub-base), com ou sem recomposição granulométrica, podendo estes ser tratados com energia térmica, estabilizantes ou rejuvenescedores ou apenas remisturados no estado em que se encontram após a obtenção e desagregação (Momm & Domingues, 1995).

2.1 Tipos de reciclagem

As técnicas de reciclagem de pavimentos podem ser classificadas de diversas formas, conforme indicado na Figura 2.1: quanto à temperatura, quanto ao local de processamento de estabilização e mistura ou ainda quanto às camadas fresadas e reaproveitadas (ARRA, 2001). Pode-se, ainda, classificar a reciclagem em relação ao estabilizante aplicado.

Temperatura	Local de processamento	Camada fresada	Estabilizante
<ul style="list-style-type: none"> • a quente • morna • a frio 	<ul style="list-style-type: none"> • in-situ • em usina 	<ul style="list-style-type: none"> • somente revestimento • reciclagem profunda 	<ul style="list-style-type: none"> • nenhum • cal • cimento portland • espuma de asfalto • emulsão asfáltica

Figura 2.1 – Tipos de reciclagem de pavimento

No tocante a temperatura em que ocorre o processo, pode-se classificá-lo em três categorias distintas. A reciclagem é a quente quando há transferência de calor. No caso do processo a frio, não há aplicação de calor e se necessita de mais energia para a compactação da camada se comparada às misturas quentes (ARRA, 2001). Há também os casos com temperatura morna, cujos estudos e aplicação são mais recentes.

A reciclagem morna despertou interesse em virtude da dificuldade de se trabalhar com altas porcentagens de RAP nas misturas a quente, pois o ligante envelhecido do RAP tendia a causar problemas na trabalhabilidade e na escolha da temperatura, a qual deve ser alta o suficiente para remoção da umidade dos agregados, mas baixa o bastante para evitar o envelhecimento do ligante antigo. As misturas mornas por vezes conseguem reduzir a viscosidade do asfalto em temperaturas mais baixas, tornando-se solução viável para aumentar o uso do RAP nas misturas recicladas (Tao & Mallick, 2009).

Quanto à área de produção do material, esta pode ser *in-situ* ou o material removido do pavimento pode ser transportado para o canteiro e tratado em usina. A reciclagem *in-situ* é realizada no local de aplicação da solução, ou seja, na via a ser restaurada, o que permite uma maior agilidade de execução, pois não há perda de tempo nem gasto com transporte de material.

Quando ocorre em usina, há necessidade de transporte do material fresado da pista até o sítio de instalação da usina. Este ônus pode ser minimizado com a adoção de usinas móveis, que permitem maior proximidade dos locais de aplicação conforme o decorrer da obra, se comparada às usinas estacionárias, em razão da facilidade de mudança de canteiro.

A grande vantagem na utilização de usinas em relação aos trabalhos *in-situ* é o maior controle nos processos de preparo, sendo possível corrigir dosagens e granulometria no caso de alteração do material reciclado. Também é possível se descobrir pontos problemáticos no pavimento remanescente, uma vez que a caixa de pavimentação fica aberta. A Figura 2.2 ilustra o caso de um local com problemas de drenagem identificado após a fresagem do revestimento e de parte da base. Neste episódio, foi retirada uma espessura maior do pavimento e executada uma camada de reforço com rachão.

Figura 2.2 – Ponto da camada cimentada remanescente danificada, identificado após fresagem

A camada reciclada pode ser constituída somente de revestimento asfáltico ou conter também materiais das camadas inferiores. Quando se trata exclusivamente de material asfáltico, usualmente a aplicação é somente no revestimento. A reciclagem de revestimentos pode ser definida como:

[...] o processo de reutilização de misturas asfálticas envelhecidas e deterioradas para a produção de novas misturas, aproveitando os agregados e ligantes remanescentes, provenientes da fresagem, com acréscimo de agentes rejuvenescedores, espuma de espuma de asfalto, CAP ou EAP novos, quando necessários, e também com a adição de aglomerantes hidráulicos (Bernucci, Motta, Soares, & Ceratti, 2008, p. 188).

No Brasil, a norma DNER-PRO 269/94 (1994) estabelece um método de dimensionamento para este tipo de reciclagem.

Ao se adicionar mais uma camada no processamento e composição do material reciclado a frio, o processo denomina-se reciclagem profunda, na bibliografia usualmente designada pela sigla FDR (*Full-Depth Reclamation*). É a técnica de reabilitação na qual a camada de revestimento e parte da base ou toda ela (podendo incluir no processo até a camada de sub-base) são fresadas, reduzidas a dimensões apropriadas e tratadas para utilização como base ou sub-base. É realizada sem a adição de calor, semelhantemente aos processos de reciclagem a frio (ARRA, 2001).

A reciclagem profunda tem como grande vantagem a correção de defeitos estruturais em camadas além da de revestimento. Esta solução atende ainda a alguns casos específicos, como pistas com mais de uma faixa de tráfego em um

sentido, de modo que uma destas sofre maior desgaste devido às diferenças acentuadas de tráfego de veículos pesados. Por exemplo, o Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006a) indica que para rodovias de pista dupla, a faixa da direita acomoda entre 70% e 96% do tráfego de veículos pesados por sentido. Nestes casos, reabilitações com recapeamentos gerariam degrau entre as faixas ou obrigatoriedade de aplicação de reforço na faixa menos solicitada sem necessidade, desperdiçando recursos e materiais, enquanto que soluções de fresagem mais recapeamento ou reciclagem do revestimento podem não atingir a capacidade estrutural necessária.

O material fresado muitas vezes é combinado com agentes estabilizadores e adição de material para correção granulométrica. O processo de reciclagem pode ser classificado conforme o estabilizante adicionado ao material reciclado e os mais comuns são cimento, cal e concreto asfáltico, sendo o último aplicado sob forma de emulsão ou de espuma.

2.2 Reciclagem profunda com espuma de asfalto

Dentre os agentes estabilizantes que podem ser adicionados aos processos de reciclagem profunda para atuar como aglomerante, a espuma de asfalto vem mostrando bom desempenho. Entre outras vantagens, o processo de reciclagem profunda com este material apresenta menor consumo de energia e combustível se comparados a outras soluções de reabilitação (Thenoux, González, & Dowling, 2007).

O processo de tratamento do material pode ocorrer tanto na pista como em usina, assim como nas demais opções de reciclagem. Quando ocorrer na própria pista, o processo é realizado por uma recicladora, que trabalha em conjunto com outros equipamentos, formando o trem de reciclagem. A Figura 2.3 ilustra um trem de reciclagem quando se trabalha com espuma de asfalto e cimento Portland.

Figura 2.3 – Esquema do trem para reciclagem profunda com espuma de asfalto e cimento Portland (adaptado de Wirtgen GmbH, 2004)

No caso das usinas, a execução compreende a fresagem e transporte até o canteiro, onde ocorre a usinagem (mistura e homogeneização), com incorporação de material para correção granulométrica e do agente estabilizador. O material processado é carregado em caminhões basculantes para retornar diretamente à caixa de pavimentação na pista, caso se utilize motoniveladora para auxiliar no espalhamento, ou até a mesa da vibroacabadora, como mostra a Figura 2.4. Então, prossegue-se com os serviços de compactação (DNIT, 2014).

Figura 2.4 – Caminhão basculante abastecendo mesa de vibroacabadora com mistura reciclada com espuma de asfalto

2.3 Experiência brasileira na reciclagem profunda

Na década de 1980 a reciclagem de pavimentos se iniciou no Brasil, com obras de concreto asfáltico usinado a quente reciclado (DNER, 1996). A primeira experiência brasileira de reciclagem profunda com espuma de asfalto ocorreu somente em 1998, na BR 381, Rodovia Fernão Dias (Pinto, 2002), o que evidencia o atraso do Brasil em relação aos demais países.

Na área de dimensionamento, um dos poucos avanços ocorreu quando, em junho de 1982, os engenheiros Ernesto Preussler e Salomão Pinto formularam uma metodologia para projeto de reforço de pavimentos que, após otimização, originou o procedimento DNER-PRO 269/94 – TECNAPAV (DNIT, 2006b).

O método é baseado nas características resilientes dos materiais para pavimentação, em modelos de fadiga de misturas betuminosas, no desempenho típico de solos finos e em análise mecanicista. É possível se dimensionar reforço

com mistura reciclada, porém apenas do revestimento, com as mesmas informações do processo sem reciclagem, acrescidas dos dados de espessura de corte do revestimento e da relação entre o módulo de resiliência da mistura reciclada e o módulo efetivo do revestimento existente.

No âmbito dos estudos acadêmicos brasileiros, a bibliografia aponta para pesquisas referentes aos materiais, dosagens ou comportamento das misturas recicladas. O estudo de misturas recicladas com espuma de asfalto, especificamente, se intensificou no início da década de 2000.

Pinto (2002) estudou as características físicas e mecânicas de misturas recicladas com espuma de asfalto, por meio de ensaios de laboratório e da análise de trechos experimentais das rodovias BA-535 e RJ-106. Avaliou a influência de adição de filler na mistura, seja cimento ou cal, e propôs um procedimento para projeto de misturas recicladas.

Dama (2003) avaliou o comportamento de camada reciclada com espuma de asfalto na rodovia BR-290/RS e observou a forte influência da água no processo.

Castro (2003) realizou pesquisa semelhante na rodovia RJ-106. Segundo a autora, embora exista variabilidade no material, a técnica de reciclagem é promissora. Também define a necessidade de se conhecer os valores de módulo de resiliência do material reciclado, não apenas da resistência à tração por compressão diametral, para que se faça um projeto mecanicista do pavimento.

No mesmo ano, Oliveira (2003) desenvolveu sua pesquisa baseada em ensaios laboratoriais de amostras retiradas de uma rodovia paulista e outra mineira, ambas recicladas com cimento Portland e propôs uma especificação para a construção de camadas recicladas tratadas com este estabilizante. Verificou a influência do prazo de trabalhabilidade do cimento na resistência de misturas recicladas e a importância da relação água/cimento para o bom comportamento da camada.

Suzuki et al (2005) avaliaram estruturalmente a reciclagem a frio com emulsão de asfalto num trecho urbano, no município de Paulínia. Foram realizados levantamentos deflectométricos antes e após a reciclagem do revestimento. O processo resultou em incremento estrutural, com redução das deflexões e significativa melhoria das condições funcionais da via. Os autores já consideravam importante o monitoramento e acompanhamento de trechos experimentais para

calibração de procedimentos de dimensionamento estrutural e elaboração de modelos de degradação.

O controle tecnológico de obras de reciclagem profunda a frio sem a adição de agentes estabilizadores foi abordado por Sachet (2007). A autora, por meio de aplicações práticas em rodovias do Rio Grande do Sul, verificou a importância do processo construtivo para o bom desempenho das bases recicladas e propõe especificação técnica para o controle de obra, com execução de ensaios in-situ de umidade, grau de compactação, massa específica aparente seca, granulometria, índice de suporte Califórnia (CBR) e levantamento com *Light Weight Deflectometer* (LWD).

Em contribuições mais recentes, ao conjugar trabalhos de campo e de laboratório, Silva (2011) mostrou que a reciclagem a frio pode ser aplicada em rodovias com tráfego pesado, como foi o caso da obra da BR 116 – Rodovia Régis Bittencourt, reciclada in-situ com emulsão. Uma rodovia de tráfego pesado também foi objeto das análises realizadas por Aranha (2013) para a reciclagem profunda com cimento.

Guatimosim (2015) avaliou o desempenho e o comportamento mecânico de uma base reciclada com espuma de asfalto. A influência da tensão de confinamento e do teor de umidade foi avaliada através de ensaios laboratoriais e acompanhamento de trecho experimentos na SP 070 – Rodovia Ayrton Senna. Observa redução das deflexões do pavimento nos dois primeiros anos de operação e atesta a importância da cura no comportamento do material reciclado.

Cabe ressaltar que, embora os manuais nacionais de pavimentação não apresentem metodologia para reciclagem profunda com espuma de asfalto, nos últimos anos surgiram normas para regular a execução e aceitação dos serviços, o que de fato é um grande avanço para a aplicação desta tecnologia no país.

2.4 Normatização

Recentes avanços foram alcançados com a publicação de normas para a reciclagem profunda com espuma de asfalto. Tratam-se de especificações para realização e controle dos serviços.

No âmbito federal, o extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) publicou em 2000 a especificação de serviço DNER-ES 405/2000:

reciclagem de pavimento a frio “in situ” com espuma de asfalto, a primeira norma nacional a abordar o tema. Sua revisão ocorreu treze anos depois quando o DNIT, que substituiu o DNER em 2001, publicou a norma DNIT 166/2013-ES. As principais alterações foram os novos requisitos para equipamentos, especificação da composição granulométrica do material reciclado e imposição de valores mínimos para meia-vida e taxa de expansão da espuma de asfalto.

Em novembro de 2014 o DNIT publicou a norma DNIT 169/2014-ES: Reciclagem de pavimento em usina com espuma de asfalto – Especificação de Serviço, para regulamentar a reciclagem profunda com preparo da mistura em usina própria para esta finalidade.

Como se observa na Tabela 2.1, órgãos rodoviários estaduais e municipais também elaboraram suas próprias especificações, como os Departamentos de Estradas de Rodagem dos estados do Paraná e São Paulo em 2005 e 2006, respectivamente, e a Prefeitura Municipal de São Paulo, no ano de 2009.

Tabela 2.1 – Normas nacionais para reciclagem profunda com espuma de asfalto

Órgão	Código	Ano	Título
DER/PR	ESP-P 32/05	2005	Reciclagem de pavimento a frio "in situ" com espuma de asfalto
DER/SP	ET-DE-P00/033	2006	Reciclagem in situ a frio com espuma de asfalto
PMSP	ETS-02/2009	2009	Base de material fresado com espuma de asfalto
DEINFRA/SC	ES-P-09B/12	2012	Reciclagem profunda de pavimento com adição de espuma de asfalto
DNIT	166/2013-ES	2013	Reciclagem de pavimento a frio "in situ" com adição de espuma de asfalto - especificação de serviço
DNIT	169/2014-ES	2014	Reciclagem de pavimento em usina com espuma de asfalto - especificação de serviço

2.5 Caracterização de materiais para reciclagem profunda com espuma de asfalto

Para que a reciclagem com espuma de asfalto resulte em material satisfatório executa-se o controle tecnológico. Para verificação e aceitação, são definidos valores limites para os dois principais componentes que formam o material: a espuma de asfalto e os agregados reciclados.

As especificações técnicas avaliam a espuma de asfalto baseadas em duas propriedades: a meia-vida e a taxa de expansão. Já os agregados são controlados principalmente por meio da granulometria, com especial atenção à parcela fina.

2.5.1 Espuma de asfalto

Os primeiros processos de utilização de espuma de asfalto são descritos por Csanyi¹ (1957 apud MACCARRONE, HOLLERAN, & LEONARD, 1993; MALLICK & HENDRIX, 2004; READ & WHITEOAK, 2003). A espuma é o estado temporário da mistura obtida do encontro do ligante asfáltico aquecido com água e ar sob pressão, num processo controlado, conforme ilustrado na Figura 2.5. A mistura expande de 10 a 15 vezes seu volume, de forma que a viscosidade diminui temporariamente e, como consequência, a trabalhabilidade aumenta.

Figura 2.5 – Esquema do processo de produção da espuma (Bernucci, Motta, Soares, & Ceratti, 2008)

O controle da qualidade da espuma produzida se dá, principalmente, por meio dos valores de meia-vida e taxa de expansão, duas variáveis dependentes da quantidade de água adicionada, conforme exemplifica a Figura 2.6. A meia-vida é definida como o intervalo de tempo no qual a espuma diminui pela metade seu volume máximo e a taxa de expansão é definida como a relação entre o volume máximo do CAP na forma de espuma e seu volume original.

¹ CSANYI, L.H. Foamed asphalt in bituminous paving mixes. Bulletin 160. Highway Research Board, National Research Council, Washington DC, v. 10, pp. 108-122, 1957.

Figura 2.6 – Determinação do teor de água através de curva Expansão x Meia-vida (adaptado de Asphalt Academy, 2009)

De acordo com Jenkins (2000), devido às diversas aplicações a que o material está sujeito, a escolha do teor ótimo de água carece de maior precisão, não bastando apenas se adotar o valor de encontro das curvas de expansão e de meia-vida. O autor desenvolveu um novo parâmetro para caracterizar melhor a espuma de asfalto e sua “espumabilidade”: o índice de espuma (*foam index* - FI), sendo este definido como a área sob a curva de Taxa de expansão X Tempo (Figura 2.7) e acima do valor mínimo aceitável para taxa de expansão, fixado em quatro vezes.

Figura 2.7 – Ilustração do Índice de Espuma (adaptado de Jenkins, Molennar, de Groot, & van de Ven, 2000)

Observa-se uma extrapolação, para período de tempo $t < 0$ s, em virtude do intervalo entre produção da espuma e realização das leituras. O parâmetro FI é então a soma das áreas A_1 e A_2 . Ensaio com diversos teores de água e aditivos permitem uma análise de sensibilidade, por meio de visualização gráfica.

Todavia, a utilização apenas do índice de espuma pode levar a resultados insatisfatórios (Dama, 2003). Além dele, sugere-se que os dois parâmetros citados anteriormente, meia-vida e taxa de expansão, também sejam empregados para controle e produção de espuma de boa qualidade.

Jenkins, Molennar, de Groot, & van de Vem (2000) propuseram valores mínimos, apresentados na Tabela 2.2, em virtude do tipo de aplicação.

Tabela 2.2 – Valores mínimos de parâmetros da espuma de asfalto para diferentes aplicações (Jenkins, Molennar, de Groot, & van de Ven, 2000)

Tipo de mistura de espuma de asfalto	Valores mínimos		
	Taxa de expansão (vezes)	Meia-vida (s)	FI (s)
Tratamento superficial	10	30	131
Misturas frias	15	15	164
RAP e misturas meio-mornas	17	13	180
Encapsulamento de contaminantes, como amianto e alcatrão	25	10	257

Nota-se a manutenção da relação inversa entre taxa de expansão e meia-vida. Outro ponto de destaque é o rigor dos valores especificados para misturas de espuma de asfalto utilizadas na estabilização de camadas com RAP, se comparados com publicações e normas mais recentes.

Na Tabela 2.3 estão dispostos limites mínimos de parâmetros da espuma de asfalto para a reciclagem profunda. Dentre as normas e publicações consultadas, nenhuma atenderia os valores de meia-vida e taxa de expansão sugeridos por Jenkins, Molennar, de Groot, & van de Vem (2000) para a reciclagem profunda. Observa-se ainda, uma maior brandura de alguns órgãos rodoviários nacionais, especialmente quanto à taxa de expansão.

Tabela 2.3 – Valores mínimos para meia-vida, em segundos, e taxa de expansão, em relação ao volume original, para espuma de asfalto a ser utilizada na reciclagem profunda

Norma/Publicação	País	Taxa de expansão (vezes)	Meia-vida (s)	Observação
DEINFRA/SC ES-P-09B/12		10	6	
DER/PR ES-P 32/05		5	5	
DER/SP ET-DE-P00/033	Brasil	5	5	
DNIT 166/2013-ES		10	8	
DNIT 169/2014-ES		10	8	
TG2 (Asphalt Academy, 2009)	África do Sul	10	6	Temperatura dos agregados entre 10 °C e 25 °C
		8	6	Temperatura dos agregados acima de 25 °C
Wirtgen cold recycling manual (Wirtgen GmbH, 2004)	Alemanha	10	8	
AUSTROADS (2011a)	Austrália	20	10	
Caltrans (2012)	Estados Unidos	10	12	
TRL386 (Milton & Earland, 1999)	Inglaterra	10	10	
Browne (2012)	Nova Zelândia	10	6	

2.5.2 Características dos agregados reciclados

O material a ser reciclado deve possuir determinadas características para que não venha a desempenhar papel muito diferente do esperado no campo. Desta forma, são estabelecidos valores limites para algumas propriedades, como por exemplo, a composição granulométrica e o índice de plasticidade.

A importância da presença de material fino, aquele que passa na peneira #200 (0,075 mm), ao se utilizar espuma de asfalto já era observada por Bowering (1970). Este é habitualmente um dos requisitos para granulometria do RAP.

A preocupação se deve ao fato de que o asfalto espumado se distribui sobre estas partículas de maior superfície específica, formando ligações pontuais na mistura, exemplificadas na Figura 2.8, e promovem maior coesão na mistura (Asphalt Academy, 2009).

Figura 2.8 – Ligações pontuais formadas pelo asfalto espumado e a fração fina nas misturas recicladas (Asphalt Academy, 2009)

As curvas granulométricas encontradas na bibliografia sugerem como ideal entre 5% e 20% em massa de material fino. Também há preocupação para o arranjo estrutural e diâmetro máximo dos agregados, por isso os materiais devem se enquadrar dentro de uma faixa granulométrica, como as indicadas na Figura 2.9. Caso isto não ocorra, é possível a adição de material virgem para contorno do problema.

Figura 2.9 – Faixas granulométricas para agregados a serem tratados com espuma de asfalto

2.5.3 Caracterização para dimensionamento

Balbo (2007) afirma que, para os materiais de pavimentação, os parâmetros comumente empregados e mais pesquisados são o módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson. Juntos aos dados de espessura, são as variáveis necessárias para análise mecanicista através de sistemas de camadas elástico-lineares.

Mesmo que a adoção de valores irreais resulte no projeto de uma estrutura suscetível a falha prematura ou superdimensionada, pode-se afirmar que são exceções os projetos nos quais se realizam estes ensaios, pois para a maioria dos materiais de pavimentação há vasta bibliografia a respeito de resultados de ensaios e valores aceitos como típicos.

Materiais novos como os estabilizados com espuma de asfalto carecem destas informações. Com o intuito de compreender melhor a faixa de variação e se obter certa sensibilidade, alguns valores de módulo de resiliência encontrados na bibliografia para a camada reciclada com espuma de asfalto constam ilustrativamente na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Valores de módulos de resiliência para misturas recicladas com espuma de asfalto

Publicação	Módulo de Resiliência (MPa)	Observação
Maccarrone, Holleran, & Leonard (1993)	1.300	
Van Wyk, Yoder, & Wood (1983)	960 – 1.035	
Van Wijk (1984)	671	Após 10 dias da construção
Van Wijk (1984)	2296	Após 375 dias da construção
Milton & Earland (1999)	2.000 – 2.500	
Pinto (2002)	1.864	Condição seca (espuma de asfalto + cimento)
Pinto (2002)	1.318	Condição seca (somente espuma de asfalto)
Pinto (2002)	893	Condição saturada (espuma de asfalto + cimento)
Pinto (2002)	460	Condição saturada (somente espuma de asfalto)
Nunn & Thom (2002)	4.100	Condição seca
Nunn & Thom (2002)	2.800	Condição saturada
Castro (2003)	1.426	Laboratório
Castro (2003)	4.026	Após 20 meses da construção
Dama (2003)	2.500	2,8% de espuma de asfalto + 3,0% de filler calcário
Wirtgen GmbH (2004)	2.500 – 4.000	50% RAP / 50% brita (laboratório)
Wirtgen GmbH (2004)	800 – 2.000	50% RAP / 50% brita (em serviço)
Ramanujam & Jones (2007)	1.100 – 1.250	3,5% de espuma de asfalto + 2,0% de cal
Transit New Zealand (2007)	800	Valor de projeto
Fu, Steven, Jones, & Harvey (2009)	400	Valor (interino) recomendado para projetos na Califórnia
Leek (2010)	4.300	Valor de projeto para subcamada (0 a 10 cm do topo da camada)
Leek (2010)	3.600	Valor de projeto para subcamada (10 a 20 cm do topo da camada)
Leek (2010)	2.600	Valor de projeto para subcamada (20 cm abaixo do topo da camada)
Guatimosim (2015)	321 – 1.400	Laboratório (diversas formas de cura) 2% de espuma de asfalto + 1% de cimento
Guatimosim (2015)	240 – 2.400	Retroanálise 2% de espuma de asfalto + 1% de cimento

Observa-se grande variabilidade nos valores dos módulos de resiliência, como esperado, em razão da heterogeneidade do material reciclado. O teor de ligante, tipos e quantidade de fillers utilizados também influenciam nas propriedades mecânicas.

Quanto ao coeficiente de Poisson, encontra-se na bibliografia métodos que adotam valores de 0,30 (Transit New Zealand, 2007), 0,35 (Queensland Department of Transport and Main Roads, 2012) e 0,40 (AUSTROADS, 2011c), resultados próximos aos valores para concretos asfálticos, situados entre 0,32 e 0,38 (Balbo, 2007).

Outros parâmetros comumente encontrados na bibliografia para caracterização dos materiais tratados com espuma de asfalto são as resistências à tração por compressão diametral para amostras secas e saturadas. Porém estas são informações mais vinculadas ao projeto da mistura em si do que ao dimensionamento estrutural de pavimentos.

Uma das dificuldades encontradas na utilização de alguns métodos de dimensionamento é a grande quantidade de informações laboratoriais necessárias, muitas vezes de obtenção pouco prática. Como solução, foram elaborados sistemas de classificação das misturas estabilizadas com espuma de asfalto baseados em testes laboratoriais mais simples. É o caso dos métodos sul-africanos TG2 (Asphalt Academy, 2002) e sua revisão (Asphalt Academy, 2009) e do inglês TRL611 (Merril, Nunn, & Carswell, 2004), apresentados no Capítulo 3.

Definidos os parâmetros que controlam a qualidade e viabilidade dos materiais que compõem as bases recicladas com espuma de asfalto, são apresentados os critérios aplicáveis para a execução deste tipo de reabilitação, com ênfase na capacidade mínima de suporte do subleito e avaliação do pavimento existente.

2.6 Critérios para execução da reciclagem profunda

A escolha do processo de reciclagem profunda a ser adotado é função de inúmeros fatores, dentre os quais destacam-se a condição do pavimento existente e a disponibilidade de materiais e equipamentos. Usualmente, pavimentos com baixa degradação, apresentando apenas defeitos superficiais no revestimento, são indicados para processos de reciclagem superficial a quente *in-situ*. No caso de

pavimentos com problemas estruturais, como afundamentos de trilhas de roda ou trincamento severo na superfície do revestimento, é indicada a reciclagem profunda a frio. Em situações intermediárias, a priori, são recomendadas técnicas de reciclagem superficial a frio *in-situ* (NCHRP, 2011), conforme ilustra a Figura 2.10.

Figura 2.10 – Condição do pavimento e métodos indicados de reciclagem in-situ (adaptado de NCHRP, 2011)

Além da análise técnica, o aspecto econômico é um importante fator para escolha da solução. Por exemplo, o Caltrans (2012) recomenda a reciclagem profunda nos casos em que a solução de reforço em concreto asfáltico demande reparos profundos em mais de 20% da área de projeto, enquanto que o *Transport Research Laboratory* dá como estimativa a execução de no mínimo 3.000 m² de pavimento para a alternativa de reciclagem profunda ser economicamente interessante, já que demanda equipamentos mais específicos do que os utilizados nas soluções mais convencionais, como recapeamentos (Milton & Earland, 1999).

A seguir são elencados os principais critérios aplicáveis à avaliação para utilização da reciclagem profunda com espuma de asfalto.

2.6.1 Capacidade de suporte mínima do subleito

Um fator importante para execução da reciclagem profunda é a capacidade de suporte do subleito existente. Um subleito com baixa capacidade de suporte necessita de grandes espessuras de pavimento, não exequíveis devido à dificuldade de compactação ou à inviabilidade econômica.

Dentre os métodos avaliados neste trabalho, os valores mínimos de suporte do subleito para execução da reciclagem profunda são apresentados a seguir:

Tabela 2.5 – Capacidade de suporte mínima do subleito

Método	CBR_{subleito} (%)
TRL386	2%
TG2 (2009)	3%
Transit New Zealand	3%
Caltrans (2012)	4,5% (44,8 MPa)
TMR Queensland	5%
TRL611	5% (50 MPa)

Nos projetos de pavimentação nacionais é comum a retirada de amostras do subleito para ensaios laboratoriais. Todavia, por vezes não há ensaios em quantidade suficiente ou ainda, em virtude de questões orçamentárias e de cronograma, os mesmos são preteridos, como no caso de análises em nível de gerência. Alternativamente, a estimativa da capacidade de suporte do subleito pode ser feita através da retroanálise de dados deflectométricos.

O método do Caltrans (2012) de reciclagem profunda com espuma de asfalto, por exemplo, utiliza as deflexões lidas a uma distância de 24 polegadas, aproximadamente 60 cm, do ponto de aplicação da carga no levantamento deflectométrico. Através da retroanálise das deflexões e análise gráfica, são identificados os pontos com problemas no subleito.

A Tabela 2.6 apresenta os critérios deflectométricos para avaliação do subleito, com valores transformados para unidades mais usuais para pavimentação no Brasil.

Tabela 2.6 – Critérios de avaliação do subleito por meio de retroanálise (adaptado de Caltrans, 2012)

Deflexão a 24 pol ($\times 10^{-2}$ mm)	E_{SL} (MPa)	Zona	Conclusão quanto ao subleito
$d_{24} < 38,1$	$> 44,8$	A	Resistente o suficiente
$38,1 \leq d_{24} \leq 124,5$	$24,8 - 44,8$	B	Avaliar necessidade de estabilização, reforço com geotêxtil, troca de solo, melhora da drenagem ou pavimento mais robusto
$d_{24} > 124,5$	$< 24,8$	C	Considerar outras estratégias para reabilitação ou obrigatoriamente tratar antes da reciclagem

A Figura 2.11 a seguir ilustra a avaliação do subleito ao longo de uma rodovia. A soma dos segmentos nas zonas B e C deve ser menor que 10% da extensão total do projeto (CALTRANS, 2012). Se forem maiores, a reciclagem profunda com espuma de asfalto não está descartada, mas assim como em outras estratégias de reabilitação, adotam-se medidas mitigadoras como estabilização (com cimento ou cal) ou troca do material, aplicação de geotêxteis, aumento da espessura do pavimento ou melhoria dos dispositivos de drenagem.

Figura 2.11 – Exemplo de análise gráfica de retroanálise do subleito proposta pelo Caltrans (2012)

Este e outros procedimentos simplificados de retroanálise para estimativa da resistência do subleito são melhor detalhados no Apêndice A.

Usualmente a reciclagem profunda não avança com o corte do pavimento até o subleito, restando parte da estrutura, e esta contribuirá, assim como a base reciclada e o revestimento novo na proteção do subleito contra os esforços advindos do tráfego. Caso sejam realizados ensaios destrutivos, como abertura de poços de inspeção no pavimento existente e retirada de amostras, os materiais componentes das camadas estruturais do pavimento e suas respectivas espessuras são identificados e pode-se obter dados de resistência com ensaios em laboratório.

Como alternativa, na impossibilidade de tais ensaios destrutivos, o método de Noureldin (1993) permite ao menos identificar a espessura da infraestrutura remanescente, através de algumas simplificações.

Considerando o pavimento como um sistema de duas camadas, ambas com coeficiente de Poisson de 0,5, avaliado por equipamento FWD, cujo carregamento aplicado é 9.000 lb (4,1 tf) através de um prato de raio de 6 pol (15 cm), o método utiliza as bacias deflectométricas para estimar o módulo de resiliência da camada menos resistente (conforme detalhado no apêndice A) e também fornece a que profundidade tal camada se encontra.

O conceito central do mesmo é de que existe um ponto na superfície localizado a uma distância radial x do ponto de aplicação da carga cuja deflexão no topo do subleito é idêntica à deflexão medida na superfície d_x , conforme ilustra a linha tracejada da Figura 2.12.

Figura 2.12 – Linhas de igualdade de deflexão vertical ao longo da estrutura do pavimento (Noureldin, 1993)

No procedimento para estimativa da espessura do pavimento, para os geofones localizados fora do raio de aplicação de carga, calcula-se o produto entre a deflexão lida e sua respectiva distância ao ponto de aplicação da carga. O maior produto indica a localidade única cuja deflexão na superfície é igual à do subleito, devendo os dados deste ponto serem utilizados no procedimento de retroanálise.

A espessura total efetiva do pavimento é obtida por meio da equação (1):

$$T_x = \sqrt[3]{\frac{d_0 - d_x}{d_x \times \left(\frac{x}{3} - 1\right)}} \times \sqrt[2]{4 \times x^2 - 36} \quad (1)$$

Onde:

x = distância do ponto de aplicação da carga [pol];

d_x = deflexão à distância x [pol];

T_x = espessura total efetiva [pol];

d_0 = deflexão máxima [pol].

No caso da reciclagem profunda com tratamento do material em usina, é possível se obter uma estimativa da capacidade estrutural da infraestrutura remanescente durante a obra, com a realização do levantamento deflectométrico após a fresagem

e a retirada do material a ser reciclado, com a caixa ainda aberta, conforme ilustra a Figura 2.13.

Figura 2.13 – Realização de levantamento deflectométrico com a caixa de pavimentação aberta no processo de reciclagem profunda

Considerando o pavimento, nesta situação específica, como um sistema de uma camada, homogênea e isotrópica, é possível aplicar a formulação de Boussinesq:

$$E_{SL} = \frac{2 \times P \times (1 - \nu^2)}{\pi \times d_0 \times a} \quad (2)$$

Onde:

E_{SL} = módulo de resiliência do subleito retroanalisado [Pa];

P = carga aplicada no ensaio [N];

ν = coeficiente de Poisson;

a = distância do ponto de aplicação da carga [m];

d_0 = deflexão sob o ponto de aplicação da carga [m].

Respeitados os casos que indiquem problema estrutural no subleito ou de drenagem, como o processo de reciclagem profunda é semelhante a construção de uma nova estrutura sobre a infraestrutura remanescente do pavimento, a ele podem ser aplicados alguns critérios limites que indiquem reconstrução. Os parâmetros aplicáveis são explanados a seguir.

2.6.2 Critérios deflectométricos

Os levantamentos deflectométricos fornecem as medidas das deflexões recuperáveis que ocorrem na superfície do pavimento em resposta a um carregamento aplicado. São uma maneira rápida e não destrutiva de se avaliar a condição estrutural dos pavimentos e são a base de diversos métodos de dimensionamento que utilizam o princípio de limitação de deformações elásticas das camadas.

No caso de estudo para a reciclagem profunda, não há critérios deflectométricos diretamente aplicáveis para definição de tal solução. Entretanto, a utilização de parâmetros da bacia deflectométrica permite identificar os casos em que há problemas estruturais nas camadas inferiores, sendo então indicada a reciclagem profunda.

2.6.2.1 Deflexão máxima

No Brasil, pavimentos existentes cuja deflexão de projeto é três vezes maior que a deflexão admissível em projeto são classificados como de má qualidade estrutural, segundo as normas DNER-PRO 010 (1979) e DNER-PRO 011 (1979). A deflexão de projeto é a soma da média e do desvio padrão das deflexões obtidas em campo, sendo o valor corrigido por um fator climático.

O manual sul-africano de pavimentação possui os seguintes limites para verificar a integridade da estrutura do pavimento, conforme Tabela 2.7:

Tabela 2.7 – Valores de deflexão máxima que indicam baixa capacidade estrutural

País	Tipo de base	Deflexão máxima (10 ⁻² mm)
África do Sul (SANRA, 2014)	Granular	> 75
	Cimentada	> 40
	Betuminosa	> 60

2.6.2.2 Parâmetros da bacia deflectométrica

Apesar da deflexão máxima ser o indicador mais utilizado, esta isoladamente, por vezes, não caracteriza de forma satisfatória o pavimento. A utilização de parâmetros da bacia deflectométrica permite uma avaliação mais abrangente (Lopes, 2012).

Para a reciclagem profunda, os de maior interesse são aqueles que indicam a integridade das camadas superiores, como o raio de curvatura e o índice de curvatura da superfície.

O raio de curvatura, no Brasil, é definido como:

$$R = \frac{10 \times 25^2}{2 \times (d_0 - d_{25})} \quad (3)$$

Onde:

R = raio de curvatura [m];

d_0 = deflexão na superfície do pavimento sob o ponto de aplicação da carga [10^{-2} mm];

d_{25} = deflexão na superfície do pavimento distante 25 cm do ponto de aplicação da carga [10^{-2} mm].

Este parâmetro indica a qualidade estrutural do pavimento. De acordo com a norma DNER-PRO 011 (1979), pavimentos com raio de curvatura inferiores a 100 m sugerem baixa capacidade estrutural, sendo indicada a reconstrução dos mesmos.

Na África do Sul, o raio de curvatura é calculado através de expressão semelhante:

$$R = \frac{L^2}{2 \times (d_0 - d_L)} \quad (4)$$

Onde:

R = raio de curvatura [m];

L = distância entre os pontos de leitura de deflexões d_0 e d_L [mm];

d_0 = deflexão na superfície do pavimento sob o ponto de aplicação da carga [μ m];

d_L = deflexão na superfície do pavimento distante L mm do ponto de aplicação da carga [μ m].

O valor original da distância L foi alterado de 127 mm para 200 mm, com o advento dos equipamentos FWD (Horak & Emery, 2006).

Os valores limites que indicam baixa capacidade estrutural são expostos na Tabela 2.8:

Tabela 2.8 – Valores de raio de curvatura que indicam baixa capacidade estrutural

País	Tipo de base	Raio de Curvatura (m)
Brasil	Granular	< 100
África do Sul (Horak, 2008)	Granular	< 50
	Cimentada	< 80
	Betuminosa	< 100

Assim como o raio de curvatura, o índice de curvatura da superfície, (SCI – do inglês *Surface Curvature Index*) é um indicativo da resistência das camadas superiores. Trata-se da diferença entre as deflexões lidas imediatamente abaixo e distante 30 cm do ponto de aplicação da carga:

$$SCI = d_0 - d_{30} \quad (5)$$

Onde:

SCI = índice de curvatura da superfície [10^{-2} mm];

d_0 = deflexão na superfície do pavimento sob o ponto de aplicação da carga [10^{-2} mm];

d_{30} = deflexão na superfície do pavimento distante 30 cm do ponto de aplicação da carga [10^{-2} mm].

Os valores limites encontrados, de acordo com Horak (2008), são:

Tabela 2.9 – Valores de SCI que indicam baixa capacidade estrutural

País	Tipo de base	SCI (10^{-2} mm)
África do Sul (Horak, 2008)	Granular	> 40
	Cimentada	> 30
	Betuminosa	> 40

Outros parâmetros deflectométricos encontrados na bibliografia que inferem sobre a qualidade estrutural de determinadas camadas do pavimento são indicados na Tabela 2.10.

Tabela 2.10 – Outros parâmetros deflectométricos (Lopes, 2012)

Parâmetro	Unidade	Expressão para determinação	Camada do pavimento aferida
Fator de Curvatura	10^{-2} mm	$CF = d_0 - d_{20}$	Revestimento
Índice de Danos à Base	10^{-2} mm	$BDI = d_{30} - d_{60}$	Base
Índice de Curvatura da Base	10^{-2} mm	$BCI = d_{60} - d_{90}$	Subleito

Os parâmetros índice de danos à base e índice de curvatura da base também são descritos na bibliografia pelas siglas MLI (*Middle Layer Index*) e LLI (*Lower Layer Index*). Assim como no índice de curvatura da superfície, os limites estabelecidos para definir a qualidade estrutural dos pavimentos dependem do tipo de base existente, conforme descreve a Tabela 2.11:

Tabela 2.11 – Valores de SCI que indicam baixa capacidade estrutural

País	Tipo de base	BDI (10^{-2} mm)	BCI (10^{-2} mm)
África do Sul (SANRA, 2014)	Granular	> 20	> 10
	Cimentada	> 10	> 8
	Betuminosa	> 15	> 8

A comparação e estudo dos dados das bacias devem ser precedidos pela normalização dos valores, seja devido às diferentes temperaturas do pavimento à época do levantamento, seja devido à carga aplicada pelo equipamento. A variação da temperatura resulta em alteração significativa da resistência das misturas asfálticas e, portanto, nas deflexões lidas.

Procedimentos propostos pela AASHTO e pelo Austroads para correção das deflexões em função da temperatura do pavimento e utilizados nos cálculos dos estudos de casos deste trabalho são apresentados no Apêndice B.

2.6.3 Critérios de avaliação da superfície

A avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos, no Brasil regulada pela norma DNIT 006/2003 - PRO (2003), permite a obtenção do Índice de Gravidade Global (IGG), que infere o grau de degradação do pavimento. As normas DNER-PRO 010 (1979) e DNER-PRO 011 (1979) limitam o valor de IGG para a possibilidade de restauração por meio de aplicação de reforço em concreto asfáltico.

Para valores de IGG superiores à 180, ambas as normas indicam a reconstrução, mesma recomendação dada no DNER-PRO 010 (1979) para pavimentos com valor médio das flechas na trilha de roda superior à 30 mm ou com 33% das estações inventariadas com afundamentos plásticos significativos.

As camadas que mais contribuem para o acúmulo de deformações permanentes são revestimento e base, se comparadas ao subleito (Barker, 1982), portanto, especialmente nestes casos a reciclagem profunda é uma alternativa à reconstrução.

2.6.4 Número estrutural

Nos casos em que a capacidade estrutural do pavimento é baixa, de forma que é preciso aplicar camadas de reforço muito espessas para se atingir a capacidade necessária, a reciclagem profunda é uma opção.

O método da AASHTO (1993) apresenta três diferentes abordagens para determinação da capacidade estrutural do pavimento existente (SN_{ef}):

- Inspeção visual e teste de materiais;
- Expectativa de vida remanescente em função do tráfego;
- Avaliação defletoométrica.

2.6.4.1 Inspeção visual

Por meio de inspeção visual da condição superficial do pavimento existente, são atribuídos coeficientes estruturais para as camadas existentes, conforme indica a Tabela 2.12. As espessuras e os materiais constituintes devem ser conhecidos, sendo recomendada a extração de corpos de prova para ensaios laboratoriais, especialmente no caso de camadas estabilizadas.

Tabela 2.12 – Coeficientes estruturais sugeridos devido à degradação dos materiais AASHTO (1993)

Condição superficial	Coeficiente estrutural	
	Revestimento	Base estabilizada
Poucas ou nenhuma trinca couro de jacaré e/ou trincas transversais de baixa severidade	0,35 – 0,40	0,20 – 0,35
< 10% de trincas couro de jacaré de baixa severidade e/ou < 5% de trincas transversais de média a alta severidade	0,25 – 0,35	0,15 – 0,25
> 10% de trincas couro de jacaré de baixa severidade e/ou < 10% de trincas couro de jacaré de média severidade e/ou > 5% a 10% de trincas transversais de média a alta severidade	0,20 – 0,30	0,15 – 0,20
> 10% de trincas couro de jacaré de média severidade e/ou < 10% de trincas couro de jacaré de alta severidade e/ou > 10% de trincas transversais de média a alta severidade	0,14 – 0,20	0,10 – 0,20
> 10% de trincas couro de jacaré de alta severidade e/ou > 10% de trincas transversais de alta severidade	0,08 – 0,15	0,08 – 0,15

Para as bases e sub-bases granulares, os coeficientes estruturais sugeridos variam de 0,10 a 0,14 no caso de não existirem evidências de degradação, contaminação ou bombeamento de finos. Do contrário, os valores recomendados variam de zero a 0,10.

Determinados os coeficientes estruturais e conhecidas as espessuras, obtém-se o número estrutural do pavimento existente:

$$SN_{ef} = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times m_2 + a_3 \times D_3 \times m_3 \quad (6)$$

Onde:

SN_{ef} = número estrutural efetivo;

a_1, a_2, a_3 = coeficiente estrutural do revestimento, base e sub-base, respectivamente, conforme Tabela 2.12;

D_1, D_2, D_3 = espessura das camadas de revestimento, base e sub-base, respectivamente [pol].

2.6.4.2 Expectativa de vida remanescente

O segundo método estima a vida remanescente em função do tráfego a partir da seguinte equação:

$$RL = 100 \times \left[1 - \left(\frac{N_p}{N_{1,5}} \right) \right] \quad (7)$$

Onde:

RL = vida remanescente [%];

N_p = número N até a data atual;

$N_{1,5}$ = número N limite (até atingir serventia limite = 1,5).

O valor obtido é associado ao fator de condição do pavimento por meio do gráfico da Figura 2.14.

Figura 2.14 – Relação entre vida remanescente e fator de condição (adaptado de AASHTO, 1993)

O fator de condição é definido como a relação entre a capacidade estrutural do pavimento após a passagem do tráfego até a presente data e a capacidade estrutural inicial, antes do desgaste.

Finalmente, a capacidade estrutural do pavimento existente é determinada por:

$$SN_{ef} = CF \times SN_o \quad (8)$$

Onde:

SN_{ef} = número estrutural do pavimento existente;

CF = fator de condição;

SN_o = número estrutural inicial do pavimento.

2.6.4.3 Avaliação deflectométrica

Ainda, pode-se determinar a capacidade estrutural do pavimento por meio de ensaios deflectométricos. Considerando-se o pavimento existente como uma estrutura de duas camadas, é possível calcular o módulo equivalente de toda a estrutura acima do subleito com base na deflexão máxima, da espessura total do pavimento e do módulo de resiliência do subleito.

$$d_o = 1,5 \times p \times a \left\{ \frac{1}{E_{SL} \times \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \times \sqrt[3]{\frac{E_P}{E_{SL}}} \right)^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}}}{E_P} \right\} \quad (9)$$

Onde:

E_P = módulo de resiliência efetivo do pavimento [psi];

E_{SL} = módulo de resiliência do subleito [psi];

d_o = deflexão medida no centro de aplicação de carga, ajustada para temperatura padrão de 68° F (20 ° C) [pol];

p = pressão de contato aplicada [psi];

a = raio da área circular de distribuição do carregamento [pol];

D = espessura total do pavimento [pol].

De posse das informações, a equação a seguir fornece o número estrutural do pavimento existente:

$$SN_{ef} = 0,0045 \times D \times \sqrt[3]{E_P} \quad (10)$$

Onde:

SN_{ef} = número estrutural efetivo;

D = espessura total do pavimento [pol];

E_P = módulo de resiliência efetivo do pavimento [psi].

Rohde (1994) desenvolveu outra maneira para estimar a capacidade estrutural existente do pavimento, através da equação:

$$SN_{ef} = k_1 \times (d_0 - d_{1,5D})^{k_2} \times D^{k_3} \quad (11)$$

Onde:

SN_{ef} = número estrutural do pavimento existente;

D = espessura total do pavimento [mm];

d_0 = deflexão na superfície do pavimento sob o ponto de aplicação da carga [μm];

$d_{1,5D}$ = deflexão na superfície do pavimento distante 1,5D do ponto de aplicação da carga [μm];

k_1 , k_2 e k_3 = coeficientes tabelados em função do revestimento (ver Tabela 2.13).

Kim, Kim, & Murph (2013) estabeleceram novos coeficientes para a equação proposta por Rohde (1994), por meio da simulação de mais casos que o autor original.

Tabela 2.13 – Coeficientes k_1 , k_2 e k_3

Material do revestimento	Espessura do revestimento D_1 (pol)	(Rohde, 1994)			(Kim, Kim, & Murph, 2013)		
		k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3
Tratamento superficial	$D_1 < 2,5$	0,1165	-0,3248	0,8241	0,0811	-0,3994	0,9904
	$D_1 < 2,5$	0,4728	-0,4810	0,7581	0,1070	-0,3715	0,9179
Concreto asfáltico	$2,5 \leq D_1 \leq 5,5$	0,4728	-0,4810	0,7581	0,1361	-0,3719	0,8752
	$D_1 > 5,5$	0,4728	-0,4810	0,7581	0,0875	-0,2926	0,8860

Foram além e desenvolveram a equação (12) contemplando parâmetros da bacia deflectométrica:

$$SN_{ef} = k_1 (d_0 - d_{1,5D})^{k_2} D^{k_3} + k_4 (1 + r_0)^{k_5} + k_6 SCI^{k_7} BDI^{k_8} \quad (12)$$

Onde:

SN_{ef} = número estrutural do pavimento existente;

d_0 = deflexão na superfície do pavimento sob o ponto de aplicação da carga [10^{-3} pol];

$d_{1,5D}$ = deflexão na superfície do pavimento distante 1,5D do ponto de aplicação da carga [10^{-3} pol];

D = espessura total do pavimento [pol];

k_i = novos coeficientes de regressão;

SCI = índice da curvatura da superfície [10^{-3} pol];

BDI = índice de danos à base [10^{-3} pol];

r_0 = ponto de deflexão zero [pés⁻¹].

O ponto de deflexão zero (r_0) é obtido por meio de gráfico, com eixo vertical indicando a deflexão e o eixo horizontal o inverso da distância da deflexão lida em relação ao ponto de aplicação da carga. O lugar geométrico do encontro do eixo das abcissas com as projeções das curvas fornece o valor de r_0 .

Os coeficientes de regressão da equação (12) são discriminados na Tabela 2.14:

Tabela 2.14 – Coeficientes para equação (12) (adaptado de Kim, Kim, & Murph, 2013)

Espessura do revestimento (pol)	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8
Tratamento superficial	0,2296	-0,4112	1,2626	0,1629	0,7919	1,5146	-1,4247	1,0960
$D_1 < 2,5$	0,2797	-0,3770	1,1606	-0,0149	3,4038	1,2251	-0,8397	0,6901
$2,5 \leq D_1 \leq 5,5$	0,9712	-0,3129	0,7521	-0,3422	2,9334	0,0657	0,8854	-2,5504
$D_1 > 5,5$	1,5136	-0,1749	0,5718	-1,7876	1,9035	1,2479	0,1411	-0,8383

3 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS COM CAMADA RECICLADA A FRIO ESTABILIZADA COM ESPUMA DE ASFALTO

Os reforços de pavimentos podem ser dimensionados por meio de soluções catalogadas, de critérios de deformabilidade, de resistência estrutural ou ainda por meio de abordagem empírico-mecanicista. A estes critérios, podem se somar indicadores funcionais como irregularidade e perda de serventia, entre outros.

Os catálogos fornecem uma lista de estruturas para determinadas condições. Usualmente se baseiam em experiências prévias dos agentes envolvidos e apresentam as vantagens da padronização e facilidade de aplicação para projeto. Como desvantagens, ao simplificar uma gama de variáveis que influenciam na durabilidade dos pavimentos, se tornam dificilmente transferíveis para diversas condições e ampliam a distância entre a estrutura ideal e aquela projetada, podendo resultar em soluções relativamente caras. Também impedem que novas tecnologias sejam aplicadas, a menos que revisões periódicas venham a ocorrer.

A escolha de soluções de pavimentação por meio de catálogos é usualmente indicada apenas para rodovias de baixo tráfego, as quais não exigem alto nível de serviço, ou como alternativa para estudos preliminares, devido às simplificações impostas. Na África do Sul, por exemplo, para projetos com baixo tráfego previsto ($N < 10^7$) as soluções para as camadas tratadas com material asfáltico, incluindo as recicladas, são catalogadas (Asphalt Academy, 2009).

Uma opção mais elaborada para o dimensionamento de restauração de pavimentos corresponde a métodos que utilizam o critério de deformabilidade, também conhecido como deflectométrico. Tem o conceito de que quanto maiores as deflexões na superfície do pavimento, mais fracos serão a estrutura total e o subleito, sendo necessária uma camada de reforço mais resistente (Huang, 2004).

Tais métodos que utilizam este critério, por meio de modelos analíticos, empíricos, estatísticos ou combinações destes, buscam limitar os deslocamentos na superfície com a aplicação de material, usualmente concreto asfáltico, para reforço da estrutura.

Para os processos que envolvem reciclagem, estima-se a deflexão que ocorreria a determinada espessura de corte com base na deflexão da superfície do pavimento, como é o caso do método de reabilitação californiano do Caltrans (2008) ou do

brasileiro DNER PRO-269/94 (1994). Em ambos, o processo se limita à camada de revestimento.

Porém, devido à dificuldade de se realizar esta estimativa de deflexão com espessuras de corte muito altas e por ser um processo que envolve o corte de pelo menos mais de uma camada além do revestimento, esta metodologia não é aplicável para a reciclagem profunda.

Outra forma de se dimensionar um pavimento é através de métodos empírico-mecanicistas, que utilizam modelagem teórica do pavimento calibrada com dados experimentais de campo e/ou laboratório (Balbo, 2007).

Países como Inglaterra, África do Sul, Austrália e Nova Zelândia adotam esta metodologia para dimensionar a restauração de pavimentos por meio da reciclagem profunda com espuma de asfalto.

Por fim, existem os métodos empíricos ou semi-empíricos baseados em critérios de resistência. Neste tipo de análise, busca-se evitar a ruptura por cisalhamento de camadas granulares do pavimento existente, em especial do subleito, camada com menor resistência estrutural.

Estes últimos abordam o problema de maneira semelhante ao dimensionamento de pavimentos novos: o reforço a ser aplicado é a diferença entre a espessura de material novo necessário para proteção do subleito e a espessura existente. Esse enfoque é possível por meio do conceito de espessura efetiva ou módulo efetivo dos materiais existentes. Outra abordagem é a utilização de um índice representativo da capacidade estrutural do pavimento, conforme os métodos da AASHTO e da *Asphalt Academy*.

Os subcapítulos a seguir apresentam as principais metodologias encontradas na bibliografia internacional para o dimensionamento estrutural de pavimentos com camadas recicladas a frio com espuma de asfalto.

3.1 Inglaterra

Na Inglaterra, a reciclagem ganhou força com o surgimento do conceito de se utilizar o pavimento existente como uma “pedreira linear”, de onde pode-se extrair os agregados a serem tratados com vantagens econômicas e ambientais. Motivadas

pela ECO 92, realizada no Rio de Janeiro, as autoridades passam a dificultar a extração e forçar a minimização do consumo de matérias-primas da natureza, e a encorajar o reaproveitamento dos materiais já processados, por meio da publicação do Guia para Fornecimento de Agregados Minerais – MPG6 e do Regulamento de Licenciamento da Gestão de Resíduos, ambos em 1994, entre outras medidas do Departamento de Meio Ambiente (Milton & Earland, 1999).

Na área de pavimentação, Milton & Earland (1999) elaboraram um guia de dimensionamento e especificações para a reciclagem profunda *in-situ*, o TRL368, publicado pelo *Transport Research Laboratory*. Baseado em um programa de pesquisa de três anos de duração, que envolveu o estudo de rodovias com tráfego médio e pesado já executadas, foi complementado pelo monitoramento de um trecho experimental na rodovia A3088, em Somerset. São considerados tanto o tratamento com cimento como com espuma de asfalto, que já não era um material tão inovador no país, uma vez que a primeira experiência inglesa com espuma de asfalto ocorreu em 1986 (Akeroyd & Hicks, 1988).

Para completar a lacuna existente para especificações de reciclagem que não ocorrem *in-situ*, Nunn & Thom (2002) elaboraram um estudo para o *Transport Research Laboratory*: monitoraram sete seções instrumentadas em pista experimental com diferentes bases recicladas com espuma de asfalto em usina.

Formularam a equação (13) para correção do módulo de resiliência da base reciclada em usina com espuma de asfalto em função da temperatura.

$$E_{20} = E_T \times 1,027^{(T-20)} \quad (13)$$

Onde:

E_{20} = módulo de resiliência para 20 °C [MPa];

E_T = módulo de resiliência para temperatura T [MPa];

T = Temperatura [°C].

A equação é oriunda de comparações entre módulos de resiliência obtidos em laboratório com amostras extraídas da pista experimental e os módulos de resiliência retroanalizados dos resultados de diferentes levantamentos deflectométricos ao longo de um ano.

Posteriormente, um novo trabalho foi elaborado por Merrill, Nunn, & Carswell (2004) para atender ao aumento e maior viabilidade dos serviços de reciclagem profunda. O novo guia – TRL611 – passa a contemplar a reciclagem em usina, rodovias de tráfego mais pesado e uma gama maior de agentes estabilizadores.

Os materiais reciclados com diferentes combinações de aglomerantes e desempenho de cura são divididos em quatro categorias:

- QH (*quick hydraulic*): hidráulico rápido, com aglomerante hidráulico apenas, incluindo cimento;
- SH (*slow hydraulic*): hidráulico lento, com aglomerante hidráulico apenas, excluindo cimento;
- QVE (*quick visco-elastic*): viscoelástico rápido, com material betuminoso e aglomerante hidráulico, incluindo cimento;
- SVE (*slow visco-elastic*): viscoelástico lento, com material betuminoso e aglomerante hidráulico, excluindo cimento.

Estas categorias se enquadram em três classes (ou famílias como preferem os autores) de materiais para bases recicladas, ilustradas na Figura 3.1. Cada família tem um comportamento distinto, e as camadas recicladas com espuma de asfalto pertencem à família 3.

Figura 3.1 – Identificação de famílias dos materiais (adaptado de Merrill, Nunn, & Carswell, 2004)

O método também passa a adotar as propriedades de resistência dos materiais após o estágio de cura, no que chama de propriedades de longo prazo, e mais resultados laboratoriais, que são utilizados como dados de entrada no dimensionamento.

Baseado no estudo de Nunn & Thom (2002), se considera os materiais reciclados com espuma de asfalto suscetíveis à fadiga, em comportamento semelhante às misturas asfálticas convencionais.

3.1.1 TRL386

A primeira etapa do dimensionamento em restauração é a avaliação da via a ser restaurada, de modo que alguns requisitos devam ser atendidos para que se obtenha condições ideais para aplicação da reciclagem profunda, como indicado no fluxograma da Figura 3.2.

Figura 3.2 – Avaliação da possibilidade de reciclagem profunda in-situ (adaptado de Milton & Earland, 1999)

O conhecimento das diferentes estruturas ao longo da rodovia permite verificar a homogeneidade do pavimento e se usualmente a fresagem dos materiais existentes

gera ou não agregados reciclados de qualidade. O RAP produzido deve ser uniforme, sem grande variabilidade. Tal situação é difícil de ser encontrada no Brasil.

Caso não seja permitido alterar o greide, a estrutura de pavimento deve possuir espessura tal que produza material fresado suficiente para a nova camada de base. Do contrário, uma camada do subleito poderá fazer parte da mistura desde que tenha granulometria adequada e tenha resistência suficiente ($\text{CBR} > 2\%$). Também há critérios econômicos, como no caso de extensão mínima do trecho e de necessidade de remoção ou proteção de interferências subterrâneas, como redes de água, esgoto ou gás, por exemplo.

Atendidos os requisitos, procede-se o cálculo da espessura da camada reciclada, cujo valor mínimo é 0,15 m e máximo é 0,33 m, de acordo com o agente estabilizador escolhido e o tráfego estimado.

A via a ter o pavimento reciclado é classificada inicialmente segundo o tráfego estimado para um período de projeto de 20 anos, conforme indica a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Classificação das rodovias (adaptado de Department for Transport, 2010)

Classe	Tráfego no período de projeto (Número de repetições do eixo padrão)
1	$10^7 < N \leq 3 \times 10^7$
2	$2,5 \times 10^6 < N \leq 10^7$
3	$5 \times 10^5 < N \leq 2,5 \times 10^6$
4	$N \leq 5 \times 10^5$

A Figura 3.3 mostra o fluxograma para dimensionamento para a reciclagem profunda com espuma de asfalto. O módulo de resiliência, cujo ensaio deve ser realizado de acordo com a norma DD213 (British Standard Draft for Development, 1993), precisa ser superior a 2.000 MPa para rodovias de tráfego leve (Classe 4) e maior que 2.500 MPa para as rodovias de tráfego mais intenso.

Figura 3.3 – Roteiro para dimensionamento de pavimentos com bases recicladas com espuma de asfalto pelo método do TRL386 (adaptado de Milton & Earland, 1999)

Para rodovias de tráfego menor (Classe 3 e 4) as condicionantes para determinação da espessura da base são a espessura do revestimento escolhido e o índice de suporte Califórnia do subleito (CBR_{SL}), listadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Determinação das espessuras das camadas do pavimento na reciclagem profunda in-situ utilizando espuma de asfalto para rodovias de baixo tráfego (adaptado de Milton & Earland, 1999)

Espessura da camada reciclada com espuma de asfalto (mm)						
Classificação da rodovia	Classe 3			Classe 4		
Esp. revest. (mm)	TS	40	100	TS	40	100
CBR_{SL} (%)						
2 – 4	n.r.	310 (n.r.)	250	320 (n.r.)	280	195
5 – 7	330 (n.r.)	290	230	300	260	185
8 – 14	315 (n.r.)	275	215	285	245	160
> 15	285	245	185	255	215	150

TS: tratamento superficial
n.r.: não recomendado

Observa-se que para espessuras superiores a 300 mm, a reciclagem in-situ não é recomendada, em virtude da dificuldade de se obter compactação suficiente e uniforme ao longo de toda a camada.

No caso de rodovias classes 1 e 2, assume-se que após a fresagem o pavimento existente terá capacidade de suporte equivalente às combinações de CBR do subleito (CBR_{SL}) e espessura da sub-base da Tabela 3.3:

Tabela 3.3 – Características da infraestrutura remanescente para rodovias Classes 1 e 2 (adaptado de Milton & Earland, 1999)

	Espessura remanescente mínima (mm)			
	$2\% < CBR_{SL} \leq 4\%$	$5\% \leq CBR_{SL} \leq 7\%$	$8\% \leq CBR_{SL} \leq 14\%$	$CBR_{SL} \geq 15\%$
Sub-base granular	300	250	200	150
Sub-base tratada	85	70	60	40

Nas rodovias de tráfego elevado não se recomenda a incorporação de material do subleito ao RAP. Logo, a espessura a ser fresada deve ser tal que se mantenha uma camada entre o subleito e a base.

Não existindo material suficiente para atuar como sub-base, é possível compensar com o aumento de espessura da camada reciclada, sendo a diferença de espessura necessária transformada através de fatores de equivalência.

Contudo, o aumento da camada reciclada reduz ainda mais a espessura da camada de sub-base remanescente. Para corrigir este contrassenso, os fatores de equivalência estrutural são majorados, sendo definidos como fatores de déficit de espessura. Para a reciclagem com espuma de asfalto, o fator de déficit de espessura é de 0,65.

Em resumo, a espessura da camada reciclada é dada por:

$$h_{REC,Total} = h_{REC} + (h_{SB,min} - h_{SB,r}) \times f_{de} \quad (14)$$

Onde:

$h_{REC,Total}$ = espessura total da camada reciclada [mm];

h_{REC} = espessura da camada reciclada definida por meio de ábaco [mm];

$h_{SB,min}$ = espessura mínima da sub-base remanescente, de acordo com Tabela 3.3 [mm];

$h_{SB,r}$ = espessura da sub-base remanescente [mm];

f_{de} = fator de déficit de espessura.

Os ábacos da Figura 3.4 permitem dimensionar as espessuras do revestimento e da camada reciclada (h_{REC}) quando são atendidas às condições de suporte mínimas da estrutura remanescente.

Figura 3.4 – Ábacos do TRL386 para determinação das espessuras das camadas do pavimento na reciclagem a frio in-situ utilizando espuma de asfalto para rodovias de tráfego elevado (adaptado de Milton & Earland, 1999)

3.1.2 TRL611

No guia de Merrill, Nunn, & Carswell (2004) basicamente a espessura da camada reciclada e do revestimento são definidas em função do tráfego previsto, da

capacidade de suporte da fundação remanescente e do módulo de resiliência do material reciclado.

Os dois primeiros passos para o dimensionamento são classificar a rodovia em função do tráfego previsto para o período de projeto e a capacidade de suporte da infraestrutura remanescente.

A classificação da rodovia segundo o tráfego se dá conforme a Tabela 3.4. Observa-se que se trata da mesma classificação do TRL386, porém com a inclusão de uma categoria de tráfego mais pesado (classe 0).

Tabela 3.4 – Classificação das vias segundo o TRL611 (Merril, Nunn, & Carswell, 2004)

Classe	Tráfego no período de projeto (Número de repetições do eixo padrão)
0	$3 \times 10^7 < N \leq 8 \times 10^7$
1	$10^7 < N \leq 3 \times 10^7$
2	$2,5 \times 10^6 < N \leq 10^7$
3	$5 \times 10^5 < N \leq 2,5 \times 10^6$
4	$N \leq 5 \times 10^5$

A infraestrutura remanescente após a execução da reciclagem é dividida em quatro categorias, de acordo com a capacidade de suporte:

Tabela 3.5 – Classificação da infraestrutura remanescente (Merril, Nunn, & Carswell, 2004)

Tipo	Capacidade de suporte (MPa)	Coeficiente de Poisson
1	50	0,35
2	100	
3	200	
4	400	

Esta avaliação é feita através de ensaios laboratoriais de amostras extraídas, de ensaio in-situ com cone de penetração dinâmica ou ainda subjetivamente, a depender do tipo de solo do subleito, do material e da espessura da sub-base.

O novo método utiliza dados de ensaios laboratoriais do material tratado para as rodovias de tráfego maior que $N = 5 \times 10^6$. No caso de estabilização com material asfáltico, a classificação ocorre em razão da resistência adquirida a longo prazo,

expressa pelo módulo de resiliência de amostras com 28 dias de cura, tal qual especifica a Tabela 3.6:

Tabela 3.6 – Classificação de material da base reciclada com emulsão ou espuma de asfalto (Merril, Nunn, & Carswell, 2004)

Categoria	Módulo de Resiliência (MPa)
B1	1900
B2	2500
B3	3100

Apesar de se tratar de uma classificação extremamente simplificada, é importante pois uma vez escolhida a categoria durante o dimensionamento, o desafio passa a ser garantir no campo que a base atinja o valor estipulado de módulo de resiliência, semelhantemente ao que se faz com materiais cimentados no dimensionamento de pavimentos do Brasil. Por exemplo, o Manual de Pavimentação do DNIT (2006c) diferencia os valores de coeficiente estrutural para camadas de solo-cimento em função da resistência à compressão aos 7 dias.

Procede-se o dimensionamento com a determinação da espessura da base reciclada por meio gráfico. As figuras seguintes apresentam os ábacos, sendo um para cada tipo de fundação, que estabelecem a espessura da base estabilizada com espuma revestida por 100 mm de concreto asfáltico.

Figura 3.5 – Ábaco de dimensionamento de camada reciclada com emulsão ou espuma de asfalto e 100 mm de revestimento em concreto asfáltico para rodovia classe 2 ou superior e fundação tipo 1 (adaptado de Merrill, Nunn, & Carswell, 2004)

Figura 3.6 – Ábaco de dimensionamento de camada reciclada com emulsão ou espuma de asfalto e 100 mm de revestimento em concreto asfáltico para rodovia classe 2 ou superior e fundação tipo 2 (adaptado de Merrill, Nunn, & Carswell, 2004)

Figura 3.7 – Ábaco de dimensionamento de camada reciclada com emulsão ou espuma de asfalto e 100 mm de revestimento em concreto asfáltico para rodovia classe 2 ou superior e fundação tipo 3 (adaptado de Merrill, Nunn, & Carswell, 2004)

Figura 3.8 – Ábaco de dimensionamento de camada reciclada com emulsão ou espuma de asfalto e 100 mm de revestimento em concreto asfáltico para rodovia classe 2 ou superior e fundação tipo 4 (adaptado de Merrill, Nunn, & Carswell, 2004)

Alternativamente, pode-se empregar para rodovias classe de tráfego 1 e 2 revestimentos com espessura menor que 100 mm, desde que a camada reciclada compense esta redução, sendo a variação majorada em 30% devido às diferenças de resistência dos materiais:

$$\Delta D_2 = -1,3 \times \Delta D_1 \quad (15)$$

Onde:

ΔD_2 = variação de espessura da camada reciclada com material asfáltico [cm];

ΔD_1 = variação de espessura do revestimento asfáltico [cm];

Contudo, devem ser respeitados os valores de espessura mínima da Tabela 3.7:

Tabela 3.7 – Espessura mínima do revestimento (Merril, Nunn, & Carswell, 2004)

Classe da Rodovia	Revestimento mínimo (mm)
0	100
1	70
2	50

Para as rodovias de baixo volume de tráfego, com $N \leq 5 \times 10^6$, o material reciclado deve ter classificação B1 ou superior. As espessuras são as definidas conforme a Tabela 3.8 para vias de classe 2. Já para as de classes 3 ou 4 não houve alteração em relação ao manual anterior (ver Tabela 3.2).

Tabela 3.8 – Determinação das espessuras das camadas do pavimento na reciclagem profunda com estabilizante asfáltico para rodovias de classe 2 segundo o TRL 611 (adaptado de Merrill, Nunn, & Carswell, 2004)

Espessura da camada reciclada com espuma de asfalto (mm)			
Esp. Revest. (mm) \ CBR _{subleito} (%)	Tratamento Superficial	40	100
2 – 4	n.r.	n.r.	n.r.
5 – 7	n.r.	n.r.	n.r.
8 – 14	n.r.	n.r.	300
> 15	n.r.	n.r.	270

n.r.: não recomendado

3.2 África do Sul

A África do Sul é um dos países que mais tem estudado e desenvolvido a técnica de reciclagem profunda com espuma de asfalto.

O mais recente guia de pavimentação sul-africano, publicado em 2014 pela *South African National Roads Agency*, apresenta pequeno conteúdo de materiais estabilizados com asfalto, com foco na caracterização dos mesmos. O dimensionamento de pavimentos utiliza critérios mecanicistas, todavia, para pavimentos com camadas tratadas com materiais asfálticos há indicação de guia de referência específico: o *South African Technical Guideline: Bituminous Stabilised Materials*, conhecido como TG2 (SANRA, 2014). Sua primeira publicação ocorreu em 2002 como método interino, sendo revisado em 2009.

O TG2 na sua primeira edição foi desenvolvido com base em dados laboratoriais e ensaios acelerados em escala real de pavimento com estrutura reciclada in-situ com 2% de cimento e 1,8% de espuma de asfalto conduzidos com simulador móvel tipo *Heavy Vehicle Simulator* (HVS). Apresenta um método empírico-mecanicista e considera que as camadas estabilizadas com espuma de asfalto possuem dois comportamentos distintos ao longo de sua vida útil (Long & Theyse, 2002).

A primeira fase, chamada de fase eficaz à fadiga (*effective fatigue phase*) é referente a camada recém-construída, em condição intacta e sem danos, com elevada resistência estrutural, e comportamento semelhante a materiais asfálticos.

A segunda fase, definida como fase de equivalência granular (*equivalent granular phase*) ocorre quando, devido às solicitações impostas, a resistência da camada diminui, resultando em módulo de resiliência semelhante a uma base granular de boa qualidade. Devido à mudança de comportamento do material, o critério de ruptura deixa de ser a fadiga e passa a ser o acúmulo de deformações permanentes. Importante frisar que a semelhança é em relação ao módulo de resiliência, não ao comportamento. Isto é, o material tratado não será um material granular, sem coesão (Long & Theyse, 2002).

Estudos de Jooste & Long (2007) subsidiaram a revisão do método interino. Observou-se que os materiais tratados com asfalto (BSM – do inglês *Bitumen Stabilised Materials*) possuem comportamento mais próximo aos materiais granulares do que às misturas asfálticas, em virtude da não continuidade da

estabilização, uma vez que há pouca ou nenhuma conexão entre as partículas de asfalto. Outra grande revisão ocorreu na classificação dos materiais e na metodologia do dimensionamento, que deixa de ser empírico-mecanicista e passa a adotar a metodologia empírica do *Pavement Number*, índice que afere a capacidade estrutural do pavimento (Asphalt Academy, 2009), numa abordagem semelhante ao *Structural Number* do método da AASHTO (1993).

Junto à nova metodologia foram criadas regras de boas práticas comuns (ou pontos de partida), que tratam de incorporar conceitos consagrados no dimensionamento de pavimentos, como utilização de parâmetros de resistência de longo prazo para caracterização dos materiais, melhor modelagem do subleito, limitação da diferença de módulos de resiliência entre camadas adjacentes e fator de confinamento para as camadas de base.

Foi desenvolvido com dados das estruturas catalogadas pelos guias sul-africanos, avaliação de desempenho de campo e seções de teste com HVS. Assim como o guia anterior, não é aplicável para projetos com tráfego superior a 3×10^7 repetições de eixo-padrão e pavimentos com camadas de solo com laminações (Asphalt Academy, 2009).

A versão revisada exibe nova classificação das misturas estabilizadas com asfalto, seja espuma ou emulsão. São definidas três categorias para este tipo de material, identificados pela sigla BSM – *Bitumen Stabilised Materials*.

Os materiais BSM1 são aqueles de elevada resistência ao cisalhamento, provenientes de material britado bem graduado ou RAP, sendo aplicáveis a rodovias de tráfego elevado.

As misturas BSM2, indicadas para rodovias com tráfego de até 6×10^6 repetições do eixo-padrão possuem boa resistência ao cisalhamento e tipicamente são originárias do tratamento de agregados naturais ou RAP.

Por fim, as misturas BSM3, normalmente oriundas da estabilização de solos-brita e/ou areias, são indicadas apenas para vias de tráfego leve.

3.2.1 TG2 (2002)

O método interino considera duas fases para o comportamento e ruptura do material reciclado, e só é aplicável para rodovias com tráfego entre 1×10^6 e 3×10^7 repetições de eixo-padrão e pavimentos com ausência de camadas de solos com laminações.

A determinação da vida útil da camada na fase eficaz à fadiga é regida pela seguinte equação:

$$N_{F,FB} = 10^{\left[A - 0,708 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_b}\right]} \quad (16)$$

Onde:

$N_{F,FB}$ = número de carregamentos de um eixo-padrão de 80 kN admissíveis durante a fase eficaz à fadiga da camada tratada com espuma de asfalto;

A = coeficiente de confiabilidade;

ε = deformação específica de tração horizontal na fibra inferior da camada tratada, calculada utilizando programa computacional de análise elástico-linear [$\mu\text{m/m}$];

ε_b = deformação de ruptura no ensaio de flexão em viga [$\mu\text{m/m}$].

O coeficiente A é um parâmetro de confiabilidade, baseado na categoria de tráfego e importância da via em questão (Tabela 3.9).

Tabela 3.9 – Categorização e parâmetros de confiabilidade das rodovias (adaptada de Department of Transport, 1996 e de Long & Theyse, 2002)

Categoria da Rodovia	A	B	C	D
Confiabilidade	95 %	90 %	80 %	50 %
Importância	Muito importante	Importante	Pouco importante	Pouco importante
Nível de serviço	Muito alto	Alto	Moderado	Moderado a baixo
Repetições de eixo-padrão	3×10^6 a 10^8	3×10^5 a 10^7	10^5 a 3×10^5	$< 10^5$
Coeficiente A	6,339	6,499	6,579	6,619

Para esta fase, a localização dos pontos críticos para obtenção da deformação específica de tração horizontal na fibra inferior da camada tratada são os indicados na Figura 3.9, sendo adotado o maior valor.

Figura 3.9 – Localização dos pontos críticos para dimensionamento da camada tratada com espuma de asfalto na fase eficaz à fadiga

Ao término desta fase, há redução na resistência, ou seja, o material deixa de ter comportamento de material estabilizado e passa a ter desempenho de granular. Considera-se que ocorreram 2 mm de deformação permanente na camada, ou seja, 10 % da condição terminal de afundamento de trilha de roda admissível para todo o período de projeto (20 mm).

Conforme mostra a Figura 3.10, na fase equivalente a material granular, os pontos críticos na camada tratada com espuma passam a ser os localizados a um quarto abaixo do topo da camada e um quarto acima do fundo da camada, ambos abaixo e entre as cargas de roda dupla, diferentemente da localização usual do método mecanicista sul-africano (SANRA,2014) para materiais puramente granulares, cuja avaliação é feita no meio da camada.

Figura 3.10 – Localização dos pontos críticos para análise mecânica da camada tratada com espuma de asfalto na fase de equivalência granular

O número máximo de repetições admissíveis nesta segunda fase é dado pelas equações a seguir:

$$N_{PD,FB} = \frac{1}{30} \cdot 10^{(-B+11,938 \cdot RD+0,0726 \cdot PS-1,628 \cdot SR+0,691 \cdot c)} \quad (17)$$

Onde:

$N_{PD,FB}$ = número de repetições admissíveis;

B = coeficiente de confiabilidade;

RD = densidade relativa da mistura de asfalto espumado;

PS = deformação permanente admissível na camada tratada expressa em porcentagem de sua espessura [%];

SR = relação de tensões;

c = taxa de cimento por asfalto.

A Tabela 3.10 mostra os possíveis valores do parâmetro de confiabilidade B , análogo ao coeficiente A da equação (16).

Tabela 3.10 – Coeficiente de confiabilidade B (adaptada de Long & Theyse, 2002)

Categoria da Rodovia	Coeficiente B
A	2,047
B	1,951
C	1,816
D	1,625

A densidade relativa é um parâmetro adimensional definido como:

$$RD = \frac{DD_{mix}}{ARD_{mix} \cdot D_w} \cdot 100 \quad (18)$$

Onde:

RD = densidade relativa da mistura de asfalto espumado;

DD_{mix} = densidade seca da mistura [kg/m³];

ARD_{mix} = densidade relativa aparente, determinada utilizando os valores de densidade individuais dos agregados, cimento, asfalto e água;

D_w = densidade da água [kg/m³].

A relação de tensões provém da equação utilizada no método mecanicista de dimensionamento sul-africano para modelagem da deformação permanente em materiais granulares, devido à densificação e cisalhamento gradual (Theyse, de Beer, & Rust, 1996). Trata-se do inverso do fator de segurança desenvolvido por Maree (1981)² (apud Theyse, de Beer, & Rust, 1996) a partir da teoria de Mohr-Coulomb:

$$SR = \frac{\sigma_1^a - \sigma_3^a}{\sigma_3^a \left[k \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right] + 2kC \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)} \quad (19)$$

Onde:

SR = relação de tensões;

σ_1^a, σ_3^a = tensões principais [kPa];

ϕ = ângulo de atrito [°];

² MAREE, J. H. Design parameters for crushed stone in pavements (in Afrikaans). Master's thesis. University of Pretoria, Pretoria, 1978.

C = coesão [kPa] determinada por meio de ensaios triaxiais de carregamento monotônico;

k = coeficiente de sensibilidade à umidade, de acordo com a Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Coeficiente de sensibilidade à umidade (Theyse, de Beer, & Rust, 1996)

k	Condição de campo
0,65	Condição saturada (umidade = 80%)
0,80	Condição moderada (umidade = 50%)
0,95	Condição normal (umidade = 20%)

Para as condições de drenagem, ou umidade, foram estabelecidos três valores da constante k para os materiais granulares. Todavia, para a camada tratada na fase granular, admite-se $k=1,00$ (Long & Theyse, 2002).

A Figura 3.11 ilustra o comportamento de um material que resiste à tração e à compressão. Por convenção, o sinal positivo é utilizado para os esforços de compressão.

Figura 3.11 – Modelagem linear típica para comportamento de material resistente à tração e à compressão (Theyse, de Beer, & Rust, 1996)

Ao se admitir o material de comportamento puramente granular, este não resistiria aos esforços de tração. Portanto, caso a modelagem mecanicista resulte em $\sigma_3^a < 0$

(tração), um ajuste deve ser feito: $\sigma_3^{a'} = 0$ e $\sigma_1^{a'} = \sigma_1^a - \sigma_3^a$. Dessa forma, o círculo de Mohr é deslocado para a zona exclusivamente de compressão (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Adaptação na modelagem para comportamento puramente granular (sem tração) (Theyse, de Beer, & Rust, 1996)

A equação (19) e os coeficientes de umidade ainda são utilizados no atual manual de pavimentação sul-africano para verificação mecanicista de camadas granulares, bem como a estratégia de transformação das tensões para se trabalhar com o material sempre em compressão (SANRA, 2014).

O sistema de classificação presente no método interino sul-africano de 2002 é composto por quatro categorias, divididas de acordo com as resistências à compressão simples (UCS) e à tração por compressão diametral (ITS), conforme a Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Classificação de materiais tratados com espuma de asfalto de acordo com o TG2 (2002)

Classificação	UCS (kPa)	ITS (kPa)
FB1	1.400 – 2.000	300 – 500
FB2	1.400 – 2.000	100 – 300
FB3	700 – 1.400	300 – 500
FB4	700 – 1.400	100 – 300

Para duas destas categorias, cujos materiais foram extensivamente estudados, são sugeridos valores de referência para outros parâmetros (Tabela 3.13).

Tabela 3.13 – Propriedades de materiais tratados com espuma de asfalto segundo o TG2 (2002)

Classificação	FB2		FB3	
	Intervalo	Recomendado	Intervalo	Recomendado
Taxa de cimento por asfalto		1,11		0,33
Módulo de Resiliência (MPa)	1.240 – 2.075	1.600	680 – 1.685	1100
Coeficiente de Poisson		0,35		0,35
Deformação na ruptura (µm/m)	120 – 225	172	390 – 590	490
Coesão (kPa)	110 – 425	210	110 – 210	120
Ângulo de atrito (°)	27 – 55	49	34 – 53	45

3.2.1 TG2 (2009) – Pavement Number

O princípio básico do método de dimensionamento é a adição de camadas com o objetivo de atingir-se capacidade estrutural, quantificada pelo PN (*Pavement Number*), suficiente para proteção do subleito.

A metodologia foi elaborada para rodovias com tráfego elevado das categorias A e B, conforme classificação já apresentada na Tabela 3.9. Para rodovias com tráfego mais leve, o método não é aplicável, e as soluções de pavimentação são obtidas por meio de catálogo de estruturas.

Embora tenha sido preparado para o projeto de pavimentos novos, a utilização do catálogo para casos de reabilitação de pavimentos é validada, desde que se garanta infraestrutura remanescente seja tão ou mais resistente que a estrutura catalogada.

A título de exemplo, a Figura 3.13 ilustra as estruturas propostas para rodovias de classe C.

	Tráfego previsto para período de projeto		Fundação (CBR)
Classe da rodovia	$N \leq 3 \times 10^5$	$3 \times 10^5 < N \leq 10^6$	
C (confiabilidade 80%)			> 15%
	7% a 15%
	3% a 7%

Legenda: CAUQ: Concreto Asfáltico Usinado a Quente
TS: Tratamento Superficial
BSM3: Base tratada com espuma de asfalto classe 3
Gi: material granular classe i

medidas em milímetros

Figura 3.13 – Catálogo de estruturas de pavimentos com camada estabilizada com espuma de asfalto para rodovias de baixo tráfego Classe C (adaptado de Asphalt Academy, 2009)

Além do tráfego, a capacidade de suporte do subleito, ou da infraestrutura remanescente, expressa pelo índice de suporte Califórnia, também define a escolha da estrutura, porém de forma menos incisiva do que em outros métodos. Por exemplo, para uma rodovia classe C com tráfego previsto de 5×10^5 repetições do eixo padrão, a mesma estrutura poderia ser utilizada para diferentes subleitos com valores de CBR entre 3% e 15%: revestimento de 40 mm de espessura em concreto asfáltico sobre uma base espumada BSM3 com 200 mm de espessura.

Para as rodovias de tráfego mais pesado, o fluxograma da Figura 3.14 ilustra a rotina de dimensionamento, e as etapas são detalhadas em seguida.

Figura 3.14 – Fluxograma de dimensionamento do TG2 (2009)

Inicialmente, são escolhidos os materiais e espessuras de cada camada, respeitados os limites da Tabela 3.14.

Tabela 3.14 – Limites de espessuras para camadas do pavimento para o TG2 (2009)

Material	Aplicação	Espessura (mm)	
		Mínima	Máxima
Concreto asfáltico usinado a quente	Revestimento	20	50
Tratamento superficial	Revestimento	5	5
Camada estabilizada com asfalto	Base e sub-base	100	350
Camada estabilizada com cimento	Sub-base	100	400
Materiais granulares	Sub-base e reforço	100	300

Observa-se que a espessura máxima admissível para o revestimento é de 50 mm, um valor consideravelmente baixo se comparado a pavimentos brasileiros. Todavia, está de acordo com a prática sul-africana, uma vez que o método do *Pavement Number* foi desenvolvido a partir de dados de pavimentos em serviço na África do Sul e das estruturas catalogadas do método anterior. Ainda, o mais recente guia de

pavimentação sul-africano ressalta que o dimensionamento com revestimentos mais espessos leva a uma contribuição superestimada desta camada, o que pode gerar uma estrutura com capacidade estrutural insuficiente (SANRA, 2014).

Para rodovias com tráfego inferior a 10^6 repetições do eixo padrão pode-se utilizar tratamento superficial como revestimento sobre base estabilizada com material asfáltico. Caso o tráfego seja maior, deve-se trabalhar com concreto asfáltico usinado a quente, com espessura mínima conforme o ábaco da Figura 3.15.

Figura 3.15 – Revestimento mínimo para pavimentos com base estabilizada com asfalto (adaptado de Asphalt Academy, 2009)

Então procede-se à classificação dos materiais, detalhada no Apêndice A da publicação. Os materiais são divididos em categorias conforme resultados de testes de campo e laboratoriais.

Para materiais granulares há dez categorias (G1 à G10) e são realizados testes de CBR, granulometria, densidade relativa, cone de penetração dinâmica, índice de plasticidade, consistência, umidade relativa, módulo de resiliência retroanalisado de levantamento com FWD.

Já para os estabilizados com cimento, são apenas quatro categorias (C1 à C4) e ensaios: cone de penetração dinâmica, consistência, teor de cimento e módulo de resiliência retroanalisado de levantamento com FWD.

Finalmente, para os materiais estabilizados com asfalto são dispostas três categorias: BSM1 à BSM3. Os ensaios que permitem a classificação são realizados

tanto nos materiais antes da estabilização como após o processo. Para o material ainda não tratado, realiza-se ensaio de CBR, granulometria, densidade relativa, cone de penetração dinâmica, plasticidade, teor de umidade e também do módulo de resiliência por retroanálise de levantamento FWD. Após tratamento, são realizados ensaios de compressão triaxial, resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão simples.

O resultado da classificação dos materiais fornece o parâmetro de resistência efetiva de longo prazo (*effective long term stiffness* – ELTS). Portanto, este não é um valor de resistência ou módulo de resiliência determinado em campo ou em laboratório do material em determinado momento, e sim um parâmetro específico do método do *Pavement Number* e através dele se mensura a capacidade estrutural do material na estrutura do pavimento, semelhantemente a um coeficiente estrutural.

O passo seguinte é combinar os materiais de forma que se obtenha um sistema de cinco camadas, incluindo o subleito, ainda respeitando os limites de espessura da Tabela 3.14. Caso o pavimento possua três ou quatro camadas, o topo do subleito deve ser subdividido, adicionando uma ou duas camadas com espessura de 100 mm.

A capacidade de suporte inicial do subleito ($E_{SL\ inicial}$) é estimada de acordo com a classificação do material, conforme a Tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Capacidade de suporte do subleito

Classe	Módulo de resiliência admitido $E_{SL\ inicial}$ (MPa)
G6 ou melhor	180
G7	140
G8	100
G9	90
G10	70

O valor deve ser corrigido em virtude de condicionantes climáticas e pela espessura total do pavimento. Dessa forma, se obtém a resistência efetiva a longo prazo, definida pela equação:

$$ELTS_{SL} = (E_{SL\ inicial} \times F_{clima}) + F_{esp,pav} \quad (20)$$

Onde:

$ELTS_{SL}$ = resistência efetiva a longo prazo do subleito (MPa);

$E_{SL\ inicial}$ = módulo de resiliência admitido para o subleito (MPa);

F_{clima} = fator climático;

$F_{esp,pav}$ = fator de espessura total do pavimento.

Utiliza-se o fator climático, cujos valores são indicados na Tabela 3.16, para considerar no dimensionamento o aumento da frequência e o risco de haver umidade excessiva no subleito, acelerando os processos degenerativos do pavimento.

Tabela 3.16 – Fator de ajuste climático para subleito

Clima	Fator de ajuste F_{clima}
Úmido	0,6
Moderado	0,9
Seco	1,0

É obtido com base na classificação de Weinert para as características climáticas da África do Sul. A Figura 3.16 mostra a as grandes zonas climáticas do país.

Figura 3.16 – Zonas climáticas sul-africanas (adaptado de Department of Transport, 1996)

O fator de espessura total do pavimento advém do fato de que uma estrutura mais robusta de pavimento reduz a magnitude das tensões que atingem o subleito. Considerando a tensão de confinamento invariante, essa diminuição das tensões verticais levaria a uma menor tensão desvio.

Especialmente para solos finos com alta sensibilidade, a menor tensão desvio resultaria em maior módulo de resiliência (Huang, 2004), sendo o inverso também válido: o aumento da tensão desvio provocaria a queda do módulo. O fator de espessura total leva em conta este fenômeno e sua determinação é realizada através do ábaco da Figura 3.17.

Figura 3.17 – Fator de ajuste para cálculo da resistência efetiva a longo prazo do subleito (adaptado de Asphalt Academy, 2009)

A próxima etapa é determinar o limite de relação modular entre as camadas acima do subleito e a máxima resistência admissível, para que se obtenha a resistência efetiva a longo prazo de cada uma delas, num processo de baixo para cima, ou seja, que se inicia pela camada acima do subleito e termina no revestimento:

$$ELTS_i = \text{mínimo}(E_{m\acute{a}x}, rm_i \times ELTS_{i-1}) \quad (21)$$

Onde:

$ELTS_i$ = resistência efetiva a longo prazo da camada i [MPa];

$E_{m\acute{a}x}$ = módulo de resiliência máximo admissível [MPa];

rm_i = razão modular admissível para a camada i ;

$ELTS_{i-1}$ = resistência efetiva a longo prazo da camada imediatamente abaixo da camada i (MPa).

A limitação da diferença de rigidez entre camadas adjacentes, por meio da razão modular, busca assegurar que os valores de resistência impostos no dimensionamento sejam adequados e próximos à realidade. É a garantia de que cada material terá suporte suficiente da estrutura que se encontra abaixo e, dessa forma, não concentrará esforços solicitantes em excesso.

Os valores limites para razão modular e de resistência são encontrados na Tabela 3.17, na qual também é apresentado o Fator de Confinamento da Base (FCB), um fator multiplicador aplicado à resistência da camada de base.

Tabela 3.17 – Limite de razão modular e resistência máxima para materiais de pavimentação (Asphalt Academy, 2009)

Material	Classificação	Limite de Relação Modular – rm	Resistência efetiva máxima admissível – $E_{máx}$ (MPa)	FCB
CAUQ para revestimento e base	AG, AC, AS, AO	5,0	3500	1,0
Tratamentos superficiais	S1, S2, S3, S4, S5, S6	2,0	800	-
Agregado natural ou reciclado estabilizado com material asfáltico	BSM1	3,0	600	1,0
	BSM2	2,0	450	0,7
Agregado britado	G1	2,0	700	1,1
	G2	1,9	500	0,8
	G3	1,8	400	0,7
Agregado natural	G4	1,8	375	0,2
	G5	1,8	320	0,1
	G6	1,8	180	-2,0
	G7	1,7	140	-2,5
Mistura de solo e agregado	G8	1,6	100	-3,0
	G9	1,4	90	-4,0
	G10	1,2	70	-5,0
Agregado britado estabilizado com cimento	C1, C2	9	1500	0,8
Agregado natural estabilizado com cimento	C3	4	550	0,6
	C4	3	400	0,4

O valor de resistência efetiva de longo prazo da base deve ser multiplicado pelo FCB. O objetivo de tal etapa é evitar que bases inapropriadas sejam utilizadas, seja em relação à escolha do material ou em relação à espessura insuficiente. Isto porque a base é tida como o principal elemento resistente do pavimento e a sua ruptura leva efetivamente à falha de toda a estrutura.

Finalmente, é calculado o PN da estrutura do pavimento, sendo este a soma dos produtos de resistência e espessura de cada camada. A divisão por dez mil é feita apenas por razões de ordem de grandeza.

$$PN = \sum_{i=1}^5 \frac{ELTS_i \times D_i}{10.000} \quad (22)$$

Onde:

PN = *Pavement Number*;

$ELTS_i$ = resistência efetiva a longo prazo da camada i [MPa];

D_i = espessura da camada i [mm].

O número de solicitações admissíveis é definido pelo *Pavement Number* da estrutura e da categoria da rodovia (já apresentada na Tabela 3.9). A equação a seguir permite determinar o tráfego admissível:

$$N = [N_{\min} + m \times (PN - PN_{\min})] \times 10^6 \quad (23)$$

Onde:

N = número de repetições admissíveis;

$N_{\min}$ = número mínimo de repetições admissíveis para determinada faixa de PN [$\times 10^6$];

m = coeficiente angular;

$PN_{\min}$ = limite inferior para a faixa de PN.

Os parâmetros da equação estão dispostos nas tabelas que seguem.

Tabela 3.18 – Valores para determinação do número N, rodovias categoria A

PN	$N_{min} [x 10^6]$	PN_{min}	m
PN < 15	N < 3×10^6 , não admissível para rodovias categoria A		
15 < PN ≤ 23	3	15	0,00
23 < PN ≤ 25	3	23	3,50
25 < PN ≤ 32	10	25	0,00
32 < PN ≤ 35	10	32	6,67
PN > 35	30	35	0,00

Tabela 3.19 – Valores para determinação do número N, rodovias categoria B

PN	$N_{min} [x 10^6]$	PN_{min}	m
PN < 3	N < 10^6 , usar catálogo (Figura 3.13)		
3 < PN ≤ 8	1	3	0,00
8 < PN ≤ 11	1	8	0,67
11 < PN ≤ 15	3	11	0,00
15 < PN ≤ 25	3	15	0,70
PN > 25	Usar valores para Categoria A		

Alternativamente, a verificação pode ser feita por meio de leitura em ábaco, ilustrado na Figura 3.18:

Figura 3.18 – Ábaco para verificação do tráfego admissível com base no *Pavement Number* (adaptado de Asphalt Academy, 2009)

3.3 Austrália e Nova Zelândia

A Austroads é uma associação das agências de transporte e tráfego da Austrália e da Nova Zelândia e é responsável por uma série de publicações utilizadas como guias para planejamento, projetos e serviços de infraestrutura de transporte. Recentemente, apresentou na publicação *Review of Structural Design Procedures for Foamed Bitumen Pavements: AP-T188/11* (2011b) um método de dimensionamento interino para reabilitação de pavimentos com espuma de asfalto. Embora utilize a metodologia do dimensionamento de pavimentos novos com critérios mecanicistas, foi adicionado ao *Guide to Pavement Technology – Part 5* (AUSTROADS, 2011c), o guia de avaliação e restauração de pavimentos.

Os modos de ruptura considerados para as camadas tratadas com espuma de asfalto são deformação permanente e trincamento por fadiga, com estudos recentes apontando maior ênfase para o segundo (AUSTROADS, 2013a, 2013b, 2014).

Considera-se o comportamento do material semelhante ao das misturas asfálticas, ou seja, não dependente do confinamento, porém sensível à temperatura e à taxa de carregamento, sendo a última relacionada à velocidade do tráfego. Como usualmente as obras Australianas utilizam de 3% a 4% de teor de ligante asfáltico nas misturas e cal como filler e as obras da Nova Zelândia normalmente utilizam teores menores de ligante combinados com cimento como filler, tal raciocínio se justifica com base nos achados de Jenkins (2000), que observou menor dependência da tensão de confinamento quando se utiliza teores de ligante asfáltico em torno de 4% ou se adiciona cimento na mistura.

O Austroads tem se esforçado para desenvolver a reciclagem profunda de pavimentos com espuma de asfalto através de projetos que acompanham a construção e monitoramento de rodovias.

Por exemplo, no projeto TT1663: *Improved Design of Foamed Bituminous Stabilised Pavements* acompanha-se o desempenho de nove rodovias com bases recicladas com espuma de asfalto, sendo que cinco delas já existiam antes do início do projeto e quatro foram construídas com estruturas subdimensionadas para melhor entender os processos de ruptura neste tipo de pavimento (AUSTROADS, 2013a).

Foram executados levantamentos deflectométricos, de irregularidade longitudinal, de deformação permanente e da condição da superfície. Observaram alta variabilidade

no desempenho e nos mecanismos de ruína dos pavimentos. Entre problemas de trincamento, excesso de deformação permanente nas trilhas de roda ou ambos, o primeiro foi o mais recorrente.

O projeto TT1885 *Mix design and field evaluation of foamed bitumen stabilised pavements* teve início em 2012. Com duração estimada de quatro anos, o objetivo principal é obter informações para aprimorar os processos de dimensionamento dos materiais estabilizados com espuma de asfalto e subsidiar a elaboração de um guia definitivo tanto para o dimensionamento estrutural como para ensaio e elaboração das misturas recicladas (AUSTROADS, 2013b, 2014).

Relatam problemas de deformação permanente e desgaste nas primeiras vinte e quatro horas após a liberação do tráfego sem a camada de revestimento. O principal modo de ruptura observado foi o trincamento.

Algumas agências de transporte realizam pesquisas e possuem os próprios métodos de dimensionamento para reciclagem profunda com espuma de asfalto. É o caso do *Department of Transport and Main Roads*, do estado australiano de Queensland, que possui abordagem próxima ao Austroads.

A cidade de Canning, também na Austrália, através de pesquisas coordenadas por Leek (2010) a respeito do desempenho de pavimentos reciclados in-situ com espuma de asfalto também elaborou seu próprio método de dimensionamento.

De mesmo modo, ao adaptar o guia Austroads para as condições locais, a agência neozelandesa de transportes – *Transit New Zealand* – adota um procedimento diferente, haja visto que os pavimentos reciclados na ilha não apresentaram o comportamento semelhante ao das misturas asfálticas convencionais.

3.3.1 Austroads

O dimensionamento interino proposto pela Austroads (2011c) é mecanicista, considera a anisotropia dos materiais granulares e diferentes limites de repetições do eixo-padrão para cada modo de ruptura adotado. Materiais reciclados com espuma de asfalto são considerados de comportamento mais próximo ao das misturas asfálticas e seu dimensionamento é realizado com base no método para pavimentos novos (AUSTROADS, 2012).

O processo para dimensionamento de pavimentos reciclados com espuma de asfalto é descrito na Figura 3.19:

Figura 3.19 – Roteiro de dimensionamento interino da Austroads (adaptado de Austroads, 2011b)

Definida a estrutura inicial do pavimento, prossegue-se para a determinação dos parâmetros elásticos dos materiais. São eles os módulos de resiliência e coeficientes de Poisson vertical e horizontal e um parâmetro adicional de tensão – f – definido como:

$$f = \frac{E_{SLV}}{(1 + \nu)} \quad (24)$$

Onde:

f = fator de tensão;

E_{SLV} = módulo de resiliência do subleito na direção vertical [MPa];

ν = coeficiente de Poisson.

Inicia-se o processo pelo subleito. Assim como todos os materiais granulares, é considerado anisotrópico: assume-se o módulo de resiliência vertical como o dobro do horizontal e os coeficientes de Poisson iguais. O módulo de resiliência pode ser estimado pela relação com o CBR.

$$E_{SL} = 10 \times CBR \quad (25)$$

Onde:

E_{SL} = módulo de resiliência do subleito [MPa];

CBR = Índice de Suporte Califórnia [%].

Para a camada de sub-base granular, o módulo é calculado pela equação:

$$E_{SBV} = 2 \times E_{SBH} = E_{SLV} \times 2^{\frac{h_{SB}}{125}} \quad (26)$$

Onde:

E_{SBV} = módulo de resiliência da sub-base na direção vertical [MPa];

E_{SBH} = módulo de resiliência da sub-base na direção horizontal [MPa];

h_{SB} = espessura da sub-base [mm].

Entretanto, este não é o valor de módulo de resiliência utilizado no dimensionamento, pois a sub-base deve ser subdividida em cinco subcamadas, com espessuras iguais, calculando o módulo de resiliência de cada uma delas e respeitando a razão modular.

$$E_{SBV,i} = R \times E_{SBV,i-1} \quad (27)$$

Onde:

$E_{SBV,i}$ = módulo de resiliência da subcamada i [MPa];

$E_{SBV,i-1}$ = módulo de resiliência da camada ou subcamada inferior [MPa];

R = razão modular, definida como:

$$R = \left(\frac{E_{SBV}}{E_{SLV}} \right)^{1/5} \quad (28)$$

Para projeto, o módulo de resiliência dos materiais asfálticos é determinado de acordo com a norma AS 2891.13.1 (Standards Australia, 1995) e deve ser ajustado em função da média anual ponderada da temperatura do pavimento. A resistência das camadas recicladas com espuma de asfalto é considerada dependente da temperatura, e a correção do módulo de resiliência para valores de dimensionamento é dada pela equação seguinte:

$$E_T = E_{25} \times e^{-\beta(T-25)} \quad (29)$$

Onde:

E_T = módulo de resiliência para temperatura T [°C];

E_{25} = módulo de resiliência para 25 °C;

β = constante = 0,025 para misturas com 10 a 15% de RAP. Para teores mais altos, β tende a ser maior.

Assim como no caso das camadas recicladas, o módulo de resiliência do revestimento em concreto asfáltico usinado a quente varia com a temperatura. A Figura 3.20 apresenta as curvas para correção do módulo de resiliência de ambos os materiais.

Figura 3.20 – Variação do módulo com a temperatura (adaptado de Austroads, 2011b, 2012)

Observa-se que o método australiano considera os concretos asfálticos mais sensíveis às variações de temperatura. O mesmo vale para a velocidade de carregamento, conforme se discute a seguir.

Devido à natureza viscoelástica do ligante asfáltico, a resistência também é dependente da taxa de carregamento. Esta é considerada no dimensionamento através da velocidade de operação dos veículos pesados. A variação do módulo de resiliência em virtude da velocidade é dada por:

$$E_T = E_{25} \times 0,46 \times V^{0,16} \quad (30)$$

Onde:

E_T = módulo de resiliência para temperatura T [°C];

E_{25} = módulo de resiliência para 25 °C;

V = velocidade de operação de veículos pesados [km/h].

A comparação do efeito da velocidade no módulo de resiliência dos concretos asfálticos e do material reciclado com espuma de asfalto é ilustrada na Figura 3.21:

Figura 3.21 – Variação do módulo da camada reciclada devido à velocidade de operação (adaptado de Austroads, 2011b, 2012)

Mais uma vez, no método australiano o material tratado com espuma de asfalto é considerado com comportamento similar aos concretos asfálticos usinados a quente, porém menos sensível às variações de temperatura e taxa de carregamento.

Realmente, este é um comportamento esperado, visto que no material reciclado com espuma de asfalto as ligações são mais pontuais, envolvendo majoritariamente as partículas mais finas, do que nas misturas asfálticas convencionais.

Como método interino, o modelo de fadiga adotado para a camada reciclada com espuma de asfalto é igual ao das misturas asfálticas:

$$N = \left[\frac{6918 \times (1,08 + 0,856 \times V_b)}{E_T^{0,36} \times \mu \varepsilon} \right]^5 \quad (31)$$

Onde:

N = número de repetições admissíveis para fadiga da camada estabilizada;

V_b = porcentagem em volume de espuma de asfalto na camada estabilizada [%];

E_T = módulo de resiliência [MPa];

$\mu\epsilon$ = deformação de tração na fibra inferior da camada devido ao carregamento [$\mu\text{m}/\text{m}$];

O número de repetições admissíveis para ruptura do subleito é definida pela equação:

$$N = \left(\frac{9300}{\mu\epsilon} \right)^7 \quad (32)$$

Onde:

N = Número de repetições admissíveis para ruptura por cisalhamento do subleito;

$\mu\epsilon$ = deformação de compressão no topo do subleito [$\mu\text{m}/\text{m}$].

Finalizada a obtenção dos dados de entrada, procede-se à modelagem mecanicista do pavimento, e para tal recomenda-se o software CIRCLY.

O carregamento aplicado é de um eixo simples e roda dupla, cada uma exercendo carga de 20 kN, numa área de contato circular e pressão de 750 kPa. Os pontos de interesse são a fibra inferior dos materiais asfálticos (deformação de tração) e o topo do subleito (deformação de compressão), tanto abaixo como entre o ponto de aplicação das cargas de roda, conforme ilustra a Figura 3.22.

Figura 3.22 – Modelagem do pavimento para análise mecanicista

De posse dos esforços solicitantes máximos, calcula-se o número de repetições admissível para cada material (SAR – *Standard Axle Repetition*). Esse valor é

referente ao dano admissível causado pelo carregamento padrão para cada material. Como cada material reage de forma diferente em relação ao carregamento dos diversos tipos de eixo que compõem a frota, diferentes do carregamento padrão, este valor é convertido para o número de repetições de eixo padrão de projeto (ESA – *Equivalent Standard Axle*) para comparação dos resultados.

O revestimento mínimo a ser adotado é dado pela Tabela 3.20.

Tabela 3.20 – Espessuras mínimas de revestimento (Austroads, 2011b)

Número N	Revestimento mínimo
$N < 10^7$	Tratamento superficial
$N \geq 10^7$	30 mm de CBUQ

3.3.2 TMR

O método de dimensionamento do departamento de transportes do estado de Queensland (*Department of Transport and Main Roads – TMR*), assim como o método interino do Austroads, considera a fadiga da camada estabilizada o mecanismo de ruptura de camadas betuminosas com nível de confiabilidade de 95%.

Usualmente, se adiciona 3,0% a 3,5% de espuma de asfalto e 1,0% a 2,0% de cal hidratada, ambos em massa. Não é usual a utilização de cimento como filler.

O módulo de resiliência da camada é limitado a 2500 MPa e é corrigido pela média ponderada anual das temperaturas do pavimento na região de estudo e definido como:

$$E_{dim} = F_t \times E_{TMR} \leq 2500 \text{ MPa} \quad (33)$$

Onde:

E_{dim} = módulo de resiliência do dimensionamento [MPa];

F_t = fator de correção devido à temperatura, conforme Tabela 3.21;

E_{TMR} = módulo de resiliência material saturado obtido a 25 °C [MPa].

Tabela 3.21 – Fatores de correção devido à temperatura (Queensland Department of Transport and Main Roads, 2012)

Média ponderada anual das temperaturas do pavimento (°C)	Fator de Correção F_t
≤ 25	1,0
30	0,9
35	0,8
40	0,7

Além de adotar o módulo de resiliência de amostras saturadas para verificação mecanicista, o TMR também recomenda valores mínimos em razão do tráfego diário previsto para no ano de abertura, conforme Tabela 3.22:

Tabela 3.22 – Requisitos mínimos de módulo de resiliência (Queensland Department of Transport and Main Roads, 2012)

Número de repetições diárias do eixo-padrão no ano de abertura	E_{TMR} mínimo (MPa)
< 100	1.500
100 – 1.000	1.800
> 1.000	2.000

Há a alternativa de se incluir uma fase pós-trincamento, na qual o material passaria a se comportar de forma semelhante a uma base granular. Entretanto, esta não é uma prática comum, haja visto que não foram observadas trincas em projetos de reciclagem com espuma de asfalto e cal como filler no estado de Queensland.

De toda forma, admite-se grau de anisotropia igual a 2, módulo de resiliência de 500 MPa e coeficiente de Poisson de 0,35.

3.3.3 Cidade de Canning

As primeiras restaurações de pavimento com espuma de asfalto nas cidades de Canning e Gosnells, no oeste da Austrália, datam do final da década de 90. Quase uma década depois, (Leek, 2010) analisou uma série de corpos de prova de vias restauradas com esta solução, com objetivo de obter nova equação de fadiga, pois suspeitava-se que a equação de fadiga de revestimentos betuminosos do guia Austroads, utilizada até então, não era compatível com as camadas estabilizadas.

Todavia, em razão da variabilidade dos resultados, não foi possível relacionar a vida útil com a porcentagem em volume de espuma de asfalto e o módulo de resiliência da mistura em condição saturada. O resultado, para um nível de confiabilidade de 95%, foi a equação a seguir:

$$N = \left(\frac{1558}{\mu\varepsilon} \right)^6 \quad (34)$$

Onde:

N = Número de repetições admissíveis para fadiga da camada estabilizada;

$\mu\varepsilon$ = deformação de tração na fibra inferior da camada devido ao carregamento [$\mu\text{m/m}$].

O recobrimento em concreto asfáltico a ser executado após a reciclagem deve ter no mínimo 30 mm de espessura.

3.3.4 Transit New Zealand

Na Nova Zelândia, a maioria dos pavimentos existentes são constituídos por bases granulares com revestimentos delgados. O dimensionamento de camadas estabilizadas com espuma de asfalto tem abordagem semelhante à de materiais cimentados, ou seja, considera-se duas fases distintas ao longo da vida útil: uma de assentamento e outra de estabilidade (Transit New Zealand, 2007).

Na primeira fase, de assentamento, a camada atinge um módulo de resiliência elevado conforme ocorre a cura do material e atinge-se a umidade de equilíbrio. A segunda fase, de estabilidade, é a de decréscimo de rigidez. O manual da agência de transportes da Nova Zelândia inclusive faz menção ao termo “estado de equivalência granular”, já discutido anteriormente neste trabalho.

Em virtude da dificuldade de se avaliar a performance deste tipo de camada na primeira fase, recomenda-se o dimensionamento com valores referentes a segunda condição apenas.

As características básicas a se considerar no dimensionamento são:

- $\text{CBR}_{\text{subleito}} \geq 3\%$
- Módulo de resiliência do material reciclado com espuma = 800 MPa;
- Coeficiente de Poisson = 0,3;

- Comportamento anisotrópico ($E_{\text{vertical}} = 2E_{\text{horizontal}}$).

O modelo de ruptura adotado para o pavimento não leva em consideração a falha na camada tratada, apenas do subleito, através da equação do Manual de Dimensionamento de Pavimentos Novos do Austroads (2012):

$$N = \left(\frac{9300}{\mu\varepsilon} \right)^7 \quad (35)$$

Onde:

N = Número de repetições admissíveis antes de ocorrer nível inaceitável de deformação permanente;

$\mu\varepsilon$ = deformação vertical de compressão no topo do subleito [$\mu\text{m}/\text{m}$].

Figura 3.23 – Localização dos pontos críticos para análise mecanicista

3.4 Estados Unidos

O interesse americano na reciclagem se intensificou a partir de 1975, em meio a um cenário de dificuldades econômicas e energéticas. Por ser uma técnica promissora e que aparentemente atendia a parte das necessidades existentes, diversas agências e instituições implantaram programas de pesquisa voltados para a reciclagem de

pavimentos (Epps, 1990). Entre elas, pode-se citar a *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP).

Epps (1990) elaborou para a NCHRP uma síntese da reciclagem a frio com materiais asfálticos no país. O autor aponta que diversos estados americanos já tinham grande experiência na reciclagem profunda, entre eles Califórnia, Indiana, Kansas, Michigan, Nevada e Novo México.

A respeito do dimensionamento estrutural, não se desenvolveu um método específico para a reciclagem de pavimentos com espuma de asfalto. Os esforços têm sido voltados para a determinação de coeficientes estruturais para a camada reciclada, de forma que se aplique o método da AASHTO.

A exceção ocorre em alguns estados com metodologias próprias, como ocorre na Califórnia (CALTRANS, 2008, 2012) e em Minnesota (Labuz, Tang, & Cao, 2012). Em particular na Califórnia, a reciclagem profunda com espuma de asfalto é adotada como estratégia de reabilitação desde 2001. Parceria entre o departamento de transporte e a universidade da Califórnia resultou no desenvolvimento de guia para este tipo de intervenção de forma a complementar o manual de dimensionamento (Jones, Wu, & Louw, 2014).

Inicialmente objetivou-se estabelecer o coeficiente de equivalência granular do material para que o dimensionamento estrutural dos pavimentos pudesse ser feito com método semi-empírico californiano para pavimentos novos. Atualmente, os estudos buscam, com o uso de simulador de tráfego móvel, desenvolver um procedimento mecanicista (Jones, Wu, & Louw, 2014).

3.4.1 AASHTO 1993

O método da AASHTO de 1993, descrito no *AASHTO Guide for Design of Pavements Structures* (1993) se baseia na restauração da capacidade de suporte do pavimento, perdida com o passar do tempo, de modo que, após a intervenção, o mesmo resista aos esforços impostos pelo tráfego estimado para o período de projeto. Esta capacidade de suporte é mensurada por meio do Número Estrutural (SN), que é a soma ponderada da capacidade de resistência de cada camada, sendo função do material, da espessura e da qualidade de drenagem de cada uma delas.

O SN de projeto depende da capacidade de suporte do subleito, do tráfego previsto e da variação de serventia admissível durante o período de projeto, regidos pela seguinte equação:

$$\log_{10} N = z_R \times s_0 + 9,36 \times \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right)}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \times \log_{10} E_{SL} - 8,07 \quad (36)$$

Onde:

N = número de repetições do eixo-padrão de 8,2 t;

z_R = coeficiente de distribuição normal;

s_0 = desvio padrão combinado das variáveis do projeto;

SN = número estrutural;

ΔPSI = variação de serventia inicial menos final;

E_{SL} = módulo de resiliência do subleito [psi].

O nível de confiabilidade de projeto depende do termo $z_R \times s_0$. Para pavimentos asfálticos, adota-se s_0 entre 0,30 e 0,40. Os valores de z_R estão indicados na Tabela 3.23.

Tabela 3.23 – Coeficientes de distribuição normal correspondentes a diferentes níveis de confiabilidade

Confiabilidade (%)	z_R	Confiabilidade (%)	z_R
50	0	93	-1,476
60	-0,253	94	-1,555
70	-0,524	95	-1,645
75	-0,674	96	-1,751
80	-0,841	97	-1,881
85	-1,037	98	-2,054
90	-1,282	99	-2,327
91	-1,340	99,9	-3,090
92	-1,405	99,99	-3,750

Para projetos de restauração com aplicação de reforço, uma vez determinada a capacidade estrutural do pavimento existente, o incremento estrutural necessário é a diferença entre o SN de projeto e o SN do pavimento existente:

$$SN_{ref} = SN - SN_{ef} \quad (37)$$

Onde:

SN_{ref} = incremento estrutural necessário;

SN = número estrutural para o período de projeto;

SN_{ef} = número estrutural do pavimento existente.

No caso de projetos de reciclagem profunda, a abordagem descrita no método da AASHTO é aplicada parcialmente, pois o processo de fresagem altera a estrutura e, conseqüentemente, o número estrutural do pavimento existente. Uma adaptação a ser feita é a estimativa da infraestrutura remanescente após a fresagem e determinação do número estrutural, numa abordagem semelhante ao dimensionamento de pavimentos novos:

A equação a seguir fornece o número estrutural para o reforço:

$$SN_{ref} = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 \quad (38)$$

Onde:

a_1, a_2 = coeficiente estrutural do revestimento e da base reciclada, respectivamente [pol^{-1}];

D_1, D_2 = espessura das camadas de revestimento e da base reciclada, respectivamente [pol];

m_2 = coeficiente de drenagem para base reciclada.

Para a camada de revestimento asfáltico em concreto asfáltico usinado a quente, o coeficiente estrutural a_1 vale 0,44 e a espessura mínima de revestimento (D_1) a ser construída em função do tráfego é descrita na Tabela 3.24:

Tabela 3.24 – Espessura mínima de revestimento (AASHTO, 1993)

Número de repetições de eixo padrão	D ₁ (pol)
$N \leq 5 \times 10^4$	1,0 ou tratamento superficial
$5 \times 10^4 < N \leq 1,5 \times 10^5$	2,0
$1,5 \times 10^5 < N \leq 5 \times 10^5$	2,5
$5 \times 10^5 < N \leq 2 \times 10^6$	3,0
$2 \times 10^6 < N \leq 7 \times 10^6$	3,5
$N > 7 \times 10^6$	4,0

Combinando as equações (37) e (38), e admitindo-se a_1 igual $0,44 \text{ pol}^{-1}$ é possível se determinar a espessura necessária para a camada reciclada com espuma de asfalto:

$$D_2 = \frac{SN_{ref} - 0,44 \times D_1}{a_2 \times m_2} \quad (39)$$

Para as camadas oriundas da reciclagem profunda a frio com espuma de asfalto, os coeficientes estruturais encontrados na bibliografia variam de $0,18 \text{ pol}^{-1}$ a $0,42 \text{ pol}^{-1}$, com mais valores na faixa entre $0,20 \text{ pol}^{-1}$ e $0,30 \text{ pol}^{-1}$. A Tabela 3.25 apresenta alguns valores encontrados na bibliografia.

Tabela 3.25 – Coeficientes estruturais da AASHTO para camada reciclada a frio

Referência	Agente estabilizador	Coeficiente estrutural a_2 (pol^{-1})
Bemanian, Polish, & Maurer (2006)	-	0,18
Romanoschi, Hossain, Gisi, & Heitzman (2004)	3,0% de espuma de asfalto + 1,0% de cimento	0,18
Van Wijk (1984)	Espuma de asfalto	0,20 – 0,42
Diefenderfer & Apeagyei (2011a)	2,7% de espuma de asfalto + 1,0% de cimento	0,21 – 0,33
	Espuma de asfalto	0,22
	Espuma de asfalto	0,22
Marquis, Peabody, Mallick, & Soucie (2003)	2,5% de espuma de asfalto + 1,5% de cimento	0,23
	3,0% de espuma de asfalto + 1,5% de cimento	0,35
	2,0% de espuma de asfalto + 1,5% de cimento	0,23
Thompson, Garcia, & Carpenter (2009)	2,5% de espuma de asfalto + 1,0% de cinza volante	0,25
Van Wyk, Yoder, & Wood (1983)	7,15% de espuma de asfalto	0,26 – 0,37

Durante 1981, o departamento de transportes do estado norte-americano de Indiana construiu um trecho experimental de 15 km de pavimento reciclado com espuma de asfalto e com emulsão. Tentaram determinar um único coeficiente estrutural para a camada reciclada com espuma, porém o objetivo não foi alcançado. Justifica-se o insucesso por desconhecer exatamente o mecanismo de degradação dos materiais (Van Wyk, Yoder, & Wood, 1983).

Os resultados apresentaram variação em razão da espessura da camada, o que levou os autores a elaborar um gráfico com a faixa de valores de coeficientes estruturais em função da espessura da camada (Figura 3.24).

Figura 3.24 – Faixa de valores de coeficiente estrutural em função da espessura da base reciclada (adaptado de Van Wyk, Yoder, & Wood, 1983)

O coeficiente a_2 da camada reciclada pode, ainda, ser estimado por meio de seu módulo de resiliência E_2 (em psi), caso se admita a mesma com comportamento granular:

$$a_2 = 0,249 \times \log E_2 - 0,977 \quad (40)$$

Todavia, esta estimativa deve ser utilizada com cuidado, visto que não há consenso na forma de comportamento dos materiais estabilizados com espuma de asfalto, se são mais similares aos materiais granulares com alta coesão ou mais semelhantes às misturas asfálticas.

3.4.2 Caltrans

O Caltrans é o departamento de transportes da Califórnia. O departamento de pavimentação do órgão apresenta conteúdo específico para projeto, construção e controle de obras de reciclagem profunda com espuma de asfalto. Há também capítulos para estabilização com cimento ou emulsão asfáltica (CALTRANS, 2012).

Adota-se para o dimensionamento da reciclagem profunda o mesmo procedimento utilizado para pavimentos novos. É um método semi-empírico, com cálculo da espessura de material granular necessária para proteção do subleito e demais

camadas em função do tráfego e da capacidade de suporte e, posteriormente, utilização de coeficientes de equivalência estrutural para transformar a espessura total em termos de outros materiais.

A espessura total é calculada através da equação (41).

$$GE = 0,975 \times TI \times (100 - R) + FS \quad (41)$$

Onde:

GE = espessura total em termos de material granular [mm];

TI = índice de tráfego californiano;

R = R-Value;

FS = fator de segurança = 0,1 pés = 30,48 mm.

Para determinação do R-Value, parâmetro de resistência determinado através do estabilômetro de Hveem, amostras devem ser retiradas do pavimento para ensaio em laboratório. A correlação entre R-Value e módulo de resiliência é possível através da equação (42), do *Asphalt Institute* (1982):

$$R = \frac{M_R - 1155}{555} \quad (42)$$

Onde:

R = R-Value;

M_R = módulo de resiliência [psi].

Para obtenção do Índice de Tráfego (TI), a seguinte equação é utilizada:

$$TI = 9 \times \left[\frac{N \times LDF}{10^6} \right]^{0,119} \quad (43)$$

Onde:

TI = índice de tráfego californiano;

N = número equivalente de solicitações do eixo padrão (eixo simples);

LDF = fator de distribuição do tráfego nas faixas de rolamento.

O fator de distribuição do tráfego nas faixas de rolamento varia de 0,2 a 1,0 e depende da quantidade de faixas por sentido, conforme Tabela 3.26. No caso, as faixas são numeradas sequencialmente da esquerda para a direita.

Tabela 3.26 – Fator de distribuição do tráfego nas faixas de rolamento (CALTRANS, 2012)

Número de faixas por sentido de tráfego	1ª faixa	2ª faixa	3ª faixa	4ª faixa
1	1,0	-	-	-
2	1,0	1,0	-	-
3	0,2	0,8	0,8	-
4	0,2	0,2	0,8	0,8

Uma simplificação para cálculo do TI é apresentada no DNER-PRO 010 (1979):

$$\log TI = 0,127 \log N + 0,166 \quad (44)$$

TI = índice de tráfego californiano;

N = número equivalente de solicitações do eixo padrão (eixo simples).

A espessura de cada camada é obtida com a divisão da espessura em termos de material granular pelo coeficiente estrutural do material:

$$h_i = \frac{GE_i}{G_{fi}} \quad (45)$$

Onde:

h_i = espessura da camada i [mm];

GE_i = espessura em termos de material granular da camada i [mm];

G_{fi} = fator de equivalência estrutural da camada i .

Na Tabela 3.27 estão representados os valores dos coeficientes estruturais para os principais materiais de pavimentação. O concreto asfáltico usinado a quente tem coeficiente variável, função do tráfego e, dependendo, da espessura também. Para os demais materiais, os valores são fixos.

Tabela 3.27 – Fatores de equivalência estrutural (Caltrans, 2008, 2012)

Material	Fator de equivalência estrutural – G_f
Concreto asfáltico usinado a quente ($h \leq 150$ mm)	$\frac{5,67}{TI^{1/2}}$
Concreto asfáltico usinado a quente ($h > 150$ mm)	$1,04 \times \frac{h^{1/3}}{TI^{1/2}}$
Base reciclada com espuma de asfalto	1,40
Base tratada com cimento	1,20 ou 1,70
Base granular	1,10
Sub-base granular	1,00

O método californiano ressalta um aspecto ignorado nos demais: devido à alteração de granulometria e diminuição da densidade dos materiais fresados, considera-se uma expansão entre 5% e 10% em relação ao volume inicial. O material em excesso pode ser destinado para aterros, alargamentos, acostamentos ou incremento da espessura da camada reciclada.

O roteiro para o dimensionamento pode ser resumido em cinco passos:

- 1 Verificar a espessura mínima a ser fresada, que deve ser a espessura máxima do revestimento no trecho acrescida de 30,48 mm;
- 2 Definida a espessura de corte, estimar o excesso de material fresado devido à expansão após fresagem e definir destino;
- 3 Calcular a espessura granular total necessária;
- 4 Calcular a espessura granular necessária para cada camada;
- 5 Transformar as espessuras para cada material através dos coeficientes estruturais.

4 ESTUDOS DE CASO – RODOVIA SP 070

A fim de avaliar de maneira mais prática os métodos apresentados e se obter uma análise de sensibilidade são propostos dois estudos de caso. O primeiro se trata do dimensionamento estrutural da reciclagem profunda para um pavimento semirrígido cuja base se encontra deteriorada. O segundo estudo é a avaliação, por meio de dados da bacia deflectométrica, da variação do comportamento estrutural de camada reciclada ao longo do tempo numa obra de reciclagem com espuma de asfalto realizada na Rodovia Ayrton Senna – SP 070.

4.1 Estudo de Caso 1 – Dimensionamento por diferentes metodologias

O exemplo utilizado provém de informações obtidas da Rodovia SP 070. O pavimento a ser restaurado é do tipo semirrígido com a camada cimentada extremamente deteriorada, cujo trincamento da mesma já refletiu as trincas para o revestimento. A estrutura do pavimento existente é a seguinte:

Concreto Asfáltico Usinado a Quente – CAUQ	11,6 cm
Brita Graduada Tratada com Cimento – BGTC	20,0 cm
Brita Graduada Simples – BGS	26,7 cm
Subleito	

Figura 4.1 – Seção transversal antes da reciclagem

Como citado anteriormente, o estado degradado da camada cimentada a torna apta para reciclagem. Caso a camada estivesse íntegra, a preferência seria o estudo de outras soluções.

Através de ensaios deflectométricos, foi estimada a capacidade de suporte do pavimento existente. Os dados do levantamento deflectométrico, realizado em

março de 2012, podem ser visualizados no Anexo A. Os valores de deflexão foram normalizados em relação à carga (4.100 kgf) e temperatura (25 °C), em conformidade com os procedimentos apresentados no Apêndice B. A exceção é o procedimento da AASHTO (1993), que teve a deflexão máxima ajustada para 20 °C.

Figura 4.2 – Bacia deflectométrica do pavimento antes da reciclagem

Utilizando os diferentes procedimentos apresentados no Apêndice A, foram encontrados os valores de módulo de resiliência do subleito indicados na Tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1 – Valores de módulo de resiliência do subleito retroanalísado

Método	Módulo de resiliência retroanalísado do subleito (MPa)
Sistema de uma camada (Boussinesq)	57
Caltrans (2012)	90
AASHTO (1993), usando d_{120}	95
AASHTO (1993), usando d_{90}	84
AASHTO (1993), usando d_{60}	77
Nourelidin (1993)	72
Garg & Thompson (1999)	59
Choubane & McNamara (2000)	107

Observa-se que o valor retroanalísado utilizando a deflexão máxima da caixa de pavimentação aberta foi o menor. Por definição, esta metodologia considera a sub-base existente e o subleito como uma só camada e era de se esperar um valor de resistência maior, exatamente por considerar a camada de brita graduada simples

no processo. O valor pode ser justificado pela desagregação e falta de confinamento da BGS, fruto da fresagem executada nas camadas sobrejacentes a ela.

O resultado médio para o módulo de resiliência do subleito foi 80 MPa, sendo este o valor utilizado para os dimensionamentos neste estudo.

Na rodovia em questão, o número de repetições de eixo-padrão N_{USACE} estimado para a faixa mais solicitada foi de $6,3 \times 10^7$, sendo este valor utilizado no dimensionamento pelo método californiano. No caso de N_{AASHTO} , são $2,4 \times 10^7$ solicitações durante o período de projeto (5 anos). Para estimar o número de repetições de eixo-padrão, é importante ressaltar que os diferentes procedimentos apresentados anteriormente possuem suas particularidades quanto aos estudos de tráfego, em especial para o cálculo de fatores de carga, e esta avaliação não é o objetivo deste trabalho.

Para os métodos que permitem a variação da confiabilidade para a estrutura projetada, adotou-se o valor de 95%, em virtude da magnitude do tráfego e da importância da Rodovia Ayrton Senna. Nesta etapa do trabalho foram avaliados os métodos da AASHTO (1993), Caltrans, TG2 (2009), TRL386 e TRL611.

AASHTO (1993)

Considerando-se o tráfego como N_{AASHTO} igual a $2,4 \times 10^7$ solicitações, confiabilidade de 95%, variação de serventia de 1,7 e módulo de resiliência do subleito igual a 80 MPa, obtém-se, por meio da equação (36) número estrutural SN necessário igual a 4,86.

Propõem-se a fresagem de toda a camada de BGTC, em função de seus problemas estruturais. Portanto, a infraestrutura remanescente acima do subleito será a camada de brita graduada simples com 26,7 cm de espessura.

Estimado o coeficiente desta camada em 0,05, de acordo com o exposto no Capítulo 2.6.4.1 e aplicando-o juntamente com a espessura da camada na equação (6), segue que o número estrutural efetivo SN_{ef} é igual a 0,53.

Portanto, o número estrutural do reforço SN_{ref} é igual a 4,33, obtido através da equação (37).

A espessura mínima do revestimento, de acordo com a Tabela 3.24, é de 10,0 cm (4 pol). Adota-se $a_1 = 0,44$, $a_2 = 0,18$ e $m_2 = 1,0$. Estes valores, aplicados à equação (39) indicam $D_2 = 36,3$ cm.

$$D_2 = \frac{SN_{ref} - 0,44 \times D_1}{a_2 \times m_2} = \frac{4,33 - 0,44 \times 4}{0,18 \times 1,0} = 14,3 \text{ pol} = 36,3 \text{ cm}$$

Portanto, será adotada a seguinte estrutura:

CAUQ	10,0 cm
Camada reciclada	36,5 cm
BGS	26,7 cm
Subleito	

Figura 4.3 – Estrutura projetada pelo método da AASHTO (1993)

CALTRANS

Foi estudada a alternativa de se reciclar em profundidade suficiente para remoção total da camada de BGTC, em função de seus problemas estruturais. Também se avaliou a opção de se reciclar na espessura mínima de corte.

Como o tráfego considerado, $N_{USACE} = 6,3 \times 10^7$ repetições, já se refere à faixa de tráfego mais solicitada, a equação (43), com $LDF = 1$, resulta em $TI = 11,20$. O valor de R , obtido através da equação (42), é de 21,4. Portanto, para proteção do subleito, a espessura total de material granular, obtida com a equação (41), deve ser de 920 mm:

$$GE = 0,975 \times TI \times (100 - R) + FS$$

$$GE = 0,975 \times 11,20 \times (100 - 21,4) + 30,48 = 920 \text{ mm}$$

A primeira hipótese é de reciclar totalmente a base e o revestimento, conforme descreve o roteiro tabelado abaixo:

Roteiro de cálculo: reciclagem revestimento + base	
Espessura mínima de corte	316,0 mm
Fator de Segurança	30,5 mm
Espessura mínima de corte de projeto	346,5 mm
Expansão	7%
Espessura de base para utilização de todo o volume fresado	370,7 mm
Espessura de base adotada:	370,0 mm
Coeficiente de equivalência granular da base reciclada	1,4
GE base reciclada	518,0 mm
 Espessura sub-base remanescente	 267,0 mm
Coeficiente de equivalência granular da sub-base remanescente	1,0
GE sub-base remanescente	267,0 mm
 GE revestimento	 134,7 mm
Coeficiente de equivalência granular do revestimento	1,7
Espessura do revestimento	79,5 mm
Espessura adotada	80,0 mm

A seguir foi elaborado o dimensionamento para a segunda alternativa, executando a reciclagem na espessura mínima de corte, dada em função da espessura máxima do revestimento no segmento acrescida do fator de segurança.

Roteiro de cálculo: reciclagem revestimento

Espessura mínima de corte	116,0	mm
Fator de Segurança	30,5	mm
Espessura mínima de corte de projeto	146,5	mm
Espessura mínima de corte adotada	150,0	mm
Expansão	7%	
Espessura de base para utilização de todo o volume fresado	160,5	mm
Espessura de base adotada:	160,0	mm
Coeficiente de equivalência granular da base reciclada	1,4	
GE reciclada	224,0	mm

Espessura sub-base remanescente	433,0	mm
Coeficiente de equivalência granular da sub-base remanescente	1,0	
GE sub-base remanescente	433,0	mm

GE revestimento	262,7	mm
Coeficiente de equivalência granular do revestimento	1,7	
Espessura do revestimento	157,0	mm
Espessura adotada	160,0	mm

As estruturas dimensionadas para as duas situações são ilustradas na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Estruturas projetadas pelo método do CALTRANS: reciclagem (a) de toda a base e revestimento e (b) na espessura mínima de corte

TG2 (2009)

Para o dimensionamento, em virtude do elevado tráfego, a mistura reciclada deve atender os requisitos da classe BSM1. A classificação do subleito está indicada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Classificação adotada para o subleito

Classe	G9
Módulo de resiliência inicial (MPa)	80
Clima	Moderado
Fator de ajuste	0,9
Espessura total do pavimento (mm)	767
Fator de ajuste	7,8
ELTS (MPa)	79,8

O tráfego previsto exige que o pavimento tenha PN igual ou superior a 34,1. Definido este objetivo, procedeu-se ao dimensionamento:

Camada	Espessura (mm)	Classe	Relação modular	E_{max} (MPa)	ELTS (MPa)	FCB	PNi
Revestimento	50	AC	5	3.500	2.160,0	-	10,8
Reciclada	350	BSM1	3	600	432,0	1,0	15,1
BGS	267	G3	1,8	150	144,0	-	3,8
Subleito	100	G9	1,4	80	80,0	-	0,8
Subleito	-	G9	-		79,8	-	
						PN	30,6

Duas observações devem ser feitas. A primeira é que, para compor um sistema de cinco camadas, os 100 cm superiores do subleito foram definidos como uma nova camada. A segunda é que mesmo utilizando os valores máximos para revestimento e camada reciclada a estrutura não atinge a capacidade estrutural necessária, ficando dimensionada para $N = 1 \times 10^7$ solicitações.

Como opção, resolveu-se manter parte da camada de BGTC. Em vista de seu estado deteriorado, adotou-se um valor baixo para a capacidade estrutural da mesma, com ELTS de cerca de 200 MPa. O roteiro de cálculo e a estrutura obtida são indicados a seguir.

Camada	Espessura (mm)	Classe	Relação modular	E _{max} (MPa)	ELTS (MPa)	FCB	PNi
Revestimento	50	AC	5	3.500	3.000,0	-	15,0
Reciclada	227	BSM1	3	600	600,0	1,0	13,6
BGTC	100	C2	1,8	200	200,0	-	2,0
BGS	267	G3	1,8	150	128,9	-	3,4
Subleito	-	G9	-		71,6	-	
						PN	34,1

A Figura 4.5 ilustra o pavimento dimensionado.

CAUQ	5,0	cm
Camada Reciclada	23,0	cm
BGTC	10,0	cm
BGS	26,7	cm
Subleito		

Figura 4.5 – Estrutura projetada pelo método TG2 (2009)

TRL386

O TRL386 possui um procedimento bastante simplificado e de fácil aplicação, porém possui o inconveniente de limitar o módulo de resiliência mínimo admissível do material num valor considerado elevado, acima de 2.500 MPa.

A rodovia se enquadra, de acordo com a Tabela 3.1, na classe 1 de tráfego. Dado que o módulo do subleito é de 80 MPa, equivalente a 8% de CBR, para a reciclagem profunda deve remanescer do pavimento existente uma sub-base granular com no mínimo de 200 mm de espessura (Tabela 3.3). Avaliando a estrutura remanescente após a fresagem das camadas de base e revestimento, conclui-se que este critério é atendido.

Através dos ábacos da Figura 3.4, para $N = 2,4 \times 10^7$ se obtém a estrutura a seguir:

CAUQ	10,0	cm
Camada Reciclada	26,0	cm
BGS	26,7	cm
Subleito		

Figura 4.6 – Estrutura projetada pelo método do TRL386

TRL611

Para avaliar o método TRL611, em virtude de sua facilidade de aplicação, foram estudadas soluções de reciclagem profunda com as três categorias de materiais disponíveis.

A rodovia, por ser de classe 1 (Tabela 3.4), deve ter revestimento mínimo de 100 mm (Tabela 3.7). Admitindo-se o conjunto formado pelo subleito, com módulo de resiliência de 80 MPa, e a sub-base granular de espessura considerável, classificou-se a infraestrutura remanescente como categoria 2.

O ábaco da Figura 3.6 fornece as espessuras da camada reciclada em função do tráfego e da classe de resistência do material reciclado processado com espuma de asfalto.

Figura 4.7 – Estruturas projetadas pelo método do TRL611 para base reciclada de categoria: (a) B1, (b) B2 e (c) B3.

Comentários

Observam-se na Figura 4.8 as soluções obtidas. É interessante notar que nenhum método permitiu a manutenção do greide existente da rodovia para a proposta de reciclagem do revestimento e base. Este resultado era esperado pois o tráfego considerado no período é elevado.

Figura 4.8 – Resumo de soluções encontradas

A estrutura que geraria o menor alteamento foi a projetada pelo TRL611 com base classe B3, com um acréscimo de 2,4 cm. Porém, neste caso, o módulo de resiliência mínimo admitido para a camada reciclada é de 3.100 MPa, valor próximo ao das misturas asfálticas convencionais. Observa-se ainda que é pequena a variação das espessuras em relação à mudança de categoria do material reciclado, não sendo o método tão sensível a esse parâmetro.

Assim como o TRL611, o TRL386 permitiria a reciclagem da base e revestimento por completo. Os métodos americanos da AASHTO e Caltrans dependeriam da adição de material para compensar o déficit nas espessuras, pois o volume de material processado seria inferior à espessura da camada reciclada.

Em apenas dois procedimentos, TG2 (2009) e Caltrans com espessura mínima de corte, houve a manutenção de parte da camada cimentada degradada e esta é uma situação de risco. Quando ocorre o trincamento em blocos, a resistência cai drasticamente, pois a camada deixa de ser contínua, como se as cargas solicitantes oriundas do tráfego fossem aplicadas em placas isoladas.

Avaliando o método do Caltrans, a reciclagem com corte na espessura mínima não se mostrou vantajosa. Além da manutenção da base antiga degradada, também houve o maior consumo de concreto asfáltico usinado a quente e maior elevação do perfil longitudinal. A opção de reciclagem profunda de toda a base e revestimento gerou menor alteamento, mas foi o procedimento com a base reciclada mais espessa. Caso se opte por limitar a espessura da base e descartar o material fresado excedente, se realizaria um incremento na espessura do revestimento.

Dentre todos os métodos, o que resultou na estrutura com menor consumo de concreto asfáltico usinado a quente foi o TG2 (2009), que limita a espessura do revestimento em 5,0 cm.

Na comparação dos métodos, além da variação de espessuras encontradas, ressalta-se que os materiais que compõem a camada reciclada são diferentes também, em virtude das especificações impostas por cada método.

4.2 Estudo de Caso 2 – Variação do comportamento da camada reciclada com o tempo

Com o objetivo de melhor compreender o comportamento dos materiais reciclados com espuma de asfalto, um trecho experimental foi avaliado por meio de ensaios deflectométricos. O segmento em questão foi executado na faixa 3 (da esquerda para a direita no sentido de tráfego) do segmento de 200 metros compreendido entre o km 36,2 e o km 36,4 da pista interior-capital da rodovia SP 070, localizado no município de Guarulhos – SP.

Tendo em vista a necessidade de se executar a reciclagem profunda atingindo a base altamente degradada, alternativas como utilização de sucessivas camadas de misturas asfálticas a quente ou estabilização com cimento Portland foram descartadas, principalmente devido ao curto prazo disponível para execução da obra.

A solução final adotada é constituída dos seguintes materiais e espessuras correspondentes:

Camada / Material	Espessura (cm)
Revestimento – gap graded	3,0
Base reciclada – RAP espumado	15,0
Base reciclada – RAP espumado	20,0
Sub-base de brita graduada simples remanescente	18,0
Subleito	

Figura 4.9 – Solução de restauração proposta

A base reciclada foi constituída de 84% de material fresado, 15% de pó de pedra, 1% de cimento e 2% em peso de asfalto espumado, processada numa usina móvel modelo Wirtgen KMA 2000 e executada em duas camadas em vista da elevada espessura, e visando garantir características eficientes de compactação na energia do Proctor Modificado.

Para subsidiar os estudos foram consideradas oito campanhas de levantamento deflectométrico utilizando-se o deflectômetro de impacto tipo FWD, apresentado na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Avaliação estrutural do trecho experimental com emprego de equipamento FWD

As medidas de deflexão foram efetuadas nas trilhas de roda interna e externa, alternadamente, em 10 pontos espaçados a cada 20 m, ao longo das seguintes datas: 0, 10, 30, 90, 180, 270, 330 e 367 dias após a liberação do trecho ao tráfego.

Os geofones foram posicionados sistematicamente a distância de 0, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 cm do ponto de aplicação da carga. Todas as medidas de deflexões foram posteriormente normalizadas para a carga preconizada de 80 kN por eixo simples e para a temperatura de 25°C do revestimento.

Para a caracterização da bacia de deflexão foram estudados a deflexão máxima e os parâmetros indicados na Tabela 4.3, já descritos no Capítulo 2.6.2.

Tabela 4.3 – Parâmetros deflectométricos avaliados

Parâmetro	Unidade
Deflexão Máxima (d_0)	10^{-2} mm
Índice da Curvatura da Superfície (SCI)	10^{-2} mm
Índice de Danos à Base (BDI)	10^{-2} mm
Índice de Curvatura da Base (BCI)	10^{-2} mm
Raio de Curvatura (R)	m
Fator de Curvatura (CF)	10^{-2} mm

Na Tabela 4.4 são indicadas as deflexões normalizadas tanto em relação à temperatura como em relação à carga aplicada, conforme procedimentos do Apêndice B, e correspondentes a cada afastamento em relação ao ponto de aplicação das cargas.

Tabela 4.4 – Resumo dos Resultados dos Levantamentos Deflectométricos

Data (dias)	Valor	Deflexões (10^{-2} mm)							
		d ₀ 0 cm	d ₂₀ 20 cm	d ₃₀ 30 cm	d ₄₅ 45 cm	d ₆₀ 60 cm	d ₉₀ 90 cm	d ₁₂₀ 120 cm	d ₂₅ 25 cm
0	média	123	80	42	30	16	11	6	61
	caract	167	120	68	49	24	14	9	94
10	média	64	43	31	24	17	11	7	37
	caract	69	49	35	27	20	13	8	42
30	média	45	33	25	20	16	10	7	29
	caract	49	36	27	22	17	11	8	32
90	média	33	24	21	17	13	10	7	23
	caract	39	28	24	19	14	10	8	26
180	média	28	23	20	17	15	11	7	22
	caract	34	27	23	19	16	12	8	25
270	média	20	15	14	11	10	8	6	14
	caract	24	17	15	12	11	9	6	16
330	média	20	16	15	13	11	9	6	16
	caract	23	19	17	14	12	10	8	18
367	média	20	19	16	13	12	9	7	18
	caract	24	22	19	15	14	10	8	21

A Tabela 4.5 relaciona os resultados dos parâmetros caracterizadores da bacia de deformação para os diversos levantamentos efetuados ao longo do tempo.

Tabela 4.5 – Resumo dos Resultados dos Parâmetros da Bacia de Deflexão

Data (dias)	Valor	d ₀ (10^{-2} mm)	SCI (10^{-2} mm)	BDI (10^{-2} mm)	BCI (10^{-2} mm)	R (m)	CF (10^{-2} mm)
0	média	123	81	26	5	51	39
	caract.	167	99	44	10	43	50
10	média	64	33	13	7	117	20
	caract.	69	34	15	7	114	22
30	média	45	20	9	6	197	10
	caract.	49	22	10	6	177	15
90	média	33	12	8	4	286	9
	caract.	39	15	10	4	229	13
180	média	28	8	5	4	475	5
	caract.	34	11	6	4	357	8
270	média	20	7	3	2	492	6
	caract.	24	8	4	2	406	7
330	média	20	5	4	2	772	3
	caract.	23	6	4	3	606	4
367	média	20	4	4	3	1250	1
	caract.	24	5	5	3	978	2

Confrontando-se os dados defletoométricos da bacia completa dos diversos levantamentos através dos diferentes parâmetros de avaliação, pode-se verificar a influência das condições de cura e de alteração das propriedades elásticas do material ao longo do tempo.

Com exceção do período inicial de cura, não se observa uma clara redução da variabilidade dos resultados com o tempo, conforme se observa na Figura 4.11 a seguir.

Figura 4.11 – Coeficiente de variação dos parâmetros defletoométricos

Para a avaliação do desempenho da estrutura ao longo do tempo a partir dos levantamentos defletoométricos foram utilizados três procedimentos, a saber:

- Critério que considera a deflexão máxima admissível na superfície do pavimento, empregando-se modelos de normas nacionais;
- Critério que considera análise da forma da bacia completa de deformação utilizando-se modelos de fadiga baseados no trabalho de Lopes⁽²⁰¹²⁾;
- Critério do guia da AASHTO (1993) que emprega o conceito do número estrutural efetivo do pavimento, descrito no item 2.6.4.3, combinado à metodologia para estimativa do módulo de resiliência do subleito, apresentada no Apêndice A.

Para o critério deflectométrico que considera a deflexão máxima, utilizou-se os modelos do DNER-PRO 011 (1979) e DNER-PRO 269 (1994):

$$N = 1,265 \times 10^{17} \times d_0^{-5,682} \quad \text{DNER-PRO 011} \quad (46)$$

$$N = 5,548 \times 10^{16} \times d_0^{-5,319} \quad \text{DNER-PRO 269} \quad (47)$$

Para o critério deflectométrico que considera os parâmetros característicos da bacia de deflexão foram utilizados os modelos de fadiga elencados a seguir:

$$N = 1,7146 \times 10^{13} \times \text{SCI}^{-5,5866} \quad (48)$$

$$N = 1,3352 \times 10^{11} \times \text{BDI}^{-4,3011} \quad (49)$$

$$N = 1,1067 \times 10^{11} \times \text{BCI}^{-5,5960} \quad (50)$$

$$N = 2,1950 \times 10^{-8} \times R^{5,9630} \quad (51)$$

Tais modelos foram produzidos com base no trabalho de Lopes (2012), que elaborou modelos de fadiga para pavimentos flexíveis, com bases puramente granulares.

Na Tabela 4.6 são indicados os módulos de resiliência do subleito e do pavimento retroanalizados, considerando a metodologia mencionada. Apresentam-se ainda os números estruturais efetivos do pavimento antes e após a reciclagem, calculados de acordo com o método da AASHTO (1993) através da equação (10), e que permitiram elaborar a previsão de vida útil.

Tabela 4.6 – Valores de parâmetros retroanalizados pelo método da AASHTO (1993)

Data (dias)	E_{SL} (MPa)	E_P (MPa)	SN_{ef}	N_{AASHTO} admissível (solicitações do eixo padrão)
Antes da intervenção	79	293	2,35	$4,16 \times 10^5$
0	92	74	1,49	$4,15 \times 10^4$
10	98	254	2,24	$5,13 \times 10^5$
30	97	448	2,71	$1,55 \times 10^6$
90	101	652	3,07	$3,63 \times 10^6$
180	94	954	3,48	$6,69 \times 10^6$
270	124	1428	3,98	$2,93 \times 10^7$
330	105	1834	4,33	$3,38 \times 10^7$
367	99	1797	4,30	$2,81 \times 10^7$

Utilizou-se a equação (36) para o cálculo do número de solicitações admissíveis. Foram considerados os seguintes valores para os demais parâmetros:

z_R = coeficiente de distribuição normal = -1,037;

s_0 = desvio padrão combinado das variáveis do projeto = 0,35;

ΔPSI = variação de serventia admissível = 1,7.

O valor máximo de previsão de vida útil se deu aos 330 dias. O tráfego previsto N_{AASHTO} para 5 anos é de $2,4 \times 10^7$ repetições, de forma que ao término do primeiro ano de operação a estrutura ainda atenderia tal demanda.

Os resultados da variação da previsão de vida útil por meio de modelos baseados em dados da bacia deflectométrica são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Previsão de vida útil (Número de repetições de eixo-padrão N_{USACE})

Data (dias)	d_0 (PRO 011)	d_0 (PRO 269)	SCI	BDI	BCI	R
0	2,98E+04	8,37E+04	1,24E+02	1,12E+04	2,68E+05	1,17E+02
10	4,41E+06	9,01E+06	5,61E+04	1,97E+06	3,10E+06	4,74E+04
30	3,00E+07	5,42E+07	4,44E+04	1,13E+06	1,78E+06	3,96E+04
90	1,07E+08	1,79E+08	9,28E+05	8,55E+06	6,77E+06	1,06E+06
180	2,72E+08	4,27E+08	5,08E+05	6,65E+06	6,59E+06	5,48E+05
270	1,96E+09	2,71E+09	1,46E+07	1,93E+07	7,43E+07	9,67E+06
330	2,31E+09	3,17E+09	4,14E+06	7,17E+06	5,31E+07	2,59E+06
367	1,81E+09	2,52E+09	1,35E+08	9,82E+07	3,63E+07	2,00E+08

Os máximos valores de previsão de vida útil também ocorreram no final do período de estudo, entre 270 e 367 dias. O tráfego previsto para o período de projeto N_{USACE} é de $6,3 \times 10^7$ solicitações de carga do eixo padrão. Observa-se que ao término do período de monitoramento, de maneira geral, a estrutura suportará ao tráfego.

Um ano após a conclusão da obra, apenas no caso da análise de vida útil através do índice de curvatura da base (BCI), que infere sobre a capacidade de suporte do subleito, o pavimento não suportaria por completo o tráfego para os quatro anos seguintes.

Para uma segunda análise, os valores dos parâmetros deflectométricos e de capacidade estrutural do pavimento deram origem a equações de regressão, na

intenção de se avaliar a forma e a velocidade de variação dos mesmos ao longo do período de cura.

Tabela 4.8 – Equações de regressão para variação dos parâmetros da bacia deflectométrica e de capacidade estrutural com o tempo

Parâmetro	Expressão	R ²
d_0 (10 ⁻² mm)	$d_o = -13,750 \ln t + 101,95$	0,996
SCI (10 ⁻² mm)	$SCI = -8,882 \ln t + 56,334$	0,996
BDI (10 ⁻² mm)	$BDI = -3,766 \ln t + 25,686$	0,985
BCI (10 ⁻² mm)	$BCI = -0,706 \ln t + 7,427$	0,884
R (m)	$R = 56,591 \ln t + 164,730$	0,422
CF (10 ⁻² mm)	$CF = -4,394 \ln t + 30,719$	0,991
E_p (MPa)	$E_p = 147,64 \ln t + 411,94$	0,568
SN_{ef}	$SN_{ef} = 0,2581 \ln t + 2,2933$	0,790

t = tempo em dias

Ressalta-se que as expressões são apenas modelos matemáticos com validade para a rodovia em questão. Outro aspecto a se destacar é que algumas equações apresentam correlação direta entre melhora do parâmetro e aumento do tempo. Porém, isto é resultado do processo de cura. Uma vez cessada a cura, os índices indicarão a degradação do pavimento.

Os gráficos da Figura 4.12 permitem avaliar a forma das curvas e a proximidade com os valores originais.

Figura 4.12 – Variação de parâmetros com o tempo na Rodovia SP 070

Observa-se uma queda acentuada nos valores dos parâmetros defletoométricos no início da operação do trecho, tendendo para a estabilização após os primeiros meses. Os parâmetros que indicam capacidade estrutural vão aumentando com o tempo.

É interessante observar que tal ganho ocorreu mesmo com a maior intensidade e frequência das chuvas no início do período, conforme ilustra o gráfico das precipitações diárias na região do trecho experimental durante o período de estudo, na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Precipitações diárias na região de estudo. Fonte: INMET (2014)

As equações de regressão da Tabela 4.8 têm a seguinte forma:

$$f_{(t)} = a \ln t + b \quad (52)$$

Derivando o modelo acima, se obtêm:

$$f'_{(t)} = \frac{a}{t} \quad (53)$$

De posse destas informações, a taxa de variação relativa, expressa em porcentagem, pode ser obtida através da seguinte equação:

$$TVR = \frac{f'_{(t)}}{f_{(t)}} \times 100 = \left[t \times \left(\ln t + \frac{b}{a} \right) \right]^{-1} \times 100 \quad (54)$$

Das expressões da Tabela 4.8 que possuem boa correlação com os valores originais, os parâmetros SCI e BDI, justamente os que melhor inferem sobre a resistência da camada de base reciclada, mais lentamente convergiram para

estabilização, ou seja, cujos valores de taxa de variação relativa estão mais distantes de zero, conforme ilustra a Figura 4.14 abaixo.

Figura 4.14 – Taxa de variação relativa dos parâmetros defletoométricos

É notável a variação das características elásticas do material ao longo do tempo. Mesmo com as solicitações do tráfego ocorrendo, a cura do material resultou em aumento da capacidade estrutural e diminuição das deflexões máximas na superfície do pavimento ao longo do tempo, de acordo com os ensaios realizados com FWD em diversas idades.

Destaca-se na Figura 4.14 que apenas a curva do parâmetro SCI apresenta segmento com taxa de variação crescente. Isso indica que o processo de degradação do revestimento se acelerou no final do período.

A variação da capacidade estrutural se deu principalmente devido a alterações da base, com a cura completa desta camada ocorrendo entre 9 e 12 meses após a execução do trecho experimental.

A análise do trecho ressalta a importância de ferramentas para acompanhamento e controle de obras. Os levantamentos defletoométricos permitiram conferir a evolução do material com praticidade. Recomenda-se o emprego deste tipo de serviço, pelo menos durante os primeiros meses após a conclusão dos trabalhos de construção para verificar se a resistência progride conforme o esperado.

Considerando a alta deformabilidade do material reciclado com espuma e a alteração das propriedades elásticas com a cura do mesmo, fica evidenciada a

importância da escolha do tipo de revestimento superficial da camada, em termos de flexibilidade e de índice de vazios.

Aparentemente, é fundamental a verificação das condições de drenagem subsuperficial da estrutura visando controlar as características de cura do material, principalmente na fase inicial de estabilização da camada.

5 PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

Com base nos estudos encontrados na bibliografia e nas observações realizadas no trecho experimental da Rodovia SP 070, é proposto um procedimento prático para o dimensionamento estrutural de pavimentos reciclados com espuma de asfalto, em concordância com o método do manual de Pavimentação do DNIT (2006c).

O procedimento contemplará a determinação da capacidade de suporte da infraestrutura remanescente de pavimentos existentes por meio da retroanálise de deflexões. O intuito é obter as informações necessárias para o dimensionamento através de ensaio não destrutivo, como é o caso dos levantamentos deflectométricos.

A avaliação de diversos métodos de dimensionamento estrangeiros de materiais reciclados com espuma de asfalto e o acompanhamento de trecho experimental na Rodovia SP 070 permitiram identificar uma série de apontamentos que distinguem tais materiais de base e que serão de alguma forma contemplados no processo proposto.

5.1 Aspectos relevantes observados

Objetivando-se a elaboração de um procedimento para dimensionamento que atenda ao método do DNIT, são descritas de forma resumida as características relevantes observadas nos métodos avaliados, resumidos na Tabela 5.1, exceto o método da AASHTO (1993), não incluído pois este não trata especificamente de bases recicladas ou estabilizadas com espuma de asfalto.

Ressalta-se que as características elencadas na Tabela 5.1 são referentes às características particulares para bases recicladas com espuma de asfalto. Por exemplo, o método de dimensionamento da Caltrans possui exigências mínimas para espessura do revestimento para pavimentos novos, mas o guia elaborado especificamente para a reciclagem profunda de pavimentos não indica tais valores.

Tabela 5.1 – Resumo das principais características dos métodos de dimensionamento estudados

	TRL 386	TRL 611	TG2 2002	TG2 2009	Austroroads	TMR	Canning	Transit New Zealand	Caltrans
País	Reino Unido	Reino Unido	África do Sul	África do Sul	Austrália	Austrália	Austrália	Nova Zelândia	EUA
Ano	1999	2004	2002	2009	2011	2012	2010	2007	2012
Comportamento da camada reciclada	asfáltico	asfáltico	duas fases	granular	asfáltico	duas fases	asfáltico	duas fases	granular
Mecanismo de ruptura	-	fadiga	fadiga e deformação plástica	condição geral do pavimento	fadiga	fadiga	fadiga	-	condição geral do pavimento
Tipo do modelo		mecanicista	mecanicista	empírico	mecanicista	mecanicista	mecanicista	mecanicista	semi-empírico
Espessura mínima	150mm	150mm	-	100 mm	-	-	-	-	
Espessura máxima	300 mm	300 mm	-	350 mm	-	-	-	-	
% de espuma usual	≥ 3,5%	≥ 3,0% (usina) ≥ 4,0% (in-situ)			3,0% - 4,0%	3,0% - 3,5%	≥ 3,5%	2,8% - 3,3%	3,0%
Filler usual	cimento				cal (1,0% - 1,5%)	cal hidratada (1,0% - 2,0%)	cal hidratada	cimento (1,0%)	cimento (1,5%)
Revestimento mínimo	sim	sim	não especificado	sim	sim	não especificado	sim	não especificado	não especificado
Suporte mínimo do subleito	CBR ≥ 2%	E _{SL} ≥ 50 MPa	não especificado	CBR _{SL} ≥ 3%	não especificado	CBR _{SL} ≥ 5%	não especificado	não especificado	E _{SL} ≥ 45 MPa

A seguir são discutidos pontos de destaque deste tipo de base de pavimento.

5.1.1 Comportamento da camada reciclada

A pesquisa bibliográfica permite afirmar que não há consenso em relação ao comportamento das bases compostas por material reciclado com espuma de asfalto. Como ilustra a Figura 5.1, este material tende a ter comportamento entre granular, com menor resistência, e asfáltico, com maior influência da temperatura ou do tempo de carregamento das cargas. Dentre os métodos avaliados, três diferentes tipos de comportamento foram encontrados.

Figura 5.1 – Representação do comportamento de materiais da pavimentação (adaptado de Asphalt Academy, 2009)

Inicialmente, há aqueles que avaliam as bases estabilizadas com espuma de asfalto semelhantes aos materiais asfálticos durante toda a vida útil. É o caso dos métodos ingleses TRL386 e TRL611, do método interino do Austroads e da Cidade de Canning.

Outra forma de caracterização, como acontece no TG2 (2009), é considerar o material resultante da reciclagem e estabilização com o comportamento mecânico de um granular modificado, com elevada coesão.

Por fim, há métodos que consideram as camadas recicladas atuando de duas maneiras distintas no decorrer do tempo. Os métodos do Transit New Zealand, do TMR Queensland e o interino sul-africano TG2 (2002) apontam para uma fase de comportamento típico de materiais asfálticos, com elevada resistência e vida útil regida pela fadiga e outra fase na qual o material passaria a atuar de maneira semelhante a um material granular, com queda do módulo de resiliência. Todavia, no dimensionamento neozelandês apenas a segunda fase é contemplada. Já no caso do TMR Queensland, considerar a segunda fase é opcional e pouco usual.

Um fato a ser considerado para que este comportamento fosse validado no caso sul-africano é que os estudos que balizaram a elaboração do método interino foram feitos em estruturas com o alto teor de cimento, da ordem de 2%, superior ao teor de espuma de asfalto, de 1,8%. Ora, uma estrutura semirrígida realmente teria um rápido e grande ganho de resistência na fase inicial e após o trincamento da camada se comportaria semelhantemente a uma base granular.

De maneira geral, analisando a Figura 5.1 em conjunto com a Tabela 5.1, conclui-se que a reciclagem com menores teores de espuma, entre 2% e 3%, levariam a um comportamento mais próximo aos materiais granulares, enquanto que teores maiores aproximaria tais materiais aos concretos asfálticos e vida útil limitada pela fadiga.

5.1.2 Coeficiente de equivalência estrutural

Assim como no método do DNIT (2006c), foram encontrados métodos que utilizam coeficientes de equivalência estrutural entre materiais tendo como referência uma camada granular, que possui coeficiente estrutural igual a 1,0.

Os valores encontrados são próximos. O método do Caltrans adota 1,4 para o coeficiente de equivalência granular, mesmo valor que o método do DNIT indica para bases ou revestimentos de pré-misturado a frio, de graduação densa. Já no estado americano de Minnesota adota-se 1,5 (Labuz, Tang, & Cao, 2012), valor também estabelecido por Bowering & Martin (1976).

5.1.3 Ganho de resistência com o tempo

Outro aspecto distinto para este tipo de material encontrado na pesquisa é seu ganho de resistência com o tempo devido ao lento processo de cura, observado ao longo de quase um ano no trecho experimental da Rodovia SP 070.

Ramanujam & Jones (2007) acompanharam obras no estado australiano de Queensland e também observaram um aumento de resistência da estrutura do pavimento com o tempo, com base em resultados deflectométricos. Na comparação entre os levantamentos realizados seis semanas e dez meses após a obra, houve redução e maior homogeneidade das deflexões máximas, o que indica uma estrutura mais resistente. Recentes projetos de monitoramento em diversas rodovias da Austrália e da Nova Zelândia também identificaram este fenômeno (AUSTROADS, 2011, 2013a, 2013b, 2014).

Na Inglaterra, Nunn & Thom (2002) observaram em seus testes em pista experimental para o TRL a evolução dos módulos de resiliência no decorrer de um ano. A Figura 5.2 ilustra o valor médio dos módulos de resiliência retroanalizados das diferentes bases recicladas com espuma de asfalto estudadas. Observa-se a estabilização dos valores aproximadamente seis meses após a exposição do material ao tráfego.

Figura 5.2 – Evolução do módulo de resiliência médio (adaptado de Nunn & Thom, 2002)

Nos Estados Unidos, Van Wyk, Yoder, & Wood (1983) registraram ganho estrutural por meio de levantamentos deflectométricos realizados doze e duzentos e cinquenta dias após conclusão do trecho experimental em Indiana. Ressalta-se ainda que o primeiro levantamento foi executado durante o outono, estação mais seca que a do levantamento seguinte, a primavera.

Diefenderfer & Apeagyei (2011b) avaliaram por dois anos obras de reciclagem profunda com diferentes estabilizantes na Virgínia. Para espuma de asfalto, observou-se um ganho de resistência estrutural entre 28% e 42% nas comparações entre dados obtidos três semanas e 24 meses após a obra. A Figura 5.3 mostra a evolução do número estrutural efetivo do pavimento durante o acompanhamento da rodovia *State Route 40*, tratada com emulsão e com espuma de asfalto:

Figura 5.3 – Evolução do número estrutural (SN) efetivo de rodovia estadual americana tratada com material asfáltico: (a) faixa sentido leste e (b) faixa sentido oeste (adaptado de Diefenderfer & Apeagyei, 2011b)

Dado tal comportamento das bases recicladas com espuma de asfalto, justifica-se que métodos de dimensionamento estabeleçam os valores mínimos de capacidade estrutural para resultados a longo prazo, seja ela expressa por meio do módulo de resiliência, resistência à tração ou coeficientes estruturais. Do contrário, ao se trabalhar com dados do estágio inicial da vida útil, os valores seriam conservadores demais e as estruturas obtidas estariam superdimensionadas, gerando custos extras.

Sendo a evolução da capacidade estrutural não desprezível e estando esta subentendida nos métodos de dimensionamento, é indispensável o acompanhamento das obras de reciclagem com espuma de asfalto não apenas na fase de execução, mas também no decorrer dos primeiros meses de operação da rodovia. Os levantamentos deflectométricos, por exemplo, atenderiam esta demanda.

5.1.4 Revestimento

Requisitos de revestimento mínimo sobre este tipo de base foram encontrados em alguns métodos: TRL386, TRL 611, TG2 (2009) e do Austroads. Todos admitem a utilização de tratamento superficial para vias de tráfego leve.

Para vias de tráfego mais elevado, os métodos ingleses TRL386 e TRL611 adotam revestimentos mais espessos, com até 100 mm de concreto asfáltico, valor próximo aos praticados no Brasil para vias de tráfego médio a elevado. Porém, há a opção de se incrementar a espessura da base para utilizar camadas de concreto asfáltico mais delgadas, de até 50 mm. Já o sul-africano TG2 (2009) limita a espessura máxima do revestimento em 50 mm.

Em suma, os revestimentos em concreto asfáltico tendem a ser menos espessos que os dos pavimentos brasileiros. Outro aspecto a ser frisado é que a escolha do revestimento ganha mais importância neste tipo de pavimento dada a cura lenta do material da base, de forma que o ideal seriam materiais que não dificultassem a saída da água.

Feitas estas considerações, é apresentado o método do DNIT, a fim de fornecer as informações que guiarão a elaboração do procedimento para reciclagem profunda com espuma de asfalto.

5.2 Método do DNIT

O dimensionamento proposto pelo DNIT é um método semi-empírico, com cálculo da espessura total necessária, em termos de material granular, para proteção do subleito e demais camadas em função do tráfego e da capacidade de suporte.

$$H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (55)$$

Onde:

H_t = espessura total em termos de material granular [cm];

N = número de repetições de eixo padrão de 80 kN;

CBR = índice de suporte Califórnia do subleito [%].

Faz uso de coeficientes de equivalência granular, indicados na Tabela 5.2, para converter a espessura total de material granular em termos de outros materiais.

Tabela 5.2 – Coeficientes de equivalência estrutural (DNIT, 2006c)

Material	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto asfáltico	2,0
Base ou revestimento de pré-misturado a quente, de graduação densa	1,7
Base ou revestimento de pré-misturado a frio, de graduação densa	1,4
Base ou revestimento asfáltico por penetração	1,2
Camadas granulares	1,0
Solo-cimento com resistência à compressão a 7 dias superior a 45 kg/cm ²	1,7
Solo-cimento com resistência à compressão a 7 dias entre 28 kg/cm ² e 45 kg/cm ²	1,4
Solo-cimento com resistência à compressão a 7 dias entre 21 kg/cm ² e 28 kg/cm ²	1,2

Para o revestimento, são fixados valores da espessura mínima para pavimentos com bases de comportamento puramente granular, com base no número de repetições do eixo padrão, conforme a Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Espessura mínima de revestimento para bases de comportamento puramente granular (DNIT, 2006c)

Número de repetições de eixo padrão	R (cm)
$N \leq 10^6$	Tratamento superficial
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	5,0
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	7,5
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	10,0
$N > 5 \times 10^7$	12,5

Uma vez definida a espessura do revestimento e o material a ser utilizado como base, a espessura mínima da mesma e das demais camadas é obtida com a resolução das inequações a seguir:

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_{20} \quad (56)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S \geq H_n \quad (57)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S + h_n \times K_{Ref} \geq H_t \quad (58)$$

Onde:

R = espessura do revestimento [cm];

K_R = coeficiente de equivalência estrutural do revestimento;

B = espessura da base [cm];

K_B = coeficiente de equivalência estrutural da base;

H_{20} = espessura de material granular necessária para proteção da sub-base [cm];

h_{20} = espessura da sub-base [cm];

K_S = coeficiente de equivalência estrutural da sub-base;

H_n = espessura de material granular necessária para proteção do reforço do subleito [cm];

h_n = espessura do reforço do subleito [cm];

K_{Ref} = coeficiente de equivalência estrutural do reforço do subleito;

H_t = espessura de material granular necessária para proteção do subleito [cm].

Os valores de espessura de material granular são obtidos através da equação (55).

Uma vez dimensionada a estrutura, efetua-se a verificação mecanicista para complementação do método. Entretanto o Manual da Pavimentação do DNIT não sugere quais modelos de fadiga devem ser utilizados para previsão do número de solicitações que levam à ruína do material.

O Manual cita que as análises devem ser feitas para verificar o trincamento por fadiga das camadas asfálticas, nos pavimentos flexíveis, e das camadas cimentadas, nos semirrígidos. Contudo, é prática comum na engenharia rodoviária nacional se verificar também o nível das deformações verticais de compressão no topo do subleito.

5.3 Elaboração de procedimento para dimensionamento de pavimentos com base reciclada com espuma de asfalto

No procedimento proposto, o pavimento a ser reciclado será dimensionado como um sistema de três camadas. Portanto, vale a seguinte igualdade:

$$H_t = H_{20} \quad (59)$$

Adotou-se 1,4 para o coeficiente de equivalência estrutural da base reciclada, em conformidade com a experiência californiana. Deste modo, a espessura da base pode ser obtida combinando as equações (55), (56) e (59), resultando na expressão (60):

$$B = \frac{77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} - R \times K_R}{1,4} \quad (60)$$

Onde:

B = espessura da base reciclada [cm];

N = número de repetições de eixo padrão de 80 kN;

CBR = índice de suporte Califórnia do subleito [%];

R = espessura do revestimento [cm];

K_R = coeficiente de equivalência estrutural do revestimento.

O valor de CBR do subleito será estimado por meio das deflexões do pavimento existente para permitir maior agilidade na obtenção dos dados.

Dado que no Brasil é comum os levantamentos com FWD efetuarem as leituras dos deslocamentos na superfície do pavimento distantes 0, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 cm do ponto de aplicação do carregamento, procurou-se adotar um procedimento de retroanálise que utilizasse uma destas leituras, dispensando assim interpolações ou extrapolações. Além disso, a carga aplicada também deveria ser compatível com a usual à engenharia rodoviária brasileira nos levantamentos deflectométricos, de 4.100 kgf aplicados sobre uma área circular de raio 15,0 cm.

Outro ponto para definição do procedimento de retroanálise foi a questão da estrutura remanescente. Quando não se conhece a estrutura do pavimento existente, observou-se que a modelagem mecanicista do pavimento reciclado desconsiderando esta camada entre o subleito e a base reciclada levaria à avaliação das deformações verticais de compressão em profundidade superior à que deveria, conforme ilustra a Figura 5.4, gerando resultados demasiadamente severos:

Figura 5.4 – Diferença da localização do ponto de análise na verificação mecanicista nas situações: (a) considerando a estrutura remanescente e (b) desconsiderando-a

Analizando os procedimentos de retroanálise sob estes aspectos, propõem-se que a estimativa da capacidade estrutural do subleito seja feita pelo método de Noureldin (1993), com maiores detalhes sendo encontrados no Apêndice A. No mesmo apêndice são apresentados outros procedimentos que poderão ser empregados para a estimativa do valor de suporte do subleito, caso se disponha de dados mais completos da estrutura do pavimento existente.

Outra vantagem do método de Noureldin (1993) é que, quando não se conhece a estrutura do pavimento, o mesmo retroanalisa e define como subleito a camada de menor resistência. Por exemplo, caso a sub-base de determinado pavimento esteja extremamente deteriorada, sendo ela a camada menos resistente do sistema, será determinado o seu módulo de resiliência, e o não do subleito propriamente dito. Isto é extremamente importante pois, dessa forma, ao realizar o dimensionamento estrutural com esta informação, há garantia de proteção desta camada e automaticamente das subjacentes a ela.

Dado que o método fornece o módulo de resiliência retroanalizado, e não o índice de suporte Califórnia, a correlação entre os parâmetros será feita com a equação (61), presente no guia da AASHTO (1993):

$$E_{SL} = 1500 \times CBR \quad (61)$$

Onde:

E_{SL} = módulo de resiliência do subleito retroanalizado [psi];

CBR = índice de suporte Califórnia [%].

Uma vez definido o revestimento, será possível a obtenção da espessura necessária da camada de base, devendo a estrutura ser verificada por meio da análise mecanicista. Na hipótese de não se conhecer a estrutura de pavimento remanescente, propõem-se que seus parâmetros sejam idênticos aos do subleito, a camada mais frágil, numa situação a favor da segurança.

No que se refere ao revestimento, sugere-se a utilização de espessuras mais delgadas que as indicadas no método do DNIT para pavimentos com bases com comportamento puramente granulares. Essa condição vai de encontro à prática internacional.

O ideal seria utilizar revestimentos menos espessos e com maior índice de vazios, ao menos durante o início de operação da via, com o objetivo de facilitar a saída da água da base e protegê-la contra o risco de desgaste prematuro na liberação ao tráfego sem revestimento. A depender do tráfego e desempenho do pavimento, este revestimento seria complementado após determinado período de tempo, quando a camada atingisse a resistência esperada.

Sobre a verificação mecanicista, ainda não há consenso sobre a forma como ocorre a ruptura nas bases tratadas. Dessa forma, recomenda-se realizá-la nos pontos indicados nas instruções de projeto nacionais: deslocamento na superfície do pavimento, deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento e deformação específica de compressão no topo do subleito. Para atender com segurança a verificação da base, os módulos de resiliência adotados serão ligeiramente baixos se comparados aos encontrados na bibliografia e na retroanálise das bacias deflectométricas do estudo da Rodovia Ayrton Senna.

Ainda, recomenda-se a verificação mecanicista em duas etapas, com variação do módulo de resiliência da camada reciclada para incorporar no procedimento o ganho de resistência com o tempo. Considerar na análise o módulo de resiliência do início de vida-útil da camada reciclada resultaria em estrutura superdimensionada. Por outro lado, o uso de valores apenas da situação da base já curada não leva em conta todos os danos gerados nos materiais na condição inicial.

Para simular esta situação, será utilizado o modelo de dano contínuo de Palmgren-Miner para a fadiga dos materiais, que assume a hipótese de que os danos ocorrem nos materiais linearmente e o consumo à fadiga de dado material pode ser dado

como a razão entre o número de solicitações ocorridas e o número admissível de solicitações (Balbo, 2007). A vida útil do material esgotaria quando a razão é igual a 1, ou seja, o material atingiu 100% de consumo à fadiga.

A hipótese de Palmgren-Miner aplicada para diferentes níveis de esforços, para que o material não atinja a exaustão é dada pela equação (62):

$$\sum_i^k \frac{n_i}{N_i} \leq 100\% \quad (62)$$

Onde:

n_i = número de solicitações ocorridas na situação i ;

N_i = número de solicitações admissíveis para a situação i .

Para o procedimento proposto, a análise em duas fases resulta em:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} \leq 100\% \quad (63)$$

Onde:

n_1 = número de solicitações ocorridas na fase de cura da base;

N_1 = número de solicitações admissíveis para a fase de cura da base;

n_2 = número de solicitações ocorridas na fase mais resistente;

N_2 = número de solicitações admissíveis para a fase mais resistente;

Caso a condição da equação (63) não seja atendida para algum parâmetro analisado, a capacidade estrutural do pavimento deve ser aumentada, seja com incremento de espessuras ou troca dos materiais, e então procede-se a uma nova análise.

Com base na experiência internacional documentada e nas observações de campo, recomenda-se adotar a fase de cura igual a um ano, na ausência de maiores estudos sobre a mistura e condições climáticas locais.

5.3.1 Exemplo de aplicação

Para exemplificar o procedimento, propõem-se utilizar dados dos estudos de caso da Rodovia SP 070. O pavimento existente é o indicado na Figura 4.1 e os dados de projeto estão elencados a seguir:

Período de projeto: 5 anos;

$N_{USACE} = 6,3 \times 10^7$ solicitações de carga;

$N_{AASHTO} = 2,4 \times 10^7$ solicitações de carga;

Espessura total do pavimento existente: 58,3 cm;

Deflexões conforme Tabela 5.4

Tabela 5.4 – Bacia deflectométrica avaliada

Geofone	Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7
Distância (cm)	0	20	30	45	60	90	120
Deflexão (10^{-2} mm)	66,5	45,5	39,9	29,8	20,8	12,7	8,4

Para retroanálise do módulo de resiliência do subleito pelo método de Nouredin (1993), são necessárias transformações de unidade. Em seguida, são calculados módulo de resiliência e espessura equivalente para cada ponto.

Tabela 5.5 – Procedimento para estimativa da capacidade de suporte do subleito

Geofone	Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7
Distância (pol)	0,0	7,9	11,8	17,7	23,6	35,4	47,2
Deflexão (pol)	0,026	0,018	0,016	0,012	0,008	0,005	0,003
Módulo de resiliência do subleito retroanalizado (psi) – equação (70)	-	15.247	11.590	10.349	11.085	12.117	13.785
Espessura total efetiva (pol) – equação (71)	-	9,57	13,94	22,04	32,00	51,64	73,31

Plotando as informações da Tabela 5.5 e de posse da espessura total do pavimento, 58,3 cm, equivalentes à 23,0 pol, obtém-se módulo retroanalizado do subleito por análise gráfica, ilustrada na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Procedimento de retroanálise do subleito

Como resultado da retroanálise, o módulo de resiliência do subleito é igual a 10.400 psi. Da equação (61), segue que:

$$CBR = \frac{E_{SL}}{1.500} = \frac{10.400}{1.500} = 7\%$$

Caso não se conhecesse a espessura do pavimento existente, o procedimento seria mais simples. Inicialmente se calculam os produtos entre deflexão e distância, observando-se o máximo valor para dar procedimento aos cálculos de módulo de resiliência e espessura do pavimento.

Tabela 5.6 – Procedimento para estimativa da capacidade de suporte do subleito desconhecendo a espessura do pavimento

Geofone	Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7
Distância r_i (pol)	0,0	7,9	11,8	17,7	23,6	35,4	47,2
Deflexão d_i (pol)	0,026	0,018	0,016	0,012	0,008	0,005	0,003
Produto $d_i \times r_i$	-	0,141	0,185	0,208	0,194	0,177	0,156
Módulo de resiliência do subleito retroanalizado (psi) – equação (70)	-	-	-	10.349	-	-	-
Espessura total efetiva (pol) – equação (71)	-	-	-	22,04	-	-	-

Como resultado, a espessura total do pavimento foi de 22,04 pol, cerca de 56,0 cm, valor bem próximo à espessura real. O módulo de resiliência retroanalísado do subleito foi de 10.349 psi, também equivalente a CBR 7%.

Para o dimensionamento da espessura da base reciclada, propõem-se revestimento composto por concreto asfáltico de 5 cm de espessura. Considerando:

$$N_{USACE} = 6,3 \times 10^7 \text{ solicitações de carga;}$$

$$R = 5,0 \text{ cm;}$$

$$K_R = 2,0;$$

$$\text{CBR} = 7\%.$$

Através da equação (60), segue que a espessura da base reciclada necessária é de:

$$B = \frac{77,67 \times (6,3 \times 10^7)^{0,0482} \times 7^{-0,598} - 5,0 \times 2,0}{1,4} = 35,5 \text{ cm}$$

O dimensionamento estrutural que atende ao método do DNIT resulta numa estrutura com 5 cm de revestimento e 35,5 cm de base sobre a sub-base remanescente:

Figura 5.6 – Estrutura projetada segundo procedimento proposto atendendo o método do DNIT

Dimensionada a estrutura, procede-se à análise mecanicista para verificação dos deslocamentos e deformações atuantes no interior da estrutura do pavimento.

Para a determinação dos esforços admissíveis, apresentados na Tabela 5.7 foram adotados os modelos indicados na instrução de pavimentação IP-DE-P00/001 do

DER/SP (2006), uma vez que o Manual de Pavimentação do DNIT não informa quais devem ser usados.

Tabela 5.7 – Modelos adotados para análise mecanicista

Verificação	Equação
Deslocamento vertical na superfície do pavimento d_0 ($\times 10^{-2}$ mm)	$\log d_0 = 3,148 - 0,188 \times \log N_{USACE}$ DNER-PRO 269/94 (64)
Deformação específica horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento ε_t (cm/cm)	$N_{AASHTO} = 2,85 \times 10^{-7} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,69}$ Pinto & Preussler – CAP - 50/70 (65)
Deformação específica vertical de compressão no topo do subleito ε_v (cm/cm)	$N_{USACE} = 6,069 \times 10^{-10} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right)^{4,762}$ Shell ksla (Dormon & Metcalf) (66)

Para a determinação dos esforços internos solicitantes, deformações e deslocamentos da estrutura do pavimento flexível, empregou-se o programa computacional ELSYM-5 (*Elastic Layered System*), com os seguintes parâmetros:

CAUQ	5,0 cm	E_{CAUQ}	3.500 MPa	ν_{CAUQ}	0,35
Base reciclada	35,5 cm	$E_{rec,1}$	500 MPa	$\nu_{rec,2}$	0,40
		$E_{rec,2}$	1.000 MPa		
Sub-base remanescente	17,8 cm	E_{SB}	70 MPa	ν_{SB}	0,50
Subleito		E_{SL}	70 MPa	ν_{SL}	0,50

Figura 5.7 Parâmetros utilizados na verificação mecanicista

Para adoção dos valores de módulo de resiliência da base reciclada, deve-se realizar o projeto da mistura. Caso não seja possível, como na fase de estudos, são sugeridos os valores de 500 MPa e 1.000 MPa para as primeira e segunda fases, respectivamente.

A fase de cura é estimada em um ano. Na ausência de maiores detalhes e estudos de tráfego, será considerado nesta fase 20% do total de solicitações previstas para o período de projeto. Os deslocamentos e deformações de interesse obtidos estão indicados na Tabela 5.8 a seguir.

Tabela 5.8 – Resultados da análise mecanicista

Verificação	Fase	Solicitante	$N_{\text{admissível}}$	N_{projeto}	Consumo à fadiga
Deslocamento vertical na superfície do pavimento d_0 ($\times 10^{-2}$ mm)	1	$49,21 \times 10^{-2}$ mm	$5,55 \times 10^7$	$1,26 \times 10^7$	23%
	2	$36,05 \times 10^{-2}$ mm	$2,91 \times 10^8$	$5,04 \times 10^7$	17%
TOTAL					40%
Deformação específica horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento ε_t ($\times 10^{-4}$ cm/cm)	1	$1,42 \times 10^{-4}$ cm/cm	$4,51 \times 10^7$	$4,80 \times 10^6$	11%
	2	$0,47 \times 10^{-4}$ cm/cm	$2,61 \times 10^9$	$1,92 \times 10^7$	1%
TOTAL					12%
Deformação específica vertical de compressão no topo do subleito ε_v ($\times 10^{-4}$ cm/cm)	1	$2,72 \times 10^{-4}$ cm/cm	$5,81 \times 10^7$	$1,26 \times 10^7$	22%
	2	$1,87 \times 10^{-4}$ cm/cm	$3,47 \times 10^8$	$5,04 \times 10^7$	15%
TOTAL					37%

Conforme evidenciado na Tabela 5.8, a estrutura projetada atende com folga ao tráfego previsto para o período de análise. Normalmente, o emprego do método do DNIT no dimensionamento de pavimentos novos gera estruturas que necessitam de revisão pois não atendem aos critérios mecanicistas. Sob este aspecto, o procedimento aparenta ser robusto.

Parte da sub-base teve que ser incluída na reciclagem para atender ao critério estrutural. Como vantagem, o pavimento dimensionado permitiu a manutenção do greide e o consumo de concreto asfáltico usinado à quente foi baixo.

Para a manutenção da sub-base seria necessário o alteamento do greide e a adição de agregados para compensar o déficit de material, já que a espessura de corte, de no máximo 31,6 cm, seria inferior à dimensionada, 35,5 cm, assim como nos

pavimentos dimensionados pelos métodos da Caltrans e AASHTO no Estudo de Caso 1.

A base reciclada é espessa, com dimensão superior à recomendada por certos manuais internacionais. Neste caso, a compactação em duas etapas seria indicada. Caso se opte por limitar a espessura da base, especialmente nos casos de reciclagem in-situ, há a opção de incremento do revestimento.

Inclusive, parte da robustez do procedimento advém da tentativa de utilizar revestimentos mais esbeltos e da consideração da estrutura remanescente com capacidade estrutural idêntica ao subleito. Se esta parcela fosse considerada no dimensionamento estrutural, poderiam ser obtidas espessuras menores. Nestas situações, deve-se conhecer bem os materiais que compõem o pavimento existente.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Não existe ainda no país um procedimento de dimensionamento estrutural consolidado para soluções de reciclagem profunda de pavimentos, embora essa alternativa tecnológica venha crescentemente sendo utilizada em obras de restauração de rodovias.

A pesquisa bibliográfica mostrou que outros países desenvolveram metodologias próprias para o dimensionamento estrutural de camadas estabilizadas com asfalto.

Dos métodos analisados, pode-se destacar para cada um deles:

- AASHTO (1993): não é especificado para a reciclagem profunda, porém pode ser utilizado por meio de adaptações. Estudos, normalmente patrocinados pelos departamentos de transporte estaduais, foram realizados com o intuito de se obter valor de coeficiente estrutural para a camada reciclada com espuma de asfalto. Valores variam muito, com maior concentração na faixa de 0,20 – 0,30;
- Caltrans: apresenta guia próprio para a reciclagem profunda, baseado na equivalência estrutural de camadas e utilização de fatores de equivalência em termos de material granular. O fator adotado para camada reciclada com espuma de asfalto é igual a 1,4. É o único que considera diferença volumétrica entre o material fresado e o material tratado;
- Austroads: o método interino australiano considera o comportamento do material semelhante ao das misturas asfálticas, com ruptura por fadiga e trincamento. Pavimentos são monitorados no país para validar o método e elaborar um procedimento definitivo;
- Métodos baseados no AUSTROADS: alguns órgãos da Austrália e Nova Zelândia adaptaram o método australiano antigo para a reciclagem profunda de pavimentos com espuma de asfalto, como os departamentos de transportes da Nova Zelândia e de Queensland e da cidade de Canning, na Austrália. Também adotam critérios mecanicistas e anisotropia dos materiais granulares;
- TRL386 e TRL611: sendo o TRL611 a revisão do TRL386, ambos os métodos ingleses utilizam uma série de simplificações, e as variáveis de entrada de capacidade de suporte e tráfego são classificadas em categorias. Consideram

valores altos para o módulo de resiliência das bases recicladas com espuma de asfalto, a partir de 1.900 MPa;

- TG2 (2002): tratava-se de um método interino. Considera que as camadas estabilizadas com espuma de asfalto passam por duas fases ao longo de sua vida útil: uma fase de resistência à fadiga e outra de decréscimo na capacidade estrutural, com comportamento semelhante a um material granular;
- TG2 (2009): publicado para substituir a versão de 2002, trata as misturas estabilizadas com material asfáltico como um material granular de alta coesão e resistência. O dimensionamento é feito com base em índice que infere a capacidade estrutural do pavimento.

Como se observou, não há consenso em relação ao comportamento das bases recicladas com espuma de asfalto. Existem diferentes abordagens para o problema. Na Austrália e Inglaterra, onde normalmente os teores de espuma são maiores, o material é tratado como uma mistura asfáltica, sendo o mecanismo de falha o trincamento da camada, enquanto que na África do Sul o comportamento é considerado como de material granular e a ruptura se dá pelas deformações permanentes, sendo os teores de espuma menores.

Constatou-se durante avaliação e monitoramento de trecho restaurado por meio da reciclagem profunda com espuma de asfalto na Rodovia Ayrton Senna que esse material apresenta características mecânicas fortemente dependentes da idade, principalmente nos primeiros meses de vida útil. Tal fato também é constatado na bibliografia internacional. Recomenda-se o emprego de controle deflectométrico para acompanhar o ganho de resistência da base reciclada com espuma de asfalto.

Em se tratando de reciclagem profunda, nem todos os métodos avaliados consideram que o pavimento chegará ao final de sua vida útil devido à fadiga da base reciclada. O consenso é maior na questão da proteção do subleito contra a ruptura por esforços cisalhantes.

Assim, é recomendado o critério de resistência para cálculo da espessura total de reforço, conforme procedimento clássico do DNIT para dimensionamento de pavimentos novos. Neste caso, para as bases recicladas com espuma de asfalto é

proposto inicialmente a utilização de um coeficiente estrutural igual a 1,4, que corresponderia a um pré-misturado a frio no método do DNIT.

O procedimento combina o método de Noureldin com a metodologia do Manual de Pavimentação do DNIT. Utiliza dados da bacia deflectométrica para obtenção de informações do pavimento existente quando estes não são conhecidos: o índice de suporte Califórnia e a espessura total do pavimento. O CBR é utilizado como dado de entrada para o dimensionamento estrutural propriamente dito, e a espessura total é utilizada na verificação mecanicista.

A ausência da informação da espessura total acarretaria na incorreta simulação e análise das deformações verticais específicas de compressão no topo do subleito, uma vez que a verificação seria efetuada em profundidade inadequada.

Para considerar a evolução estrutural do material ao longo dos primeiros meses, propõem-se também realizar a análise mecanicista em duas fases, utilizando a hipótese de Palmgren-Miner aplicada para diferentes níveis de esforços.

Como recomendações para futuras pesquisas, sugere-se:

- Estudo do comportamento dos materiais tratados com espuma de asfalto, seus mecanismos de degradação e ruptura usuais e determinação de modelos de vida-útil;
- Determinação do coeficiente estrutural do material para as condições brasileiras;
- Caracterização do material para análises mecanicistas (valores de módulo de resiliência e coeficiente de Poisson)
- Análise dos processos de cura e evolução do ganho de resistência dos materiais;
- Elaboração de procedimentos para quantificar a espessura e capacidade estrutural da camada remanescente do pavimento, e não apenas do subleito, nos processos de reciclagem profunda através de ensaios não destrutivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Guide for design of pavement structures*. Washington D.C.

Akeroyd, F., & Hicks, B. (1988). Foamed bitumen road recycling. *Highways*, Vol. 56, No. 1933, p. 42.45.

Aranha, A. L. (2013). *Avaliação laboratorial e de campo da tecnologia de reciclagem de base com cimento para reabilitação de pavimentos*. São Paulo: Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ARRA. Asphalt Reclaiming and Recycling Association. (2001). Basic asphalt recycling manual.

Asphalt Academy. (2002). *Interim technical guidelines (TG2): The design and use of foamed bitumen treated materials*. Pretoria: CSIR.

Asphalt Academy. (2009). *Technical guideline: Bitumen stabilised materials (TG2, Second editon)*. Pretoria: Asphalt Academy.

Asphalt Institute. (1982). *Research and development of the Asphalt Institute's thickness design manual (MS-1), Research Report 82-2 (9ª ed.)*. Asphalt Institute.

AUSTROADS. (2011a). *Review of foamed bitumen stabilisation mix design methods AP-T178/11*. Sydney: Austroads.

AUSTROADS. (2011b). *Review of structural design procedures for foamed bitumen pavements AP-T188/11*. Sydney: Austroads.

AUSTROADS. (2011c). *Guide to pavement technology. Part 5: pavement evaluation and treatment design AGPT05/11*. Sydney: Austroads.

AUSTROADS. (2012). *Guide to pavement technology. Part 2: pavement structural design AGPT02/12*. Sydney: Austroads.

AUSTROADS. (2013a). *Improved design of bituminous stabilised pavements AP-T226-13*. Sydney: Austroads.

AUSTROADS. (2013b). *Design and performance of foamed bitumen stabilised pavements: Progress report one AP-T247-13*. Sydney: Austroads.

AUSTROADS. (2014). *Design and performance of foamed bitumen stabilised pavements: Progress report 2 AP-T275-14*. Sydney: Austroads.

Balbo, J. T. (2007). *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos.

Barker, W. R. (1982). *Prediction of pavement roughness*. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station.

Bermanian, S., Polish, P., & Maurer, G. (2006). Cold in-place recycling and full-depth reclamation projects by Nevada Department of Transportation: State of the practice. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1949, Transportation Research Board of the National Academies, 54-71.

Bernucci, L. B., Motta, L. G., Soares, J. B., & Ceratti, J. P. (2008). *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA.

Bonfim, V. (2001). *Fresagem de pavimentos asfálticos* (2ª edição ed.). São Paulo: Fazendo Arte Editorial.

Bowering, R. H. (1970). Properties and behaviour of foamed bitumen mixtures for road building. *Proceedings of the 5th Australian Road Research Board Conference* (pp. 38-57). Austrália: ARRB.

Bowering, R. H., & Martin, C. L. (1976). Foamed bitumen production and application of mixtures evaluation and performance of pavements. *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists Volume 45*, (pp. 453-477). New Orleans.

British Standard Draft for Development. (1993). *Determination of the indirect tensile stiffness modulus of bituminous mixtures*. Londres.

Browne, A. (2012). Foamed bitumen stabilisation in New Zealand - A performance review and comparison with Australian and South African design philosophy. *25th ARRB Conference*.

CALTRANS. California Department of Transportation. (2008). *Highway design manual*. Disponível em <<http://www.dot.ca.gov/hq/oppd/hdm/hdmtoc.htm>> Acesso em 05/04/2014.

CALTRANS. California Department of Transportation. (2012). *Division of Maintenance - Pavement*. Disponível em <http://www.dot.ca.gov/hq/maint/Pavement/Offices/Pavement_Engineering/> Acesso em 05/04/2014.

Castro, L. N. (2003). *Reciclagem a frio "in situ" com espuma de asfalto*. Rio de Janeiro: Dissertação (Mestrado) - COPPE/UFRJ.

Choubane, B., & McNamara, R. (2000). A practical approach to predicting flexible pavement embankment moduli using Falling Weight Deflectometer (FWD) data. *Research Report FL/DOT/SMO/00-442*. Tallahassee: State Materials Office, Florida Department of Transportation.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. (2014). *Pesquisa CNT de rodovias 2014: relatório gerencial*. Brasília: CNT : SEST : SENAT.

Dama, M. A. (2003). *Análise de comportamento da camada reciclada com espuma de asfalto na rodovia BR-290/RS*. Porto Alegre: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DEINFRA-SC. Departamento Estadual de Infraestrutura do Estado de Santa Catarina. (2012). *DEINFRA-SC-ES-P-09B/12: Reciclagem profunda de pavimento com adição de espuma de asfalto*.

Department for Transport. (2010). *New roads and street works act 1991 - Specification for the reinstatement of openings in highways* (3ª ed.). Londres.

Department of Transport. (1996). *Structural design of flexible pavements for interurban and rural roads: Draft TRH 4*. Pretoria.

DER/PR. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná. (2005). *DER/PR ES-P 32/05: Reciclagem de pavimento a frio "in situ" com espuma de asfalto*.

DER/SP. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. (2006). *DER/SP ET-DE-P00/033: Reciclagem in situ a frio com espuma de asfalto*.

DER/SP. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. (2006). *IP-DE-P00/001 - Projeto de pavimentação*. São Paulo.

Diefenderfer, B. K., & Apeagyei, A. K. (2011a). *Analysis of full-depth reclamation trial sections in Virginia. Rep. No. 11-R23*. Charlottesville: Virginia Center for Transportation Innovation and Research.

Diefenderfer, B., & Apeagyei, A. (2011b). Time-dependent structural response of full-depth reclamation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2253, *Transportation Research Board of the National Academies*, 3-9.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1979). *DNER-PRO 010/79. Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis: Procedimento A*. Rio de Janeiro.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1979). *DNER-PRO 011/79. Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis: Procedimento B*. Rio de Janeiro.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1994). *Projeto de restauração de pavimentos flexíveis - TECNAPAV. DNER-PRO 269/94*. Rio de Janeiro.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1996). *Manual de pavimentação* (2ª ed.). Rio de Janeiro: Publicação IPR-697.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (2000). *DNER-ES 405/2000: Reciclagem de pavimento a frio "in situ" com espuma de asfalto*. Rio de Janeiro.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2003). *DNIT 006/2003 - PRO. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento*. Rio de Janeiro.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2006a). *Manual de estudos de tráfego*. Rio de Janeiro: Publicação IPR-723.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2006b). *Manual de restauração de pavimentos asfálticos* (2ª ed.). Rio de Janeiro: Publicação IPR-720.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2006c). *Manual de pavimentação*. Rio de Janeiro: Publicação IPR-719.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2013). *DNIT 166/2013-ES: Reciclagem de pavimento a frio "in situ" com adição de espuma de asfalto – Especificação de serviço*. Rio de Janeiro.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2014). *DNIT 169/2014-ES: Reciclagem de pavimento em usina com espuma de asfalto - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro.

EAPA. European Asphalt Pavement Association. (2013). *Asphalt in figures 2012*. Bruxelas.

Epps, J. A. (1990). *Synthesis of highway practice 160. Cold-recycled bituminous concrete using bituminous materials*. Washington D.C.: Transportation Research Board.

Fu, P., Steven, B. D., Jones, D., & Harvey, J. T. (2009). Relating laboratory foamed asphalt mix resilient modulus tests to field measurements. *Road Materials and Pavement Design*, v. 10, n. 1, pp. 155-185.

Garg, N., & Thompson, M. R. (1999, Junho). Structural response of LVR flexible pavements at Mn/Road Project. *Journal of Transportation Engineering* v. 125 N°3, pp. 238-244.

Guatimosim, F. V. (2015). *Mechanical behaviour and structural performance of recycled foamed bitumen stabilized materials*. São Paulo: Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Horak, E. (2008). Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters: technical paper. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*. Vol 50 No. 2, (pp. 2-9).

Horak, E., & Emery, S. (2006). Falling weight deflectometer bowl parameters as analysis tool for pavement structural evaluations. *ARRB CONFERENCE, 22ND, 2006*. Canberra.

Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2ª ed.). Upper Saddle River, New Jersey, EUA: Prentice Hall.

INMET. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/>> Acesso em 21/12/2014.

Jenkins, K. J. (2000). *Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis of foamed bitumen*. Stellenbosch: Tese (Doutorado) - Stellenbosch University.

Jenkins, K., Molennar, A., de Groot, J., & van de Ven, M. (2000). Developments in the uses of foamed bitumen in road pavements. *Heron Journal*, 167-176.

Jones, D., Wu, R., & Louw, S. (2014). Comparison of full-depth reclamation with foamed asphalt and full-depth reclamation with no stabilizer in accelerated loading test. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2462, pp. 126-135.

Jooste, F., & Long, F. (2007). *A knowledge based structural design method for pavements incorporating bituminous stabilized materials*.

Kim, M. Y., Kim, D. Y., & Murph, M. R. (2013). Improved method for evaluating the pavement structural number with falling weight deflectometer deflections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2366, n. 1, pp. 120-126.

Labuz, J. F., Tang, S., & Cao, Y. (2012). *Structural evaluation of asphalt pavements with full-depth reclaimed base*. Minneapolis: Minnesota Department of Transportation.

Leek, C. (2010). *Review of the performance of in-situ foamed bitumen stabilised pavements in the City of Canning*. City of Canning.

Long, F., & Theyse, H. L. (2002). The development of structural design models for foamed bitumen treated materials. *South African Transport Conference*.

Lopes, F. M. (2012). *Pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico: avaliação estrutural a partir dos parâmetros de curvatura da bacia de deformação*. Campinas: Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.

Maccarrone, S., Holleran, G., & Leonard, D. J. (1993). Bitumen stabilisation - a new approach to recycling pavements. *Australian Asphalt Pavement Association Members' Conference*. Melbourne, Victoria.

Mallick, R. B., & Hendrix, G. (2004). Use of foamed asphalt in recycling incinerator ash for construction of stabilized base course. *Resources, conservation and recycling*, 42(3), pp. 239-248.

Marquis, B., Peabody, D., Mallick, R., & Soucie, T. (2003). *Determination of structural layer coefficient for roadway recycling using foamed asphalt. Final Report (Project 26)*. Durham: Recycled Materials Resource Center, University of New Hampshire.

Merril, D., Nunn, M., & Carswell, I. (2004). *A guide to the use and specification of cold recycled materials for the maintenance of road pavements*. Transportation Research Laboratory Report 611.

Milton, L. J., & Earland, M. (1999). *Design guide and specification for structural maintenance of highway pavements by cold in-situ recycling*. Transportation Research Laboratory Report 386.

Ministério dos Transportes. (2012, Setembro). *Ministério dos Transportes - PNLT - Relatório Executivo 2011*. Disponível em <<http://www.transportes.gov.br/conteudo/2818-pnlt-relatorio-executivo-2011.html>> Acesso em 15/11/2014.

Momm, L., & Domingues, F. A. (1995). Reciclagem de pavimentos a frio in situ - Superficial e profunda. *Cuiabá: 29ª Reunião Anual de Pavimentação*, pp. 569-601.

Nam, B., An, J., & Murphy, M. R. (2014, Fevereiro). Improvements to the AASHTO subgrade resilient modulus (MR) equation. *Geo-Congress 2014 Technical Papers*, pp. 2414-2425.

NAPA. National Asphalt Pavement Association. (2013). *Annual asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage: 2009-2012*.

NCHRP. National Cooperative Highway Research Program. (2011). *Recycling and reclamation of asphalt pavements using in-place methods*. Transportation Research Board.

Noureldin, A. S. (1993). New scenario for backcalculation of layer moduli of flexible pavements. *Transportation Research Record*, v. 1384.

Nunn, M., & Thom, N. (2002). *Foamix: Pilot scale trials and design considerations*. Viridis Report VR1.

Oliveira, P. C. (2003). *Contribuição ao estudo da técnica de reciclagem profunda na recuperação de pavimentos flexíveis*. Campinas: Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.

Pinto, I. E. (2002). *Estudo das características físicas e mecânicas de misturas recicladas com espuma de asfalto*. São Paulo.

PMSP. Prefeitura Municipal de São Paulo. (2009). *PMSP ETS-02/2009: Base de material fresado com espuma de asfalto*.

Queensland Department of Transport and Main Roads. (2012). *Pavement rehabilitation manual*. Brisbane.

Ramanujam, J., & Jones, J. (2007). Characterization of foamed-bitumen stabilisation. *International Journal of Pavement Engineering* v. 8, n. 2, pp. 111-112.

Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The Shell bitumen handbook* (5^a ed.). Tomas Telford.

Rohde, G. T. (1994). Determining pavement structural number from FWD testing. *Transportation Research Record*, v. 1448.

Romanoschi, S., Hossain, M., Gisi, A., & Heitzman, M. (2004). Accelerated pavement testing evaluation of the structural contribution of full-depth reclamation material stabilized with foamed asphalt. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1896, n. 1, 199-207.

Sachet, T. (2007). *Controle tecnológico de obras rodoviárias envolvendo a reciclagem in situ de bases granulares de pavimentos asfálticos*. Passo Fundo: Dissertação (Mestrado) - Universidade de Passo Fundo.

SANRA. South African National Roads Agency. (2014). *South African pavement engineering manual* (2^a ed., Vols. ISBN 978-1-920611-00-2). África do Sul.

Schimmoller, V. E. (2000). *Recycled materials in European highway environments uses, technologies, and policies*. FHWA.

Schwab, K. (2014). *The global competitiveness report 2014-2015*. Genebra: World Economic Forum.

Silva, A. M. (2011). *Avaliação do comportamento de pavimentos com camada reciclada de revestimentos asfálticos a frio com emulsão modificada por polímero*. São Paulo: Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Standards Australia. (1995). *AS 2891.13.1 - Methods of sampling and testing asphalt. Method 13.1: Determination of the resilient modulus of asphalt – Indirect tensile method*. Sidney.

Suzuki, C. Y., Pereira, A. O., Azevedo, A. M., Diaz, P. H., & Tuchumantel, O. (2005). Structural analysis of a test section using cold in place recycling. *2005 International Symposium on Pavement Recycling*. São Paulo.

Tao, M., & Mallick, R. B. (2009). Effects of warm-mix asphalt additives on workability and mechanical properties of reclaimed asphalt pavement material. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2126, pp. 151-160.

Thenoux, G., González, Á., & Dowling, R. (2007, Fevereiro). Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile. *Resources, Conservation and Recycling, Volume 49, Elsevier*, pp. 325-339.

Theyse, H. L., de Beer, M., & Rust, F. C. (1996). Overview of South African mechanistic pavement design method. *Transportation Research Record*, v. 1539.

Thompson, M. R., Garcia, L., & Carpenter, S. H. (2009). *Cold in-place recycling and full-depth recycling with asphalt products (CIR&FDRwAP)*. Springfield: ICT. Illinois Center for Transportation.

Transit New Zealand. (2007). *New Zealand supplement to the document, Pavement design - A guide to the structural design of road pavements (Austroads, 2004)*. Wellington, Nova Zelândia: Transit New Zealand.

Van Wijk, A. J. (1984). Structural comparison of two cold recycled pavement layers. *Transportation Research Record*, v. 954, *TRB, National Research Council*, 70-77.

Van Wyk, A., Yoder, E. J., & Wood, L. E. (1983). Determination of structural equivalency factors of recycled layers by using field data. *Transportation Research Record*, v. 898, pp. 122-132.

Wimsatt, A. J. (1999). Direct analysis methods for falling weight deflectometer deflection data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1655, n. 1, pp. 135-144.

Wirtgen GmbH. (2004). *Wirtgen cold recycling manual* (2^a ed.). Windhagen, Alemanha.

APÊNDICE A – PROCEDIMENTOS SIMPLIFICADOS PARA ESTIMATIVA DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DO SUBLEITO A PARTIR DE DADOS DEFLECTOMÉTRICOS

Procedimento do guia da AASHTO (1993)

O guia da AASHTO (1993) apresenta um procedimento simplificado para retroanalizar o módulo de resiliência do subleito, baseado na equação de Boussinesq com coeficiente de Poisson de 0,5:

$$E_{SL} = C \times \frac{(1 - \nu^2) \times P}{\pi \times d_r \times r} \xrightarrow{\nu=0,5} E_{SL} = C \times \frac{0,24 \times P}{d_r \times r} \quad (67)$$

Onde:

E_{SL} = módulo de resiliência do subleito retroanalizado [psi];

P = carga aplicada no ensaio [lb];

C = fator de ajuste campo x laboratório;

ν = coeficiente de Poisson;

r = distância do ponto de aplicação da carga [pol];

d_r = deflexão à distância r [pol].

Sugere-se que o valor retroanalizado seja minorado através de um fator multiplicador de ajuste “C”. O guia indica para pavimentos asfálticos $C=0,33$, porém Nam, An, & Murphy (2014) demonstraram que este é um valor muito conservador.

A distância r deve ser grande o suficiente para que a resposta ao carregamento tenha influência predominante do subleito e próxima o bastante para que os valores de deflexão não sejam pequenos demais, perdendo acurácia. Deve ser superior a 70% do raio do bulbo de tensões (a_e), na profundidade da interface subleito – pavimento. Ressalta-se o fato de que para realizar esta verificação, deve-se conhecer a espessura total do pavimento.

$$r \geq 0,7 \times a_e$$

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left(D \times \sqrt[3]{\frac{E_P}{E_{SL}}} \right)^2} \quad (68)$$

Onde:

a_e = raio do bulbo de tensões [pol];

a = raio do prato de aplicação da carga [pol];

D = espessura total do pavimento [pol];

E_p = módulo de resiliência efetivo do pavimento, conforme descrito no Capítulo 2.6.4 [psi].

Procedimento de Wimsatt (1999)

A comparação entre resultados retroanalizados do módulo resiliência do subleito obtidos com a equação da AASHTO (1993) e com o software baseado na teoria de sistema de camadas elásticas levou Wimsatt (1999) a considerar o fator de ajuste “C” igual a 0,8. O autor utilizou as deflexões a 1828,8 mm (ou 72 polegadas) de distância do ponto do carregamento.

$$E_{SL} = 0,8 \times \frac{0,24 \times P}{d_{72} \times 1828,8} = \frac{0,192 \times P}{d_{72} \times 1828,8} \quad (69)$$

Onde:

E_{SL} = módulo de resiliência do subleito [MPa];

P = carga aplicada [N];

d_{72} = deflexão à uma distância de 1828,8 mm (72 pol) do ponto de aplicação [mm].

Procedimento de Noureldin (1993)

O método desenvolvido por Noureldin (1993) utiliza as bacias deflectométricas obtidas por equipamento FWD para estimar o módulo de resiliência do subleito. O pavimento é considerado um sistema de duas camadas, ambas com coeficiente de Poisson de 0,5, e o carregamento aplicado pelo equipamento através de um prato de raio de 6 polegadas é de 9.000 lb, valores equivalentes a raio de 15 cm e carga de 4,1 tf.

O método possui duas abordagens, uma para quando se conhece a espessura total do pavimento e outra quando a mesma não é disponibilizada ou confiável.

No primeiro caso, calcula-se para cada medida de deflexão lida fora da área de aplicação do carregamento o valor de módulo de resiliência do subleito através da equação (70) e a espessura total efetiva do pavimento por meio da equação (71).

$$E_{SL} = \frac{(1 - \nu^2) \times P}{\pi \times d_x \times x} \xrightarrow{\nu=0,5 \text{ e } P=9.000 \text{ lb}} E_{SL} = \frac{2149}{d_x \times x} \quad (70)$$

$$T_x = \sqrt[3]{\frac{d_0 - d_x}{d_x \times \left(\frac{x}{3} - 1\right)}} \times \sqrt[2]{4 \times x^2 - 36} \quad (71)$$

Onde:

E_{SL} = módulo de resiliência do subleito [psi];

x = distância do ponto de aplicação da carga [pol];

d_x = deflexão à distância x [pol];

T_x = espessura total efetiva [pol];

d_0 = deflexão máxima [pol].

Os valores obtidos são plotados em função da distância x . Conhecida a espessura do pavimento, se obtém o valor da distância única, cuja linha de deflexão na superfície é igual à deflexão no topo da camada do subleito, e consequentemente o valor retroanalísado do módulo de resiliência do subleito. A Figura A.6.1 exemplifica a aplicação do procedimento gráfico.

Figura A.6.1 – Exemplo de gráficos para obtenção da distância única e do valor do módulo de resiliência do subleito de acordo com o método de Nouredin (1993)

Quando a espessura do pavimento não é conhecida, plota-se um gráfico extra, dos valores do produto entre deflexão e distância do geofone ao ponto de aplicação do carregamento, em função de x . O ponto máximo desta curva indica a espessura do pavimento, conforme descrito no Capítulo 2.6.1. De posse dessa informação, o procedimento é idêntico à abordagem anterior.

Procedimento de Rohde (1994)

Para estimativa do módulo de resiliência do subleito, Rohde (1994) utilizou como dados de entrada a bacia deflectométrica e a espessura total do pavimento sobre o subleito.

$$E_{SL} = 10^{k_4} \times (d_{1,5D} - d_S)^{k_5} \times D^{k_6} \quad (72)$$

Onde:

E_{SL} = módulo de resiliência do subleito [MPa];

D = espessura total do pavimento acima do subleito [mm];

$d_{1,5D}$ = deflexão a 1,5D mm do ponto de aplicação da carga [μ m];

d_S = deflexão a (1,5D + 450) mm do ponto de aplicação da carga [μ m];

k_i = coeficientes da Tabela A.6.1.

Tabela A.6.1 – Coeficientes para retroanálise de subleito propostos por Rohde (1994)

Espessura total do pavimento (mm)	k_4	k_5	k_6
≤ 380	9,138	-1,236	-1,903
Entre 380 e 525	8,756	-1,213	-1,780
> 525	10,655	-1,254	-2,453

Procedimento de Choubane e McNamara (2000)

Choubane & McNamara (2000) analisaram mais de 300 trechos com uma milha de extensão cada, no estado da Flórida, obtendo a seguinte relação:

$$E_{SL} = 0,03764 \cdot \left(\frac{P}{d_{36}} \right)^{0,898} \quad (73)$$

Onde:

E_{SL} = módulo de resiliência do subleito [psi];

P = carregamento aplicado [lb];

d_{36} = deflexão medida a uma distância radial de 36 polegadas do ponto de aplicação da carga [pol].

Procedimento de Garg e Thompson (1999)

Garg & Thompson (1999) realizaram seus estudos na pista experimental de Minnesota, conhecida como Mn/ROAD. Por realizar um levantamento não destrutivo de baixo custo e rápida execução, escolheram o FWD para avaliar o efeito da qualidade dos materiais granulares na resposta estrutural dos pavimentos. A estimativa do módulo do subleito foi feita através da equação (74):

$$E_{SL} = 10^{1,51-0,19 \times d_{36}+0,27 \times \log d_{36}} \quad (74)$$

Onde:

E_{SL} = módulo de resiliência do subleito [ksi];

d_{36} = deflexão medida a uma distância radial de 36 polegadas do ponto de aplicação da carga [pol].

Procedimento do Caltrans (2012)

O método do Caltrans (2012) de reciclagem profunda com espuma de asfalto apresenta procedimento semelhante ao da AASHTO (1993) para avaliação da resistência do subleito. Utiliza-se a equação de Boussinesq com valores das deflexões distantes 24 polegadas, aproximadamente 60 cm, do ponto de aplicação da carga e coeficiente de Poisson igual a 0,35.

$$E_{SL} = \frac{(1 - \nu^2) \times P}{\pi \times d_r \times r} \xrightarrow{\nu=0,35 \atop r=24 \text{ pol}} E_{SL} = 1,16 \times 10^{-2} \times \frac{P}{d_{24}} \quad (75)$$

Onde:

E_{SL} = módulo de resiliência retroanalisado do subleito [psi];

P = carga aplicada no ensaio [lb];

ν = coeficiente de Poisson;

r = distância do ponto de aplicação da carga [pol];

d_r = deflexão à distância r [pol];

d_{24} = deflexão distante 24 polegadas do ponto de aplicação da carga [pol].

APÊNDICE B – CORREÇÃO DAS DEFLEXÕES MÁXIMAS DEVIDO À TEMPERATURA

Dois procedimentos propostos pela AASHTO e pela AUSTROADS para correção das deflexões em função da temperatura são apresentados a seguir.

AASHTO (1993)

No guia da AASHTO (1993), a correção dos valores de deflexão máxima depende do tipo de base, granular ou cimentada, e da espessura do revestimento, além da temperatura. O valor padrão, por definição, é 20 °C. A Figura B.1 apresenta o ábaco utilizado para pavimentos de bases granulares.

Figura B.1 – Ábaco para correção da deflexão máxima de pavimentos asfálticos com base granular da AASHTO (1993)

Austroads (2011)

O guia de avaliação e restauração de pavimentos da Austroads (2011c) propõe não apenas a correção dos valores de deflexão máxima, como também do Fator de Curvatura, parâmetro da bacia deflectométrica que permite avaliar a probabilidade de fissuração da camada asfáltica já apresentado anteriormente (ver Tabela 2.10).

O fator de correção é aplicável apenas aos pavimentos asfálticos com espessura de revestimento maior que 25 mm e depende do tipo de equipamento utilizado: FWD, Viga Benkelman ou Deflectógrafo.

A obtenção do fator de correção é feita através de ábaco, como o da Figura B.2, que utiliza como informações de entrada a espessura do revestimento asfáltico e a razão entre a temperatura padronizada para o projeto e a temperatura de levantamento.

Figura B.2 – Ábaco para correção da deflexão máxima oriunda de levantamento com FWD em pavimentos asfálticos com base granular do Austroads (2011c)

ANEXO A – LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS DA RODOVIA SP 070

CONDICÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD
Rodovia SP-070		Trecho Taubaté > São Paulo				Sentido Decrescente		Pista Dupla		Faixa 03				
Início km 107,179		Final km 11,160		Equipamento Falling Weight Deflectometer				Revestimento		Raio de aplicação 15 cm				
Ponto km	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data e hora		Observação	
		Df1 0	Df2 20	Df3 30	Df4 45	Df5 65	Df6 90	Df7 120	Ar	Pav.				
36,400	4.135	53,2	37,7	34,9	26,9	19,3	12,3	8,0	16	22	22-03-12	4:19 AM		
36,360	4.114	61,6	42,7	41,3	32,9	19,8	11,1	7,4	16	22	22-03-12	4:20 AM		
36,320	4.079	72,8	51,2	46,4	33,2	24,8	14,3	9,1	16	22	22-03-12	4:20 AM		
36,280	4.107	62,6	43,8	37,3	28,1	20,0	12,0	7,5	16	22	22-03-12	4:21 AM		
36,240	4.086	70,3	50,2	39,4	25,2	18,4	11,3	6,8	16	22	22-03-12	4:22 AM		
36,200	4.093	66,4	47,2	40,0	32,4	22,8	15,3	11,5	16	22	22-03-12	4:22 AM		

CONDICÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD
RODOVIA SP-070 - Rodovia Ayrton Senna		TRECHO Itaquaquecetuba => Sao Paulo			SENTIDO Oeste			PISTA Dupla			FAIXA 3 - Fundo de Caixa			
INÍCIO estaca 1		FIM estaca 10			EQUIPAMENTO Falling Weight Deflectometer						RAIO DE APLICAÇÃO 15 cm			
estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data e hora		Observação	
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav				
1	4.093	294,1	187,6	93,3	37,8	17,4	9,6	7,0	23	32	06/10/12	12:31 PM	TRE	
2	4.213	185,0	102,1	59,3	36,4	17,5	13,2	9,5	23	32	06/10/12	12:35 PM	TRI	
3	4.178	179,6	118,7	81,8	55,6	26,8	22,9	14,0	23	32	06/10/12	12:38 PM	TRE	
4	4.185	194,0	96,9	54,7	36,3	22,1	16,9	11,3	23	32	06/10/12	12:40 PM	TRI	
5	4.043	245,9	159,4	93,7	50,1	25,1	18,9	13,0	23	32	06/10/12	12:43 PM	TRE	
6	4.156	207,3	108,4	46,7	23,7	12,7	8,0	4,5	23	32	06/10/12	12:44 PM	TRI	
7	4.107	223,6	125,3	69,0	35,7	15,2	8,8	4,0	23	32	06/10/12	12:45 PM	TRE	
8	3.916	303,0	135,9	67,9	43,6	21,5	15,4	9,4	23	32	06/10/12	12:48 PM	TRI	
9	4.015	210,7	116,8	70,1	43,2	18,2	14,0	8,2	23	32	06/10/12	12:51 PM	TRE	
10	4.001	214,6	107,9	45,9	24,9	16,1	11,6	7,3	23	32	06/10/12	12:51 PM	TRI	

CONDICÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD
RODOVIA SP-070 - Rodovia Ayrton Senna		TRECHO Itaquaquecetuba => Sao Paulo				SENTIDO Oeste			PISTA Dupla		FAIXA 3 - Rap Espumado			
INÍCIO estaca 1		FIM estaca 10				EQUIPAMENTO Falling Weight Deflectometer			RAIO DE APLICAÇÃO 15 cm					
estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data e hora		Observação	
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav				
1	3.937	242,9	167,9	113,0	79,6	40,7	18,3	2,3	21	22	06/10/12	5:19 PM	TRE	
2	4.241	115,6	61,3	34,1	23,0	12,9	10,4	7,5	21	22	06/10/12	5:31 PM	TRI	
3	4.220	124,3	67,4	40,5	30,9	19,4	16,1	11,7	21	22	06/10/12	5:33 PM	TRE	
4	4.213	111,2	56,5	31,0	21,0	13,0	11,5	8,7	17	22	06/10/12	5:54 PM	TRI	
5	4.107	141,3	86,2	54,9	36,5	19,9	13,5	9,0	17	22	06/10/12	6:13 PM	TRE	
6	4.220	97,6	52,8	29,7	19,8	11,0	8,1	5,1	17	22	06/10/12	6:22 PM	TRI	
7	4.156	118,2	68,1	39,4	25,7	10,8	7,9	4,0	17	22	06/10/12	6:40 PM	TRE	
8	3.994	175,6	107,5	61,9	35,3	13,9	6,7	4,3	17	22	06/10/12	6:43 PM	TRI	
9	4.149	122,5	72,0	42,3	29,7	13,5	11,6	7,0	17	22	06/10/12	6:48 PM	TRE	
10	4.185	95,1	51,6	30,7	22,2	12,9	9,4	6,1	17	22	06/10/12	6:51 PM	TRI	

CONDICÃO DEFLECTOMÉTRICA - FWD
RODOVIA SP-070 - Rodovia Ayrton Senna		TRECHO Itaquaquecetuba => Sao Paulo				SENTIDO Oeste			PISTA Dupla		FAIXA 3 - Revestimento (GAP Graded)			
INÍCIO estaca 1		FIM estaca 10				EQUIPAMENTO Falling Weight Deflectometer					RAIO DE APLICAÇÃO 15 cm			
estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data e hora		Observação	
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav				
1	3.895	237,0	174,1	107,1	77,5	35,9	16,1	2,8	18	39	06/10/12	7:34 PM	TRE	
2	4.220	104,9	58,7	29,2	21,0	12,1	9,8	7,0	18	39	06/10/12	7:35 PM	TRI	
3	4.220	114,9	69,1	37,1	29,1	17,5	14,5	10,8	18	39	06/10/12	7:37 PM	TRE	
4	4.248	97,1	51,6	26,2	20,7	13,1	11,4	8,5	18	39	06/10/12	7:38 PM	TRI	
5	4.114	134,9	83,7	46,5	33,4	15,9	12,9	8,3	18	39	06/10/12	8:08 PM	TRE	
6	4.255	106,8	56,2	27,7	20,1	12,0	8,5	5,0	18	39	06/10/12	8:09 PM	TRI	
7	4.199	117,8	69,4	32,7	23,3	12,2	7,2	3,7	18	39	06/10/12	8:10 PM	TRE	
8	4.079	156,4	103,4	52,1	34,7	17,3	11,2	7,1	18	39	06/10/12	8:11 PM	TRI	
9	4.178	121,9	76,6	30,9	22,1	12,8	9,9	6,4	18	39	06/10/12	8:12 PM	TRE	
10	4.248	105,1	61,2	27,8	21,3	12,5	9,0	6,1	18	39	06/10/12	8:12 PM	TRI	

RODOVIA		TRECHO		SENTIDO				PISTA		FAIXA		
SP-070 - Rodovia Ayrton Senna		Itaquaquecetuba ==> Sao Paulo		Oeste				Dupla		Revestimento (10 dias de cura)		
INÍCIO		FIM		EQUIPAMENTO				RAIO DE APLICAÇÃO				
estaca 1		estaca 10		Falling Weight Deflectometer				15 cm				
estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data e hora	Observação
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav		
1	4.298	80,6	59,8	43,3	33,1	22,9	13,1	6,7	23	26	16/10/12 7:48 PM	TRE
2	3.973	64,4	42,3	28,9	21,3	15,0	8,8	6,1	23	26	16/10/12 8:06 PM	TRI
3	4.192	65,7	46,0	33,2	27,3	20,8	14,0	9,5	23	26	16/10/12 7:50 PM	TRE
4	4.057	57,3	37,1	26,6	22,0	16,7	11,2	7,8	23	26	16/10/12 8:07 PM	TRI
5	4.107	66,4	44,4	32,3	25,9	19,6	12,8	8,7	23	26	16/10/12 7:52 PM	TRE
6	4.114	58,9	39,0	27,3	21,2	14,9	8,9	5,1	23	26	16/10/12 8:08 PM	TRI
7	4.100	61,2	41,9	29,6	22,3	15,6	8,8	4,9	23	26	16/10/12 7:54 PM	TRE
8	4.121	67,1	43,5	29,8	22,7	16,4	10,3	6,5	23	26	16/10/12 8:10 PM	TRI
9	4.043	59,1	41,3	28,9	22,6	16,5	10,6	6,4	23	26	16/10/12 7:57 PM	TRE
10	4.149	60,5	39,3	27,3	21,0	15,2	9,6	5,6	23	26	16/10/12 8:11 PM	TRI

RODOVIA		TRECHO		SENTIDO				PISTA		FAIXA		
SP-070 - Rodovia Ayrton Senna		Itaquaquecetuba ==> Sao Paulo		Oeste				Dupla		Revestimento (30 dias de cura)		
INÍCIO		FIM		EQUIPAMENTO				RAIO DE APLICAÇÃO				
estaca 1		estaca 10		Falling Weight Deflectometer				15 cm				
estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data e hora	Observação
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav		
1	4.227	61,2	41,8	30,7	23,1	17,1	10,5	6,7	18	49	05/11/12 11:36 PM	TRE
2	4.220	54,9	36,6	27,1	21,2	15,8	10,2	6,8	18	49	05/11/12 11:37 PM	TRI
3	4.234	48,4	33,9	26,5	22,8	18,5	12,6	9,4	18	49	05/11/12 11:44 PM	TRE
4	4.248	46,6	32,5	25,0	21,4	17,1	11,6	8,6	18	49	05/11/12 11:45 PM	TRI
5	4.206	48,5	34,7	26,6	22,8	18,2	12,5	9,1	18	49	05/11/12 11:46 PM	TRE
6	4.241	47,8	32,3	24,0	19,2	14,0	8,3	5,1	18	49	05/11/12 11:46 PM	TRI
7	4.234	50,7	34,7	26,2	21,2	15,6	8,7	5,0	18	49	05/11/12 11:47 PM	TRE
8	4.227	50,4	33,8	25,0	20,3	15,5	9,9	6,7	18	49	05/11/12 11:48 PM	TRI
9	4.192	45,5	32,3	24,4	20,2	15,3	9,8	6,4	18	49	05/11/12 11:49 PM	TRE
10	4.185	44,9	30,6	22,6	18,4	13,8	8,5	5,6	18	49	05/11/12 11:49 PM	TRI

RODOVIA		TRECHO		SENTIDO				PISTA		FAIXA			
SP-070 - Rodovia Ayrton Senna		Itaquaquecetuba ==> Sao Paulo		Oeste				Dupla		Revestimento (90 dias de cura)			
INÍCIO		FIM		EQUIPAMENTO				RAIO DE APLICAÇÃO					
estaca 1		estaca 10		Falling Weight Deflectometer				15 cm					
estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data e hora	Observação	
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav			
1	4.185	50,6	33,6	28,3	22,0	15,8	10,6	7,4	25	37	04/01/13 1:21 PM	TRE	
2	4.213	39,8	26,4	24,9	18,2	13,7	9,1	6,4	25	36	04/01/13 1:24 PM	TRI	
3	4.213	28,6	20,7	18,8	16,4	13,8	10,9	8,6	25	37	04/01/13 1:26 PM	TRE	
4	4.199	29,6	20,2	19,7	15,5	12,8	9,9	7,6	25	37	04/01/13 1:27 PM	TRI	
5	4.227	31,5	22,3	19,7	17,0	13,8	10,8	8,3	25	37	04/01/13 1:28 PM	TRE	
6	4.178	35,1	23,5	20,6	17,2	13,0	9,2	6,2	25	37	04/01/13 1:29 PM	TRI	
7	4.178	33,4	23,5	20,8	16,9	13,0	9,0	6,0	25	37	04/01/13 1:30 PM	TRE	
8	4.185	34,8	23,2	19,5	16,7	13,0	9,8	7,3	25	37	04/01/13 1:31 PM	TRI	
9	4.206	34,5	23,6	22,0	18,3	14,3	10,5	7,8	25	37	04/01/13 1:32 PM	TRE	
10	4.227	39,6	26,7	23,6	18,8	14,7	10,3	7,2	25	37	04/01/13 1:33 PM	TRI	

RODOVIA		TRECHO		SENTIDO			PISTA		FAIXA			
SP-070 - Rodovia Ayrton Senna		Itaquaquecetuba => Sao Paulo		Oeste			Dupla		Revestimento (180 dias de cura)			
INÍCIO		FIM		EQUIPAMENTO					RAIO DE APLICAÇÃO			
estaca 1		estaca 10		Falling Weight Deflectometer					15 cm			
estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data e hora	Observação
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav		
1	4.192	45,4	33,9	27,2	22,8	17,9	11,1	7,3	29	38	04/04/13 11:35 AM	TRE
2	4.227	30,9	23,6	20,3	17,0	14,2	10,2	7,4	30	37	04/04/13 11:36 AM	TRI
3	4.241	26,8	22,6	20,3	18,1	16,2	12,7	9,7	30	38	04/04/13 11:37 AM	TRE
4	4.213	25,9	21,0	18,6	16,3	14,4	11,2	8,4	30	37	04/04/13 11:38 AM	TRI
5	4.227	28,5	22,3	20,6	18,3	16,2	12,6	9,1	30	38	04/04/13 11:39 AM	TRE
6	4.220	28,0	21,8	18,8	15,9	13,4	9,4	6,3	30	37	04/04/13 11:40 AM	TRI
7	4.220	31,4	25,0	21,6	18,1	15,2	10,0	6,4	30	38	04/04/13 11:41 AM	TRE
8	4.206	30,6	24,9	20,5	17,5	15,5	10,5	7,3	30	37	04/04/13 11:42 AM	TRI
9	4.192	28,8	22,8	20,1	17,2	15,0	10,9	7,6	30	38	04/04/13 11:43 AM	TRE
10	4.213	27,0	21,2	18,1	15,4	13,1	9,4	6,5	30	38	04/04/13 11:44 AM	TRI

RODOVIA		TRECHO		SENTIDO		PISTA		FAIXA				
SP-070 - Rodovia Ayrton Senna		Itaquaquecetuba => Sao Paulo		Oeste		Dupla		Revestimento (270 dias de cura)				
INÍCIO		FIM		EQUIPAMENTO		RAIO DE APLICAÇÃO						
estaca 1		estaca 10		Falling Weight Deflectometer				15 cm				
estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data e hora	Observação
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav		
1	4.432	30,0	21,7	19,4	14,8	12,6	9,2	6,4	9	16	24/07/13 10:59 AM	TRE
2	4.411	21,9	15,5	14,3	11,3	10,5	7,9	5,7	9	16	24/07/13 11:01 AM	TRI
3	4.156	17,3	13,7	13,1	11,2	10,8	9,2	6,9	9	16	24/07/13 11:02 AM	TRE
4	4.149	17,7	13,3	12,6	10,6	10,1	8,5	6,3	9	16	24/07/13 11:03 AM	TRI
5	4.079	17,5	13,5	12,8	10,7	10,2	8,5	6,4	9	17	24/07/13 11:04 AM	TRE
6	4.269	19,0	13,5	12,5	10,2	9,4	7,4	5,0	9	16	24/07/13 11:06 AM	TRI
7	4.107	20,0	14,7	13,6	11,1	10,0	7,7	5,2	9	16	24/07/13 11:07 AM	TRE
8	4.298	19,2	14,4	13,3	10,9	10,2	8,4	6,0	9	16	24/07/13 11:08 AM	TRI
9	4.057	20,2	14,7	13,8	11,4	10,5	8,4	6,0	9	16	24/07/13 11:09 AM	TRE
10	4.107	21,0	15,5	14,3	11,8	10,7	8,0	5,9	9	16	24/07/13 11:11 AM	TRI

RODOVIA		TRECHO		SENTIDO			PISTA		FAIXA			
SP-070 - Rodovia Ayrton Senna		Itaquaquecetuba => Sao Paulo		Oeste			Dupla		Revestimento (330 dias de cura)			
INICIO		FIM		EQUIPAMENTO			RAIO DE APLICAÇÃO					
estaca 1		estaca 10		Falling Weight Deflectometer			15 cm					
estaca	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data e hora	Observação
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav		
1	4.368	30,7	25,1	20,8	17,0	13,6	9,6	6,9	19	23	31/08/13 9:02 PM	TRE
2	4.383	21,6	17,5	15,0	12,3	10,8	8,3	6,3	19	22	31/08/13 9:06 PM	TRI
3	4.361	21,0	18,9	17,6	16,1	14,1	11,7	9,2	19	23	31/08/13 9:07 PM	TRE
4	4.333	18,2	15,9	14,4	13,2	11,7	9,7	7,8	19	23	31/08/13 9:08 PM	TRI
5	4.397	19,4	17,1	15,5	14,0	12,5	10,3	8,3	19	23	31/08/13 9:08 PM	TRE
6	4.375	19,2	15,9	13,8	12,0	10,3	7,8	5,6	19	23	31/08/13 9:09 PM	TRI
7	4.390	19,5	16,9	14,8	12,7	10,8	7,9	5,4	19	23	31/08/13 9:10 PM	TRE
8	4.361	19,7	16,7	14,7	12,8	11,1	8,7	6,7	19	23	31/08/13 9:11 PM	TRI
9	4.368	19,5	16,4	15,1	13,3	11,6	8,9	6,9	19	23	31/08/13 9:12 PM	TRE
10	4.368	18,3	15,1	13,3	11,5	10,1	7,7	5,8	19	23	31/08/13 9:13 PM	TRI

RODOVIA SP-070		TRECHO Itaquaquecetuba > São Paulo		SENTIDO Crescente			PISTA Dupla - Oeste			FAIXA Revestimento (367 dias de cura)			
INÍCIO		FIM		EQUIPAMENTO			RAIO DE APLICAÇÃO						
Ponto 1,000		Ponto 10,000		Falling Weight Deflectometer			15 cm						
Ponto	Força (kgf)	VALORES DE DEFLEXÃO (0,01mm)							Temperatura (°C)		Data e hora		Observação
		Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Ar	Pav			
1,000	4.383	32,4	29,6	25,2	18,1	16,5	11,0	7,5	13	23	12/10/13	9:24 AM	TRE
2,000	4.375	21,0	18,3	16,4	11,6	10,8	8,2	6,1	13	23	12/10/13	9:26 AM	TRI
3,000	4.354	21,7	21,0	17,7	14,6	15,5	12,4	9,8	13	23	12/10/13	9:26 AM	TRE
4,000	4.383	17,6	17,1	14,8	12,8	11,9	9,8	8,2	13	23	12/10/13	9:28 AM	TRI
5,000	4.347	18,7	18,1	17,0	13,5	12,8	10,6	8,4	13	23	12/10/13	9:29 AM	TRE
6,000	4.361	18,6	16,2	14,8	11,8	11,0	8,0	6,0	13	23	12/10/13	9:30 AM	TRI
7,000	4.340	22,4	22,1	19,8	13,9	13,1	9,8	6,7	13	23	12/10/13	9:31 AM	TRE
8,000	4.368	19,9	18,0	15,9	12,0	11,5	9,2	7,4	13	24	12/10/13	9:31 AM	TRI
9,000	4.333	20,6	20,2	17,4	15,2	14,3	10,2	7,8	13	24	12/10/13	9:32 AM	TRE
10,000	4.326	19,5	18,2	16,0	12,6	11,5	8,9	6,5	13	24	12/10/13	9:33 AM	TRI