GABRIEL GARCIA DE ABREU LIMA

**Considerações sobre metodologias para o dimensionamento estrutural de
pavimentos reciclados com camada cimentada**

São Paulo
2018

GABRIEL GARCIA DE ABREU LIMA

Considerações sobre metodologias para o dimensionamento estrutural de pavimentos reciclados com camada cimentada

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se na unidade que aloja o Programa de Pós-graduação)

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

Área de Concentração: Engenharia de
Transportes

Orientador: Prof. Dr. Carlos Yukio Suzuki

São Paulo

2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

GABRIEL GARCIA DE LIMA

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, 18 de dezembro de 2018

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

Catálogo-na-publicação

LIMA, GABRIEL GARCIA DE

Considerações sobre metodologias para o dimensionamento estrutural de pavimentos reciclados com camada cimentada / G. G. D. LIMA -- versão corr.
- São Paulo, 2018.

236 p.

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

1.Pavimentos 2.Reciclagem 3.Cimento Portland I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

Nome: LIMA, Gabriel Garcia de Abreu

Título: Considerações sobre metodologias para o dimensionamento estrutural de pavimentos reciclados com camada cimentada

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

Aprovado em: 12 de Novembro de 2018.

Banca Examinadora

Prof. Dr.: Carlos Yukio Suzuki.

Instituição: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Julgamento: Aprovado.

Prof. Dr.: Washington Peres Núñez.

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Julgamento: Aprovado.

Prof. Dr.: Glauco Tulio Pessa Fabbri.

Instituição: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Julgamento: Aprovado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor **Carlos Yukio Suzuki** pelo incentivo e orientação, por toda a paciência, empenho e conhecimento que sempre me compartilhou neste trabalho e convívio.

Aos amigos de trabalho que me auxiliaram e encorajaram: **Caio, Flaviane, Marcelo, Vinicius, Claudioni, Raphael, Antonio França, Antônio Leite e Arthur**. Em especial ao **Marcelo** pela assistência exclusiva e **Vinicius** com quem dividi boa parte das emoções desta jornada.

À **Planservi Engenharia** pelo incentivo e parceria na realização deste trabalho.

Aos **professores** da Escola Politécnica pelos ensinamentos partilhados e colegas de PTR. Em especial a professora **Rosângela Motta** pelos comentários tecidos.

À minha doce **vó Júlia** e talentosa **tia Malu** pelas revisões deste trabalho.

Pelo apoio de minha querida família, meu **pai Fábio**, minha **mãe Nívia**, minha **irmã Bárbara**, meu **cunhado Kléber** e minhas **sobrinhas Carol e Bia**, fundamentais para que eu chegasse até aqui. Não menos importantes, meus queridos **sogros Arlete e Edson**, pela ajuda na minha ausência.

Aos meus **grandes amigos** que compreenderam, muitas vezes, o meu desaparecimento: **Eric, Aline, Gui e Nay**.

Ao **Hope** por sua fiel companhia.

Agradeço a minha **amada esposa Hadassa** por toda atenção, apoio incondicional, compreensão e cuidado comigo nesta jornada.

A **todos** que não foram citados e participaram para a conclusão de mais uma etapa da minha vida.

Por fim, agradeço a **Deus**, pela Sua **Graça e Amor**, por prover força e sabedoria para chegar até aqui, **Ebenézer**.

“A sabedoria é a coisa principal; adquiere, pois a sabedoria emprega tudo o que possuis na aquisição de entendimento.”

Provérbios 4:7

RESUMO

Lima, Gabriel Garcia de Abreu. **Considerações sobre metodologias para o dimensionamento estrutural de pavimentos reciclados com camada cimentada.** 2018. 233 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

As alternativas de reciclagem se apresentam com elevado potencial para acrescentar ganho à capacidade estrutural de um pavimento, simultaneamente, aproveitando os materiais compostos do pavimento existente, acarretando benefícios econômicos e ambientais, quando comparadas às soluções de reconstrução tradicionais. Diversos métodos de reciclagem de pavimentos têm sido aplicados no Brasil, particularmente, a reciclagem com adição de cimento, entretanto, não há um método consolidado para o dimensionamento estrutural dessa solução, o que gera dificuldades e muitas vezes desconfiança no seu emprego. Para se desenvolver um procedimento de dimensionamento que contemple esse tipo de solução, foram estudados métodos presentes na bibliografia internacional. Uma abordagem detalhada sobre cada método é apresentada, denotando seus principais aspectos, resultando em uma proposta de procedimento para o dimensionamento estrutural de pavimentos com camadas recicladas com cimento, de forma a atender a metodologia do Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) aplicando conceitos de análise mecanicista. A fim de corroborar os assuntos abordados, foi realizado um estudo paramétrico com o desenvolvimento de equações para correlação entre as deformações críticas esperadas na estrutura reciclada, resultando em modelos de dimensionamento para a camada reciclada com cimento e, por fim, o estudo de caso com o dimensionamento estrutural pelos métodos abordados em segmentos da rodovia SP 270.

Palavras-chave: Pavimentos semirrígidos. Dimensionamento estrutural. Reciclagem profunda. Cimento.

ABSTRACT

Lima, Gabriel Garcia de Abreu. **Considerations on methodologies for the structural design of recycled pavements with cemented layer**. 2018. 233 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

Recycling alternatives are presented with a high potential to add gain to the structural capacity of a pavement, making use of the existing pavement composite materials while bringing economic and environmental benefits when compared to traditional reconstruction techniques. Several methods of pavement recycling have been applied in Brazil, particularly the recycling with cement addition; however, there is no consolidated method for the structural design of this solution, which generates difficulties and often distrust regarding its employment. In order to develop a design procedure taking into account this sort of solution, methods described in international bibliography have been examined. A detailed approach to each method denoting its main aspects is presented, resulting in a proposed procedure for the structural design of pavements with cement recycled layers so as to comply with the methodology contained in the Paving Manual of National Department of Transport Infrastructure (DNIT) by applying concepts of mechanistic analysis. In order to corroborate the issues discussed, a parametric study has been carried out with the development of equations to correlate the critical deformations expected in the recycled structure, resulting in design models for the cement recycled layer and finally, the case study of a structural design on segments of Highway SP 270 using the methods discussed.

Keywords: Semi-rigid pavements. Structural design. Deep recycling. Cement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Densidade da malha rodoviária pavimentada por país, em km/1.000 km ² (CNT, 2016).....	21
Figura 1.2 – Ranking de qualidade das rodovias dos países da América do Sul (CNT, 2016)	22
Figura 2.1 – Tipos de Reciclagem (adaptado de ARRA, 2001).....	27
Figura 2.2 – Esquema simplificado do conjunto para reciclagem profunda com cimento (adaptado de Wirtgen GmbH, 2004).....	31
Figura 2.3 – Esquema do conjunto para reciclagem profunda com cimento com misturador de lama (adaptado de Wirtgen GmbH, 2004).....	31
Figura 2.4 – Esquema do rotor de moagem (adaptado de Minguela, 2011)	32
Figura 2.5 – Evolução da deterioração do pavimento em função do tempo (adaptado de Wirtgen GmbH, 2012)	37
Figura 2.6 – Condição do pavimento e métodos indicados de reciclagem <i>in situ</i> (adaptado de NCHRP, 2011)	38
Figura 2.7 – Tipos de deterioração (adaptado de Wirtgen GmbH, 2010).....	39
Figura 2.8 – Linhas de contorno de igualdade da deflexão na estrutura do pavimento (adaptado de Noureldin, 1993).....	47
Figura 2.9 – Exemplo de análise gráfica da retroanálise do subleito (adaptado de CALTRANS, 2013).....	50
Figura 2.10 – Exemplo de análise gráfica do DCP do subleito (adaptado de CALTRANS, 2013).....	53
Figura 2.11 – Ilustração do cálculo da Área de Penetração (adaptado de Merrill et al., 2004).....	54
Figura 3.1 – Avaliação da possibilidade de reciclagem profunda <i>in situ</i> (adaptado de Milton e Earland, 1999)	56
Figura 3.2 – Roteiro para dimensionamento de pavimentos com bases recicladas com cimento (adaptado de Milton e Earland, 1999).....	59
Figura 3.3 – Ábacos de dimensionamento para determinação das espessuras das camadas de revestimento asfáltico e reciclagem com cimento para rodovias de tráfego classes 1 e 2 (adaptado de Milton e Earland, 1999)	62
Figura 3.4 – Identificação das famílias dos materiais abordados no guia (adaptado de Merrill et al., 2004)	63

Figura 3.5 – Curvas granulométricas para as misturas recicladas (adaptado de Merrill et al., 2004)	66
Figura 3.6 – Classificação do desempenho das camadas recicladas (adaptado de Merrill et al., 2004)	67
Figura 3.7 – Espessuras de projeto para tráfego tipo 2 ou superior e fundação tipo 1 (adaptado de Merrill et al., 2004)	69
Figura 3.8 – Espessuras de projeto para tráfego tipo 2 ou superior e fundação tipo 2 (adaptado de Merrill et al., 2004)	69
Figura 3.9 – Espessuras de projeto para tráfego tipo 2 ou superior e fundação tipo 3 (adaptado de Merrill et al., 2004)	70
Figura 3.10 – Espessuras de projeto para tráfego tipo 2 ou superior e fundação tipo 4 (adaptado de Merrill et al., 2004)	70
Figura 3.11 – Fluxograma das investigações de campo no processo de reciclagem <i>in situ</i> com cimento (adaptado de CALTRANS, 2013)	79
Figura 3.12 – Tipos de estrutura de pavimento recomendada (adaptado de Andalucía, 2007)	86
Figura 3.13 – Catálogo de soluções para reabilitação em reciclagem com cimento (adaptado de Castilla y León, 2004).....	91
Figura 4.1 – Estruturas consideradas para o estudo paramétrico	95
Figura 4.2 – Parâmetros avaliados e pontos críticos atuantes nas estruturas	96
Figura 4.3 – Desempenho da base reciclada em função do MR, D_0 e h – Caso 1..	105
Figura 4.4 – Desempenho da base reciclada em função do MR, σ_t e h – Caso 1 ..	106
Figura 4.5 – Desempenho da base reciclada em função do MR, ϵ_v e h – Caso 1 ..	106
Figura 4.6 – Desempenho da base reciclada em função do MR, D_0 e h – Caso 2..	107
Figura 4.7 – Desempenho da base reciclada em função do MR, ϵ_t e h – Caso 2...	107
Figura 4.8 – Desempenho da base reciclada em função do MR, σ_t e h – Caso 2 ..	108
Figura 4.9 – Desempenho da base reciclada em função do MR, ϵ_v e h – Caso 2 ..	108
Figura 4.10 – Gráfico comparativo dos modelos de deflexão máxima admissível ..	115
Figura 4.11 – Gráfico comparativo dos modelos de deformação horizontal admissível	117
Figura 4.12 – Gráfico comparativo dos modelos de tensão admissível	120
Figura 4.13 – Gráfico comparativo dos modelos de deformação vertical admissível	122

Figura 5.1 – Exemplo gráfico para obtenção da distância única e do valor do módulo de resiliência do subleito (Adaptado de Nouredin, 1993)	131
Figura 5.2 – Método de dosagem para reciclagem com adição de cimento (Adaptado de Fedrigo, 2015)	136
Figura 5.3 – Espessura da camada reciclada x solicitações do eixo padrão em função da deflexão no topo do revestimento (D_0) – Caso 1	146
Figura 5.4 – Espessura da camada reciclada x solicitações do eixo padrão em função da tensão de tração da camada cimentada (σ_t) – Caso 1	147
Figura 5.5 – Espessura da camada reciclada x solicitações do eixo padrão em função da deformação vertical no subleito (ϵ_v) – Caso 1	147
Figura 5.6 – Espessura da camada reciclada x solicitações do eixo padrão em função da deflexão no topo do revestimento (D_0) – Caso 2	148
Figura 5.7 – Espessura da camada reciclada x solicitações do eixo padrão em função da deformação horizontal no revestimento (ϵ_t) – Caso 2	148
Figura 5.8 – Espessura da camada reciclada x solicitações do eixo padrão em função da tensão de tração da camada cimentada (σ_t) – Caso 2	149
Figura 5.9 – Espessura da camada reciclada x solicitações do eixo padrão em função da deformação vertical no subleito (ϵ_v) – Caso 2	149
Figura 5.10 – Fluxograma para dimensionamento de pavimento com reciclagem profunda e adição de cimento	153
Figura 6.1 – Valores de IGI máximo do trecho em estudo	155
Figura 6.2 – Fator de correção da deflexão em função da temperatura do revestimento asfáltico (adaptado da IP-DE-P00/003 DER/SP, 2006)	156
Figura 6.3 – Valores de deflexão máxima do trecho em estudo (D_0)	157
Figura 6.4 – Valores do raio de curvatura do trecho em estudo (R)	157
Figura 6.5 – Valores de curvatura da bacia deflectométrica do trecho em estudo (SCI)	158
Figura 6.6 – Valores de curvatura da bacia deflectométrica do trecho em estudo (BDI)	158
Figura 6.7 – Valores de curvatura da bacia deflectométrica do trecho em estudo (BCI)	159
Figura 6.8 – Segmentação homogênea obtida pela deflexão máxima (D_0)	160
Figura 6.9 – Dimensionamento do revestimento asfáltico para tráfegos tipos 1 e 2 (adaptado de Milton e Earland, 1999)	169

Figura 6.10 – Dimensionamento da camada cimentada para tráfegos tipos 1 e 2 (adaptado de Milton e Earland, 1999)	169
Figura 6.11 – Classificação da mistura reciclada quanto a rigidez (adaptado de Merrill et al., 2004)	171
Figura 6.12 – Dimensionamento das camadas de reciclagem com cimento e revestimento asfáltico, fundação tipo 1 (adaptado de Merrill et al., 2004)	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características do tipo de deterioração (adaptado de Wirtgen GmbH, 2010)	39
Tabela 2.2 – Valores de deflexão máxima que indicam baixa capacidade estrutural na África do Sul (adaptado de SANRA, 2014).....	42
Tabela 2.3 – Valores de raio de curvatura que indicam baixa capacidade estrutural (adaptado de DNER-PRO 011/79, 1979 e SANRA, 2014).....	44
Tabela 2.4 – Valores de SCI que indicam baixa capacidade estrutural (adaptado de Fabrício et al., 1988 e Horak, 2008)	45
Tabela 2.5 – Valores de BDI e BCI que indicam baixa capacidade estrutural (adaptado de Fabrício et al., 1988 e SANRA, 2014)	46
Tabela 2.6 – Capacidade de suporte mínima do subleito	48
Tabela 2.7 – Critérios de avaliação do subleito por meio de retroanálise (adaptado de CALTRANS, 2013)	49
Tabela 2.8 – Critérios de avaliação do subleito por meio do DCP (adaptado de CALTRANS, 2013).....	52
Tabela 2.9 – Classificação da fundação pelo DCP (adaptado de Merrill et al., 2004).....	54
Tabela 3.1 – Classificação da granulometria ideal para reciclagem com cimento <i>in situ</i> (adaptado de Milton e Earland, 1999).....	58
Tabela 3.2 – Classificação das rodovias (adaptado de Milton e Earland, 1999)	58
Tabela 3.3 – Espessuras da camada reciclada com cimento para rodovias classe 3 e 4 (adaptado de Milton e Earland, 1999)	60
Tabela 3.4 – Características mínimas da infraestrutura remanescente para rodovias Classes 1 e 2 (adaptado de Milton e Earland, 1999).....	60
Tabela 3.5 – Espessura equivalente da camada reciclada em relação à base granular (adaptado de Milton e Earland, 1999)	61
Tabela 3.6 – Classificação das rodovias (adaptado de Merrill et al., 2004)	64
Tabela 3.7 – Classificação do suporte de projeto pelo MR em relação à fundação existente (adaptado de Merrill et al., 2004)	67
Tabela 3.8 – Espessuras da camada reciclada com cimento para rodovias classe 2, 3 e 4 (adaptado de Merrill et al., 2004)	71
Tabela 3.9 – Coeficientes estruturais dos materiais (adaptado de AASHTO, 1993).....	73
Tabela 3.10 – Coeficientes de drenagem (adaptado de AASHTO, 1993).....	73

Tabela 3.11 – Nível de confiança de projeto recomendado (adaptado de AASHTO, 1993)	74
Tabela 3.12 – Coeficientes de distribuição normal correspondentes a diferentes níveis de confiabilidade (adaptado de AASHTO, 1993)	75
Tabela 3.13 – Espessura mínima de revestimento em concreto asfáltico (adaptado de AASHTO, 1993)	76
Tabela 3.14 – Coeficientes estruturais calculados para camada reciclada com cimento obtidos por retroanálise (adaptado de Diefenderfer e Apeagyei, 2011).....	77
Tabela 3.15 – Fator de distribuição do tráfego nas faixas de rolamento (adaptado de CALTRANS, 2013)	81
Tabela 3.16 – Fatores de equivalência estrutural (adaptado de CALTRANS, 2013)	83
Tabela 3.17 – Classificação das rodovias (adaptado de Andalucía, 2007)	86
Tabela 3.18 – Espessura do conjunto de camada em concreto asfáltico em função do tráfego previsto (adaptado de Andalucía, 2007).....	87
Tabela 3.19 – Classificação do tipo de mistura reciclada com cimento (adaptado de Andalucía, 2007)	87
Tabela 3.20 – Classificação da fundação (adaptado de Andalucía, 2007).....	88
Tabela 3.21 – Classificação do tráfego pesado (adaptado de Castilla y León, 2004)	90
Tabela 3.22 – Classificação da fundação sob a camada reciclada (adaptado de Castilla y León, 2004).....	91
Tabela 3.23 – Resumo das características observadas nas metodologias para o dimensionamento de estruturas com reciclagem com cimento	94
Tabela 4.1 – Módulo de resiliência de misturas recicladas com cimento obtidos na literatura	98
Tabela 4.2 – Valores de Poisson obtidos na literatura	99
Tabela 4.3 – Estrutura semirrígida base cimentada – caso 1	100
Tabela 4.4 – Estrutura invertida com sub-base cimentada – caso 2	101
Tabela 4.5 – Parâmetros de curvatura e bacia deflectométrica	102
Tabela 4.6 – Parâmetros e coeficientes do estudo paramétrico, caso 1 – estrutura semirrígida.....	103
Tabela 4.7 – Parâmetros e coeficientes do estudo paramétrico, caso 2 – estrutura invertida.....	104
Tabela 4.8 – Parâmetros fixados para análise, caso 1 – estrutura semirrígida	105

Tabela 4.9 – Parâmetros fixados para análise, caso 2 – estrutura invertida	105
Tabela 4.10 – Valores extremos de deflexão máxima obtidos – caso 1 e 2.....	110
Tabela 4.11 – Valores extremos de tensão máxima obtidos – casos 1 e 2.....	111
Tabela 4.12 – Valores extremos de deformação vertical obtidos – casos 1 e 2.....	112
Tabela 4.13 – Valores extremos de deformação horizontal obtidos – caso 2	113
Tabela 4.14 – Autores/normas e coeficientes abordados para modelos de deflexão máxima admissível.....	115
Tabela 4.15 – Autores/normas e coeficientes abordados para deformação horizontal admissível	117
Tabela 4.16 – Autores/normas e coeficientes abordados para tensão admissível..	119
Tabela 4.17 – Autores/normas e coeficientes abordados para deformação vertical admissível	122
Tabela 5.1 – Valores empregados na análise (adaptado de Balbo, 2007).....	127
Tabela 5.2 – Resultado com apresentação dos coeficientes estruturais estimados (adaptado de Balbo, 2007).....	128
Tabela 5.3 – Faixa granulométrica para mistura reciclada <i>in situ</i> com adição de cimento e brita (adaptado de DER/SP ET-DE-P00/035, 2006)	135
Tabela 5.4 – Faixa granulométrica para mistura reciclada <i>in situ</i> com adição de cimento (adaptado de DNIT 167/2013-ES, 2013)	135
Tabela 5.5 – Parâmetros de SCI, BDI e BCI, limites sugeridos para indicativo de baixa capacidade estrutural (adaptado de Horak, 2008 e SANRA, 2014).....	141
Tabela 5.6 – Espessura de revestimento asfáltico mínima em função do tráfego (adaptado de DNIT IPR-719, 2006).....	142
Tabela 5.7 – Parâmetros fixados para análise, caso 1 – estrutura semirrígida	145
Tabela 5.8 – Parâmetros fixados para análise, caso 2 – estrutura invertida	146
Tabela 5.9 – Valores de espessuras da camada reciclada para estrutura semirrígida caso 1.....	150
Tabela 5.10 – Valores de espessuras da camada reciclada para estrutura semirrígida invertida caso 2.....	151
Tabela 6.1 – Estruturas do pavimento existente verificadas através de cavas no pavimento.....	154
Tabela 6.2 – Características geotécnicas do subleito local.....	161
Tabela 6.3 – Rigidez obtida pelo geofone D ₁₂₀ na segmentação homogênea.....	162
Tabela 6.4 – Rigidez obtida pelo <i>software</i> BAKFAA – Pista Crescente	163

Tabela 6.5 – Rigidez obtida pelo <i>software</i> BAKFAA – Pista Decrescente	164
Tabela 6.6 – Envoltória dos principais dados obtidos	165
Tabela 6.7 – Resumo das soluções adotadas.....	167
Tabela 6.8 – Estrutura do pavimento adotada no trecho proposto.....	167
Tabela 6.9 – Principais dados para o dimensionamento	168
Tabela 6.10 – Dimensionamento estrutural TRL386	170
Tabela 6.11 – Dimensionamento estrutural TRL611	172
Tabela 6.12 – Parâmetros de dimensionamento AASHTO	172
Tabela 6.13 – Dimensionamento estrutural AASHTO	174
Tabela 6.14 – Dimensionamento estrutural CALTRANS.....	176
Tabela 6.15 – Valores admissíveis e obtidos do dimensionamento estrutural	177
Tabela 6.16 – Dimensionamento estrutural Andalucia.....	177
Tabela 6.17 – Valores admissíveis e obtidos do dimensionamento estrutural	178
Tabela 6.18 – Dimensionamento estrutural Castilla y León	178
Tabela 6.19 – Parâmetros para dimensionamento método semi-empírico	180
Tabela 6.20 – Parâmetros fixados para análise	181
Tabela 6.21 – Dimensionamento estrutural proposto semirrígido	182
Tabela 6.22 – Dimensionamento estrutural proposto invertido	182
Tabela 6.23 – Resumo do dimensionamento estrutural das metodologias investigadas	183
Tabela 6.24 – Resumo dos tipos de soluções analisadas.....	186
Tabela 6.25 – Resumo dos materiais adotados	186
Tabela 6.26 – Resumo das soluções de restauração e reciclagem profunda	187
Tabela 6.27 – Resumo das estruturas de pavimento novo	187
Tabela 6.28 – Planilha orçamentária para intervenção PFS	188
Tabela 6.29 – Planilha orçamentária para intervenção PFB	188
Tabela 6.30 – Planilha orçamentária para intervenção PSRS	189
Tabela 6.31 – Planilha orçamentária para intervenção PSRB	189
Tabela 6.32 – Planilha orçamentária para intervenção PSRIS.....	189
Tabela 6.33 – Planilha orçamentária para intervenção PSRIB.....	190
Tabela 6.34 – Planilha orçamentária para intervenção RSR.....	190
Tabela 6.35 – Planilha orçamentária para intervenção RSRB	190
Tabela 6.36 – Planilha orçamentária para intervenção RSRI.....	191
Tabela 6.37 – Planilha orçamentária para intervenção RSRIB	191

Tabela 6.38 – Planilha orçamentária para intervenção R7	191
Tabela 6.39 – Planilha orçamentária para intervenção R2.....	191
Tabela 6.40 – Planilha orçamentária para intervenção DP	192
Tabela 6.41 – Resumo dos custos das soluções propostas	192

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ARRA	<i>Asphalt Recycling and Reclaiming Association</i>
BGTC	Brita Graduada Tratada Cimento
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CE	Coeficiente Estrutural
DCP	<i>Dynamic Cone Penetration</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FDR	<i>Full-Depth Reclamation</i>
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i>
IECA	Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones
IGG	Índice de Gravidade Global
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LWD	<i>Light Weight Deflectometer</i>
MR	Módulo de Resiliência
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
PMSP	Prefeitura Municipal de São Paulo
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RCS	Resistência à Compressão Simples
RTF	Resistência à Tração na Flexão
SN	<i>Structural Number</i>
TRL	<i>Transport Research Laboratory</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos	23
1.2	Justificativa.....	23
1.3	Estruturação	24
2	RECICLAGEM DE PAVIMENTOS	26
2.1	Tipos de reciclagem	27
2.2	Reciclagem Profunda	30
2.3	Reciclagem com Cimento	32
2.4	Critérios para execução da reciclagem profunda	37
2.4.1	Critérios de avaliação da superfície.....	38
2.4.2	Critérios deflectométricos	41
2.4.2.1	Deflexão máxima.....	42
2.4.2.2	Parâmetros da bacia deflectométrica	43
2.4.3	Capacidade de suporte mínima do subleito.....	47
3	EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS RECICLADOS COM CIMENTO	55
3.1	Inglaterra	55
3.1.1	TRL386.....	55
3.1.2	TRL611	63
3.2	Estados Unidos da América	71
3.2.1	AASHTO.....	71
3.2.2	CALTRANS.....	77
3.3	Espanha	84
3.3.1	Andalucía.....	84
3.3.2	Castilla y León	88
3.4	Aspectos relevantes	92

4	ESTUDO PARAMÉTRICO DE PAVIMENTOS RECICLADOS COM CAMADA CIMENTADA	95
4.1	Aspectos Metodológicos	96
4.2	Características dos materiais constituintes	97
4.2.1	Revestimento	97
4.2.2	Base ou sub-base cimentada	97
4.2.3	Base granular	99
4.2.4	Infraestrutura remanescente	99
4.2.5	Subleito	100
4.2.6	Parâmetros adotados	100
4.3	Indicadores estruturais analisados	101
4.4	Apresentação dos resultados	103
4.5	Análise dos Parâmetros Estudados	104
4.5.1	Deflexão (D_0)	109
4.5.2	Tensão de tração (σ_t)	110
4.5.3	Deformação vertical (ϵ_v)	111
4.5.4	Deformação horizontal (ϵ_t)	112
4.6	Comportamento dos materiais à fadiga	113
4.6.1	Modelos de fadiga da camada asfáltica – deflexões	114
4.6.2	Modelos de fadiga da camada asfáltica – deformações	116
4.6.3	Modelos de fadiga da camada cimentada – tensões	118
4.6.4	Modelos de fadiga da infraestrutura remanescente ou subleito	121
5	CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO PROPOSTO PARA PAVIMENTOS RECICLADOS COM CIMENTO	124
5.1	Considerações iniciais	124
5.2	Esforços atuantes	124
5.3	Esforços resistentes	125
5.4	Coeficiente de equivalência estrutural	126

5.4.1	Estimativa simplificada do coeficiente estrutural.....	126
5.5	Infraestrutura existente e mistura reciclada.....	129
5.5.1	Caracterização da infraestrutura.....	129
5.5.2	Suporte mínimo do subleito	133
5.5.3	Dosagem da mistura reciclada com cimento	134
5.5.4	Espessura da camada reciclada.....	137
5.6	Drenagem	138
5.7	Condição funcional.....	139
5.8	Condição estrutural	140
5.9	Dimensionamento	142
5.9.1	Fluxograma proposto.....	152
6	ESTUDO DE CASO – SP 270	154
6.1	TRL386	168
6.2	TRL611	170
6.3	AASHTO	172
6.4	CALTRANS	174
6.5	Andalucía	176
6.6	Castilla y León.....	177
6.7	Método proposto	179
6.8	Resumo do dimensionamento estrutural.....	182
6.9	Análise econômica das soluções indicadas	184
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	194
7.1	Conclusões	194
7.2	Recomendações para pesquisas futuras	196
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	198
	ANEXO A – DADOS DE LEVANTAMENTO - RODOVIA SP 270	205
	ANEXO B – DADOS DA RETROANÁLISE	215

ANEXO C - DADOS DE SAÍDA DO <i>SOFTWARE</i> BAKFAA 2.0	227
ANEXO D - DADOS DE SAÍDA DO <i>SOFTWARE</i> ELSYM-5	234

1 INTRODUÇÃO

O pavimento é uma estrutura destinada a suportar os esforços gerados pela ação do tráfego, proporcionando aos usuários conforto e segurança, e também visa garantir a durabilidade da superfície de rolamento. Com o passar do tempo, devido à ação de intempéries e do tráfego, ocorre o aparecimento de patologias na superfície de rolamento, necessitando de manutenções preventivas ou até mesmo corretivas e, em casos extremos, a necessidade de reconstrução do pavimento deteriorado.

O Brasil mantém uma malha rodoviária de 1.720.753 km, porém, sua grande maioria permanece não pavimentada, com apenas 12,3% das vias pavimentadas (CNT, 2016), valor este que representa a necessidade de investimentos para o setor rodoviário. Isto se evidencia quando é comparado com outros países de proporção territorial semelhante.

A malha rodoviária brasileira possui uma densidade de aproximadamente 25,0 km de rodovias pavimentadas para cada 1.000 km², extremamente inferior ao apresentado pelos Estados Unidos e China, potências mundiais. Entretanto, países com condição econômica similar, como a Rússia, apresentam o dobro da densidade da malha viária, quando comparados ao Brasil, conforme exposto na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Densidade da malha rodoviária pavimentada por país, em km/1.000 km² (CNT, 2016)

Além da extensão das rodovias, outro fator importante é a qualidade das rodovias pavimentadas, com resultados pouco satisfatórios, agravados pela ausência de investimentos em manutenção e conservação, aliada à sobrecarga de demanda das estradas, o que, cada vez mais, tem contribuído para a depreciação das estradas brasileiras. Visualiza-se na Figura 1.2 que, na América do Sul, o ranking mundial

classifica o Brasil em 111^a posição e com este resultado fica clara a necessidade dos serviços de manutenção ou reconstrução nas rodovias brasileiras.

Figura 1.2 – Ranking de qualidade das rodovias dos países da América do Sul (CNT, 2016)

A preocupação com a preservação do meio ambiente, diante da extração de recursos e descartes de resíduos de demolição, bem como a obtenção de novos materiais, têm tornado a reciclagem uma alternativa atraente. A utilização de pavimentos asfálticos com camada reciclada com adição de cimento contribui para a menor extração de agregados virgens da natureza e mitiga o descarte de resíduos oriundos de pavimentos demolidos.

Para que a técnica de reciclagem seja adotada como uma alternativa de reabilitação de pavimentos deteriorados, as decisões devem ser pautadas por fatores técnicos e econômicos, não somente ambientais.

A técnica da reciclagem tem sido utilizada no Brasil, como alternativa de recuperação de pavimentos, desde meados de 1980, no entanto, existem poucos documentos técnicos que retratam essa tecnologia, quanto menos o seu dimensionamento estrutural, necessário para prever um desempenho adequado ao pavimento. Uma exceção quanto ao dimensionamento pode ser verificada no método de reciclagem de revestimentos, abordado pelo procedimento DNER-PRO 269/94.

Conforme abordado por Paiva et al. (2013), estima-se que durante os últimos anos, somente no estado de São Paulo, milhares de quilômetros de rodovias têm sido restaurados utilizando a reciclagem com adição de cimento.

Internacionalmente, a França e os Estados Unidos foram os países pioneiros nos estudos de reciclagem com adição de cimento, com experiências datadas da na década de 1950, relatadas por Jasienski e Rens (2001). Os autores mencionam que

na Bélgica, até o ano de 2001, cerca de 300.000 m² de pavimentos foram recuperados no país através desta técnica.

Na África do Sul, até o ano de 2001, estima-se que milhares de quilômetros de rodovias têm sido restaurados através da reciclagem, principalmente com adição de cimento (COLLINGS, 2001).

A primeira experiência de reciclagem com cimento na Espanha foi datada em 1992, com um trecho de 12 km de extensão. Desde 2006, são reciclados anualmente mais de 2.500.000 m² de pavimento. Estima-se que até o ano de 2012, 25.400.000 m² de pavimento tenham sido reciclados, representando uma extensão de 3.500 km (IECA, 2013).

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo apresentar um levantamento bibliográfico sobre a reciclagem com cimento, quanto a sua concepção e aplicação, como também analisar a experiência internacional e as metodologias de dimensionamento existentes.

Através da avaliação de parâmetros e técnicas abordadas na experiência internacional, propôs-se ao término do trabalho uma metodologia para o dimensionamento estrutural de pavimentos reciclados a frio com cimento, pautado nas premissas preconizadas pelos órgãos públicos nacionais.

1.2 Justificativa

São diversos os trabalhos que abordam temas quanto ao desempenho de misturas recicladas com cimento, tanto nacionais como internacionais, contudo, raramente são observados estudos que tratam sobre o dimensionamento estrutural, com indicações de parâmetros de materiais e espessuras.

Pela lacuna aberta pelas normas vigentes quanto ao dimensionamento estrutural de pavimentos reciclados com cimento, como também pela dificuldade de aplicação de normas estrangeiras, que aplicam parâmetros muitas vezes distintos dos aplicados pelos engenheiros de infraestrutura de transportes no Brasil e das especificações técnicas nacionais, este trabalho vem trazer esclarecimentos.

1.3 Estruturação

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

Capítulo 1: INTRODUÇÃO

Este capítulo tem o objetivo de apresentar o tema da pesquisa e o desenvolvimento dos estudos.

Capítulo 2: RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

É apresentada uma revisão bibliográfica, onde são expostas as principais técnicas de reciclagem de pavimentos, com ênfase para a reciclagem profunda com cimento. Caracterizam-se os principais materiais que compõem as bases recicladas com cimento, questões quanto ao processo executivo e critérios existentes para escolha e aplicação da solução de reciclagem com cimento.

Capítulo 3: EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS RECICLADOS COM CIMENTO

Trata-se de uma síntese dos principais métodos de dimensionamento de reciclagem com cimento da literatura internacional, bem como de autores que contribuíram para a evolução dos mesmos. Este é o capítulo central do trabalho, uma vez que não há normas de dimensionamento estrutural no Brasil.

Capítulo 4: ESTUDO PARAMÉTRICO DE PAVIMENTOS RECICLADOS COM CAMADA CIMENTADA

É abordada a metodologia aplicada no estudo paramétrico realizado, as considerações quanto aos parâmetros adotados e as equações de correlação obtidas através de retroanálise, avaliando os principais fatores estruturais que afetam o comportamento dos pavimentos reciclados com camadas cimentadas.

Capítulo 5: CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO PROPOSTO PARA PAVIMENTOS RECICLADOS COM CIMENTO

A partir do conhecimento obtido, através da avaliação da experiência internacional e pelo estudo paramétrico, é proposta uma metodologia de dimensionamento estrutural para pavimentos reciclados com cimento, atendendo aos critérios dos órgãos de infraestrutura rodoviária nacional.

Capítulo 6: ESTUDO DE CASO

Para um segmento da Rodovia Raposo Tavares é apresentado o dimensionamento estrutural de pavimento reciclado com cimento, conforme os métodos estudados neste trabalho, como também o dimensionamento proposto, através dos dados disponíveis da rodovia, como: tráfego, levantamento deflectométrico, condições de superfície, características das camadas do pavimento existente e subleito.

Capítulo 7: CONCLUSÕES

É apresentado um resumo dos principais apontamentos do trabalho, com as observações e conclusões obtidas. São feitas sugestões para a continuidade com trabalhos futuros, para o melhor entendimento e desenvolvimento do tema.

No ANEXO A – DADOS DE LEVANTAMENTO - RODOVIA SP 270

São apresentados os dados dos levantamentos considerados no estudo de caso na Rodovia Raposo Tavares.

ANEXO B - DADOS DA RETROANÁLISE

Apresenta os resultados da análise estatística realizada pelo *software* Microsoft Excel, com a expressão matemática obtida e a respectiva tabela de resultados.

ANEXO C - DADOS DE SAÍDA DO SOFTWARE BAKFAA 2.0

São apresentados os dados utilizados para a retroanálise da bacia deflectométrica e obtenção do módulo de resiliência das camadas existentes.

Finalmente, no ANEXO D - DADOS DE SAÍDA DO SOFTWARE ELSYM-5

São apresentados os dados de saída utilizados para o estudo paramétrico e a retroanálise da bacia deflectométrica.

2 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

Conceitos de sustentabilidade como reuso e reciclagem estão intimamente ligados à origem das técnicas de pavimentação. 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 (RAP), do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*, sendo esta a alternativa mais conhecida. Entretanto, há processos que reciclam materiais além do revestimento, como por exemplo, a reciclagem profunda, onde os materiais do revestimento betuminoso e da infraestrutura do pavimento, sendo granular, cimentada ou asfáltica, são incorporados na nova mistura.

Além dos ganhos ambientais, as misturas recicladas têm demonstrado desempenho similar e, em alguns casos, superior ao de misturas convencionais, quando se comparam as principais propriedades mecânicas (LIMA, 2003).

O material a ser reciclado pode ser obtido ou por meio da fresagem, por recicladora, ou através da remoção com pá carregadeira e posterior britagem, sendo a primeira opção a mais utilizada em virtude da modernização do maquinário de obras rodoviárias. Também 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.

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. Pode ser executada a quente ou a frio, como parte de procedimentos de reabilitação de pavimentos. 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 à camada de ligação, sendo esta alternativa comumente vinculada à restauração com recapeamentos. Por fim, denomina-se profunda o processo de fresagem em que o

material retirado compreende o revestimento, parte ou a totalidade da camada de base e até mesmo da sub-base (BONFIM, 2010).

2.1 Tipos de reciclagem

As técnicas de reciclagem de pavimentos podem ser classificadas de diversas formas: quanto à temperatura do procedimento, quanto à localização do processo de estabilização e mistura ou ainda quanto às camadas fresadas e reaproveitadas (ARRA, 2001). Pode-se, ainda, classificar a reciclagem em relação ao agente estabilizador aplicado. Na Figura 2.1 apresentam-se os tipos de classificação de reciclagem usuais adotados no meio técnico internacional.

Figura 2.1 – Tipos de Reciclagem (adaptado de ARRA, 2001)

O processo de reciclagem pode ser classificado conforme o estabilizante adicionado ao material reciclado. Os estabilizantes mais utilizados são cimento *Portland*, cal, espuma ou emulsão asfálticas. Também há processos em que não se adiciona material, neste caso resultando em uma camada granular 100% reciclada.

As estruturas de pavimento reciclado podem ser divididas em grupos, conforme as características dos materiais adotados, assim como é feito também para as estruturas convencionais. A seguir, são apresentados os principais tipos de estruturas recicladas, adaptados do DNIT (2006) e Balbo (2007):

- Pavimento flexível: é o tipo de pavimento que sofre uma deformação elástica significativa em todas as suas camadas quando submetido a um esforço. Um exemplo típico com estruturas recicladas é um pavimento constituído por uma camada de revestimento asfáltico sobre uma camada reciclada sem aplicação de estabilizante ou cal, resultando em rigidez equivalente à de camadas granulares convencionais;
- Pavimento semirrígido: caracteriza-se por possuir revestimento asfáltico e uma camada composta por material estabilizado com ligante hidráulico, devendo, segundo Balbo (2007), apresentar um comportamento a meio caminho entre o pavimento rígido e o flexível, trazendo características de rigidez inferiores ao concreto, porém, superiores aos concretos asfálticos. Um exemplo típico é pavimento constituído por camada asfáltica assente sobre uma camada reciclada com cimento;
- Pavimento semirrígido híbrido: uma subdivisão do pavimento semirrígido, apresentando basicamente as mesmas características, porém, sendo adotados materiais asfálticos para estabilização da base. Um exemplo típico é pavimento constituído por camada asfáltica assente sobre uma camada reciclada com espuma de asfalto; e
- Pavimento semirrígido invertido: outra subdivisão do pavimento semirrígido, porém, com a presença de base granular sobre a sub-base estabilizada, invertendo o posicionamento da camada com elevada rigidez. Um exemplo típico é pavimento constituído por camada asfáltica assente sobre uma base granular e sub-base reciclada com cimento.

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 há redução de transporte de material.

Quando ocorre em usina, há necessidade de transporte do material fresado da pista até o local de instalação da usina. Porém, 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 é o maior controle nos processos de preparo, sendo possível corrigir dosagens e granulometria no caso de alterações do material reciclado, com maior homogeneidade da mistura. Ainda, pode-se analisar a caixa do pavimento aberta e descobrir pontos problemáticos no pavimento remanescente, como excesso de umidade da infraestrutura, não detectados anteriormente.

Em relação à temperatura em que ocorre o processo de reciclagem, pode-se classificá-la em três categorias distintas; quente, morna e fria. A reciclagem a quente é o processo em que parte ou todo o revestimento betuminoso é fresado para compor uma nova mistura a quente, podendo ser adicionados agregados virgens, cimento asfáltico e agente rejuvenescedor (COSTA, 2015). Quando *in situ*, a reciclagem é executada a quente ou a frio, dependendo do tipo de maquinário escolhido. Quando se trabalha com usina de asfalto a reciclagem pode ocorrer a frio. Neste caso, não há aplicação de calor no processo e se necessita de mais energia para a compactação da camada, se comparada às misturas quentes (ARRA, 2001), além de não ser possível trabalhar com CAP, e sim com emulsões asfálticas.

O estudo e aplicação da reciclagem morna são mais recentes. Este processo apresenta dificuldades de se trabalhar com altas porcentagens de RAP nas misturas a quente, pois o ligante envelhecido do RAP tende a causar problemas na trabalhabilidade e na escolha da temperatura, a qual deve ser alta o suficiente para remoção da umidade dos agregados, mas também baixa o bastante para evitar o endurecimento do ligante antigo. Além disso, a temperatura tem efeito nas características reológicas do ligante asfáltico, causando envelhecimento deste; o ideal é que o material fresado não seja submetido a altas temperaturas, a fim de se prevenir o envelhecimento ainda maior do asfalto contido no fresado e a rápida deterioração da mistura (MOTTA, 2011).

O agregado reciclado pode ser constituído somente de RAP ou também conter materiais das camadas inferiores. Quando se trata exclusivamente de material asfáltico, usualmente a aplicação é somente no revestimento. No Brasil, a norma DNER-PRO 269/94 (1994) estabelece um método de dimensionamento para este tipo de reciclagem.

2.2 Reciclagem Profunda

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*), que pode ser definida como uma técnica de reabilitação na qual a camada de revestimento e parte ou toda a base (podendo incluir no procedimento até a camada de sub-base) são fresadas, reduzidas a dimensões apropriadas e tratadas para utilização como base ou sub-base.

A reciclagem profunda tem como grande vantagem a correção de falhas estruturais nas camadas subjacentes ao revestimento, inclusive o revestimento. Esta solução atende ainda a alguns casos específicos, como pistas com mais de uma faixa de tráfego em um sentido, em que uma destas sofre maior desgaste devido às diferenças acentuadas de tráfego de veículos pesados.

O processo de tratamento do material pode ocorrer tanto na pista, *in situ*, como em usina, assim como nas demais opções de reciclagem. Quando ocorre na própria pista, o processo é realizado por uma recicladora, que trabalha em conjunto com outros equipamentos, formando um conjunto para a reciclagem. Uma combinação simplificada consiste em uma recicladora acoplada a um caminhão-pipa, de modo que com o avanço do conjunto, o pavimento seja triturado e misturado com a água retirada do caminhão pipa.

O cilindro giratório mistura a água com o material recuperado até alcançar uma consistência uniforme, sendo que a taxa de água é controlada para alcançar um teor de umidade que possibilite um maior nível de densidade quando o material for compactado. À medida que a recicladora avança, o material misturado cairá no espaço vazio criado pelo cilindro de corte, enquanto um rolo compactador segue atrás da recicladora para compactar o material, antes que uma motoniveladora seja usada para ajustar o nivelamento final. Finalmente, ocorre o processo de compactação final e acabamento, que utiliza rolos compactadores vibratórios e pneumáticos.

Na adição de estabilizante à mistura, como cimento *Portland*, por exemplo, normalmente, este é espargido na superfície da via existente à frente da operação e reciclagem e, quando a recicladora avança, o cimento é suspenso e misturado com

o material recuperado e água, tudo em uma única operação. Também, de forma alternativa, o cimento pode ser misturado com a água para formar uma suspensão de “lama” que é injetada na câmara de mistura, através de uma unidade acoplada à recicladora, produzindo a lama com quantidades precisas de água e cimento, para tratar o volume de material que está sendo reciclado. Caso verifique-se a necessidade de incorporação de agregados na mistura reciclada, é executada uma camada de material britado em espessura adequada sobre a superfície do pavimento existente, anteriormente à fresagem profunda, promovendo assim, durante o processo de trituração e homogeneização da mistura, a correção granulométrica da mistura.

A Figura 2.2 e a Figura 2.3 ilustram um trem de reciclagem profunda quando se trabalha com cimento *Portland*, sendo que na segunda tem-se o misturador de “lama”.

Figura 2.2 – Esquema simplificado do conjunto para reciclagem profunda com cimento (adaptado de Wirtgen GmbH, 2004)

Figura 2.3 – Esquema do conjunto para reciclagem profunda com cimento com misturador de lama (adaptado de Wirtgen GmbH, 2004)

A reciclagem com usina permite que os materiais a serem utilizados, a partir de um pavimento existente, sejam selecionados e tratados anteriormente à aplicação, permitindo assim o aumento no nível de qualidade da mistura que pode ser alcançado no produto final.

A operação consiste na fresagem e transporte até o canteiro de obras, onde ocorre a usinagem (mistura e homogeneização), com incorporação de agregados para correção granulométrica e agente estabilizador. Então, o material processado é carregado em caminhões basculantes e transportado até a pista, caso se utilize

motoniveladora para auxiliar no espalhamento, ou até a mesa da vibroacabadora, então, seguido dos serviços de compactação.

Na recicladora, em sua parte central, é alojado o rotor de moagem dentro de uma estrutura protetora, onde é realizada a mistura do material resultante da fresagem profunda, água e cimento, deixando-se o produto da mistura passar por uma porta ajustável localizada na parte traseira. A estrutura apresenta barras de irrigação com uma série de bicos para água ou injeção da lama (água e cimento). Na Figura 2.4 é apresentado um esquema do rotor de moagem.

Figura 2.4 – Esquema do rotor de moagem (adaptado de Minguela, 2011)

2.3 Reciclagem com Cimento

O conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais reciclados é essencial para realizar o seu dimensionamento, portanto, para determinar as espessuras necessárias da camada reciclada e da camada de revestimento subjacente. No entanto, são necessários estudos para a estimativa das propriedades mecânicas do material reciclado.

Pode-se considerar que uma das principais dificuldades para obtenção de um projeto estrutural bem-sucedido com materiais reciclados é estimar as suas características, uma vez que parte dos materiais é heterogêneo e difícil de prever em campo.

De forma conveniente, o projetista determina uma composição da mistura reciclada, baseada em estudos das propriedades mecânicas dos materiais coletados no local. Para critérios de dimensionamento, as misturas adotadas apresentam características

de rigidez semelhantes às misturas em solo-cimento, adotando-se um teor de cimento igual ou superior a 3% em peso na mistura. No Brasil, segundo Oliveira (2011), as taxas de cimento utilizadas em obras de reciclagem variam de 3% a 4% em peso na mistura; baixos teores são empregados para mitigar os efeitos nocivos da retração do cimento e da rigidez exacerbada.

Os valores de resistência e rigidez, como a compressão simples, tração na flexão e o módulo de resiliência, apresentam grande influência em função da proporção de mistura betuminosa. Segundo Minguela (2011), quanto maior o teor de asfalto na mistura reciclada, menor é o módulo de resiliência, isso quando comparado a uma mistura de brita graduada tratada com cimento de mesma resistência a compressão simples. Isto é justificado no estudo de Dellabianca (2004), onde a película do ligante que envolve os grãos do material fresado tem influência nas propriedades da mistura, facilitando o deslizamento de uma partícula sobre a outra, diminuindo assim o atrito interno e conferindo ao fresado um componente de deformação viscosa na mistura.

Em diversos estudos realizados com dosagens de mistura reciclada com cimento, entre eles Fedrigo (2015), relata-se que a predominância de material asfáltico na mistura influencia negativamente suas propriedades. Entretanto, segundo o método do TRL386 proposto por Milton e Earland (1999), a porcentagem de agregado recuperado utilizado na mistura reciclada com cimento pode ser de até 100% do revestimento asfáltico, limitando-se apenas à parcela fina da mistura. Já a PCA (2005) e o DNIT (2013) indicam que a dosagem da mistura reciclada deva conter no máximo 50%, em massa, de material fresado.

A adição de cimento em pavimentos reciclados modifica boa parte das propriedades do material, com melhora significativa em duas características:

- O enrijecimento da mistura; e
- A redução da suscetibilidade à água.

As propriedades mecânicas do material enrijecido podem ser controladas pela variação do teor de cimento ou pelas características dos agregados, mas os melhores resultados serão obtidos quando a mistura for compactada corretamente e com teor de umidade que propicie o melhor adensamento da mistura. A redução da sensibilidade à água é de considerável importância no comportamento do

pavimento, sabendo-se que a água é um dos principais agentes de deterioração de pavimentos asfálticos.

Quanto às propriedades mecânicas para o dimensionamento de pavimentos reciclados com cimento, é importante avaliar o comportamento dos materiais que integram a sua estrutura e ter o conhecimento de quatro parâmetros fundamentais, imprescindíveis para avaliação mecanicista através de modelos de previsão de desempenho. São eles:

- Resistência à ruptura: indica a resistência máxima que pode suportar um material submetido a uma carga estática;
- Módulo de resiliência: é indicativo da capacidade de resistir à deformação do material e de sua capacidade de distribuição de tensões. Em geral, materiais tratados com cimentos apresentam comportamento elástico linear até pelo menos uma porcentagem significativa de sua tensão de ruptura e seu módulo de resiliência pode ser considerado praticamente constante na faixa de tensões de trabalho;
- Coeficiente de Poisson: representa a relação entre deformação transversal e a deformação axial do material, sobre uma carga também axial; e
- Resistência à fadiga: representa a capacidade do material de suportar a aplicação de repetidas cargas inferiores à tensão de ruptura antes de se romper.

Os materiais tratados com cimento estão sujeitos ao fenômeno da fadiga, ou seja, repetições de tensão. Quando o tráfego atua através da repetição de cargas, é essencial saber a relação entre as tensões suportadas e o número de repetições dessas solicitações, no qual produzem o trincamento do material.

Para o comportamento de um material reciclado com valor de tensão solicitado abaixo da tensão que o material suporta, normalmente entre 40% e 50% de sua resistência à flexão, em tese, o material poderia suportar um número infinito de repetições.

Por outro lado, conforme Minguella (2011), as propriedades mecânicas de materiais reciclados com cimento não dependem somente das características e proporções dos materiais constituintes, mas também de sua idade, condições de umidade e temperatura a que foi submetido durante a sua aplicação e cura. No entanto, ao

contrário de materiais betuminosos, eles têm menor influência da temperatura em que se encontram e da velocidade de aplicação de carga, por não apresentarem a termoviscoelasticidade encontrada no CAP, conforme Bernucci et al. (2008).

Entretanto, a longo prazo, devido às variações de temperatura diárias e/ou sazonais, pode ocorrer o aparecimento de trincas na camada cimentada, com propagação para a camada de revestimento em concreto asfáltico até o topo do pavimento, tendo como agravantes as condições climáticas e o tráfego local. Uma das soluções para se evitar tal fenômeno é indicada no método do departamento de transportes da Califórnia, o CALTRANS (2013), onde é proposta a microfissuração da camada reciclada, com objetivo de evitar trincas severas, reduzindo o potencial de trincas no revestimento.

Os principais benefícios da reciclagem com cimento podem ser observados nas áreas técnica, econômica e ambiental.

Área técnica:

- Permite reabilitar um pavimento deteriorado ou desatualizado com o tráfego atual ou previsto, onde a reabilitação com reforço estrutural em concreto asfáltico não é adequada, com execução da camada reciclada com cimento, evitando-se a sua reconstrução;
- Redução das tensões e deformações que podem ocorrer nas camadas de revestimento em concreto asfáltico;
- Redução dos efeitos negativos causados pelas alterações de umidade no suporte do pavimento;
- Aproveitamento de materiais contaminados, envelhecidos e com características inadequadas para o pavimento existente;
- Homogeneização das características de rigidez e geometria do pavimento existente; e
- Benefício ao usuário, com a redução do tráfego de obra e menor possibilidade de causar danos à rede de estradas secundárias, devido à redução do volume de materiais novos utilizados na obra, evitando-se o transporte.

Área econômica:

- A reutilização de materiais do local produz uma economia significativa à obra, reduzindo ao mínimo o volume de material necessário de novos agregados,

considerando-se os custos para remoção, britagem, classificação e transporte;

- Redução dos custos de reabilitação de estradas antigas deterioradas, onde não é cabível solução com reforço estrutural em concreto asfáltico;
- Redução do tempo de execução da obra e contenção do tráfego; e
- Aproveitamento da infraestrutura remanescente, com redução de custos de materiais comerciais e menor espessura das camadas do pavimento reabilitado.

Área ambiental:

- A reutilização de materiais no local permite reduzir o uso de agregados virgens, mantendo as reservas existentes;
- Com a diminuição do transporte de materiais, são reduzidos os impactos colaterais provocados nas estradas e flora adjacente, com lançamento de poeira, erosões etc.;
- A piora da qualidade do ar é reduzida de forma significativa, reduzindo a poluição e as emissões de vapores nocivos; e
- A reciclagem com cimento é uma técnica realizada a frio, portanto, consome pouca energia quando comparada à reciclagem a quente.

Em resumo, a reciclagem com cimento é uma solução técnica eficiente, com bom desempenho frente às solicitações do tráfego e variações de umidade, também eficiente no que diz respeito ao emprego de recursos naturais e de energia, o que contribui para a preservação do meio ambiente, e ao mesmo tempo econômica, com reutilização de materiais e diminuição de custos com deslocamentos de obra.

Em termos de desvantagens ou limitações, podem ser observados os seguintes aspectos:

- No caso do pavimento existente ser heterogêneo, o resultado da reciclagem com cimento pode apresentar maior heterogeneidade que uma nova mistura, resultando em locais com baixa capacidade estrutural e possível colapso precoce da estrutura;
- No caso de execução por faixas de rolamento, pode ocasionar o aparecimento de trincas longitudinais, se não forem adotadas as precauções

pertinentes para garantir a união adequada dos materiais entre as faixas adjacentes.

2.4 Critérios para execução da reciclagem profunda

A escolha do processo de reciclagem profunda a ser adotado é função de inúmeros fatores, dentre os quais se destaca a condição do pavimento existente e a disponibilidade de materiais e equipamentos.

Com uma primeira análise é verificada a deterioração do pavimento. Esta é uma medida indireta, realizada através da avaliação da qualidade de rolagem por meio de características visíveis, tendo destaque a profundidade da trilha de roda e o trincamento do revestimento. Cada mecanismo de deterioração do pavimento tem a sua própria função de desempenho em função do tempo, conforme é apresentado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Evolução da deterioração do pavimento em função do tempo (adaptado de Wirtgen GmbH, 2012)

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. Em situações intermediárias, a priori, são recomendadas técnicas de reciclagem superficial a frio *in situ* (NCHRP, 2011), conforme ilustra a Figura 2.6.

Figura 2.6 – 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. O *Transportation Research Laboratory* sugere 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 e EARLAND, 1999).

A seguir, são elencados os principais critérios aplicáveis à avaliação para utilização da reciclagem profunda com cimento.

2.4.1 Critérios de avaliação da superfície

A avaliação de superfície fornece informações valiosas em relação à causa da deterioração do pavimento. O modo e tipo de deterioração podem ser reconhecidos

durante a inspeção e, de maneira geral, são classificados como dano superficial ou dano estrutural.

O dano superficial é caracterizado por defeitos no revestimento asfáltico, com o defeito observado vinculado a problemas somente no revestimento. O dano estrutural é caracterizado também por defeitos no revestimento, porém, com indícios de falência das camadas de base e sub-base, desprotegendo o subleito das ações do tráfego. Seguem na Tabela 2.1 as principais características dos dois tipos de danos observados.

Tabela 2.1 – Características do tipo de deterioração (adaptado de Wirtgen GmbH, 2010)

Dano	Tipo
Superficial	Desagregação do revestimento, fissuras térmicas, afundamento plástico na trilha de roda, desgaste superficial, trincas classe FC-1 e FC-2.
Estrutural	Deformação permanente, afundamento consolidado na trilha de roda, trincas couro de jacaré FC-3, panelas, remendos.

A principal diferença entre a deterioração superficial e estrutural pode ser observada na Figura 2.7 a seguir.

Figura 2.7 – Tipos de deterioração (adaptado de Wirtgen GmbH, 2010)

Conforme observado na Figura 2.7, as camadas que mais contribuem para o acúmulo de deformações permanentes são o revestimento e a base, se comparadas ao subleito (BARKER, 1982), portanto, especialmente nestes casos, a reciclagem profunda é uma alternativa apropriada à reconstrução.

No país tem sido prática corrente avaliar o pavimento asfáltico em nível de rede, empregando-se a norma DNIT 008/2003 – PRO (2003), Levantamento Visual Contínuo para Avaliação de Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semirrígidos, que consiste em determinar o Índice do Estado de Superfície (IES), em função do Índice de Condição dos Pavimentos (ICPF) e do Índice de Gravidade Global Expedito (IGGE).

O ICPF corresponde à nota atribuída ao estado do pavimento de forma subjetiva, observado por 2 ou mais avaliadores, com escala variando de 0 a 5, péssimo a ótimo, respectivamente. O IGGE se refere ao índice ponderado, levando-se em consideração a frequência e gravidade das ocorrências dos defeitos. O IES corresponde ao conceito final da condição do pavimento, variando de A a E, ótimo a péssimo, respectivamente, sintetizando os índices anteriores.

O conceito péssimo, com código E, corresponde ao IES variando entre 8 e 10, com IGGE superior a 60 e ICPF inferior ou igual a 2,5, que seria a condição limite sugerida para a execução dos serviços de reciclagem profunda do pavimento, de acordo com este tipo de inventário.

A avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos no Brasil, em nível de projeto, é regulada pela norma DNIT 006/2003 - PRO (2003), que permite a obtenção do Índice de Gravidade Global (IGG), que infere o grau de degradação do pavimento. As normas DNER-PRO 010/79 (1979) e DNER-PRO 011/79 (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 a 180, ambas as normas indicam a reconstrução, mesma recomendação dada no DNER-PRO 010/79 (1979) para pavimentos com valor médio das flechas na trilha de roda superior a 30 mm ou com 33% das estações inventariadas com afundamentos plásticos significativos.

O método CALTRANS (2013) 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. O método também recomenda a reciclagem com cimento quando são observados os seguintes defeitos:

- Trincas severas, classe FC-3;
- Reflexão de trincas profundas;
- Trincas tipo couro de jacaré; e
- Deformação plástica superior a 6,5 mm.

Ainda, o método comenta que a reciclagem com cimento é eficaz para atenuar irregularidades, deterioração da base devido à fadiga, bombeamento de finos e excesso de umidade.

O método Inglês prevê que deverão ser avaliados os segmentos de projeto para que se tenham condições ideais de aplicação da solução de reciclagem quanto a:

- Localização;
- Extensão e largura da deterioração;
- Tipo e gravidade dos defeitos observados;
- Condições de drenagem existentes; e
- Detalhes e condições do acostamento.

A avaliação deverá ser executada conforme as normas:

- *Road Haunches: A Guide to Maintenance Practice*, PA/SCR243, TRL, 1994;
- *Practical Guide to Haunching*, ENG/1/9, 1991; e
- *Road Haunches: A Guide to Re-useable Materials*, TRL216, 1996.

Se a deterioração observada for identificada como falha estrutural, deverá ser definido se o local está adequado para o recebimento de soluções com reciclagem profunda.

2.4.2 Critérios deflectométricos

As medidas de deflexão e análise da bacia deflectométrica fornecem informações *in situ* valiosas sobre os materiais da estrutura do pavimento existente. Além de serem auxiliares na determinação de segmentos homogêneos, as medições podem ser avaliadas estatisticamente, com o nível de confiança adequado.

Este levantamento é base para diversos métodos de dimensionamento que utilizam o princípio de limitação de deformações elásticas das camadas, principalmente para dimensionamento de reforço estrutural.

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 portanto recomendada a reciclagem profunda.

2.4.2.1 Deflexão máxima

As metodologias nacionais, DNER-PRO 010/79 (1979) e DNER-PRO 011/79 (1979), recomendam que os pavimentos existentes cuja deflexão de projeto for três vezes superior à deflexão admissível sejam classificados como de má qualidade estrutural, sendo recomendada a reconstrução total do pavimento. A deflexão de projeto é obtida conforme a expressão (1) a seguir:

$$D_p = (D + \sigma) \times F_s \quad (1)$$

Onde:

D_p = Deflexão Admissível (10^{-2} mm);

D = Média da deflexão no segmento homogêneo (10^{-2} mm);

σ = desvio padrão da amostra; e

F_s = Fator de correção sazonal.

O manual sul-africano de pavimentação, por exemplo, possui os valores fixos para verificar a integridade da estrutura do pavimento, conforme Tabela 2.2, independentemente do tráfego de projeto.

Tabela 2.2 – Valores de deflexão máxima que indicam baixa capacidade estrutural na África do Sul (adaptado de SANRA, 2014)

Tipo de base	Deflexão máxima (10^{-2} mm)
Granular	> 75
Cimentada	> 40
Betuminosa	> 60

2.4.2.2 Parâmetros da bacia deflectométrica

Apesar da deflexão máxima ser o indicador mais utilizado, esta isoladamente, por vezes, não caracteriza de forma satisfatória o pavimento. Porém, 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 de base e sub-base, como o raio de curvatura e o índice de curvatura da superfície.

O raio de curvatura, no Brasil, é definido como na expressão (2):

$$R = \frac{3125}{(d_0 - d_{25})} \quad (2)$$

Onde:

R = raio de curvatura (m);

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

d_{25} = deflexão na superfície do pavimento distante 0,25 m do ponto de aplicação da carga (10^{-2} mm).

Este parâmetro indica a qualidade estrutural do pavimento. De acordo com a norma DNER-PRO 011/79 (1979), pavimentos com raio de curvatura inferior a 100 m sugerem baixa capacidade estrutural, sendo indicada a reconstrução dos mesmos.

Na África do Sul, SANRA (2014), por exemplo, o raio de curvatura é calculado através de expressão semelhante (3):

$$R = \frac{L^2}{2 \times (d_0 - d_L)} \quad (3)$$

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 (μm); e

d_L = deflexão na superfície do pavimento distante L mm do ponto de aplicação da carga (μm).

Para o valor da distância L , utiliza-se o geofone posicionado a 200 mm da aplicação da carga, ou seja, neste caso, a norma prevê o uso de equipamento FWD e não de Viga *Benkelman*.

Os valores limites que indicam baixa capacidade estrutural são expostos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Valores de raio de curvatura que indicam baixa capacidade estrutural (adaptado de DNER-PRO 011/79, 1979 e SANRA, 2014)

País	Tipo de base	Raio de Curvatura (m)
Brasil	Granular	< 100
África do Sul	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, atribuído ao revestimento e à base; quanto menor for o valor do SCI, menor será sua contribuição nas camadas superiores para a deflexão máxima. Trata-se da diferença entre as deflexões lidas imediatamente abaixo e distante 0,30 m do ponto de aplicação da carga, descrito na expressão (4) a seguir:

$$SCI = d_0 - d_{30} \quad (4)$$

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 0,30 m do ponto de aplicação da carga (10^{-2} mm).

Os valores limites, de acordo com Fabrício et al. (1988) e Horak (2008), são:

Tabela 2.4 – Valores de SCI que indicam baixa capacidade estrutural (adaptado de Fabrício et al., 1988 e Horak, 2008)

Referência	Tipo de base	SCI (10^{-2} mm)
Fabrício et al. (1988)	-	> 25
Horak (2008)	Granular	> 40
	Cimentada	> 30
	Betuminosa	> 40

Outros dois parâmetros deflectométricos que inferem sobre a qualidade estrutural de determinadas camadas do pavimento são o BDI e o BCI, índice de danos à base e índice de curvatura da base, respectivamente. São descritos na bibliografia internacional pelas siglas MLI (*Middle Layer Index*) e LLI (*Lower Layer Index*). Em Fabrício et al, (1988), o BDI caracteriza-se por aferir as condições do conjunto das camadas de revestimento base e sub-base do pavimento, enquanto que o BCI pelas condições do subleito; valores de BCI superiores a 10×10^{-2} mm estão associados a CBR menor ou igual a 10%.

A seguir são apresentadas as expressões (5) e (6) para obtenção do BDI e BCI, respectivamente:

$$BDI = d_{30} - d_{60} \quad (5)$$

$$BCI = d_{60} - d_{90} \quad (6)$$

Onde:

BDI = índice de danos à base (10^{-2} mm);

BCI = índice de curvatura da base (10^{-2} mm);

d_{30} = deflexão na superfície do pavimento distante 0,30 m do ponto de aplicação da carga (10^{-2} mm);

d_{60} = deflexão na superfície do pavimento distante 0,60 m do ponto de aplicação da carga (10^{-2} mm); e

d_{90} = deflexão na superfície do pavimento distante 0,90 m do ponto de aplicação da carga (10^{-2} mm).

Assim como no índice de curvatura da superfície, os limites estabelecidos na África do Sul, SANRA (2014) e Fabrício et al. (1988), para definir a qualidade estrutural dos

pavimentos dependem do conjunto de camadas existentes e do subleito, conforme os limites descritos na Tabela 2.5:

Tabela 2.5 – Valores de BDI e BCI que indicam baixa capacidade estrutural (adaptado de Fabrício et al., 1988 e SANRA, 2014)

País	Tipo de base	BDI (10^{-2} mm)	BCI (10^{-2} mm)
Fabrício et al. (1988)	-	> 40	> 10
SANRA (2014)	Granular	> 20	> 10
	Cimentada	> 10	> 8
	Betuminosa	> 15	> 8

No Brasil, as metodologias para a reabilitação de pavimentos asfálticos não adotam o SCI, BDI e BCI como critério para caracterização da capacidade estrutural.

Por meio da deflexão máxima e da bacia deflectométrica, a fim de se evitarem ensaios destrutivos para a estimativa da espessura do pavimento existente, por consequência, a espessura da infraestrutura remanescente após a fresagem profunda, a metodologia de Noureldin (1993) permite esta verificação através de algumas simplificações.

Com as medições do equipamento de FWD, com carregamento de 40 kN e prato com raio de 0,15 m, a metodologia de Noureldin (1993) utiliza a bacia deflectométrica para estimar a profundidade da camada com menor resistência, a partir do menor módulo de resiliência obtido, admitindo-se a simplificação de que o pavimento é composto por duas camadas, ambas com coeficiente de Poisson de 0,50.

O conceito central 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 na Figura 2.8.

No procedimento para estimativa da espessura do pavimento, considerando-se 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 valor do produto indica a localidade cuja deflexão na superfície é igual à do subleito, devendo os dados deste ponto serem utilizados no procedimento de retroanálise.

Figura 2.8 – Linhas de contorno de igualdade da deflexão na estrutura do pavimento (adaptado de Nouredin, 1993)

A espessura total efetiva do pavimento é obtida por meio da seguinte expressão (7):

$$T_x = \left[\frac{d_0 - d_x}{d_x \times \left(\frac{x}{3} - 1 \right)} \right]^{1/3} \times (4 \times x^2 - 36)^{1/2} \quad (7)$$

Onde:

T_x = espessura total efetiva (pol);

x = distância do ponto de aplicação da carga (pol);

d_x = deflexão à distância x (pol); e

d_0 = deflexão máxima (pol).

2.4.3 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 (CBR) para execução da reciclagem profunda são apresentados na Tabela 2.6 a seguir:

Tabela 2.6 – Capacidade de suporte mínima do subleito

Método	CBR_{subleito} (%)
TRL386	2
TRL611	2
CALTRANS	4,5 (45 MPa)
Andalucía	6
Castilla y León	5

Nos projetos de dimensionamento estrutural de pavimentos 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 rede ou gerência. Complementarmente, a estimativa da capacidade de suporte do subleito pode ser feita através da retroanálise de dados defletoométricos.

O método do TRL611 preconiza a utilização do levantamento defletoométrico para complementar a avaliação da fundação do pavimento existente, prioritariamente, usando equipamento tipo FWD, por meio da retroanálise do subleito. O método recomenda apenas duas classificações e comenta que isto se deve pela baixa precisão do procedimento:

- > 100 MPa – Fundações que apresentam bom desempenho;
- ≤ 100 MPa – Fundações que apresentam mau desempenho.

O método do CALTRANS (2013) de reciclagem profunda com cimento, por exemplo, utiliza as deflexões lidas a uma distância de 0,60 m, no ponto de aplicação da carga do levantamento defletoométrico. Através da retroanálise das deflexões e análise gráfica, são identificados os pontos com problemas no subleito. A Tabela 2.7 apresenta os critérios defletoométricos para avaliação do subleito preconizado pela CALTRANS.

Tabela 2.7 – Critérios de avaliação do subleito por meio de retroanálise (adaptado de CALTRANS, 2013)

Deflexão D_{60} (x 10^{-2} mm)	MR_{SL} (MPa)	Zona	Conclusão
$D_{60} < 38$	> 45	A	Subleito satisfatório
$38 \leq D_{60} \leq 124$	$25 - 45$	B	Pode haver necessidade de tratamento do subleito antes da reciclagem com cimento
$D_{60} > 124$	< 25	C	Obrigatório tratamento do subleito ou considerar outras estratégias para reabilitação ou reconstrução

Onde:

MR_{SL} = módulo de resiliência do subleito (MPa); e

D_{60} = deflexão à distância de 0,60 m do ponto de aplicação da carga.

Tomando-se como base a Tabela 2.7, a Figura 2.9, a seguir, ilustra a avaliação do subleito ao longo de uma rodovia, onde, para uma condição satisfatória, a soma dos segmentos nas zonas B e C deve ser menor que 10% da extensão total do projeto. No caso de se obter extensão superior a 10%, a reciclagem com cimento não está descartada, mas assim como em outras estratégias de reabilitação, adotam-se medidas mitigadoras como estabilização do subleito (com cimento ou cal), substituição de solo, aplicação de geotêxteis, aumento da espessura do pavimento ou melhoria dos dispositivos de drenagem.

Figura 2.9 – Exemplo de análise gráfica da retroanálise do subleito (adaptado de CALTRANS, 2013)

O procedimento de retroanálise para estimativa do módulo de resiliência do subleito recomendado pelo CALTRANS (2013) utiliza a equação (8) de Boussinesq apresentada a seguir:

$$MR_r = \frac{100 \times (1 - \nu^2) \times P}{\pi \times r \times d} \quad (8)$$

Onde:

MR_r = módulo de resiliência à distância r (MPa);

P = carga aplicada (kgf);

ν = coeficiente de Poisson, geralmente adotado 0,35;

r = distância entre centro do carregamento e geofone medida (cm); e

d = deflexão medida no ponto r ($\times 10^{-2}$ mm).

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, para a proteção do subleito contra os esforços advindos do tráfego. Nos casos de 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 podem-se obter dados de resistência com ensaios em laboratório.

Como alternativa aos ensaios destrutivos para obtenção das características de resistência das camadas existentes do pavimento, os métodos CALTRANS e TRL recomendam a adoção do cone de penetração dinâmica (DCP), do inglês, *Dynamic Cone Penetrometer*.

Os resultados do DCP são analisados em termos de Número DCP (DN), do original, *DCP Number*, que proporciona uma indicação relativa da resistência à penetração do cone e das espessuras das camadas. Neste tipo de ensaio, as camadas do revestimento são excluídas da análise.

O Número DCP é calculado como a taxa de penetração do DCP (mm) por golpe, que proporciona uma indicação da resistência ao cisalhamento relativo ao material e profundidade. Na plotagem dos dados obtidos, podem ser verificados saltos distintos entre as profundidades, onde é possível identificar mudanças de material, condições de umidade e estimar a espessura das camadas subjacentes.

O método CALTRANS (2013), conforme visto anteriormente para o critério deflectométrico, também apresenta um modelo para verificação da condição do subleito através de método do DCP, que sugere correlacionar a taxa de penetração com o CBR do material. Esta correlação fornece indicadores úteis que podem ser combinados com o levantamento deflectométrico e avaliação visual, a fim de identificar áreas problemáticas, porém, observa-se que os valores de CBR obtidos nas correlações são apenas estimativas aproximadas.

Para o cálculo do módulo de resiliência efetivo através do número DCP é indicada a expressão (9) a seguir:

$$E_{ef} = 10^{3,05 - 1,066 \times \log DN} \quad (9)$$

Onde:

MR_{ef} = módulo de resiliência efetivo (MPa); e

DN = número DCP (mm/golpe).

Na Tabela 2.8 é apresentado um resumo com valores de DN, a rigidez esperada e a possível condição do subleito.

Tabela 2.8 – Critérios de avaliação do subleito por meio do DCP (adaptado de CALTRANS, 2013)

DN (mm/golpe)	MR_{SL} (MPa)	Zona	Subleito
<4	<260	A	Relativamente forte
4-5	260-205		
5-8	205-125		
8-14	125-70		
14-19	70-45		
19-25	45-37	B	Regular
25-30	37-30		
30-35	30-25		
>35	>25	C	Fraco, potencialmente úmido

A Figura 2.10, a seguir, ilustra a avaliação do subleito ao longo de uma rodovia para uma condição satisfatória. Como observado para o levantamento deflectométrico, a soma dos segmentos nas zonas B e C deve ser menor que 10% da extensão total do projeto, caso contrário, a reciclagem com cimento não está descartada, mas deverão ser adotadas medidas mitigadoras para manter a vida útil do pavimento.

Figura 2.10 – Exemplo de análise gráfica do DCP do subleito (adaptado de CALTRANS, 2013)

O método do TRL611 proposto por Merril et al. (2004), recomenda avaliar as condições da fundação, com a combinação de ensaios de laboratório e testes *in situ* para classificar as camadas de suporte existentes. O DCP também é adotado para estimar a resistência e espessura das camadas do pavimento.

O método baseia-se na integração da área de penetração sob um gráfico em função da profundidade de até 600 milímetros. A integração incorpora a contribuição do apoio das camadas em diferentes profundidades. O valor integrado é chamado de "área de penetração", e pode ser considerado como refletindo uma quantidade ponderada de energia necessária para conduzir o equipamento DCP através do apoio entre as camadas.

Um exemplo deste procedimento é apresentado na Figura 2.11, resultando numa fundação tipo 2, indicada na Tabela 2.9, a qual apresenta a classificação da fundação através da utilização do DCP.

Figura 2.11 – Ilustração do cálculo da Área de Penetração (adaptado de Merrill et al., 2004)

Tabela 2.9 – Classificação da fundação pelo DCP (adaptado de Merrill et al., 2004)

Tipo de Fundação	Área de Penetração (golpes x mm)
1	> 6.500
2	> 10.000
3 ou 4	> 18.000 ^(*)

^(*) Talvez seja impraticável medir com o DCP

3 EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS RECICLADOS COM CIMENTO

3.1 Inglaterra

3.1.1 TRL386

Milton e Earland (1999), da área de pavimentação, elaboraram um guia de dimensionamento e especificações para a reciclagem profunda *in situ* para pavimentação, o TRL386, publicado pelo *Transport Research Laboratory*, considerando-se tanto o tratamento com cimento como também a espuma de asfalto. Este guia foi baseado em um programa de pesquisa que durou três anos, envolvendo estudos de rodovias com tráfego médio e pesado e o monitoramento de um trecho experimental.

Para o início das atividades de dimensionamento na restauração de pavimentos, é imprescindível a avaliação da via, de modo que alguns requisitos devem ser atendidos para que se obtenham condições ideais para aplicação da reciclagem profunda. Os locais devem ser identificados quanto a:

- Localização;
- Extensão e largura da deterioração;
- Tipo e gravidade dos defeitos observados;
- Condições de drenagem existentes; e
- Detalhes e condições do acostamento.

Por meio da avaliação de defeitos, caso identifique-se falha estrutural no pavimento, deverão ser averiguadas todas as questões abordadas como indicado no fluxograma da Figura 3.1.

Figura 3.1 – Avaliação da possibilidade de reciclagem profunda *in situ* (adaptado de Milton e Earland, 1999)

Para investigações com poços no pavimento, sugere-se que a frequência máxima seja de um poço para cada 500 m². Estes poços devem ser de tamanho suficiente

para extrair uma quantidade suficiente dos materiais das camadas para determinar fatores como:

- Subleito: limites de Atterberg, umidade natural e CBR;
- Fundação: espessuras e características das camadas;
- Classificação dos agregados como matéria-prima para as misturas recicladas;
- Resistência a compressão de bases de concreto existentes, no caso de suspeitas da alta rigidez, dificultando o processo de regularização e trituração (resistência a compressão simples superior a 15 MPa).

A adoção do processo de reciclagem a frio *in situ* dependerá da espessura do pavimento existente, devendo ser suficiente para, após a reciclagem, receber as novas camadas de pavimento sem grandes variações do greide e de modo que atenda às demandas de tráfego. Caso a espessura de pavimento existente seja insuficiente, uma camada do subleito poderá fazer parte da mistura, desde que tenha granulometria adequada e resistência mínima de $\text{CBR} > 2\%$.

Também há critérios econômicos, como extensão mínima do trecho e necessidade de remoção ou proteção de interferências subterrâneas, como redes de água, esgoto ou gás, por exemplo.

Para a reciclagem com cimento, segundo o método, o agregado recuperado pode ser 100% de revestimento betuminoso existente, base, sub-base e material do subleito. Segundo Milton e Earland (1999), o material reciclado com cimento apresenta baixa influência da granulometria no desempenho da mistura, no entanto, há um limite superior recomendado de 35% de material passante da peneira de 0,075 mm. A distribuição do agregado triturado, antes da reciclagem, igualmente para agregados complementares, deve estar em conformidade com a Zona A. Também, dentre as circunstâncias da obra, é aceitável a Zona B, desde que os resultados dos testes de projeto da mistura demonstrem-se aceitáveis, conforme apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Classificação da granulometria ideal para reciclagem com cimento *in situ* (adaptado de Milton e Earland, 1999)

Tamanho da Peneira (mm)	Porcentagem de Material Passante (%)			
	Zona A		Zona B	
50,0	100		-	
37,5	94	100	-	
20,0	66	100	100	
10,0	48	75	75	100
5,0	35	57	57	95
2,36	25	42	42	77
0,60	13	28	28	52
0,30	10	24	24	45
0,075	5	20	20	35

Sendo atendidos os pré-requisitos, procede-se ao cálculo da espessura da camada reciclada, começando pela questão do tráfego. O viário a ter o pavimento reciclado é classificado inicialmente segundo o tráfego estimado para um período de projeto de 20 anos, conforme indica a Tabela 3.2, obtido de acordo com o procedimento inglês HAUC (1992) apud Milton e Earland (1999).

Tabela 3.2 – Classificação das rodovias (adaptado de Milton e Earland, 1999)

Categorias de Tráfego	
Tipo	Tráfego de Projeto
1	$10^7 < N \leq 3,0 \times 10^7$
2	$2,5 \times 10^6 < N \leq 10^7$
3	$5,0 \times 10^5 < N \leq 2,5 \times 10^6$
4	$N \leq 5,0 \times 10^5$

A Figura 3.2 apresenta o fluxograma para o dimensionamento estrutural da camada de reciclagem com cimento. A média da resistência à compressão simples aos 7 dias deverá ser superior a 4,5 MPa para rodovias de tráfego leve (classe 4), 7,0 MPa para rodovias de tráfego médio (classe 3) e igual ou superior a 10,0 MPa para as rodovias de tráfego mais intenso (classe 2 e 1).

Figura 3.2 – Roteiro para dimensionamento de pavimentos com bases recicladas com cimento (adaptado de Milton e Earland, 1999)

Para a determinação da espessura de base reciclada nas rodovias de classe 3 e 4, os parâmetros condicionantes são a espessura do revestimento adotado e o suporte do subleito, através do ensaio de Índice de Suporte Califórnia, ou simplesmente, CBR, apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Espessuras da camada reciclada com cimento para rodovias classe 3 e 4 (adaptado de Milton e Earland, 1999)

Tráfego	Tipo 3			Tipo 4		
Espessura Revestimento Asfáltico (m)	Tratamento Superficial	0,04	0,10	Tratamento Superficial	0,04	0,10
CBR (%)	Espessuras da Camada Reciclada (m)					
<2	n/r	n/r	n/r	n/r	n/r	n/r
2 - 4	0,28	0,24	0,18	0,24	0,20	0,15
5 - 7	0,26	0,22	0,16	0,22	0,18	0,15
8 - 14	0,24	0,20	0,15	0,20	0,16	0,15
>15	0,22	0,18	0,15	0,19	0,15	0,15

Onde:

n/r = não recomendável.

Observa-se que para suporte do subleito com CBR inferior a 2%, a reciclagem *in situ* não é recomendada para qualquer classificação de tráfego.

No caso de rodovias classes 1 e 2, assume-se que após a reciclagem profunda o pavimento existente terá capacidade de suporte mínimo equivalente às combinações de CBR do subleito (CBR_{SL}) e espessura de infraestrutura remanescente, conforme o material existente, apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Características mínimas da infraestrutura remanescente para rodovias Classes 1 e 2 (adaptado de Milton e Earland, 1999)

Espessura de Infraestrutura Remanescente Mínima (m)							
CBR Subleito (%)							
2 a 4		5 a 7		8 a 14		> 15	
Material Granular	Tratado	Material Granular	Tratado	Material Granular	Tratado	Material Granular	Tratado
0,300	0,085	0,250	0,070	0,200	0,060	0,150	0,040

Se houver dúvidas quanto à capacidade de suporte da infraestrutura existente, a espessura da camada reciclada deverá ser aumentada, de acordo com os fatores de equivalência indicados na Tabela 3.5, que se referem à espessura de base granular para a espessura equivalente da camada reciclada. Na expressão (10) segue exemplo de um pavimento reciclado com cimento de resistência à compressão

simples igual a 7,0 MPa, que apresenta infraestrutura remanescente com 0,10 m de material britado deficiente, onde o aumento da espessura da camada reciclada com cimento é calculado.

Tabela 3.5 – Espessura equivalente da camada reciclada em relação à base granular (adaptado de Milton e Earland, 1999)

Resistência à Compressão Simples da Mistura Reciclada aos 7 dias (MPa)	Fator de Equivalência	Fator de Espessura
10,0	0,3	0,45
7,0	0,4	0,65
4,5	0,5	1,00

$$\text{Incremento Espessura} = F_e \times I_R$$

$$\text{Incremento Espessura} = 0,65 \times 1,00 = 0,65 \text{ m}$$

(10)

Onde:

F_e = fator de espessura; e

I_R = infraestrutura remanescente (mm).

Os ábacos da Figura 3.3 permitem dimensionar as espessuras do revestimento e da camada reciclada quando são atendidas às condições de suporte mínimas da estrutura remanescente.

A espessura mínima praticada para a camada reciclada com cimento é de 0,15 m, podendo atingir até 0,30 m, com os incrementos previstos. Acima disto, torna-se inviável a execução das camadas pela dificuldade de uma compactação adequada. A reciclagem utilizando-se o processo de compactação em duas camadas é viável, mas fica comprometido pelo processo *in situ*, causado pela necessidade de estocar temporariamente a camada superior de reciclagem, enquanto se recicla a inferior, reduzindo a economia de tempo, energia e vantagens obtidas pelo processo *in situ*.

Figura 3.3 – Ábacos de dimensionamento para determinação das espessuras das camadas de revestimento asfáltico e reciclagem com cimento para rodovias de tráfego classes 1 e 2 (adaptado de Milton e Earland, 1999)

3.1.2 TRL611

Uma atualização do método do TRL386 foi realizada com o novo trabalho elaborado por Merrill et al. (2004), para atender ao aumento de agentes estabilizadores, para rodovias de tráfego mais intenso e dar maior viabilidade aos serviços de reciclagem profunda, sendo denominado TRL611.

Neste guia consideram-se as combinações dos aglomerantes em quatro categorias: aglomerante hidráulico (apenas cimento), aglomerante hidráulico (excluindo cimento), material betuminoso e aglomerante hidráulico (apenas cimento) e, por fim, material betuminoso e aglomerante hidráulico (excluindo cimento).

Estas categorias se enquadram em três famílias de materiais para bases recicladas, cada uma com um comportamento distinto. A reciclagem com cimento se enquadra na família 1, conforme a Figura 3.4.

Figura 3.4 – Identificação das famílias dos materiais abordados no guia (adaptado de Merrill et al., 2004)

No guia, 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 dinâmico 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 estimado para um período de 20 anos se dá conforme a Tabela 3.6, obtido de acordo com o procedimento inglês HAUC (2002) apud Merrill et al. (2004).

Tabela 3.6 – Classificação das rodovias (adaptado de Merrill et al., 2004)

Categorias de Tráfego	
Tipo	Tráfego de Projeto
0	$3,0 \times 10^7 < N \leq 8,0 \times 10^7$
1	$10^7 < N \leq 3,0 \times 10^7$
2	$2,5 \times 10^6 < N \leq 10^7$
3	$5,0 \times 10^5 < N \leq 2,5 \times 10^6$
4	$N \leq 5,0 \times 10^5$

Para o tratamento com reciclagem profunda, a infraestrutura existente é classificada em quatro categorias, de acordo com a qualidade do material e sua estabilidade, conforme os critérios expostos a seguir.

- Classe 1 - Fundação é formada por material granular de baixa qualidade e/ou espessura delgada;
- Classe 2 - Fundação é formada por camada com espessura delgada e boa capacidade de suporte, adequada para o subleito existente;
- Classe 3 - Fundação apresenta-se estabilizada e em boas condições; e
- Classe 4 - Fundação apresenta-se estabilizada e em boas condições. No entanto, esta fundação deve ser formada de material granular com alta resistência e espessura adequada.

Esta classificação aplica-se apenas à reciclagem profunda, ou seja, tendo-se o aproveitamento parcial da fundação existente para apoio da camada reciclada com cimento. Para a determinação da infraestrutura existente, são recomendadas diversas metodologias.

Um destes métodos é o estudo de registros e documentos dos projetos antecedentes, sendo muito provável que este seja o método mais econômico de se obter a informação desejada, porém, é certo que nele se eleva a possibilidade de inconsistências nas informações, devido à falta de atualização, podendo ter influência nos resultados.

Para investigações com poços no pavimento, o método sugere que a frequência máxima seja de um poço para cada 500 m² ou 135 metros de pista. Estes poços

devem ser do tamanho necessário para extrair uma quantidade suficiente dos materiais das camadas para determinar fatores como:

- Subleito: limites de Atterberg, umidade natural e CBR;
- Fundação: espessuras e características das camadas; e
- Bases de concreto: resistência à compressão simples.

Estas recomendações são para vias de tráfego alto, assim Merrill et al. (2004) reconhecem que para vias de tráfego inferiores pode-se reduzir o número de investigações.

Os métodos não destrutivos também são utilizados para avaliar a fundação do pavimento existente, prioritariamente, usando-se equipamento tipo FWD; os resultados são utilizados para obter parâmetros de rigidez da camada de fundação. No método, devido à baixa precisão do levantamento, são recomendadas apenas duas classificações:

- > 100 MPa – Fundações que apresentam bom desempenho;
- ≤ 100 MPa – Fundações que apresentam mau desempenho.

A metodologia preferencial recomendada para avaliar as condições da fundação requer uma combinação de ensaios de laboratório e testes *in situ* para classificar as camadas de suporte existentes. O DCP fornece uma estimativa da resistência e espessura das camadas do pavimento, como já mencionado no item 2.4.3. A Tabela 2.9 e Figura 2.11 a classificação da fundação através da utilização do DCP.

A classificação granulométrica dos materiais retirados do pavimento a que se pretende incorporar cimento foi dividida em 3 zonas, conforme proposto por Merrill et al. (2004). A Figura 3.5 ilustra esta classificação.

- Zona A - Adequada para todos os materiais reciclados a frio;
- Zona B - Maior presença de agregados finos, adequada apenas em determinadas circunstâncias; e
- Zona C - Adequada somente para a estabilização *in situ*. A Zona C apresenta maior risco de segregação, portanto seu uso é recomendado apenas para reciclagem utilizando processo de estabilização *in situ*.

Figura 3.5 – Curvas granulométricas para as misturas recicladas (adaptado de Merrill et al., 2004)

Dimensionamento

Para o dimensionamento das estruturas com material reciclado a frio, Merrill et al. (2004) produziram ábacos de dimensionamento, onde se cobre uma ampla variedade de materiais de pavimentação e técnicas de construção *in situ* e *ex situ*, conforme nomenclatura utilizada pela norma para situação em usina.

Este método de dimensionamento visa caracterizar a fundação existente, a fim de dimensionar a estrutura do pavimento sobrejacente. É assumido que a fundação existente é capaz de suportar a ação do tráfego para a construção das camadas de pavimento novo. Conforme já apresentado, a fundação existente é caracterizada em quatro níveis de suporte, apresentados na Tabela 3.7 a seguir, na qual estão os valores adotados para concepção do projeto.

Tabela 3.7 – Classificação do suporte de projeto pelo MR em relação à fundação existente (adaptado de Merrill et al., 2004)

Tipo de Fundação	Suporte de Projeto (MPa)
1	50
2	100
3	200
4	400

Posteriormente, são classificados o material reciclado e a espessura dotada. Os materiais são classificados em nove zonas distintas, nomeadas de H1 a H9.

Nesta etapa é verificada a relação entre o módulo dinâmico e a resistência à flexão da mistura reciclada adotada, onde a combinação da rigidez e resistência da camada é imprescindível para a concepção do projeto.

No ábaco da Figura 3.6 é apresentado o método de classificação da mistura. No exemplo, o triângulo ilustra um material com módulo dinâmico de 20.000 MPa e uma resistência à flexão de 0,90 MPa, e como a base do triângulo está logo acima da reta H3, o material é classificado na zona H3.

Figura 3.6 – Classificação do desempenho das camadas recicladas (adaptado de Merrill et al., 2004)

Para a classificação do material, há necessidade de que o módulo dinâmico e a resistência de tração à flexão sejam conhecidos. Quando estes valores não são

diretamente mensuráveis, um método alternativo de correlação pode ser adotado, utilizando-se testes de resistência à compressão simples de acordo com a norma BS EN13286-41 (2003) e empregando-se as relações de Croney e Croney (1997) ambas citadas por Merril et al. (2004), conforme as equações (11) e (12).

$$E_{dyn} = \frac{\log R_f + 0,773}{0,0301} \quad (11)$$

$$R_f = 0,11 \times R_c \quad (12)$$

Também, utilizando-se os testes de resistência à tração e rigidez estática indireta de acordo com a norma BS EN13286-42 (2003) apud Merril et al. (2004), como nas equações (13) e (14).

$$E_{dyn} = 8,4 + 0,93E_s \quad (13)$$

$$R_f = 1,33 \times R_{it} \quad (14)$$

Onde:

E_{dyn} = módulo dinâmico (GPa);

E_s = rigidez estática indireta (GPa);

R_f = resistência à tração na flexão (MPa);

R_c = resistência à compressão simples (MPa);

R_{it} = resistência à tração indireta (MPa).

Definida a zona de classificação da mistura reciclada, com os ábacos apresentados nas figuras a seguir (Figura 3.7 a Figura 3.10), é verificada a espessura da camada reciclada mínima, em função do tipo de fundação e tráfego previsto. As soluções são projetadas para rodovias Tipo 2 ou superior.

Como exemplo, a Figura 3.8 ilustra a adoção de tráfego de 2×10^7 solicitações do eixo padrão, para camada reciclada com cimento classificado na zona H3, resultando em uma espessura mínima para a camada reciclada de 300 mm e para o revestimento asfáltico em 0,15 m.

Figura 3.7 – Espessuras de projeto para tráfego tipo 2 ou superior e fundação tipo 1 (adaptado de Merrill et al., 2004)

Figura 3.8 – Espessuras de projeto para tráfego tipo 2 ou superior e fundação tipo 2 (adaptado de Merrill et al., 2004)

Figura 3.9 – Espessuras de projeto para tráfego tipo 2 ou superior e fundação tipo 3 (adaptado de Merrill et al., 2004)

Figura 3.10 – Espessuras de projeto para tráfego tipo 2 ou superior e fundação tipo 4 (adaptado de Merrill et al., 2004)

Segundo o método, a espessura do revestimento asfáltico foi definida de modo a reduzir o risco de reflexão de trincas da camada cimentada que, naturalmente, formam fissuras de retração. Para isso, também são estudados retardadores de cura, a fim de se controlar tais fissurações.

Para estradas de baixo volume Tipo 2, 3 e 4, Potter (1996) apud Merrill et al. (2004) propôs que a partir do nível de contribuição estrutural da fundação incorporada à base, atribuído pelo parâmetro de CBR, há alternativas com intuito de permitir uma redução na espessura da camada reciclada com a compensação no aumento da espessura de revestimento, conforme apresentado na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Espessuras da camada reciclada com cimento para rodovias classe 2, 3 e 4 (adaptado de Merrill et al., 2004)

Tráfego	Tipo 2			Tipo 3			Tipo 4		
Espessura de Revestimento (m)	TS	0,04	0,10	TS	0,04	0,10	TS	0,04	0,10
CBR Subleito (%)	Espessura da Camada Reciclada (m)								
< 2	n/r	n/r	n/r	n/r	n/r	n/r	n/r	n/r	n/r
2 – 4	n/r	0,30	0,24	0,28	0,24	0,18	0,24	0,20	0,15
5 – 7	n/r	0,28	0,22	0,26	0,22	0,16	0,22	0,18	0,15
8 – 14	n/r	0,27	0,20	0,24	0,20	0,15	0,20	0,16	0,15
< 15	n/r	0,25	0,20	0,22	0,18	0,15	0,19	0,15	0,15

Onde:

n/r = não recomendável; e

TS = tratamento superficial.

3.2 Estados Unidos da América

3.2.1 AASHTO

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.

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

O método da AASHTO de 1993, descrito no *AASHTO Guide for Design of Pavements Structures* (1993) é fundamentado na análise estatística dos resultados obtidos da pista experimental da AASHO e monitorado sob o tráfego entre 1958 e 1960.

Dentre os resultados obtidos, destacou-se um modo de quantificar a condição da ruptura do pavimento, baseado na opinião subjetiva dos usuários e na medição objetiva dos defeitos superficiais, consistindo na condição de serventia do pavimento, variando entre 0 e 5, sendo 5 a melhor condição possível.

A capacidade de suporte do pavimento é mensurada por meio do Número Estrutural (SN), sendo um valor abstrato que expressa a capacidade estrutural do pavimento necessária em função da combinação de suporte do subleito, do número de solicitações de um eixo padrão 80 kN, da serventia desejada para o final da vida útil de projeto e das condições ambientais. O número estrutural projetado é calculado pela seguinte expressão (15):

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times m_2 + a_3 \times D_3 \times m_3 \quad (15)$$

Onde:

a_1, a_2, a_3 = coeficientes estruturais das camadas;

D_1, D_2, D_3 = espessuras das camadas (pol); e

m_2, m_3 = coeficientes de drenagem das camadas.

O coeficiente de equivalência estrutural expressa uma medida de capacidade relativa do material para atuar como componente estrutural do pavimento. A AASHTO (1993) apresenta diversas correlações para obtenção do coeficiente, em geral, por meio das propriedades mecânicas. Na Tabela 3.9 são apresentados os valores de coeficientes estruturais típicos recomendados.

Tabela 3.9 – Coeficientes estruturais dos materiais (adaptado de AASHTO, 1993)

Material	Parâmetro	Coeficiente estrutural
Concreto asfáltico	$MR = 3.160 \text{ MPa}$	0,44
	$MR = 2.110 \text{ MPa}$	0,37
	$MR = 1.406 \text{ MPa}$	0,30
Bases granulares	$CBR = 100\%$	0,14
	$CBR = 33\%$	0,10
Sub-bases granulares	$CBR = 100\%$	0,14
	$CBR = 23\%$	0,10
Materiais cimentados	$RCS_7 = 5,6 \text{ MPa}$	0,22
	$RCS_7 = 3,1 \text{ MPa}$	0,16
	$RCS_7 = 1,4 \text{ MPa}$	0,13

Os coeficientes de drenagem das camadas do pavimento são em função do tempo exigido de remoção da água do pavimento, classificados da seguinte forma: excelente, duas horas; boa, em um dia; regular, em uma semana; pobre, em um mês; muito pobre, a água acumulada não é drenada.

Os efeitos da drenagem em revestimentos asfálticos e bases cimentadas não são considerados no método. São apresentados na Tabela 3.10 os valores dos coeficientes de drenagem das camadas granulares.

Tabela 3.10 – Coeficientes de drenagem (adaptado de AASHTO, 1993)

Qualidade de drenagem	% de tempo a que o pavimento estará sujeito a condições de umidade próximas da saturação			
	< 1%	1% a 5%	5% a 25%	> 25%
Excelente	1,40 – 1,35	1,35 – 1,30	1,30 – 1,20	1,20
Boa	1,35 – 1,25	1,25 – 1,15	1,15 – 1,00	1,00
Regular	1,24 – 1,15	1,15 – 1,05	1,00 – 0,80	0,80
Pobre	1,15 – 1,05	1,05 – 0,80	0,80 – 0,60	0,60
Muito pobre	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

A equação que relaciona o tráfego, a serventia e a capacidade de suporte do subleito e os parâmetros adotados das camadas é expressa a seguir (16):

$$\log_{10} N = z_R \times s_0 + 9,36 \times \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \times \log_{10}(MR) - 8,07 \quad (16)$$

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 admissível; e

MR = módulo de resiliência do subleito (psi).

O nível de confiabilidade do projeto é embutido no processo de dimensionamento pelo termo z_R conforme o tipo de função da via, apresentado na Tabela 3.11 e os coeficientes a serem adotados na Tabela 3.12. O valor de s_0 adotado tem variação entre 0,30 e 0,40.

Tabela 3.11 – Nível de confiança de projeto recomendado (adaptado de AASHTO, 1993)

Classificação da via	Urbana	Rural
Interestadual e autoestradas	85 – 99,9	80 – 99,9
Arteriais simples	80 – 99	75 – 95
Coletoras	80 - 95	75 – 95
Locais	50 - 80	50 – 80

Tabela 3.12 – Coeficientes de distribuição normal correspondentes a diferentes níveis de confiabilidade (adaptado de AASHTO, 1993)

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 os projetos de restauração com aplicação de reforço em concreto asfáltico, uma vez determinada à capacidade estrutural do pavimento existente, o incremento estrutural necessário é a diferença entre o SN de projeto e o efetivo do pavimento existente, conforme a expressão (17) a seguir:

$$SN_{ref} = SN - SN_{ef} \quad (17)$$

Onde:

SN_{ref} = incremento estrutural necessário;

SN = número estrutural para o período de projeto; e

SN_{ef} = número estrutural do pavimento existente.

No caso de projetos de reciclagem profunda com cimento, o método da AASHTO (1993) não apresenta conteúdo específico, e desta forma, é feita uma adaptação da metodologia.

A estimativa da infraestrutura remanescente após a fresagem profunda e a determinação do número estrutural, pode ser obtida numa abordagem semelhante ao dimensionamento de pavimentos novos. Conforme a equação (15) apresentada, o número estrutural para a reabilitação em reciclagem profunda, pode ser obtido considerando:

- a_1 , a_2 e a_3 como coeficiente estrutural do revestimento, base reciclada e infraestrutura remanescente, respectivamente;

- D_1 , D_2 e D_3 = espessura do revestimento, base reciclada e infraestrutura remanescente, respectivamente (pol);
- m_2 , m_3 = coeficiente de drenagem da base reciclada e infraestrutura remanescente, respectivamente.

Para a camada de revestimento asfáltico em concreto asfáltico usinado a quente, o coeficiente estrutural a_1 adotado é 0,44 e a espessura mínima de revestimento D_1 , a ser definida em função do tráfego é descrita na Tabela 3.13 a seguir.

Tabela 3.13 – Espessura mínima de revestimento em concreto asfáltico (adaptado de AASHTO, 1993)

Tráfego	Espessura concreto asfáltico (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 (15) e (17) é possível se determinar a espessura necessária para a camada reciclada com cimento:

$$D_2 = \frac{SN_{ref} - a_1 \times D_1 - a_3 \times D_3 \times m_3}{a_2 \times m_2} \quad (18)$$

Para as camadas provenientes da reciclagem profunda com cimento, os coeficientes estruturais indicados pela AASHTO (1993) variam de acordo com a resistência a compressão simples.

A Tabela 3.14 apresenta alguns valores do coeficiente estrutural encontrados no trabalho realizado por Diefenderfer e Apeageyi (2011) através da retroanálise de deflexões em seções testes com 0,08 a 0,10 m de revestimento em concreto asfáltico, 0,20 a 0,27 m de camada reciclada com 5% de cimento na mistura e infraestrutura remanescente, avaliando-se no decorrer do tempo.

Tabela 3.14 – Coeficientes estruturais calculados para camada reciclada com cimento obtidos por retroanálise (adaptado de Diefenderfer e Apeageyi, 2011)

Meses	Coeficientes
2	0,26 a 0,29
6	0,28 a 0,31
18	0,30 a 0,32

3.2.2 CALTRANS

O CALTRANS apresenta o método de dimensionamento de reciclagem com cimento *in situ*, descrito como *Full Depth Reclamation Using Cement* (2013).

O departamento de pavimentação do órgão apresenta conteúdo específico para o projeto, construção e controle de obras para a reciclagem profunda com cimento, disponibilizando também métodos para a reciclagem profunda com emulsão asfáltica e espuma de asfalto.

Para o início das atividades de dimensionamento, a metodologia prevê uma avaliação abrangente do local do projeto, para uma melhor compreensão das condições existentes do pavimento, materiais e questões climáticas. Esta avaliação é dividida em três etapas:

(1) Estudos em escritório:

Onde são coletados os dados das condições do pavimento existente, informações históricas da construção, incluindo espessuras e materiais adotados, obtidos em bancos de dados disponibilizados pela CALTRANS. Também são relevantes os cadastros fotográficos como uma indicação inicial das condições do pavimento, podendo-se prever possíveis áreas problemáticas, dados climáticos e de tráfego, obtidos na Divisão de Operação de Trânsito do CALTRANS.

(2) Estudos preliminares de campo:

São avaliações realizadas em campo, visando complementar os estudos obtidos em escritório e validando se a solução em reciclagem com cimento é adequada para o trecho em estudo. O método recomenda que os estudos de campo, preferencialmente, sejam realizados durante a estação chuvosa, quando os problemas com umidade e drenagem do subleito são mais fáceis de identificar.

A avaliação visual deve identificar defeitos no pavimento existente e quais as suas causas, podendo se prever soluções de correção para o recebimento da camada reciclada.

(3) Investigação detalhada do local:

A investigação detalhada deve coletar informações adicionais sobre o pavimento e materiais, consolidando a opção pelo uso da camada reciclada com cimento. Na investigação detalhada são avaliados os seguintes parâmetros;

- Avaliação funcional do pavimento:
 - Classificação dos defeitos;
 - Motivos dos defeitos; e
 - Sistema de drenagem.
- Avaliação estrutural do pavimento existente:
 - Georradar (GPR);
 - Deflexão (FWD);
 - Penetração (DCP); e
 - Poços de ensaio para concepção da mistura e ensaios de laboratório.

Através do GPR, do inglês *Ground Penetrating Radar*, é possível obter uma avaliação contínua das espessuras das camadas do pavimento, podendo também identificar interferências subterrâneas, como dutos e bueiros, devendo-se a cada 500 metros proceder com a coleta de corpo de prova do revestimento e a realização do ensaio de DCP, para analisar a variabilidade da resistência do subleito e validar as medições do GPR e FWD.

O principal objetivo com o FWD e o DCP é avaliar a rigidez do subleito, abaixo da camada reciclada pretendida. Neste caso, locais onde for observada baixa rigidez, com módulo de resiliência inferior a 45 MPa, é sugerido tratamento especial.

Por meio da avaliação dos estudos expostos, deverá ser averiguada se a solução de reciclagem com cimento é adequada. Um resumo deste estudo é apresentado no fluxograma da Figura 3.11.

Figura 3.11 – Fluxograma das investigações de campo no processo de reciclagem *in situ* com cimento (adaptado de CALTRANS, 2013)

Dimensionamento

Para o dimensionamento da reciclagem profunda com cimento, adota-se o mesmo procedimento utilizado para pavimentos novos, com o cálculo da espessura total de material granular necessária para a proteção do subleito, em função do tráfego solicitante e da capacidade de suporte do subleito, ou no caso, infraestrutura remanescente, com a utilização de coeficientes de equivalência estrutural para transformar a espessura total em termos de material granular, ou seja, é um método semi-empírico.

Determina-se a espessura da camada reciclada e adota-se a resistência à compressão simples da mistura aos 7 dias, que deverá encontrar-se entre 2,0 a 4,1 MPa. A metodologia recomenda a utilização de resistência à compressão simples inferior para camadas recicladas mais espessas. As espessuras típicas adotadas para as camadas recicladas com cimento são de 0,20 a 0,30 m.

Os projetos com camada reciclada com cimento devem ser feitos para uma vida útil mínima de 20 anos. Para obtenção do Índice de Tráfego (TI), do inglês *Traffic Index*, a seguinte equação (19) é utilizada:

$$TI = 9 \times \left[\frac{N \times LDF}{10^6} \right]^{0,119} \quad (19)$$

Onde:

TI = índice de tráfego californiano;

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

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 3.15. No caso, as faixas são numeradas sequencialmente da esquerda para a direita.

Tabela 3.15 – Fator de distribuição do tráfego nas faixas de rolamento (adaptado de CALTRANS, 2013)

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

Para a profundidade de execução da camada reciclada com cimento, deverá ser considerado, no mínimo, 0,09 m superior à espessura da camada superficial em concreto asfáltico, a fim de evitar desgaste excessivo nos dentes pulverizadores e perda de produtividade.

Devido à pulverização do material existente, a camada reciclada compactada normalmente incha de 5 a 10% em relação ao volume original e o material em excesso pode ser destinado para aterros, alargamentos, acostamentos ou incremento da espessura da camada reciclada.

A distribuição granulométrica da mistura reciclada deve ser 100% passante para peneira inferior a 3", com 85% a 100% passante na peneira de 1½". Grandes agregados do revestimento triturado (RAP) são prejudiciais à camada reciclada e devem ser removidos da mistura.

A mistura reciclada pode apresentar trincas por retração e refletir para a camada de concreto asfáltico, aumentando a possibilidade de infiltração de água e deterioração precoce do pavimento. Uma solução adotada é a microfissuração, onde a aplicação de rolos vibratórios, entre 48 a 72 horas após o acabamento, cria uma rede de fissuras na camada cimentada. O objetivo é evitar que sejam formadas fissuras severas, reduzindo o potencial de reflexão de trincas no revestimento. Segundo estudos de Sebasta (2004), a resistência do material sofre uma redução temporária após a microfissuração, porém, recupera-se rapidamente pela hidratação contínua do cimento, não afetando as características de resistência da mistura a longo prazo.

A espessura total de material granular requerida é calculada através da equação (20) a seguir.

$$GE = 0,09744 \times TI \times (100 - R) \quad (20)$$

Onde:

GE = espessura total em termos de material granular (cm);

TI = índice de tráfego californiano; e

R = R-Value.

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 a seguir, preconizada pelo Asphalt Institute (1982):

$$R = \frac{M_R - 1155}{555} \quad (21)$$

Onde:

R = R-Value; e

M_R = módulo de resiliência (psi).

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

$$h_i = \frac{GE_i}{G_{f_i}} \quad (22)$$

Onde:

h_i = espessura da camada i (mm);

GE_i = espessura em termos de material granular da camada i (mm); e

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

O coeficiente estrutural da camada reciclada é calculado através da equação (23) a seguir.

$$G_{f_{rec}} = 0,90 + \frac{RCS}{1000} \quad (23)$$

Onde:

$G_{f_{rec}}$ = coeficiente estrutural da camada reciclada com cimento; e

RCS = Resistência à compressão simples a 7 dias (psi).

Na Tabela 3.16 estão representados os valores dos coeficientes estruturais para os principais materiais de pavimentação. O concreto asfáltico usinado a quente tem coeficiente variável, em função do tráfego e da espessura. Para os demais materiais, os valores são fixos.

Tabela 3.16 – Fatores de equivalência estrutural (adaptado de CALTRANS, 2013)

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

No apêndice A da metodologia estudada, é apresentado um exemplo de cálculo, com um roteiro de dimensionamento da estrutura de pavimento, em cinco passos:

- (1) Cálculo da espessura mínima da camada reciclada, baseado na espessura do revestimento asfáltico existente;
- (2) Estimativa do material excessivo após a trituração do pavimento existente e definição de seu destino;
- (3) Cálculo da espessura total do pavimento, em termos de material granular;
- (4) Cálculo da espessura necessária de cada camada, conforme o fator de equivalência estrutural; e
- (5) Cálculo da espessura necessária de concreto asfáltico para o revestimento.

Também, a metodologia apresenta no apêndice B e C um exemplo de análise dos levantamentos em FWD e DCP, para tomadas de decisões quanto às soluções a serem adotadas.

3.3 Espanha

3.3.1 Andalucía

A região de Andalucía na Espanha, com capital em Sevilha, apresenta método de dimensionamento de pavimentos rodoviários com capítulo específico para soluções em reciclagem. O manual é descrito como *Instruccion para el Diseno de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía* (2007).

No capítulo 7 do manual são apresentadas soluções de reciclagem *in situ*, tanto com tratamento em cimento, como também em emulsão betuminosa. A reciclagem é uma técnica alternativa à reconstrução, no qual o seu custo deve ser comparado para validar se a solução em reciclagem é viável.

O manual define que a largura mínima da reciclagem deve ser correspondente a pista ou acostamento, exceto em situações bem justificadas, como extensões uniformemente deterioradas ao longo de um segmento. O método permite a reciclagem de camadas betuminosas, materiais granulares e tratados com cimento.

A reabilitação do pavimento existente pode ser realizada através da reciclagem *in situ*, desde que sejam cumpridas as seguintes condições:

- Pavimentos deteriorados por fadiga nas quais não é indicada a restauração com reforço estrutural em concreto asfáltico;
- Pavimento com excesso de trincamento, elevado número de panelas, remendos, ou condição transversal heterogênea, em casos óbvios de camadas com descolamento ou defeitos de misturas que podem ser corrigidos por meio da técnica de reciclagem;
- Pavimento asfáltico com camadas tratadas com cimento em que ocorre a reflexão de trincas transversais de retração, resultando em uma superfície deteriorada; e
- Pavimentos com revestimento asfáltico com espessuras de até 0,06 m e bases granulares, com intuito de estabilizar o material granular existente, tanto para aumentar a sua capacidade de suporte ou para diminuir a sua susceptibilidade à água.

Previamente antes do início dos trabalhos, é recomendado um reconhecimento minucioso do pavimento para caracterizar adequadamente as condições funcionais

da superfície existente. Para isso, a campanha de reconhecimento incluirá pelo menos uma inspeção visual, levantamento deflectométrico e a coleta de amostras representativas, além disso, os dados históricos do pavimento devem ser analisados.

Observa-se que o método de Andalucía (2007), para a determinação das espessuras da camada reciclada com cimento, considera que o material reciclado é estruturalmente análogo a uma solução em solo-cimento e devem ser obtidas através do procedimento de cálculo analítico para estruturas convencionais de pavimento, formadas por uma base de solo-cimento e revestimento em concreto asfáltico.

Principais recomendações para o dimensionamento estrutural:

- A espessura mínima da camada reciclada será de 0,20 m, em espessuras menores, as camadas de materiais tratados com cimento podem ter rupturas prematuras, sendo descartada essa opção;
- A espessura máxima do tratamento será de 0,35 m, porém não é recomendado exceder 0,30 m. Essas limitações são impostas com base nas condições de compactação dos equipamentos atuais disponível em mercado;
- A proteção correspondente e a irrigação de cura devem ser consideradas no projeto; e
- É recomendada a execução do “pré-fissuramento” da camada reciclada.

Dimensionamento

O dimensionamento consistirá na definição dos materiais e espessuras das diferentes camadas implantadas sobre a infraestrutura considerada, para que a vida útil teórica coincida ou exceda o tráfego equivalente estimado do projeto, de acordo com os modelos mecanicistas indicados pelo método.

O primeiro passo para o dimensionamento é classificar a rodovia em função do tráfego previsto para o período de projeto e estrutura de pavimento recomendada.

A classificação da rodovia, segundo o tráfego estimado para um período de 20 anos, se dá conforme a Tabela 3.17. Na Figura 3.12, apresentam-se os tipos de estruturas recomendadas para o tráfego previsto.

Tabela 3.17 – Classificação das rodovias (adaptado de Andalucía, 2007)

Categorias de tráfego	
Tipo	VDMc
T00	≥ 4.000
T0	≥ 2.000 e < 4.000
T1	≥ 800 e < 2.000
T2	≥ 200 e < 800
T3A	≥ 100 e < 200
T3B	≥ 50 e < 100
T4A	≥ 25 e < 50
T4B	< 25

T2 a T00	CAUQ S-IS	CAUQ BGS	CAUQ SC-4	
T3	CAUQ MBF BGS	CAUQ BGS	Somente T3B CAUQ SC-3	CAUQ SC-4
	CAUQ MBF SC-3	CAUQ MBF S-IS	CAUQ S-IS	MAS MBF BGS
T4	MAS BGS	MBF SC-4	TSD MBF BGS	TSD MBF BG
	CAUQ BGS	CAUQ MBF S-IS	CAUQ SC-3	CAUQ SC-4
Legenda:	CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado à Quente		
	MBF	Mistura Betuminosa à Frio		
	MAS	Mistura Aberta Selada com Ligante Asfáltico		
	TSD	Tratamento Superficial Duplo		
	SC-4	Solo-Cimento MR = 80.000 kgf/cm ²		
	SC-3	Solo-Cimento MR = 20.000 kgf/cm ²		
	BGS	Brita Graduada Simples		
	BG	Brita Graduada		
	S-IS	Solo Estabilizado <i>in situ</i>		

Figura 3.12 – Tipos de estrutura de pavimento recomendada (adaptado de Andalucía, 2007)

Posteriormente à definição do tráfego e o tipo de estrutura de pavimento a ser adotada é verificada a espessura mínima para o conjunto de camadas em concreto asfáltico, conforme apresentado na Tabela 3.18.

Tabela 3.18 – Espessura do conjunto de camada em concreto asfáltico em função do tráfego previsto (adaptado de Andalucía, 2007)

Zona climática (*)	Tipo	Espessura mínima (m)
ZT1 a ZT3	T00 a T01	0,15
	T2 a T3A	0,12
	T3B	0,10
	T4	Não exigido (TS)
ZT4	T00 a T3A	0,15
	T3B	0,12
	T4	Não exigido (TS)

(*) Conforme a zona climática prevista na região de Andalucía.

Onde:

TS = Tratamento superficial.

A resistência a compressão simples da mistura reciclada com cimento não poderá ser inferior a 2,5 MPa aos 7 dias. Os materiais estabilizados com cimentos devem apresentar características mecânicas conforme a classificação do tipo de mistura, para a reciclagem com cimento, segue os dois tipos apresentados na Tabela 3.19.

Tabela 3.19 – Classificação do tipo de mistura reciclada com cimento (adaptado de Andalucía, 2007)

Tipo	MR (MPa)	RTF (MPa)
SC-3	2.000	0,43
SC-4	8.000	0,72

O dimensionamento é realizado através do *software* computacional ICAFIR, que utiliza o modelo de resposta elástica multicamadas proposto por Burmister em 1943, considerando que as camadas estão totalmente aderidas. Este programa pode ter os resultados reproduzidos pelo *software* computacional Elsym-5, que contempla a mesma teoria empregada.

No dimensionamento mecanicista, a classificação do tipo de fundação e o tipo de tráfego recomendado, são apresentados na Tabela 3.20.

Tabela 3.20 – Classificação da fundação (adaptado de Andalucía, 2007)

Classificação	MR equivalente (MPa)	Indicação para tipo de tráfego
Baixo	≥ 60	T4
Médio	≥ 100	T3 e T4
Alto	≥ 160	T00 a T2

Os modelos mecanicistas adotados pelo método de Andalucía (2007) visam comparar a máxima deformação específica vertical de compressão atuante no topo da camada do subleito, com o valor admissível correspondente, expresso conforme a expressão (24), como também, na camada reciclada avaliando a tensão de tração na flexão máxima para dois tipos de mistura previstos, conforme as expressões (25) e (26).

$$\varepsilon_v = 2,16 \times 10^{-2} \times N^{-0,28} \quad (24)$$

$$\sigma_r = 0,43 \times (1 - 0,065 \times \log N) - \text{Tipo SC-3} \quad (25)$$

$$\sigma_r = 0,72 \times (1 - 0,065 \times \log N) - \text{Tipo SC-4} \quad (26)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão;

σ_r = tensão atuante máxima na camada cimentada (MPa); e

ε_v = Deformação vertical específica de compressão (cm/cm).

Ressalta-se que os valores 0,43 e 0,72, das expressões (25) e (26), respectivamente, estão relacionados à resistência a tração na flexão (MPa) da camada cimentada.

3.3.2 Castilla y León

A região de Castilla y León, na Espanha, com sede em Salamanca, apresenta método de dimensionamento de pavimentos rodoviários com capítulo específico para soluções em reciclagem. O manual é descrito como *Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firms y Pavimentos* (2004).

No item 6.21 do manual é definido o material reciclado com cimento, sendo detalhado o comportamento estrutural, requisitos técnicos e recomendações

construtivas. No capítulo 8 é abordado o dimensionamento estrutural para soluções em reciclagem e reforço em concreto asfáltico, com soluções catalogadas a serem adotadas, em função do tráfego previsto.

O método define que as soluções em reciclagem com cimento são ideais para reabilitação de pavimentos com deflexão excedentes a 200×10^{-2} mm ou se deseja recuperar a capacidade de suporte, com benefícios técnicos, ambientais e econômicos significativos.

Antes a execução da reciclagem são necessários estudos prévios, a fim de se verificar a viabilidade da solução, definir o tipo adequado de reciclagem e determinar as propriedades mecânicas do material reciclado. É imprescindível a realização de uma investigação do pavimento existente, com obtenção de amostras representativas para caracterizá-lo estruturalmente, como também os materiais e espessuras que constituem o pavimento existente. O número mínimo de poços de inspeção recomendado é de um a cada dois quilômetros, reduzindo para cada quilômetro, caso os resultados sejam heterogêneos.

O manual recomenda que a mistura reciclada não apresente agregados com tamanho superior a 60 mm e o material passante a peneira de 4 mm deverá ser superior a 30%, caso contrário, será obtida uma curva granulométrica descontínua e terá a necessidade de ser corrigida, para isso é indicado a adição de areia ou cascalho natural.

O teor de cimento mínimo da mistura reciclada deverá ser de 3% em massa seca, com resistência a compressão simples mínima aos 7 dias de 2,5 MPa limitada a 4,5 MPa.

Após a definição das características da mistura reciclada em laboratório e do dimensionamento estrutural, um trecho experimental deverá ser executado, a fim de se realizar testes e validar a solução.

Antes a execução da obra deve-se atentar para as características da drenagem existente, evitando acúmulo de água em valas ou nas bordas do pavimento.

Para o desempenho adequado de misturas cimentadas é recomendado espessuras entre 0,20 m e 0,35 m, sob uma ou mais camadas de concreto asfáltico. Para categoria de tráfego tipo T2 ou superior, é recomendada a execução do “pré-

fissuramento” da camada reciclada, para evitar a reflexão de trincas no revestimento asfáltico.

Observa-se que o método de Castilla y León (2004), considera o material reciclado com características semelhantes à solução em solo-cimento, sendo este o critério adotado para a definição das soluções propostas.

Dimensionamento

O dimensionamento consiste num catálogo de soluções de reabilitação, prevendo soluções de reciclagem com cimento em função do tráfego previsto. Todas as soluções propostas são para um período de projeto mínimo de 20 anos.

Em todos os casos, as espessuras indicadas devem ser consideradas como mínimas, portanto, não pode ser reduzido, entretanto, o projetista pode sugerir um incremento nas espessuras, sendo devidamente justificado.

A classificação do tráfego da rodovia se dá conforme a Tabela 3.21, limitada ao VDM comercial de 800.

Tabela 3.21 – Classificação do tráfego pesado (adaptado de Castilla y León, 2004)

Categorias de tráfego	
Tipo	VDMc
T21	≥ 400 e < 800
T22	≥ 200 e < 400
T31	≥ 100 e < 200
T32	≥ 50 e < 100
T41	≥ 25 e < 50
T42	< 25

O capítulo 5, conforme descrito no método de Castilla y León, (2004), define que o subleito para ser adequado, deve apresentar CBR mínimo de 5%, na Tabela 3.22, é apresentado à classificação do tipo de fundação em função do módulo de resiliência obtido por ensaio de carga com placa, onde a camada reciclada estará apoiada.

Tabela 3.22 – Classificação da fundação sob a camada reciclada (adaptado de Castilla y León, 2004)

Classificação	MR (MPa)
E1	≥ 60
E2	≥ 120
E3	≥ 300

As estruturas indicadas no catálogo são dimensionadas de forma a atender infraestrutura remanescente com fundação tipo E2.

Os modelos mecanicistas adotados para obtenção do catálogo de soluções de reciclagem com cimento de Castilla y León, (2004), são apresentados nas expressões (27) e (28) a seguir.

$$\varepsilon_v = 2,1 \times 10^{-2} \times N^{-0,24} \quad (27)$$

$$\sigma_r = R_f \times (1 - 1/12 \times \log N) \quad (28)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão;

σ_r = tensão admissível na camada cimentada (MPa);

R_f = resistência à tração na flexão da camada cimentada (MPa); e

ε_v = Deformação vertical específica de compressão (cm/cm).

Na Figura 3.13, segue o catálogo de soluções em reciclagem com cimento para cada categoria de tráfego pesado com espessuras mínimas em metros.

Figura 3.13 – Catálogo de soluções para reabilitação em reciclagem com cimento (adaptado de Castilla y León, 2004)

3.4 Aspectos relevantes

A pesquisa bibliográfica mostrou que os países estudados desenvolveram metodologias próprias para o dimensionamento estrutural de camadas cimentadas. Dos métodos analisados, podem-se destacar para cada um deles os principais aspectos observados:

TRL386: O método utiliza uma série de simplificações, as variáveis de entrada de capacidade de suporte e tráfego são classificadas em categorias, com limitante para adoção de soluções com reciclagem para um tráfego de $3,0 \times 10^7$. As espessuras de revestimento asfáltico e base cimentada são obtidas através de ábacos de dimensionamento. Consideram-se valores altos para a resistência à compressão simples de até 10 MPa aos 7 dias.

TRL611: É uma revisão do método TRL386, sendo que ambos os métodos ingleses utilizam uma série de simplificações, e as variáveis de entrada de capacidade de suporte e tráfego são classificadas em categorias, com limitante para adoção de soluções com reciclagem para um tráfego de $8,0 \times 10^7$. Consideram-se valores altos para o módulo dinâmico das bases recicladas com cimento, a partir de 5.000 MPa. Uma particularidade é o método de classificação da mistura, onde são relacionados o módulo dinâmico e a resistência à flexão, classificando o material por zona quanto à sua rigidez e resistência.

AASHTO: É um método clássico de dimensionamento empírico. Não é específico para o dimensionamento da reciclagem profunda, porém pode ser adaptado. Os valores de coeficiente da camada reciclada com cimento podem ser estimados pela resistência a compressão simples da mistura ou por estudos específicos, com valores que apresentam grande variação, entre 0,13 a 0,30, dificultando a precisão no dimensionamento.

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 cimento é obtido através de uma equação, em função da resistência à compressão simples, onde seu valor oscila entre 1,20 e 1,70. É o único que considera diferença volumétrica entre o material fresado e o material tratado.

Andalucía: apresenta adaptação do dimensionamento convencional de estrutura em solo-cimento para a reciclagem com cimento, como também, recomendações específicas no dimensionamento e execução da reciclagem. A definição da estrutura final é obtida através da avaliação mecanicista, conforme os modelos indicados, sem um modelo específico para camada reciclada. São considerados valores fixos de resistência e rigidez para as misturas cimentadas.

Castilla y León: O método apresenta soluções típicas por meio de um catálogo, em função do tipo de tráfego, considerando fixa a condição de suporte da fundação que receberá a camada reciclada, podendo dessa forma, acarretar em estruturas superdimensionadas. As espessuras indicadas no catálogo são as mínimas exequíveis, podendo ainda ser incrementadas, justificadas pelo projetista. Considera-se que a camada de reciclagem com cimento apresenta desempenho semelhante à camada de solo-cimento. O método não apresenta modelo mecanicista específico para a camada reciclada.

Das observações realizadas, verificou-se que entre as metodologias avaliadas não prevalece um consenso para os valores de rigidez e resistência indicados para as bases recicladas com cimento. No método inglês TRL386, o dimensionamento é realizado tendo como parâmetro a resistência a compressão simples, com valores de até 10 MPa aos 7 dias, entretanto, o método do CALTRANS recomenda valores de até 4,1 MPa. Outro exemplo é quanto ao dimensionamento pelo método do TRL611, onde um dos parâmetros de dimensionamento adotado é o módulo dinâmico da mistura reciclada, iniciando a partir de 5.000 MPa e limitado até 60.000 MPa, valores extremamente altos, quando comparados aos valores abordados neste trabalho e nos métodos de Andalucía e Castilla y León.

Sem exceção, os métodos indicam a necessidade de uma abrangente avaliação do trecho de projeto para definir se a solução de reciclagem é viável e adequada.

São descritas sucintamente na Tabela 3.23 a seguir as principais características observadas nas metodologias avaliadas, ressaltando-se as particularidades dos métodos para reciclagem com cimento, exceto o método da AASHTO (1993), pois não trata especificamente de bases reciclada.

Tabela 3.23 – Resumo das características observadas nas metodologias para o dimensionamento de estruturas com reciclagem com cimento

Item	TRL386	TRL611	CALTRANS	Andalucía	Castilla y León
País	Inglaterra	Inglaterra	EUA	Espanha	Espanha
Ano	1999	2004	2012	2007	2004
Espessura mínima (m)	0,15	0,15	0,20	0,20	0,20
Espessura máxima (m)	0,30	0,47 (ábaco)	0,30	0,35	0,35
Revestimento Asfáltico (m)	TS a 10 (tabela)	TS a 18 (ábaco)	-	TS a 15 (tabela)	5 a 12 (tabela)
CBR do subleito mínimo (%)	2,0	2,0	4,5	6,0	5,0
Tráfego máximo	3,0 x 10 ⁷ 20 anos	8,0 x 10 ⁷ 20 anos	Não há limite 20 anos	Não há limite 20 anos	VDM 800 20 anos
RCS (MPa)	4,5 a 10,0 7 dias	-	2,0 a 4,1 7 dias	Mínimo 2,5 7 dias	2,5 a 4,5 7 dias
RTF (MPa)	-	0,35 a 5,0	-	0,43 e 0,72	-
MR (MPa)	-	5.000 a 60.000 (*)	-	2.000 e 8.000	4.000 a 8.000
Metodologia	Mecanicista	Mecanicista	Semi-empírico	Mecanicista	Mecanicista

(*) Método considera o módulo dinâmico.

4 ESTUDO PARAMÉTRICO DE PAVIMENTOS RECICLADOS COM CAMADA CIMENTADA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados do estudo paramétrico desenvolvido com a finalidade de analisar os principais fatores estruturais que afetam o comportamento dos pavimentos reciclados com camadas cimentadas.

O primeiro estudo, caso 1, considera a camada cimentada funcionando como camada de base subjacente a um revestimento asfáltico, e o segundo, caso 2, admitindo que a sub-base seja cimentada e sobre a qual é colocada uma camada de base granular, antes da execução do revestimento final em concreto asfáltico, conforme é ilustrado na Figura 4.1 a seguir.

Figura 4.1 – Estruturas consideradas para o estudo paramétrico

Os estudos constaram basicamente da análise das deflexões, tensões e deformações em diversos pontos críticos do pavimento, admitindo-se como carga do eixo simples roda dupla padrão rodoviário nacional de 8,2 tf, com diferentes espessuras e módulos de resiliência dos materiais constituintes da estrutura.

Em função dos resultados obtidos, pretende-se desenvolver critérios de projeto e de verificação estrutural para cada alternativa analisada, contemplando a reciclagem com cimento na camada de base ou sub-base, identificando as vantagens e desvantagens de cada situação.

4.1 Aspectos Metodológicos

Neste trabalho, para determinação dos principais esforços atuantes na estrutura sob efeito da carga de tráfego, empregou-se o *software* computacional Elsym-5, que admite que a estrutura seja um sistema elástico, constituído de até 5 camadas, onde os materiais utilizados são homogêneos, uniformes, isotrópicos e com elasticidade linear.

O programa apresenta as vantagens de ser prático e de fácil aplicação, com baixo tempo de processamento, está consolidado no meio técnico e é aceito pelos principais órgãos rodoviários do país. Entretanto, apresenta a desvantagem de considerar somente a elasticidade linear dos materiais.

A carga de tráfego considerada é o semieixo padrão de 8,2 tf, simulada pelo carregamento tipo FWD, com carga (Q) de 40 kN, representado por uma roda simples com raio (r) de 0,15 m, correspondendo a uma pressão de contato (P) de 0,568 MPa. A Figura 4.2 apresenta o carregamento simulado, ilustrando os pontos críticos atuantes avaliados das estruturas do pavimento.

Figura 4.2 – Parâmetros avaliados e pontos críticos atuantes nas estruturas

Parâmetros adotados nos materiais constituintes dos materiais avaliados:

- MR1, MR2, MR3 e MR4 = módulo de resiliência (MPa);
- $\nu 1$, $\nu 2$, $\nu 3$ e $\nu 4$ = coeficiente de Poisson; e
- $h1$, $h2$ e $h3$ = espessuras das camadas (m).

4.2 Características dos materiais constituintes

Apresentam-se a seguir as principais características elásticas dos materiais adotados no estudo paramétrico desenvolvido.

4.2.1 Revestimento

Qualquer pavimento reciclado com cimento exigirá que o revestimento em contato com os veículos seja constituído de concreto asfáltico usinado a quente, preferencialmente com granulometria densa, que é o tipo de material comumente empregado na maioria dos pavimentos construídos na malha rodoviária do estado de São Paulo.

Adotou-se assim uma mistura betuminosa composta por agregados enquadrados na faixa II ou III e ligante asfáltico com características e teor indicados na especificação do DER/SP.

Com base nas informações da literatura técnica e metodologias de dimensionamento de pavimentos asfálticos nacionais, adotaram-se os seguintes valores ou faixas de variação para o módulo de resiliência e coeficiente de Poisson:

- $MR_{CA} = 2.250$ a 4.500 MPa; e
- $\nu_{CA} = 0,35$.

No caso de espessuras elevadas de concreto asfáltico que, por questões construtivas, deverão ser na prática executadas em camadas separadas, os valores de módulo de resiliência de cada uma delas foram mantidos constantes; também é admitido que ocorra aderência perfeita entre as mesmas.

4.2.2 Base ou sub-base cimentada

Adotou-se como base ou sub-base uma camada de material granular resultante da reciclagem do pavimento asfáltico existente tratado com cimento, de acordo com a especificação do DER/SP.

A rigidez deste material será função de sua resistência mecânica, a qual, por sua vez dependerá da granulometria e uniformidade do produto resultante da reciclagem, da adição eventual de agregados virgens e do teor de ligante hidráulico adotado.

Para o desenvolvimento deste estudo paramétrico empregaram-se valores de módulo de resiliência constantes para o material a ser aplicado em uma única camada, com faixa de variação para o módulo de resiliência e coeficiente de Poisson, apresentados a seguir:

- $MR_{RC} = 2.500$ a 10.000 MPa; e
- $\nu_{RC} = 0,20$.

Os valores foram adotados conforme a abrangência dos resultados obtidos por trabalhos com estudos de laboratório para misturas recicladas com cimento. Na Tabela 4.1 a seguir, apresentam-se alguns destes trabalhos. Ressalta-se que cada pesquisa propõe material de base existente, energia de compactação, idade de cura, pressão de confinamento, método de obtenção como compressão diametral ou tração na flexão, entre outros parâmetros, distintos entre si, não detalhados neste trabalho.

Tabela 4.1 – Módulo de resiliência de misturas recicladas com cimento obtidos na literatura

Autor	Teor de Cimento (%)	Teor de Fresado (%)	Módulo de Resiliência (MPa)
Aranha, 2013	5	0	8.000
	6	0	8.200
	7	0	8.000
Trichês et al., 2013	2	25	3.727
	3	25	4.861
	4	25	5.518
Kleinert, 2016	1	50	4.779
	2	80	7.130
	4	50	11.061

Na Tabela 4.2 apresentam-se valores de Poisson sugeridos por diversos autores.

Tabela 4.2 – Valores de Poisson obtidos na literatura

Referência	Material	Poisson Recomendado
Ceratti, 1991	Solo-cimento	0,17
DER/SP, 2006	Materiais estabilizados com cimento	0,20
Balbo, 2007	CCR e BGTC	0,15 a 0,20
Balbo, 2007	SC e SMC	0,20 a 0,30
Minguela, 2011		0,25
Trichês e Santos, 2011	Bases Recicladas com Cimento	0,20
Oliveira, et al., 2010		0,25

4.2.3 Base granular

Para as camadas de base granular prevê-se a utilização de pedra britada, cuja granulometria deve se enquadrar em uma das faixas estabelecidas para a brita graduada simples preconizada pela especificação do DER/SP.

Este material sem aditivo apresenta módulo de resiliência relativamente baixo, sensivelmente dependente da tensão de confinamento, do teor de umidade e correspondente grau de saturação.

Apesar de este material apresentar valor de módulo de resiliência variável, com elasticidade não linear, adotaram-se para a camada granular valores constantes na análise, cujos valores para o módulo de resiliência e coeficiente de Poisson foram pré-fixados na seguinte faixa de estudo:

- $MR_{BGS} = 150$ a 400 MPa; e
- $\nu_{BGS} = 0,40$.

4.2.4 Infraestrutura remanescente

Para a fundação do pavimento, subjacente à execução da camada reciclada, admitiu-se a manutenção da infraestrutura existente, que se constitui das camadas do pavimento remanescente. O mesmo poderá ou não ser reforçado, em função das condições prevalecentes no local.

Diante da variabilidade que esta camada apresenta, adotaram-se valores constantes na análise, com valores para o módulo de resiliência e coeficiente de Poisson:

- $MR_{INFRA} = 150$ a 450 MPa; e
- $\nu_{INFRA} = 0,40$.

4.2.5 Subleito

Para o subleito existente, fundação do pavimento, sobre o qual estão assentadas as camadas do pavimento existente, e devido à sua importância no desempenho estrutural da estrutura do pavimento, adotaram-se valores constantes na análise, com valores para o módulo de resiliência e coeficiente de Poisson:

- $MR_{SL} = 50$ a 200 MPa;
- $\nu_{SL} = 0,45$.

4.2.6 Parâmetros adotados

São apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4 a seguir, os valores adotados neste estudo para cada variável analisada em relação às características geométricas e elásticas de cada camada, envolvendo tipos de estruturas, materiais utilizados, espessuras, módulos de resiliência e coeficientes de Poisson.

Tabela 4.3 – Estrutura semirrígida base cimentada – caso 1

Camada	Material	Módulo de Resiliência (MPa)	Coeficiente de Poisson	Espessuras (m)
Revestimento	Concreto Asfáltico	2.250 - 3.000 - 3.750 4.500	0,35	0,05 - 0,10 0,15 - 0,20
Base	Reciclada com Cimento	2.500 - 5.000 7.500 - 10.000	0,20	0,15 - 0,20 0,25 - 0,30
Sub-base	Infraestrutura Remanescente	150 - 225 300 - 375 - 450	0,40	0,10 - 0,15 - 0,20 0,25 - 0,30
Subleito	Solo Local	50 - 100 - 150 - 200	0,45	-

Tabela 4.4 – Estrutura invertida com sub-base cimentada – caso 2

Camada	Material	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Espessuras (m)
Revestimento	Concreto Asfáltico	2.250 - 3.000 - 3.750 4.500	0,35	0,05 - 0,10 0,15 - 0,20
Base	Brita Graduada Simples	150 - 200 - 400	0,40	0,10 - 0,15 - 0,20
Sub-Base	Reciclada com Cimento	2.500 - 5.000 7.500 - 10.000	0,20	0,15 - 0,20 0,25 - 0,30
Subleito	Solo Local	50 - 100 - 150 - 200	0,45	-

4.3 Indicadores estruturais analisados

Neste trabalho procurou-se analisar os valores máximos dos indicadores estruturais a seguir relacionados, nos respectivos pontos de interesse. Principais indicadores estruturais solicitantes:

- D_0 = deslocamento vertical ou deflexão recuperável máxima na superfície do revestimento ($\times 10^{-2}$ mm);
- σ_t = tensão horizontal máxima de tração na fibra inferior da camada reciclada com cimento (MPa);
- ε_t = deformação horizontal específica máxima de tração na fibra inferior da camada asfáltica ($\times 10^{-4}$ cm/cm); e
- ε_v = deformação vertical específica máxima de compressão no topo do subleito ($\times 10^{-4}$ cm/cm).

Além da deflexão máxima, também procurou-se avaliar outros parâmetros relacionados com a bacia deflectométrica da estrutura, conforme estudado por LOPES (2012), sendo os principais destes abordados nesta pesquisa, conforme apresentado na Tabela 4.5 seguir:

Tabela 4.5 – Parâmetros de curvatura e bacia deflectométrica

Indicador	Expressão	Unidade
D_0 – Deflexão	-	10^{-2} mm
R – Raio de curvatura	$R = \frac{3125}{D_0 - D_{25}}$	m
SCI – Índice de curvatura da superfície	$SCI = D_0 - D_{30}$	10^{-2} mm
BDI – Índice de danos à base	$BDI = D_{30} - D_{60}$	10^{-2} mm
BCI – Índice de curvatura da base	$BCI = D_{60} - D_{90}$	10^{-2} mm
D_{120}	-	10^{-2} mm

Foram considerados, ainda, D_0 , D_{25} , D_{30} , D_{60} , D_{90} e D_{120} (10^{-2} mm), deflexões recuperáveis com afastamento do ponto e aplicação da carga de zero, 0,25 m, 0,30 m, 0,60 m, 0,90 m e 1,20 m, respectivamente.

A partir das medições das deflexões nos geofones mais distantes do centro de aplicação da carga é possível, através de equações propostas por diversos órgãos e autores, a obtenção de valores estimados do módulo de resiliência do subleito, imprescindível para tomadas de decisões quanto à reciclagem de um pavimento existente. Dentre os pontos recomendados para esta análise, estão D_{60} e D_{120} .

No total das estruturas simuladas, para o caso 1, base reciclada com cimento, obtiveram-se 1280 casos onde a camada do subleito apresenta módulo de resiliência igual ou superior à infraestrutura remanescente. Como a prática deste tipo de estrutura não é concebida em projetos de pavimentos, este foi excluída da análise.

Para as estruturas do caso 2, sub-base reciclada com cimento, foram eliminados 96 casos onde a deformação horizontal no revestimento apresentou compressão, resultado este inconsistente devido à base adotada apresentar módulo de resiliência de 5 a 25 vezes inferior ao revestimento, sendo, portanto, excluídas da análise estas estruturas.

Em resumo, foram utilizadas 24.320 estruturas para o caso 1 e 9.120 para o caso 2, com os resultados apresentados a seguir.

Os dados de saída obtidos através do *software* Elsym-5 podem ser visualizados no Anexo D.

4.4 Apresentação dos resultados

Os resultados das simulações realizadas foram processados através do *software* Microsoft Excel®, sendo encontradas equações de correlação entre os indicadores estruturais e os demais parâmetros da bacia deflectométrica que caracterizam as condições do pavimento reciclado. Os dados de processamento obtidos podem ser visualizados no Anexo B.

A Tabela 4.6 e a Tabela 4.7 apresentam resumidamente os coeficientes dos modelos de regressão e os parâmetros de confiabilidade estatística para os dois casos analisados, de base e sub-base recicladas com cimento. Também procurou-se analisar o valor do coeficiente de determinação r^2 , que qualifica a equação obtida. Os valores variam entre zero e 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, maior é a capacidade de representação da expressão.

Os modelos obtidos podem ser representados pelas expressões a seguir (29) e (30), com os respectivos parâmetros e coeficientes indicados.

$$P_{CASO1} = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BC}^c \times MR_{BC}^d \times h_{IR}^e \times MR_{IR}^f \times MR_{SL}^g \quad (29)$$

Tabela 4.6 – Parâmetros e coeficientes do estudo paramétrico, caso 1 – estrutura semirrígida

Parâmetro	k	a	b	c	d	e	f	g	r^2
D ₀	3,448	-0,175	-0,181	-0,460	-0,173	-0,045	-0,058	-0,597	0,983
σ _t	-2,297	-0,462	-0,156	-1,093	0,502	-0,084	-0,180	-0,137	0,980
ε _v	1,538	-0,456	-0,211	-1,097	-0,360	-0,311	0,028	-0,419	0,975
SCI	3,736	-0,002	-0,444	-0,308	-0,318	0,011	-0,006	-0,262	0,734
BDI	2,014	-0,417	-0,199	-0,961	-0,250	-0,103	-0,133	-0,395	0,966
BCI	2,088	-0,536	-0,234	-1,236	-0,417	-0,095	-0,140	-0,180	0,962
D120	2,915	-0,045	-0,028	-0,105	-0,015	-0,026	-0,029	-0,919	0,995
D60	2,996	-0,153	-0,077	-0,351	-0,078	-0,051	-0,061	-0,776	0,994
R	-0,315	-0,050	0,468	0,211	0,296	-0,018	-0,005	0,278	0,726

$$P_{CASO2} = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BG}^c \times MR_{BG}^d \times h_{SBC}^e \times MR_{SBC}^f \times MR_{SL}^g \quad (30)$$

Tabela 4.7 – Parâmetros e coeficientes do estudo paramétrico, caso 2 – estrutura invertida

Parâmetro	k	a	b	c	d	e	f	g	r ²
D ₀	3,622	-0,446	-0,213	0,142	-0,307	-0,270	-0,084	-0,407	0,971
ε _t	-2,569	-0,495	-0,146	-0,384	-0,049	-0,882	0,485	-0,265	0,965
σ _t	1,694	-0,453	-0,138	-0,341	-0,089	-0,982	-0,453	-0,303	0,970
ε _v	3,361	-0,883	-0,461	0,265	-0,395	-0,082	-0,039	-0,120	0,952
SCI	3,086	0,004	-0,044	0,341	-0,538	-0,692	-0,226	-0,163	0,798
BDI	2,093	-0,107	-0,030	-0,121	-0,268	-0,908	-0,252	-0,413	0,917
BCI	2,866	-0,064	-0,038	-0,052	-0,014	-0,088	-0,019	-0,916	0,996
D120	2,966	-0,094	-0,041	-0,079	-0,085	-0,326	-0,083	-0,774	0,992
D60	0,209	0,928	0,499	-0,238	0,368	0,063	0,032	0,119	0,956
R	3,622	-0,446	-0,213	0,142	-0,307	-0,270	-0,084	-0,407	0,971

Para o caso 1, praticamente todos os parâmetros apresentaram boa correlação com a bacia deflectométrica, com coeficiente de determinação (r²) superior a 0,9, porém, para o Índice de Curvatura da Superfície (SCI) e o raio de curvatura (R), os valores ficaram próximos de 0,7, com desempenho inferior aos demais.

No caso 2, também há um bom desempenho entre as correlações com os parâmetros adotados, com coeficiente de determinação (r²) superior a 0,9. Porém, verificou-se que o parâmetro de índice de danos à base (BDI) apresentou desempenho inferior, próximo de 0,8.

4.5 Análise dos Parâmetros Estudados

Para a análise de sensibilidade dos parâmetros estudados, apresentam-se a seguir gráficos (Figura 4.3 a Figura 4.9) mostrando as variações dos principais indicadores estruturais em função das diferentes espessuras das camadas, bem como de seus respectivos valores de módulo de resiliência, tanto para os pavimentos reciclados com base ou sub-base reciclada com cimento, a partir das equações geradas pelo estudo paramétrico. Nesta análise, os parâmetros da camada reciclada são

considerados variáveis, como o módulo de resiliência e a espessura, e fixados os demais parâmetros, conforme a Tabela 4.8 e Tabela 4.9 a seguir:

Tabela 4.8 – Parâmetros fixados para análise, caso 1 – estrutura semirrígida

Camada	Material	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Espessuras (m)
Revestimento	Concreto Asfáltico	3.000	0,35	0,10
Base	Reciclada com Cimento	Variável	0,20	Variável
Sub-base	Infraestrutura Remanescente	150	0,40	0,15
Subleito	Solo Local	50	0,45	-

Tabela 4.9 – Parâmetros fixados para análise, caso 2 – estrutura invertida

Camada	Material	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Espessuras (m)
Revestimento	Concreto Asfáltico	3.000	0,35	0,10
Base	Brita Graduada Simples	300	0,40	0,12
Sub-Base	Reciclada com Cimento	Variável	0,20	Variável
Subleito	Solo Local	50	0,45	-

Figura 4.3 – Desempenho da base reciclada em função do MR, D_0 e h – Caso 1

Figura 4.4 – Desempenho da base reciclada em função do MR, σ e h – Caso 1

Figura 4.5 – Desempenho da base reciclada em função do MR, ε_v e h – Caso 1

Figura 4.6 – Desempenho da base reciclada em função do MR, D_0 e h – Caso 2

Figura 4.7 – Desempenho da base reciclada em função do MR, ϵ_t e h – Caso 2

Figura 4.8 – Desempenho da base reciclada em função do MR, σ_t e h – Caso 2

Figura 4.9 – Desempenho da base reciclada em função do MR, ε_v e h – Caso 2

Uma análise dos gráficos obtidos através das equações de correlação da bacia deflectométrica e indicadores estruturais é apresentada a seguir. A análise é realizada através da comparação dos valores obtidos pelas equações, com a espessura da camada cimentada fixada em 0,15 m e 0,30 m, podendo assim observar as diferenças no comportamento das estruturas semirrígida e invertida,

casos 1 e 2, respectivamente, como também o desempenho mediante o ganho de rigidez pelo módulo de resiliência.

4.5.1 Deflexão (D_0)

A partir dos gráficos da Figura 4.3 e da Figura 4.6, verifica-se que o desempenho da deflexão no topo do revestimento (D_0), recebe grande influência do módulo de resiliência e espessura da camada reciclada com cimento. No caso 1, com estrutura semirrígida, a sensibilidade quanto à camada reciclada é superior ao observado no caso 2, com estrutura invertida. Também verifica-se que o caso 2 apresenta deflexões superiores ao caso 1.

Ambas as situações são justificadas pela camada de base granular entre o revestimento asfáltico e a camada reciclada com cimento, atenuando a sensibilidade das deflexões quanto à rigidez da camada reciclada, reduzindo assim sua amplitude, conforme observado.

Com o aumento da rigidez e espessura da camada reciclada é observada a redução nos valores de deflexão máxima.

Os valores obtidos para as espessuras de 0,15 m a 0,30 m são comparados entre os casos 1 e 2 e apresentados na Tabela 4.10. É possível observar um melhor desempenho da deflexão máxima para o caso 1. Comparando as deflexões máximas dos casos 1 e 2, para a mesma rigidez e espessura da camada reciclada, observam-se casos de desempenho superior em até 30% da estrutura semirrígida. A variação da deflexão máxima com o acréscimo da rigidez apresenta-se superior para o caso 1, com até 11%, comparando com módulo de resiliência da base variando de 2.500 MPa e 5.000 MPa.

Tabela 4.10 – Valores extremos de deflexão máxima obtidos – caso 1 e 2

Módulo de Resiliência (MPa)	Espessuras (m)	Deflexão Máxima (10^{-2} mm)		Diferença Casos 1 e 2	Variação	
		Caso 1	Caso 2		Caso 1	Caso 2
2.500	0,15	48	48	1%	11%	6%
	0,30	35	40	15%		
5.000	0,15	42	45	7%	7%	3%
	0,30	31	38	22%		
7,500	0,15	40	44	11%	5%	2%
	0,30	29	36	27%		
10.000	0,15	38	43	14%	-	-
	0,30	27	36	30%		

4.5.2 Tensão de tração (σ_t)

Verifica-se nos gráficos da Figura 4.4 e Figura 4.8 que a amplitude dos valores quanto à variação da rigidez da camada reciclada é semelhante para ambos os casos, ligeiramente inferior para o caso 2.

Com o aumento da rigidez e redução da espessura da camada reciclada com cimento são observados os maiores valores de tensão de tração máxima.

Para os valores de tensão de tração máxima observados, o caso 2 apresentou melhor desempenho, principalmente para os casos de menor espessura, com valores de tensão de tração inferiores, denotando a influência da camada de base granular absorvendo parte dos esforços causados pelo tráfego.

Os valores obtidos para as espessuras de 0,15 m a 0,30 m são comparados entre os casos 1 e 2, e são apresentados na Tabela 4.11. No caso 2, verifica-se que para espessuras menores da camada reciclada, a influência da camada de base granular é superior, atingindo uma redução de até 22% das tensões, onde para espessuras maiores a influência é reduzida para até 10%, sendo relevante para os valores encontrados. A variação das tensões obtidas devido à rigidez da camada é muito similar para os casos 1 e 2, sendo que ocorre a diminuição da amplitude dos valores observados com o aumento da rigidez da camada reciclada com cimento.

A variação da tensão com o acréscimo da rigidez é muito similar para os casos 1 e 2, com até 42% comparando com módulo de resiliência da base variando de 2.500 MPa e 5.000 MPa, denotando a influência da rigidez da mistura no seu desempenho.

Tabela 4.11 – Valores extremos de tensão máxima obtidos – casos 1 e 2

Módulo de Resiliência (MPa)	Espessuras (m)	Tensão Máxima (MPa)		Diferença Casos 1 e 2	Variação	
		Caso 1	Caso 2		Caso 1	Caso 2
2.500	0,15	0,47	0,38	20%	42%	40%
	0,30	0,22	0,20	8%		
5.000	0,15	0,67	0,53	21%	23%	22%
	0,30	0,31	0,29	9%		
7,500	0,15	0,82	0,64	22%	16%	15%
	0,30	0,38	0,35	9%		
10.000	0,15	0,95	0,74	22%	-	-
	0,30	0,44	0,40	10%		

4.5.3 Deformação vertical (ϵ_v)

A partir dos gráficos da Figura 4.5 e da Figura 4.9, verifica-se que, para o desempenho da deformação vertical no subleito (ϵ_v), a amplitude dos valores quanto à variação da rigidez da camada cimentada é similar para os casos 1 e 2.

Para a deformação vertical máxima, verifica-se a alta influência do módulo de resiliência e espessura da camada reciclada com cimento. O caso 2 apresenta desempenho superior ao caso 1, denotando a influência da camada de base granular absorvendo parte dos esforços causados pelo tráfego, observado também na tensão de tração.

Com o aumento da rigidez e espessura da camada reciclada é observada a redução nos valores de deformação vertical máxima.

Os valores obtidos para as espessuras de 0,15 m a 0,30 m são comparados entre os casos 1 e 2 e apresentados na Tabela 4.12. Confrontando a deformação vertical máxima dos casos 1 e 2, para a mesma rigidez e espessura da camada reciclada, observam-se casos de desempenho superior em até 17% da estrutura invertida.

A variação da deformação vertical máxima com o acréscimo da rigidez apresenta-se superior para o caso 2, com até 27% comparando com módulo de resiliência da base variando de 2.500 MPa e 5.000 MPa.

Tabela 4.12 – Valores extremos de deformação vertical obtidos – casos 1 e 2

Módulo de Resiliência (MPa)	Espessuras (m)	Deformação Vertical Máxima (10^{-4} cm/cm)		Diferença Casos 1 e 2	Variação	
		Caso 1	Caso 2		Caso 1	Caso 2
2.500	0,15	3,512	3,303	6%	22%	27%
	0,30	1,642	1,671	2%		
5.000	0,15	2,737	2,413	12%	14%	17%
	0,30	1,280	1,221	5%		
7,500	0,15	2,365	2,008	15%	10%	12%
	0,30	1,106	1,016	8%		
10.000	0,15	2,133	1,763	17%	-	-
	0,30	0,997	0,892	11%		

4.5.4 Deformação horizontal (ϵ_t)

A verificação da deformação horizontal não pode ser aplicada ao caso 1, onde o revestimento asfáltico está apoiado à camada reciclada que, devido à rigidez entre as camadas serem similares, a linha neutra que divide as tensões de compressão e tração permanece abaixo do revestimento asfáltico, resultando apenas esforços de compressão no revestimento.

A partir do gráfico da Figura 4.7, verifica-se que para o desempenho da deformação horizontal no revestimento (ϵ_t), a amplitude dos valores quanto à variação da rigidez da camada cimentada e espessura é extremamente baixa dentro dos limites propostos, apresentando amplitude máxima de $0,105 \times 10^{-4}$ cm/cm.

Com o aumento da rigidez e espessura da camada reciclada é observada a redução mínima dos valores de deformação horizontal.

Os valores obtidos para as espessuras de 0,15 m a 0,30 m são comparados e apresentados na Tabela 4.13. A variação da deformação horizontal máxima com o acréscimo da rigidez é similar, com variação máxima de 1,6 %, praticamente sem influência das características da camada cimentada, permitindo assim deduzir que o revestimento asfáltico e a base granular têm grande influência no desempenho da deformação horizontal, podendo em determinados casos ser o critério de decisão nas soluções de estruturas invertidas.

Tabela 4.13 – Valores extremos de deformação horizontal obtidos – caso 2

Módulo de Resiliência (MPa)	Espessuras (m)	Deformação Horizontal Máxima (10^{-4} cm/cm)	Variação
2.500	0,15	1,676	1,6%
	0,30	1,623	
5.000	0,15	1,649	0,9%
	0,30	1,597	
7,500	0,15	1,633	0,7%
	0,30	1,581	
10.000	0,15	1,622	-
	0,30	1,571	

Ressalta-se que as análises desenvolvidas e as conclusões obtidas são válidas apenas para os limites de variação dos parâmetros considerados, admitindo-se a hipótese de elasticidade linear para os materiais das diversas camadas e o carregamento de roda simples empregado, simulado por equipamento tipo FWD.

4.6 Comportamento dos materiais à fadiga

Tem-se verificado no país ao longo dos anos que, mesmo bem dimensionado quanto às deformações permanentes, o pavimento pode romper por fadiga devido às deformações elásticas de uma ou mais camadas integrantes de sua estrutura.

Mesmo tendo conhecimento de que as deflexões e os demais parâmetros de curvatura da bacia de deformação não traduzem perfeitamente as deformações horizontais específicas de tração nas faces inferiores das camadas constituintes da estrutura, o procedimento deflectométrico tem sido adotado por se tratar de ensaio não destrutivo e de fácil execução.

Outro aspecto que justifica a utilização do processo deflectométrico é a dificuldade prática de se avaliar em campo, sem instrumentação adequada, as tensões e deformações no interior da estrutura do pavimento.

Em função do exposto, tem se verificado que inúmeras agências rodoviárias avaliam o desempenho dos pavimentos asfálticos através da verificação da magnitude das deflexões máximas, sob o efeito da ação das cargas do tráfego.

Atualmente no Brasil, as deflexões têm sido medidas em campo com a Viga *Benkelman* ou com equipamento tipo FWD, que permite levantar além da deflexão máxima, a linha deformada completa da bacia, simulando o efeito dinâmico da passagem de um veículo de carga padrão rodoviário.

Desta forma, além das características de fadiga dos materiais optou-se também por analisar os dados do levantamento deflectométrico, possível de realizar com o deflectômetro de impacto tipo FWD.

4.6.1 Modelos de fadiga da camada asfáltica – deflexões

Apresentam-se, a seguir, além dos modelos empíricos que vêm sendo tradicionalmente utilizados no país, conforme aqueles recomendados nos procedimentos DNER-PRO 11 (1979) e DNER-PRO 269 (1994), outros modelos encontrados na literatura técnica, que trata do mesmo tema em órgãos rodoviários de países estrangeiros. Para fim de comparação, os modelos encontrados foram representados conforme a seguinte expressão (31):

$$N = k \times D^{-n} \quad (31)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão;

k e n = coeficientes de correlações estatísticas; e

D = Deflexão medida (10^{-2} mm).

Os coeficientes estatísticos dos principais modelos frequentemente estudados são apresentados na Tabela 4.14 a seguir e gráfico comparativo na Figura 4.10.

Tabela 4.14 – Autores/normas e coeficientes abordados para modelos de deflexão máxima admissível

Número	Autor/Norma	k	n
1	DNER – PRO 11/79, 1979	$1,263 \times 10^{17}$	5,682
2	DNER – PRO 269/94, 1994	$5,548 \times 10^{16}$	5,319
3	IP-08 PMSP (R >100 mm), 2004	$3,036 \times 10^{13}$	3,922
4	TRRL LR 375 (Betuminoso), 1972	$8,599 \times 10^{16}$	5,6
5	TRRL LR 375 (Granular), 1972	$1,831 \times 10^{15}$	4,8
6	TRRL LR 375 (Cimentado), 1972	$9,314 \times 10^{15}$	5,6

Figura 4.10 – Gráfico comparativo dos modelos de deflexão máxima admissível

A partir do gráfico da Figura 4.10, observa-se que o desempenho dos métodos do DNER é aproximado, nas faixas de tráfego mais baixo os valores apresentam maior distanciamento entre si.

O modelo da PMSP para o revestimento asfáltico maior que 100 mm e o modelo do TRRL LR 375 proposto por Lister (1972) para bases cimentadas, os volumes de tráfego mais elevados, acima de 10^8 , tendem a se manter próximos; entretanto, em volumes mais baixos, os valores são distintos.

Pelo amplo uso no meio técnico nacional e apresentando valores de deflexão admissíveis intermediários, para os estudos apresentados posteriormente no item 5.3 propõe-se a adoção do modelo DNER-PRO 11 (1979).

4.6.2 Modelos de fadiga da camada asfáltica – deformações

Existe na literatura técnica um número muito grande de procedimentos analíticos de projeto que consideram a deformação específica de tração na fibra inferior da camada asfáltica como o fator determinante da fadiga.

Uma revisão bibliográfica efetuada mostrou também uma variação enorme nos tipos de ensaios (tensão ou deformação controlada), tipos de solicitações, equipamentos utilizados, faixas granulométricas das misturas, tipos e teores de ligante betuminosos, utilização ou não de aditivos modificadores do ligante, temperaturas e frequências de aplicações de carga variáveis, entre outros.

No caso de misturas asfálticas, independentemente dessas variações, considerou-se o diagrama de *Wöhler*, a partir da expressão (32) ou (33) abaixo, que relaciona o logaritmo da duração da vida, expressa em número de repetições da aplicação da carga, e a deformação específica de tração correspondente.

$$\log N = \log k - n \log \varepsilon_t \quad (32)$$

ou

$$N = k \times \varepsilon_t^n \quad (33)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão;

k e n = coeficientes de correlações estatísticas, particulares para cada tipo de mistura ou ensaio; e

ε_t = Deformação horizontal específica de tração (cm/cm).

Apresentam-se a seguir, na Tabela 4.15, os coeficientes estatísticos dos modelos mais frequentes utilizados nos projetos da rede rodoviária do estado de São Paulo, conforme consta na Instrução de Projeto de Pavimentação do DER/SP IP-DE-P00/001 (2006) e da PMSP/SIURB IP-08 (2004).

Tabela 4.15 – Autores/normas e coeficientes abordados para deformação horizontal admissível

Número	AutorNorma	k	n
1	FHWA (Federal Highway Administration), 1976	$1,09 \times 10^{-6}$	3,512
2	Asphalt Institute, 1976	$2,96 \times 10^{-5}$	3,291
3	Barker et al., 1977	$9,70 \times 10^{-10}$	4,030
4	Pinto e Preussler - CAP - 50/70, 1980	$2,85 \times 10^{-7}$	3,690
5	IP-08 PMSP, 2004	$6,64 \times 10^{-7}$	2,930

A seguir, na Figura 4.11, apresenta-se gráfico comparativo dos modelos de deformação horizontal admissível.

Figura 4.11 – Gráfico comparativo dos modelos de deformação horizontal admissível

A partir do gráfico da Figura 4.11, observa-se que o desempenho dos modelos proposto por Pinto e Preussler CAP 50/70 (1980) e FHWA (1976) conforme citado na IP-DE-P00/001 (2006), são aproximados, independentemente da faixa de tráfego.

O modelo da IP-08 da PMSP/SIURB (2004) e o proposto por Barker et al. (1977) apud IP-DE-P00/001 (2006) são conservadores, apresentando valores muito baixos para a deformação horizontal admissível; ao contrário, o modelo proposto pelo Asphalt Institute (1976) apud IP-DE-P00/001 (2006), apresenta-se menos exigente.

Pelo amplo uso no meio técnico nacional e apresentando valores de deformação horizontais admissíveis intermediários, para os estudos apresentados posteriormente no item 5.3 propõe-se a adoção do modelo FHWA (1976) conforme a IP-DE-P00/001 (2006).

4.6.3 Modelos de fadiga da camada cimentada – tensões

Em diversas metodologias estudadas, onde não há método de dimensionamento e modelo para análise de fadiga de camada reciclada com cimento específico, para preencher esta lacuna é recomendada a avaliação da fadiga através de modelos obtidos para camada de solo-cimento, pois apresentam comportamento estrutural semelhante.

Os materiais granulares tratados com cimento têm recebido, em função do processo executivo e do teor de ligante adicionado, diferentes nomes, entre eles: brita graduada tratada com cimento, concreto compactado a rolo, concreto magro, solo-brita tratada com cimento, entre outros.

Para o caso de materiais tratados com cimentos, consideraram-se os modelos de fadiga que correlacionam o número (N) de solicitações do eixo padrão e a relação (SR) entre as tensões de tração na flexão produzidas pela presença da carga e a resistência a tração na flexão do material, conforme a seguinte expressão (34).

$$\log N = a - b \times SR \quad (34)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão; e

a e b = coeficientes de correlações estatísticas, particulares para cada tipo de mistura ou ensaio.

$$SR = \frac{\sigma_r}{\sigma_{adm}} \quad (35)$$

Onde:

SR = relação de tensões atuantes e resistência a tração na flexão do material;

σ_r = tensão atuante máxima na camada cimentada; e

σ_{adm} = resistência à tração na flexão admissível.

Na Tabela 4.16 a seguir, apresentam-se os principais modelos para materiais granulares tratados com cimento *Portland*, solo-cimento e concreto magro, adotados no país e encontrados na revisão bibliográfica desenvolvida, como também gráfico comparativo na Figura 4.12.

Tabela 4.16 – Autores/normas e coeficientes abordados para tensão admissível

Número	Autor/Norma	Material	<i>a</i>	<i>b</i>
1	Balbo, 1993	Brita graduada tratada com cimento	17,1373	19,6078
2	PIARC, 1979	Brita graduada tratada com cimento	16,6667	16,6667
3	Symons, 1967	Brita graduada tratada com cimento	22,8571	35,7143
4	Dac Chi, 1978	Brita graduada tratada com cimento	12,0482	12,0482
5	Marchionna, 1989	Brita graduada tratada com cimento	20,0000	20,0000
6	Peyronne et al., 1989	Brita graduada tratada com cimento	12,9870	12,9870
7	Gschwendt et al., 1982	Brita graduada tratada com cimento	11,3514	13,5135
8	6.3 IC, 2003	Brita graduada tratada com cimento	15,3846	15,3846
9	Castilla y León, 2004	Brita graduada tratada com cimento	15,0000	15,0000
10	Trichês (120 kg/m³), 1993	Concreto compactado a rolo	14,9110	15,0740
11	Trichês (200 kg/m³), 1993	Concreto compactado a rolo	14,3100	15,5180
12	Minguela, 2011	Reciclado com cimento	17,2414	17,2414
13	6.3 IC, 2003	Solo-cimento	12,5000	12,5000
14	Andalucía, 2007	Solo-cimento	15,3846	15,3846
15	Castilla y León, 2004	Solo-cimento	12,0000	12,0000
16	Cerratti (NA), 1991	Solo-cimento	8,4202	0,0670
17	Cerratti (LA), 1991	Solo-cimento	77,8710	1,2165
18	Cerratti (LA'), 1991	Solo-cimento	37,9040	0,4000
19	Cerratti (LG'), 1991	Solo-cimento	65,6214	0,9709

Figura 4.12 – Gráfico comparativo dos modelos de tensão admissível

A partir do gráfico da Figura 4.12, observa-se a grande diversidade do desempenho das misturas cimentadas em função do seu tipo.

Para as misturas em BGTC, Gschwendt e Poljacek (1982) apresenta os resultados mais conservadores e Marchionna (1989) o modelo menos exigente. O modelo de Balbo (1993) apresenta resultados intermediários e está entre os mais adotados no Brasil, sendo também muitas vezes, por falta de modelo específico, “improvisado” para análise mecanicista de misturas recicladas com cimento e solo-brita tratado com cimento.

Para os modelos de solo-cimento propostos por Ceratti (1991) observam-se as maiores diferenças no desempenho, enquanto que para os solos tipo NA este apresenta-se extremamente conservador, porém, para solos tipo LA', o autor propõe um modelo inversamente proporcional. Os modelos espanhóis para solo-cimento apresentam valores próximos ao modelo de mistura de BGTC mais conservadores.

Dentre os modelos apresentados, Minguela (2011) propõe um modelo de fadiga específico para camada reciclada com cimento, com desempenho, em média, menos conservador que a BGTC e coeficientes próximos aos modelos propostos por Balbo (1993) e PIARC (1979).

Pela carência de modelos nacionais para misturas recicladas com cimento, para os estudos apresentados posteriormente no item 5.3 propõe-se a adoção do modelo proposto por Minguela (2011).

4.6.4 Modelos de fadiga da infraestrutura remanescente ou subleito

O procedimento de análise consiste em comparar a máxima deformação específica vertical de compressão atuante no topo da camada de fundação do pavimento, com o valor admissível correspondente ao material remanescente.

De acordo com a bibliografia consultada, têm sido utilizadas inúmeras relações de fadiga entre a deformação vertical e o número de solicitações do eixo padrão, para minimizar o efeito da deformação permanente que, geralmente, se manifesta como afundamento na trilha de roda.

Verificou-se que o critério de fadiga para deformações verticais de compressão no topo do subleito é semelhante aos modelos adotados para a fadiga de misturas asfálticas e, portanto, expresso conforme a equação (36) a seguir:

$$N = k \times \varepsilon_v^{-n} \quad (36)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão;

k e n = coeficientes de correlações estatísticas; e

ε_v = Deformação vertical específica de compressão (cm/cm).

Apresentam-se, na Tabela 4.17 a seguir, os coeficientes estatísticos dos modelos conforme consta na Instrução de Projeto de Pavimentação do DER/SP IP-DE-P00/001 (2006) e os encontrados na revisão bibliográfica, como também um gráfico comparativo na Figura 4.13.

Tabela 4.17 – Autores/normas e coeficientes abordados para deformação vertical admissível

Número	Autor/Norma	k	n
1	Dormon e Metcalf, 1965	$6,069 \times 10^{-10}$	4,762
2	Monismith e Brown, 1999	$2,227 \times 10^{-9}$	4,505
3	Asphalt Institute (Santucci), 1984	$1,340 \times 10^{-9}$	4,484
4	Andalucía, 2007	$1,127 \times 10^{-6}$	3,571
5	Castilla y León, 2004	$1,022 \times 10^{-7}$	4,166
6	Shell (Claessen, Edwards, Sommer, Uge), 1985		
6a	50% de confiabilidade	$6,150 \times 10^{-7}$	4,000
6b	85% de confiabilidade	$1,940 \times 10^{-7}$	4,000
6c	95% de confiabilidade	$1,050 \times 10^{-7}$	4,000

Figura 4.13 – Gráfico comparativo dos modelos de deformação vertical admissível

A partir do gráfico da Figura 4.13, observa-se que o desempenho do modelo da metodologia de Andalucía (2007) é o mais conservador, em contraste com o modelo da Shell 50% de confiabilidade (1985) conforme citado na IP-DE-P00/001 (2006).

Os modelos propostos por Monismith e Brown (1999) apud Bordim (2010), Dormon e Metcalf (1965) e Shell 95% de confiabilidade (1985) ambos citados pela

IP-DE-P00/001 (2006) são semelhantes, abrangendo a mesma faixa de desempenho.

O modelo proposto por Dormon e Metcalf (1965) apresenta faixa de desempenho entre os modelos da Shell 95% e 50% de confiabilidade (1985), conforme apresentado na IP-DE-P00/001 (2006).

Pelo amplo uso no meio técnico nacional e apresentando valores de deformação horizontal admissíveis intermediários, para os estudos apresentados posteriormente no item 5.3 propõe-se a adoção do modelo de Dormon e Metcalf (1965) conforme a IP-DE-P00/001 (2006).

5 CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO PROPOSTO PARA PAVIMENTOS RECICLADOS COM CIMENTO

5.1 Considerações iniciais

Admitindo-se que a reciclagem profunda com cimento de um pavimento existente seja uma alternativa técnica, econômica e sustentável de reabilitação, é necessário que a estrutura final proposta atenda aos critérios de dimensionamento preconizados pelo órgão para pavimentos novos.

No caso do DER/SP e DNIT, o método de dimensionamento estrutural de pavimentos asfálticos se baseia em curvas que fornecem as espessuras totais da estrutura, em função da condição de suporte do subleito existente, através do parâmetro de CBR e das características do tráfego a que o pavimento estará submetido.

Tais curvas têm como pressuposto levantamentos feitos em pavimentos que foram bem-sucedidos em relação à não ocorrência de deformação permanente excessiva no subleito e demais camadas da estrutura.

No decorrer dos anos tem sido verificado que esses métodos adotados visam exclusivamente a proteção do subleito e demais camadas contra excessivos esforços e cisalhamento surgidos mediante a passagem do tráfego, sendo o CBR uma tentativa de quantificação da resistência ao cisalhamento do material.

Constatando que os métodos não levam em conta de maneira explícita as características de resiliência ou de deformabilidade elástica das camadas do pavimento, o presente trabalho apresenta um procedimento de avaliação estrutural que considere complementarmente a questão da resistência a fadiga dos materiais, quanto a esse tipo de comportamento.

5.2 Esforços atuantes

Os cálculos das tensões, deformações e deslocamentos atuantes foram feitos pelo *software* computacional Elsym-5, conforme abordado no estudo paramétrico.

Os resultados da simulação computacional, que permitem analisar as diversas estruturas de pavimentos estudados, variando-se as espessuras das camadas, o

módulo de resiliência dos materiais envolvidos e diferentes tipos de fundação, estão apresentados no capítulo 4.

5.3 Esforços resistentes

Considerando-se que existem grandes variações entre as diversas expressões que traduzem as relações de fadiga entre o número de solicitações do eixo padrão (N) e os diferentes indicadores estruturais, foram selecionados os modelos indicados no item 4.6 para estimar a vida de fadiga dos materiais envolvidos na avaliação estrutural.

- Deslocamento vertical no topo do revestimento asfáltico.
DNER PRO-11 (1979) preconizado pelo DER/SP IP-DE-P00/001 (2006) – Equação (37).

$$N_{USACE} = 1,263 \times 10^{17} \times D_0^{-5,682} \quad (37)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão; e

D_0 = Deformação horizontal específica de tração ($\times 10^{-2}$ mm).

- Deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico.
FHWA (1976) preconizado pelo DER/SP IP-DE-P00/001 (2006) – Equação (38).

$$N_{AASHTO} = 1,092^{-6} \times \varepsilon_t^{-3,512} \quad (38)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão; e

ε_t = Deformação horizontal específica de tração (cm/cm).

- Tensão de tração na flexão da fibra inferior da camada cimentada.
Minguela (2011) – Equações (39) e (40);

$$\log N_{USACE} = 17,241 - (17,241 \times SR) \quad (39)$$

$$SR = \frac{\sigma_r}{\sigma_{adm}} \quad (40)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão;

SR = relação de tensões atuantes e resistência a tração na flexão do material;

σ_r = tensão atuante máxima na camada cimentada; e

σ_{adm} = resistência à tração na flexão admissível.

Na obtenção do parâmetro SR , os valores de tensão deverão estar na mesma unidade, independentemente de qual seja, pois trata-se de uma relação, resultando em um valor adimensional.

- Deformação vertical de compressão no topo do subleito.
Dormon e Metcalf (1965) preconizado pelo DER/SP IP-DE-P00/001 (2006) – Equação (41).

$$N_{AASHTO} = 6,069^{-10} \times \varepsilon_v^{-4,762} \quad (41)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão; e

ε_v = Deformação vertical específica de compressão (cm/cm).

5.4 Coeficiente de equivalência estrutural

O dimensionamento estrutural de pavimentos no Brasil, conforme os principais órgãos governamentais, adota o critério do CBR, ou simplesmente, de equivalência estrutural, onde é imprescindível a adoção do coeficiente estrutural. A seguir, são apresentados métodos simplificados para estimar o coeficiente estrutural de camadas recicladas com cimento.

5.4.1 Estimativa simplificada do coeficiente estrutural

Para a definição do coeficiente estrutural da camada reciclada, diversos métodos, entre eles os espanhóis, recomendam que a camada reciclada seja caracterizada como solo-cimento, devido às características de rigidez entre esses materiais serem próximas.

Uma alternativa para estimativa do coeficiente estrutural da camada reciclada com cimento é a utilização da teoria de sistemas de camadas elásticas, comparando

materiais de resistência diferentes apoiados sobre subleito idêntico, mas variando-se o módulo de resiliência da camada reciclada e sua espessura.

Conforme Balbo (2007), o conceito de coeficiente estrutural é a capacidade relativa, em relação a um padrão, de um material distribuir pressão sobre o topo da camada imediatamente subjacente, e o valor deste coeficiente de equivalência estrutural pode ser tomado pela relação (42):

$$CE = \frac{\Delta p}{\Delta p_{ref}} \quad (42)$$

Onde:

CE = Coeficiente Estrutural;

Δp = redução relativa de pressão causada por material qualquer; e

Δp_{ref} = redução relativa de pressão causada por material de referência.

A redução relativa de pressão é obtida pela relação (43):

$$\Delta p = \frac{P_s - P_f}{P_s} \times 100 \quad (43)$$

Onde:

Δp = redução relativa de pressão;

P_s = tensão aplicada à superfície (MPa);

P_f = tensão aplicada no fundo da camada superior (MPa).

Através de simulações com o eixo padrão rodoviário sobre a superfície das camadas apoiadas no subleito, são obtidos os valores de tensões verticais no topo do subleito. Para elucidar a proposta, segue exemplo de cálculo.

Tabela 5.1 – Valores empregados na análise (adaptado de Balbo, 2007)

Material	Espessuras (m)	Módulo de Resiliência (MPa)	Módulo de Resiliência do Subleito (MPa)
BGS	0,10 – 0,15 – 0,20	100	30 - 60 - 90
BGTC	0,10 – 0,15 – 0,20	12.000	30 - 60 - 90
Solo-Cimento	0,10 – 0,15 – 0,20	6.000	30 - 60 - 90

Para o cálculo da tensão aplicada à superfície, segue expressão (44):

$$P_s = \frac{Q}{\pi \times a_s^2} \div 9,8 \quad (44)$$

Onde:

Q = carga aplicada (kgf);

a_s = raio de pressão sobre a camada de superfície (cm); e

P_s = tensão aplicada no fundo da camada superior (MPa).

A partir do emprego das equações (42), (43) e (44), é possível obter o coeficiente de equivalência estrutural teórico, em função da redução de pressões causadas sobre o topo da camada inferior, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.2 a seguir.

Tabela 5.2 – Resultado com apresentação dos coeficientes estruturais estimados (adaptado de Balbo, 2007)

Espessura (m)	Módulo de Resiliência (MPa)	Material								
		BGS	BGTC	SC	BGS	BGTC	SC	BGS	BGTC	SC
		Tensão Topo Subleito (MPa)			Redução de Pressão (%)			CE Calculado		
0,10	30	0,305	0,074	0,103	52,3	88,4	83,9	1,00	1,69	1,60
	60	0,313	0,104	0,142	51,1	83,8	77,8	1,00	1,64	1,52
	90	0,312	0,126	0,167	51,3	80,3	73,9	1,00	1,57	1,44
0,15	30	0,248	0,038	0,056	61,3	94,1	91,3	1,00	1,54	1,49
	60	0,281	0,057	0,081	56,1	91,1	87,3	1,00	1,62	1,56
	90	0,294	0,071	0,100	54,1	88,9	84,4	1,00	1,64	1,56
0,20	30	0,196	0,023	0,035	69,4	96,4	94,5	1,00	1,39	1,36
	60	0,236	0,035	0,052	63,1	94,5	91,9	1,00	1,50	1,46
	90	0,256	0,045	0,066	60,0	93,0	89,7	1,00	1,55	1,50

Conforme apresentado, pode ser constatado que à medida que aumenta o módulo de resiliência da camada superior, as pressões sobre o subleito diminuem. Também, os coeficientes de equivalência estrutural mostram-se sensíveis ao incremento do módulo de resiliência do subleito.

Verifica-se que os valores do coeficiente estrutural teórico oscilaram entre 1,4 a 1,7 e 1,3 a 1,6 para a camada de brita graduada tratada com cimento e solo-cimento, respectivamente, consistentes com os valores preconizados pelo DNIT (2006).

Portanto, segue a recomendação para obtenção dos valores de coeficiente estrutural teórico para as camadas recicladas com cimento, no caso da necessidade de se prever valores alternativos aos do solo-cimento.

5.5 Infraestrutura existente e mistura reciclada

5.5.1 Caracterização da infraestrutura

A reciclagem profunda permite a reutilização do pavimento existente, inclusive, da infraestrutura remanescente após o corte, portanto, para subsidiar o desenvolvimento do projeto estrutural é imperativo conhecer as características das camadas inferiores do pavimento existente e a condição de suporte.

Para a investigação da estrutura do pavimento existente, conforme verificado na experiência internacional e recomendado pelos órgãos nacionais, recomenda-se a execução de poços de inspeção com o objetivo de identificar as características geológico-geotécnicas das camadas do pavimento e a capacidade de suporte do solo que compõe o subleito local.

É desejável que os poços no pavimento sejam programados distando no máximo 500 m entre si e com profundidade de 1,50 m, com coleta de amostras deformadas de solo do subleito e do material das camadas do pavimento existente, com a finalidade de submetê-las a ensaios laboratoriais.

Na execução dos poços devem-se determinar as seguintes características:

- Caracterização geotécnica do subleito: ensaios de compactação, capacidade de suporte (CBR) e expansão, granulometria, classificação MCT e umidade;
- Espessuras e caracterização das camadas existentes; e
- Classificação dos agregados como matéria-prima para a mistura reciclada.

Como complemento ao levantamento geotécnico, os métodos não destrutivos também são utilizados para avaliar a fundação e infraestrutura existentes. Pela precisão e ampla divulgação no meio técnico, recomenda-se a utilização de equipamento FWD.

Através da bacia deflectométrica, com auxílio de *softwares* específicos, como por exemplo, o BAKFAA versão 2.0 da *Federal Aviation Administration*, é possível, com conhecimento prévio das espessuras e características das camadas do pavimento existente, realizar retroanálise para obtenção dos módulos de resiliência das camadas do pavimento e subleito.

Também, através de métodos simplificados são obtidos os valores de módulo de resiliência do subleito, a partir do levantamento deflectométrico. É apresentado a seguir, um breve resumo dos principais métodos utilizados.

5.5.1.1 CALTRANS (2013)

Conforme já abordado, o método do CALTRANS (2013) de reciclagem profunda com cimento apresenta procedimento semelhante ao da AASHTO (1993) para avaliação da resistência do subleito e utiliza a equação de Boussinesq apresentada a seguir (45):

$$MR_r = \frac{100 \times (1 - \nu^2) \times P}{\pi \times r \times d} \quad (45)$$

Onde:

MR_r = Módulo de Resiliência a distância r (MPa);

P = Carga aplicada (kgf);

ν = Coeficiente de Poisson, geralmente adotado 0,35;

r = Distância entre centro do carregamento e geofone medido (cm); e

d = deflexão medida no ponto r ($\times 10^{-2}$ mm).

5.5.1.2 Noureldin (1993)

Com as medições do equipamento de FWD, com carregamento de 40 kN e prato com raio de 0,15 m, a metodologia utiliza a bacia deflectométrica para estimar o módulo de resiliência do subleito, admitindo-se a simplificação de que o pavimento é composto por duas camadas, ambas com coeficiente de Poisson de 0,50.

Este procedimento prevê avaliação de duas formas, uma quando se conhece a espessura total do pavimento e outra quando não se conhece.

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, conforme apresentado na equação (45), indicada no CALTRANS (2013).

Os valores obtidos são plotados em função da distância r . 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 5.1 exemplifica a aplicação do procedimento gráfico.

Figura 5.1 – Exemplo gráfico para obtenção da distância única e do valor do módulo de resiliência do subleito (Adaptado 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 d . O ponto máximo desta curva indica a espessura do pavimento, conforme abordado no item 2.4.2. Com a obtenção da espessura do pavimento estimada, o procedimento é idêntico à abordagem anterior.

5.5.1.3 AASHTO (1993)

O guia da AASHTO (1993) apresenta um procedimento simplificado para retroanalisar o módulo de resiliência do subleito, baseado na equação de

Boussinesq, adotando o coeficiente de Poisson igual a 0,5, conforme a expressão (46) a seguir.

$$MR_{SL} = C \times \frac{24 \times P}{d \times r} \quad (46)$$

Onde:

MR_{SL} = Módulo de Resiliência à distância r (MPa);

P = Carga aplicada (kgf);

r = Distância entre centro do carregamento e geofone medido (cm);

d = deflexão medida no ponto r ($\times 10^{-2}$ mm); e

C = fator de ajuste campo x laboratório.

Sugere-se que o valor retroanalizado seja minorado através de um fator multiplicador de ajuste campo x laboratório “C”. O guia indica para pavimentos asfálticos o valor para C de 0,33, porém Nam et al. (2014) demonstraram que este é um valor muito conservador, sendo desconsiderado este fator de ajuste em outras metodologias.

O produto entre d e r deve ser determinado para um ponto da bacia deflectométrica bem afastado do ponto de aplicação da carga, onde só há a influência do subleito. A AASHTO recomenda que o valor de r seja cerca de 70% do valor do raio do bulbo de tensões na interface pavimento/subleito.

5.5.1.4 CBR do subleito

Para estimativa do CBR do subleito retroanalizado, pelo fato de o Brasil ser de clima predominantemente tropical, é recomendada a adoção da classificação Miniatura Compactada Tropical (MCT), desenvolvida por Nogami e Villibor (1981), que visa agrupar os solos tropicais de acordo com o comportamento sobre o ponto de vista mecânico, granulométrico e mineralógico.

A Instrução de Projeto do DER/SP IP-DE-P00/001 (2006), preconiza para estimativa do módulo de resiliência do subleito, correlações baseadas na classificação MCT e o CBR, conforme as equações apresentadas a seguir.

Solos lateríticos arenosos (LA') e lateríticos argilosos (LG') – Equação (47).

$$CBR = \sqrt[0,8]{\frac{MR}{22}}$$

ou

(47)

$$MR = CBR^{0,8} \times 22$$

Solos não lateríticos siltosos (NS') e não lateríticos argilosos (NG') – Equação (48).

$$CBR = \sqrt[0,64]{\frac{MR}{18}}$$

ou

(48)

$$MR = CBR^{0,64} \times 18$$

Solos arenosos pouco ou não coesivos (NA') – equação (49).

$$CBR = \sqrt[0,7]{\frac{MR}{14}}$$

ou

(49)

$$MR = CBR^{0,7} \times 14$$

Onde:

MR = Módulo de resiliência (MPa); e

CBR = CBR do subleito (%).

5.5.2 Suporte mínimo do subleito

A execução de camada reciclada com cimento sobre infraestrutura existente de elevada deformabilidade pode camuflar a existência de deficiências importantes, que inviabilizariam a eficiência da estrutura do pavimento.

Segundo Silva et al. (2013), valores superiores a 140×10^{-2} mm de deflexão sobre o subleito indicam solo de baixa qualidade, sendo necessária a substituição ou seu tratamento. Da mesma forma, para deflexões superiores a 110×10^{-2} mm sobre a camada imediatamente subjacente à camada cimentada, não é recomendada a solução de reciclagem com cimento, pela elevada deformabilidade da infraestrutura remanescente e acentuada diferença de rigidez entre as camadas, favorecendo o trincamento precoce e a diminuição da vida útil.

Dentre as metodologias de dimensionamento estudadas para reciclagem profunda com cimento, observou-se a restrição para o CBR do subleito; para o desempenho adequado da nova estrutura reciclada, este valor variou entre 2% a 6 %.

Almejando o melhor desempenho da mistura reciclada, assumindo que a infraestrutura remanescente e o subleito deverão ser capazes de suportar a ação do tráfego e dar sustentação adequada à nova camada reciclada, recomenda-se que o subleito apresente CBR mínimo de 5% e Expansão < 2%.

Para locais onde forem observados valores inferiores, deverá ser avaliada a possibilidade de tratamento específico do subleito ou considerar alternativas como estratégia de reabilitação do pavimento, até mesmo a reconstrução total do pavimento.

5.5.3 Dosagem da mistura reciclada com cimento

Conforme apresentado nos capítulos 2 e 3, a presença excessiva de material asfáltico na mistura reciclada proporciona a redução de resistência e rigidez da mistura. Portanto, recomenda-se que a mistura reciclada com cimento apresente até 50%, em massa, de agregado reciclado do revestimento asfáltico, a menos que seja verificada nos procedimentos de dosagem a eficiência da mistura com porcentagens superiores de fresado asfáltico. Na reciclagem *in situ*, para elevadas espessuras de revestimento asfáltico existente, deve-se reduzir previamente a espessura do revestimento existente por meio de fresagem, evitando excesso de material asfáltico na mistura.

Quanto ao teor de cimento adotado nas misturas recicladas com cimento, a porcentagem de cimento deve ser definida no processo de dosagem, em função das características da mistura que o projetista deseja obter. Entretanto, recomenda-se o valor máximo de 4% de cimento em peso para a mistura reciclada, o emprego de valores mais elevados, apesar de ser justificado por aumentar significativamente a resistência contra a água, pode agravar os efeitos de retração por secagem (FEDRIGO, 2015).

Segundo a pesquisa bibliográfica, recomenda-se que o projeto da mistura reciclada apresente RCS mínima de 2,1 MPa aos 7 dias, atendendo as premissas do Manual de Pavimentação do DNIT (2006) e da Instrução de Projeto do DER/SP (2006) para

misturas cimentadas. Quanto aos valores de RTF e MR, recomendam-se valores superiores a 0,25 MPa e inferiores a 8.000 MPa, respectivamente, o projetista deve propor soluções com boa relação entre o MR e a RTF, conforme preconizado por Merrill et al. (2004) na metodologia do TRL611, a fim de se evitar o enrijecimento excessivo da mistura cimentada e prover adequada resistência às tensões de tração geradas no pavimento.

A mistura reciclada deverá apresentar uma composição granulométrica bem graduada, estável, satisfazendo as faixas definidas pela especificação técnica adotada. A título de sugestão, recomendam-se as faixas granulométricas definidas pelo DER/SP ET-DE-P00/035 (2006) e DNIT 167/2013-ES (2013), apresentado na Tabela 5.3 e Tabela 5.4, respectivamente.

Tabela 5.3 – Faixa granulométrica para mistura reciclada *in situ* com adição de cimento e brita (adaptado de DER/SP ET-DE-P00/035, 2006)

Peneira de Malha Quadrada		% em massa passante	Tolerâncias
ASTM	mm		
2 ½"	63,5	100	-
Nº 4	4,8	50 – 100	± 16
Nº 40	0,42	15 – 100	± 10
Nº 200	0,075	5 – 100	± 6

Tabela 5.4 – Faixa granulométrica para mistura reciclada *in situ* com adição de cimento (adaptado de DNIT 167/2013-ES, 2013)

Peneira de Malha Quadrada		% em massa passante		Tolerâncias
ABNT	mm	Faixa I	Faixa II	
2"	50,8	100	100	-
1"	25,4	75 – 90	100	± 7
3/8"	9,5	40 – 75	50 – 85	± 7
Nº 4	4,75	30 – 60	35 – 65	± 5
Nº 10	2,0	20 – 45	25 – 50	± 5
Nº 40	0,425	15 – 30	15 – 30	± 2
Nº 200	0,075	5 - 15	5 - 15	± 2

O projetista deve atentar para a limitação do tamanho máximo do agregado, podendo em trechos com estrutura existente em pedra rachão ou macadame tornar

a reciclagem profunda inviável. Segue na Figura 5.2 o roteiro de método de dosagem sugerido por Fedrigo (2015) para reciclagem com adição de cimento.

Figura 5.2 – Método de dosagem para reciclagem com adição de cimento (Adaptado de Fedrigo, 2015)

5.5.4 Espessura da camada reciclada

Para os pavimentos com camada em base reciclada cimentada a espessura mínima e máxima executiva permanece limitada a 0,12 m e 0,20 m, respectivamente, para compactação em uma única camada, conforme citado na especificação do DER/SP ET-DE-P00/035 (2006), tendo em vista os equipamentos disponíveis na época de sua elaboração.

A compactação da camada reciclada é uma das mais importantes variáveis no desempenho de pavimentos reciclados, devendo os rolos compactadores reunirem características que permitam a correta densificação no fundo da camada.

Nas metodologias de dimensionamento abordadas, para a espessura da camada reciclada com cimento, observaram-se valores mínimos de 0,15 m, como por exemplo, o TRL611 proposto por Merrill et al. (2004), e espessura máxima de 0,35 m, conforme as metodologias de Andalucía (2007) e Castilla y León (2004). Já a metodologia do CALTRANS (2013) recomenda que as espessuras dimensionadas sejam limitadas entre 0,20 e 0,30 m.

A execução de espessuras elevadas divididas em duas etapas, como por exemplo 0,30 m executado em duas etapas com espessura de 0,15 m, não é objeto deste trabalho e também não é uma prática observada na pesquisa bibliográfica, sendo portanto necessária avaliação do benefício deste tipo de execução, já que as camadas não apresentarão comportamento monolítico, com provável perda de aderência entre as mesmas.

Ressalta-se que as camadas de espessuras superiores a 0,20 m, muitas vezes, requerem técnicas especiais de compactação e equipamentos robustos; neste caso, a execução de um trecho experimental proporciona a oportunidade de se avaliar a eficácia de diferentes métodos de compactação.

Atualmente, a tecnologia de compactação é um assunto muito pesquisado e documentado, com uma enorme gama de modelos disponíveis, permitindo assim que sejam executadas espessuras superiores aos limites previstos na normatização atual no estado de São Paulo. Deste modo, para as camadas dimensionadas com espessuras superiores a 0,20 m, é plenamente admissível que possam ser devidamente compactadas desde a superfície até a base.

Conforme a pesquisa de Silva *et al.* (2013), na avaliação da construção de um trecho experimental com base cimentada, mostrou que os equipamentos atuais dispõem de capacidade suficiente para garantir o grau de compactação requerido, mesmo para a elevada espessura de 0,30 m, preservadas as relações de produtividade dos equipamentos.

Espessuras delgadas de materiais tratados com cimento tendem a apresentar trincamento precoce pelas altas tensões geradas na fibra inferior da camada, sendo recomendado por profissionais do meio técnico, espessura mínima de 0,20 m.

Portanto, para um desempenho global adequado de pavimentos com camada reciclada com cimento, recomenda-se que a camada reciclada apresente espessuras variando entre 0,20 e 0,30 m.

5.6 Drenagem

Mesmo com projeto bem dimensionado e construído para atender ao horizonte de projeto previsto, a deficiência ou ausência de drenagem nos pavimentos tem contribuído para o surgimento precoce de problemas funcionais e estruturais.

Conforme Suzuki *et al.* (2013), um pavimento pode ser estável a uma dada condição de umidade preconizada no início da construção, mas se torna rapidamente instável quando seus materiais constituintes se tornam saturados, principalmente após o período de chuvas.

A diminuição da capacidade de suporte do subleito pela saturação e presença de vazios pode levar à ruína precoce do pavimento reciclado com cimento, causando trincamento por fadiga da camada cimentada e, por consequência, do revestimento asfáltico.

Portanto, na fase de investigações do pavimento, recomenda-se uma avaliação minuciosa do sistema de drenagem existente, a fim de prevenir defeitos oriundos da má qualidade da drenagem existente e propiciar melhor desempenho ao longo da vida útil do pavimento.

A metodologia do CALTRANS (2013) recomenda que as investigações em campo sejam preferencialmente realizadas em estação chuvosa, podendo assim identificar com maior facilidade e precisão os problemas com umidade e drenagem no pavimento.

Nos casos de constatação de problemas de drenagem no pavimento existente, o projetista deverá avaliar se tais problemas poderão ser reparados como parte do projeto; caso não possam, é recomendado considerar alternativas como estratégia de reabilitação do pavimento, ou até mesmo a reconstrução total do pavimento.

5.7 Condição funcional

A avaliação funcional do pavimento fornece indícios quanto à natureza dos defeitos observados, com isso é possível elucidar a melhor solução técnica e econômica de restauração ao pavimento.

Para a avaliação funcional recomenda-se a já consolidada norma DNIT 006/2003 – PRO (2003), que permite a obtenção do IGG, parâmetro esse que infere o grau de deterioração do pavimento através de diversos itens, permitindo uma avaliação detalhada e localizada das causas da patologia, avaliando se a mesma ocorre por dano superficial ou estrutural.

Para os casos de patologias com gênese em dano superficial, onde é possível fazer uma correlação com os conceitos de degradação do IGG entre ótimo e regular, IGG de 0 a 80, respectivamente, são recomendadas soluções de reciclagem superficial.

Para os casos com soluções em reciclagem superficial onde são previstos, na área de projeto, valores superiores a 20% de reparos localizados profundos, a metodologia do CALTRANS (2013) recomenda a substituição da solução por reciclagem profunda, melhorando o desempenho e homogeneização do pavimento.

A metodologia de Andalucía (2007) recomenda que na ocorrência de excesso de patologias no pavimento, deverá ser avaliado se isto está associado a falhas na mistura de concreto asfáltico ou a falência da estrutura do pavimento, priorizando soluções de reciclagem profunda quando observado o primeiro caso.

Para os casos de patologias com gênese em dano estrutural, do mesmo modo, correlacionando com os conceitos de degradação do IGG entre regular e ruim, IGG de 80 a 160, respectivamente, são recomendadas soluções de reciclagem profunda, com indícios de falência do revestimento e base, desprotegendo o subleito da ação do tráfego.

Os casos extremos, com conceito de degradação do IGG péssimo, acima de 160, denotando defeitos generalizados no pavimento e falência total do pavimento, o

projetista deverá estudar com critério rigoroso a solução em reciclagem profunda, pois é apurado que a infraestrutura remanescente não está minimamente adequada para suportar a ação do tráfego e dar sustentação à nova camada reciclada, sendo recomendado considerar alternativas como estratégia de reabilitação do pavimento, ou até mesmo a reconstrução total do pavimento.

5.8 Condição estrutural

Atualmente, é imprescindível a avaliação estrutural do pavimento para soluções de reabilitação estrutural, obtida através de dados de deformação recuperável, da bacia deflectométrica e seus parâmetros estruturais.

O método de reabilitação estrutural de pavimentos flexíveis, DNER-PRO 011/79 (1979), amplamente difundido no meio técnico e utilizado atualmente, recomenda que para os pavimentos existentes cuja deflexão de projeto se apresente até três vezes superior à admissível, seja proposta solução de reconstrução do pavimento, denotando a má qualidade estrutural do pavimento.

O projetista deverá avaliar criteriosamente as soluções de reforço obtidas também por outras metodologias para cálculo de reforço estrutural ou reciclagem superficial, quanto às espessuras de reforço dimensionadas e de quanto sua aplicação é viável, evitando excessos de massa asfáltica no revestimento, podendo acarretar problemas de limitação geométrica e deformações plásticas no revestimento, tendo como alternativas de reabilitação soluções de reciclagem profunda.

Para a definição de reabilitação em reciclagem profunda, além da deflexão máxima obtida no revestimento, outros fatores da bacia deflectométrica são indicados para avaliar o comportamento do pavimento existente e a integridade das camadas inferiores.

O DNER-PRO 011/79 (1979) prevê que pavimentos com raio de curvatura (R) inferior a 100 m sugerem baixa capacidade estrutural, sendo indicada a reconstrução dos mesmos.

O método do CALTRANS (2013) utiliza as deflexões lidas à distância de 0,60 m do ponto de aplicação da carga do levantamento deflectométrico como limite para condição do subleito adequado. No Brasil, é adotado comumente o valor do geofone distante a 1,20 m do ponto da carga aplicada para avaliação do subleito existente,

obtendo-se o módulo de resiliência a partir dos modelos indicados no item 5.5.1. De acordo com o CBR recomendado, estima-se que $D_{120} > 17 \times 10^{-2}$ mm não é adequado para soluções de reciclagem profunda com adição de cimento.

As normativas brasileiras não preveem outros parâmetros da bacia deflectométrica para caracterização da condição estrutural do pavimento, entretanto, a fim de se obter melhor avaliação das camadas inferiores do pavimento, recomenda-se a avaliação de três índices, apresentados no item 2.4.2, sendo eles:

- SCI – indicativo das camadas de revestimento e base;
- BDI – indicativo da camada de revestimento, base e sub-base; e
- BCI – indicativo do subleito.

Para os parâmetros de SCI, BDI e BCI, são sugeridos os seguintes limites para avaliação do pavimento indicando baixa capacidade estrutural em função do tipo de base existente, sugeridos por Horak (2008) e SANRA (2014), apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Parâmetros de SCI, BDI e BCI, limites sugeridos para indicativo de baixa capacidade estrutural (adaptado de Horak, 2008 e SANRA, 2014)

Tipo de base	SCI (10^{-2} mm)	BDI (10^{-2} mm)	BCI (10^{-2} mm)
Granular	> 40	> 20	> 10
Cimentada	> 30	> 10	> 8
Betuminosa	> 40	> 15	> 8

O projetista deverá avaliar criteriosamente os resultados dos parâmetros da bacia deflectométrica obtidos para a definição das soluções de reabilitação.

Para os valores de SCI que extrapolam os limites indicados, caracterizando a condição do revestimento e base, prioriza-se a avaliação de soluções de reforço e reciclagem superficial, validando sua eficiência; caso seja inviável, a reciclagem profunda é alternativa recomendada.

Para os valores de R, BDI e SCI que extrapolam os limites indicados, caracterizando a condição do conjunto de camadas do pavimento e do subleito, as soluções de reciclagem profunda poderão ser pleiteadas, porém, há indícios de que a infraestrutura remanescente não está minimamente adequada para suportar a ação do tráfego e dar sustentação à nova camada reciclada, sendo recomendado

considerar alternativas como estratégia de reabilitação do pavimento, ou até mesmo a reconstrução total do pavimento.

5.9 Dimensionamento

O critério de projeto proposto consiste em determinar a estrutura reciclada como se fosse um pavimento novo, considerando o tráfego futuro atuante e o subleito constituído pela infraestrutura remanescente, cujo CBR deve ser estimado a partir dos dados deflectométricos previamente ao serviço de reciclagem.

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), a espessura total necessária do pavimento, expressa em termos de material granular para a proteção do subleito quanto às tensões de cisalhamento excessivas, é dada pela seguinte expressão (50):

$$H_t = 77,67 \times N_{USACE}^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (50)$$

Onde:

H_t = Espessura total em termos de material granular (cm);

CBR = CBR do subleito (%); e

N_{USACE} = Número de solicitações do eixo padrão pela metodologia USACE.

Ainda, conforme o procedimento do DNIT, a espessura mínima do revestimento asfáltico é pré-fixada em função do número N de solicitações do eixo padrão rodoviário, de acordo com a Tabela 5.6 a seguir:

Tabela 5.6 – Espessura de revestimento asfáltico mínima em função do tráfego (adaptado de DNIT IPR-719, 2006)

Tráfego	Material	Espessura (m)
$N \leq 10^6$	Tratamentos Superficiais	-
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Concreto Asfáltico	0,050
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto Asfáltico	0,075
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto Asfáltico	0,100
$N > 5 \times 10^7$	Concreto Asfáltico	0,125

Uma vez definida a espessura do revestimento asfáltico e admitindo para a camada reciclada com cimento um coeficiente de equivalência estrutural similar ao do solo-

cimento, com resistência à compressão simples a 7 dias entre 2,8 MPa e 4,5 MPa, correspondente a um valor de k igual a 1,40, podendo variar de acordo com o material empregado, tem-se a seguinte expressão (51) para o cálculo da espessura da camada reciclada:

$$R \times K_R + B \times K_B + SB \times K_{SB} \geq H_t \quad (51)$$

Igualando as equações (50) e (51) obtém-se a seguinte expressão (52):

$$B_{Rec} = \frac{0,7767 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} - R \times K_R - SB \times K_{SB}}{K_{BRec}} \quad (52)$$

Onde:

R = Espessura mínima de revestimento asfáltico (m);

K_R = Coeficiente estrutural do revestimento asfáltico;

B_{Rec} = Espessura da base reciclada necessária (m);

K_{BRec} = Coeficiente estrutural da base reciclada;

SB = Espessura da infraestrutura remanescente (m);

K_{SB} = Coeficiente estrutural infraestrutura remanescente;

H_t = Espessura total necessária em termos de material granular (m);

CBR = CBR do subleito (%); e

N_{USACE} = Número de solicitações do eixo padrão pela metodologia USACE.

Uma vez definida a estrutura constituída de revestimento asfáltico denso e base da camada reciclada com cimento, recomenda-se a verificação quanto à fadiga dos materiais através da análise mecanicista.

No caso de não se conhecer a estrutura de pavimento remanescente em função da altura de corte do equipamento, de informações de projeto original ou de abertura de cavas que venham a ser executadas em campo, propõe-se, numa situação a favor da segurança, que seus parâmetros elásticos sejam idênticos aos do subleito, considerando a camada mais frágil do sistema analisado.

Quanto à verificação mecanicista, em vista da diversidade de modelos teóricos de fadiga encontrados na bibliografia e pela lacuna nacional constatada sobre estudos

para caracterizar as propriedades elásticas dos materiais reciclados com cimento, sugere-se, em caráter preliminar, adotar os critérios e parâmetros descritos a seguir:

- Os pontos e parâmetros críticos de análise dos esforços atuantes são: D_0 , ε_t , σ_t e ε_v ; e
- Os esforços resistentes são caracterizados pelos modelos de fadiga apresentados no item 4.4.

Do confronto entre os esforços atuantes e resistentes, considerando-se os modelos do estudo paramétrico desenvolvido como os modelos apresentados neste capítulo, obtêm-se os seguintes modelos de avaliação estrutural para determinação da espessura mínima da camada reciclada com cimento.

Estrutura Semirrígida:

- D_0 – Deflexão na superfície do revestimento, igualando a equação (29) adotando os coeficientes referentes ao D_0 e a equação (37), obtém-se (53):

$$h_{rec} = 8,9509 \times h_R^{-0,381} \times MR_R^{-0,394} \times MR_{rec}^{-0,376} \times h_{IR}^{-0,098} \times MR_{IR}^{-0,127} \times MR_{SL}^{-1,297} \times N^{0,378} \quad (53)$$

- σ_t – Quanto à tensão horizontal de tração máxima na camada cimentada, igualando a equação (29) adotando os coeficientes referentes ao σ_t e a equação (39), obtém-se (54):

$$h_{rec} = 0,008 \times h_R^{-0,423} \times MR_R^{-0,142} \times MR_{rec}^{-0,459} \times h_{IR}^{-0,077} \times MR_{IR}^{-0,165} \times MR_{SL}^{-0,125} \times \left\{ - \left[\left(\frac{\log N - 17,241}{17,241} \right) \times \sigma_{adm} \right]^{-0,915} \right\} \quad (54)$$

- ε_v – Deformação vertical de compressão máxima no subleito, igualando a equação (29) adotando os coeficientes referentes à ε_v e a equação (41), obtém-se (55):

$$h_{rec} = 0,331 \times h_R^{-0,416} \times MR_R^{-0,192} \times MR_{rec}^{-0,328} \times h_{IR}^{-0,283} \times MR_{IR}^{0,025} \times MR_{SL}^{-0,382} \times N^{0,191} \quad (55)$$

Estrutura Invertida:

- D_0 – Deflexão na superfície do revestimento, igualando a equação (30) adotando os coeficientes referentes ao D_0 e a equação (37), obtém-se (56):

$$h_{rec} = 184,423 \times h_R^{-1,651} \times MR_R^{-0,788} \times MR_{rec}^{-0,309} \times h_{BG}^{0,526} \times MR_{BG}^{-1,137} \times MR_{SL}^{-1,505} \times N^{0,644} \quad (56)$$

- ε_t – Deformação horizontal de tração máxima no revestimento, igualando a equação (30) adotando os coeficientes referentes à ε_t e a equação (38), obtém-se (57):

$$h_{rec} = 5,99 \times 10^{11} \times h_R^{-11,416} \times MR_R^{-9,561} \times MR_{rec}^{-0,505} \times h_{BG}^{5,292} \times MR_{BG}^{-11,780} \times MR_{SL}^{0,227} \times N^{6,113} \quad (57)$$

- σ_t – Quanto à tensão horizontal de tração máxima na camada cimentada, igualando a equação (30) adotando os coeficientes referentes ao σ_t e a equação (39), obtém-se (58):

$$h_{rec} = 1,223 \times 10^{-3} \times h_R^{-0,561} \times MR_R^{-0,165} \times MR_{rec}^{0,549} \times h_{BG}^{-0,436} \times MR_{BG}^{-0,055} \times MR_{SL}^{-0,301} \times \left\{ - \left[\left(\frac{\log N - 17,241}{17,241} \right) \times \sigma_{adm} \right]^{-1,134} \right\} \quad (58)$$

- ε_v – Deformação vertical de compressão máxima no subleito, igualando a equação (30) adotando os coeficientes referentes à ε_v e a equação (41), obtém-se (59):

$$h_{rec} = 0,420 \times h_R^{-0,461} \times MR_R^{-0,141} \times MR_{rec}^{-0,461} \times h_{BG}^{-0,347} \times MR_{BG}^{-0,091} \times MR_{SL}^{-0,308} \times N^{0,213} \quad (59)$$

Para a análise das equações obtidas foram gerados gráficos de dimensionamento correlacionando a espessura de camada reciclada mínima necessária com o volume de tráfego previsto. Para isto, são considerados fixos os demais parâmetros, conforme a Tabela 5.7 e Tabela 5.8 a seguir:

Tabela 5.7 – Parâmetros fixados para análise, caso 1 – estrutura semirrígida

Camada	Material	Módulo de Resiliência (MPa)	Coeficiente de Poisson	Espessuras (m)
Revestimento	Concreto Asfáltico	3.000	0,35	0,10
Base	Reciclada com Cimento	Variável	0,20	Variável
Sub-base	Infraestrutura Remanescente	150	0,40	0,15
Subleito	Solo Local	50	0,45	-

Tabela 5.8 – Parâmetros fixados para análise, caso 2 – estrutura invertida

Camada	Material	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Espessuras (m)
Revestimento	Concreto Asfáltico	3.000	0,35	0,10
Base	Brita Graduada Simples	300	0,40	0,12
Sub-Base	Reciclada com Cimento	Variável	0,20	Variável
Subleito	Solo Local	50	0,45	-

A resistência à tração na flexão admissível (σ_{adm}) adotada corresponde a 0,60 MPa. Nas figuras a seguir, Figura 5.3 a Figura 5.9, são apresentados os gráficos obtidos.

Figura 5.3 – Espessura da camada reciclada x solicitações do eixo padrão em função da deflexão no topo do revestimento (D_0) – Caso 1

Figura 5.4 – Espessura da camada reciclada x solicitações do eixo padrão em função da tensão de tração da camada cimentada (σ_t) – Caso 1

Figura 5.5 – Espessura da camada reciclada x solicitações do eixo padrão em função da deformação vertical no subleito (ϵ_v) – Caso 1

Figura 5.6 – Espessura da camada reciclada x solicitações do eixo padrão em função da deflexão no topo do revestimento (D_0) – Caso 2

Figura 5.7 – Espessura da camada reciclada x solicitações do eixo padrão em função da deformação horizontal no revestimento (ϵ_t) – Caso 2

Figura 5.8 – Espessura da camada reciclada x solicitações do eixo padrão em função da tensão de tração da camada cimentada (σ_t) – Caso 2

Figura 5.9 – Espessura da camada reciclada x solicitações do eixo padrão em função da deformação vertical no subleito (ϵ_v) – Caso 2

Uma análise dos gráficos obtidos através das equações de espessura mínima da camada reciclada para cada parâmetro de análise estrutural é apresentada a seguir.

A partir dos gráficos observados para o caso 1 são obtidas as seguintes espessuras de base reciclada apresentadas na Tabela 5.9, com grifo na condição crítica observada.

Tabela 5.9 – Valores de espessuras da camada reciclada para estrutura semirrígida caso 1

Tráfego	MR (MPa)	Espessura (m)			
		ϵ_v	D_0	σ_t	Crítica
10^5	2.500	0,06	0,02	0,17	0,17
10^6		0,09	0,04	0,18	0,18
10^7		0,14	0,09	0,19	0,19
10^8		0,21	0,20	0,21	0,21
10^9		0,33	0,49	0,24	0,49
10^5	5.000	0,04	0,01	0,23	0,23
10^6		0,07	0,03	0,25	0,25
10^7		0,11	0,07	0,27	0,27
10^8		0,17	0,16	0,29	0,29
10^9		0,26	0,38	0,33	0,38
10^5	7.500	0,04	0,01	0,27	0,27
10^6		0,06	0,02	0,30	0,30
10^7		0,09	0,06	0,32	0,32
10^8		0,15	0,14	0,35	0,35
10^9		0,23	0,32	0,39	0,39
10^5	10.000	0,04	0,01	0,31	0,31
10^6		0,06	0,02	0,34	0,34
10^7		0,09	0,05	0,37	0,37
10^8		0,13	0,12	0,40	0,40
10^9		0,21	0,29	0,45	0,45

Observa-se que a espessura crítica observada, ou seja, de maior espessura, é obtida através do parâmetro de tensão de tração (σ_t) para os módulos de resiliência e volumes de tráfego previstos, com exceção para dois pontos do parâmetro de deflexão (D_0) com tráfego de 10^9 , obtendo espessuras de 0,49 e 0,38 m.

Os parâmetros de deformação vertical de compressão (ϵ_v) e deflexão apresentam-se com espessuras semelhantes, com maior influência nos casos com módulo de resiliência igual a 2.500 MPa e tráfego de 10^8 ; com exceção destes casos, há predominância da tensão de tração na definição da espessura da base reciclada.

Para os casos com módulo de resiliência da mistura reciclada igual a 10.000 MPa, as espessuras são predominantemente superiores a 0,30 m. Consequentemente, com módulo de resiliência menor ou igual a 7.500 MPa, as soluções são predominantemente inferiores a 0,30 m.

A partir dos gráficos observados para o caso 2 são obtidas as seguintes espessuras de base reciclada apresentadas na Tabela 5.10, com grifo na condição crítica observada.

Tabela 5.10 – Valores de espessuras da camada reciclada para estrutura semirrígida invertida caso 2

Tráfego	MR (MPa)	Espessura (m)				
		ϵ_v	ϵ_h	D_0	σ_t	Crítica
10^5	2.500	0,05	0,00	0,00	0,13	0,13
10^6		0,08	0,00	0,01	0,14	0,14
10^7		0,13	0,00	0,06	0,16	0,16
10^8		0,21	>0,50	0,26	0,18	>0,50
10^9		0,34	>0,50	>0,50	0,20	>0,50
10^5	5.000	0,03	0,00	0,00	0,19	0,19
10^6		0,06	0,00	0,01	0,21	0,21
10^7		0,09	0,00	0,05	0,23	0,23
10^8		0,15	>0,50	0,21	0,26	>0,50
10^9		0,24	>0,50	>0,50	0,30	>0,50
10^5	7.500	0,03	0,00	0,00	0,24	0,24
10^6		0,05	0,00	0,01	0,26	0,26
10^7		0,08	0,00	0,04	0,29	0,29
10^8		0,12	>0,50	0,19	0,33	>0,50
10^9		0,20	>0,50	>0,50	0,37	>0,50
10^5	10.000	0,02	0,00	0,00	0,28	0,28
10^6		0,04	0,00	0,01	0,31	0,31
10^7		0,07	0,00	0,04	0,34	0,34
10^8		0,11	>0,50	0,17	0,38	>0,50
10^9		0,18	>0,50	>0,50	0,44	>0,50

Conforme observado, o parâmetro de tensão de tração (σ_t) apresenta desempenho semelhante ao caso 1, ligeiramente superior, obtido pela inclusão da camada de base granular, conferindo assim maior espessura ao pavimento final e, por consequência, atenuando as tensões recebidas pela camada cimentada.

O parâmetro de deflexão (D_0) com tráfego a partir de 10^8 , em geral, apresenta espessuras de camada cimentada elevada, excedentes aos observados no caso 1, também justificado pela inclusão da camada de base granular. Pois a mesma apresenta baixa rigidez e se encontra entre o revestimento asfáltico e a camada cimentada, formando um “sanduíche”, provocando assim maiores deformações e deslocamentos no revestimento asfáltico.

O parâmetro de deformação vertical por compressão (ϵ_v) apresenta-se com espessuras semelhantes ao caso 1, ligeiramente inferiores, sendo o parâmetro de menor influência para definição da camada reciclada. No caso extremo observado, exige-se 0,34 m de espessura para a camada reciclada com cimento.

Para o dimensionamento em pavimento semirrígido invertido, deve-se empregar atenção especial para a camada de concreto asfáltico, pois, neste caso, estará sujeita a deformação horizontal de tração (ϵ_t). Verifica-se que a dependência das características da camada cimentada para a deformação horizontal é extremamente baixa. Independentemente do módulo de resiliência observado, a espessura de base reciclada é praticamente nula para tráfegos de baixo e médio volume. Para volume de tráfego partindo de 10^8 , verifica-se um salto nos valores de espessura de base reciclada, superiores a 0,50 m.

Portanto, nos caso de pavimento semirrígido invertido, a concepção no projeto das camadas de base granular e revestimento asfáltico são relevantes para o dimensionamento da camada cimentada, pela alta influência gerada no parâmetro de deformação horizontal, requerendo critério rigoroso do projetista na definição das espessuras adotadas.

5.9.1 Fluxograma proposto

Conforme os critérios propostos neste capítulo segue na Figura 5.10 fluxograma com as considerações referentes às etapas do dimensionamento estrutural de pavimento com reciclagem profunda e adição de cimento, fornecendo um resumo de cada etapa a ser estudada, a fim de definir se a solução de reciclagem é viável e adequada ou se é recomendado considerar alternativas como estratégia de reabilitação ou a reconstrução total do pavimento.

Figura 5.10 – Fluxograma para dimensionamento de pavimento com reciclagem profunda e adição de cimento

6 ESTUDO DE CASO – SP 270

A fim de avaliar de maneira prática os métodos apresentados e se obter uma análise de sensibilidade é proposto o estudo do dimensionamento estrutural da reciclagem profunda, através das diferentes metodologias estudadas, para a reabilitação de um pavimento asfáltico.

O exemplo utilizado provém de informações obtidas da Rodovia Raposo Tavares, SP 270. O trecho é caracterizado por pista simples com largura de faixa de rolamento média de 3,60 m, com uma faixa de tráfego por sentido e acostamentos não pavimentados. O projeto prevê a restauração do pavimento existente e a implantação de acostamentos pavimentados. O pavimento existente apresenta dois tipos de estrutura, semirrígido com base em solo-cimento e flexível com base em solo-brita e macadame seco, conforme os resultados das cavas no pavimento apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Estruturas do pavimento existente verificadas através de cavas no pavimento

Local (km)	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4		Camada 5	
	Material	Esp. (m)	Material	Esp. (m)	Material	Esp. (m)	Material	Esp. (m)	Material	Esp. (m)
0,000	capa CBUQ	0,15	binder CBUQ	0,04	base solo cimento	0,15	reforço subleito areia argilosa	0,25	subleito argila arenosa	-
0,500	capa CBUQ	0,16	binder CBUQ	0,05	base solo cimento	0,17	reforço subleito areia argilosa	0,21	subleito argila arenosa	-
1,000	capa CBUQ	0,12	binder CBUQ	0,04	base solo cimento	0,15	reforço subleito areia argilosa	0,50	subleito argila arenosa	-
1,500	capa CBUQ	0,12	binder CBUQ	0,07	base solo cimento	0,13	reforço subleito areia argilosa	0,24	subleito argila arenosa	-
2,000	capa CBUQ	0,15	binder CBUQ	0,07	base solo brita	0,20	reforço subleito areia argilosa	0,35	subleito argila silto arenosa	-
2,500	capa CBUQ	0,10	base brita c/ areia	0,19	sub-base rachão	0,14	reforço subleito argila arenosa	0,20	subleito argila arenosa	-
3,000	capa CBUQ	0,12	base MS	0,11	reforço subleito argila arenosa	0,21	subleito argila arenosa	-	-	-

Com o intuito de fornecer subsídios para a elaboração do diagnóstico do pavimento, tendo em vista os aspectos funcionais, foi realizada a Avaliação Objetiva da Superfície do Pavimento, incluindo medidas das flechas nas trilhas de roda, segundo o procedimento DNIT 006/2003 – PRO (2003). Os valores do Índice de Gravidade Individual (IGI) calculado para cada estação de ensaio são apresentados no gráfico da Figura 6.1 a seguir, e posteriormente, serão apresentados o cálculo do Índice de Gravidade Global (IGG) para cada segmento homogêneo. Os dados do inventário de campo, realizado em janeiro de 2013, podem ser visualizados no Anexo A.

Figura 6.1 – Valores de IGI máximo do trecho em estudo

Por meio de ensaios defletoométricos, foi estimada a capacidade de suporte do pavimento existente. Os dados do levantamento defletoométrico, realizado em janeiro de 2013, podem ser visualizados no Anexo A. Os valores de deflexão no ponto de aplicação da carga D_0 foram normalizados em relação à carga (40 kN) e temperatura (25°C), em conformidade com os procedimentos do DER/SP IP-DE-P00/003 (2006), e as correções foram obtidas através do gráfico apresentado na Figura 6.2. As deflexões levantadas além do ponto de aplicação da carga não tiveram qualquer correção.

Figura 6.2 – Fator de correção da deflexão em função da temperatura do revestimento asfáltico (adaptado da IP-DE-P00/003 DER/SP, 2006)

O número de repetições de eixo-padrão N_{USACE} adotado para a faixa de rolamento é de $2,0 \times 10^7$, sendo este valor utilizado no dimensionamento pelo método californiano. Para o $NAASHTO$, adotou-se o valor de $5,0 \times 10^6$ solicitações durante o período de projeto de 10 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 período de projeto, e esta avaliação não é o objetivo deste trabalho.

No gráfico da Figura 6.3 são apresentadas as deflexões máximas obtidas no levantamento deflectométrico, com o limite para intervenção em reforço estrutural dimensionado pela metodologia DNER PRO 11 (1979), conforme a equação (37). Também são apresentados os valores obtidos para os parâmetros de curvatura da bacia deflectométrica como o raio de curvatura, SCI , BDI e BCI , derivados das equações (2), (4), (5) e (6), respectivamente, apresentados no gráfico da Figura 6.4 e Figura 6.7.

Preliminarmente, verifica-se que os segmentos entre o km 0,660 e o km 1,500 (pista decrescente) e entre o km 2,720 e o km 3,060 (pista crescente) apresentam deflexões elevadas, onde são recomendadas soluções de reconstrução.

Figura 6.3 – Valores de deflexão máxima do trecho em estudo (D_0)

Figura 6.4 – Valores do raio de curvatura do trecho em estudo (R)

Figura 6.5 – Valores de curvatura da bacia deflectométrica do trecho em estudo (SCI)

Figura 6.6 – Valores de curvatura da bacia deflectométrica do trecho em estudo (BDI)

Figura 6.7 – Valores de curvatura da bacia deflectométrica do trecho em estudo (BCI)

Para os valores da bacia deflectométrica, verifica-se que, em média, os parâmetros estão dentro dos limites apresentados, com exceção do BDI da pista sentido decrescente, onde se verifica o mau desempenho do conjunto das camadas de revestimento base e sub-base.

Com a finalidade de promover um tratamento diferenciado e específico para as necessidades de cada trecho, procedeu-se à divisão em segmentos que apresentam comportamento estrutural relativamente homogêneo, divisão esta que foi realizada a partir do método das diferenças acumuladas preconizado pela AASHTO (1993).

Para um resultado mais consistente, realizou-se a análise estatística dos valores com o Teste de Grubbs, a fim de serem excluídos da análise os *outliers*, valores inconsistentes na amostra.

Na Figura 6.8 é apresentada a segmentação homogênea adotada no trecho em estudo.

Figura 6.8 – Segmentação homogênea obtida pela deflexão máxima (D_0)

Para a obtenção do módulo de resiliência do subleito local foram utilizadas três metodologias:

- CBR do subleito, obtido por meio de ensaio de laboratório com amostras extraídas de poços de inspeção realizados no pavimento;
- Deflexão do último geofone (D_{120}), obtido por meio do levantamento deflectométrico realizado por FWD;
- Retroanálise com *software* BAKFAA 2.0, através dos dados da bacia deflectométrica e espessuras das camadas obtidas pela investigação de campo.

Na Tabela 6.2 são apresentados os valores dos ensaios geotécnicos executados em laboratório, para o trecho em estudo. O CBR médio obtido é de 11,8%, adequado para as soluções de reciclagem. Para a obtenção do módulo de resiliência, é utilizada a correlação apresentada na equação (47), que corresponde à classificação MCT de solo com comportamento laterítico, caracterizada pela alta coesão das partículas e elevada rigidez, resultando em um módulo de resiliência estimado para o subleito de 158 MPa.

Tabela 6.2 – Características geotécnicas do subleito local

km	CBR		Granulometria Porcentagem Passante					Classificação MCT
	CBR (%)	Expansão (%)						
			9,52 mm	4,75 mm	2,00 mm	0,42 mm	0,074 mm	
0,000	13,5	0,30	100,00	100,00	100,00	97,29	50,33	LA'-LG'
0,500	10,8	0,45	100,00	100,00	100,00	99,04	74,58	LG'
1,000	11,1	0,41	100,00	100,00	100,00	94,43	67,48	LG'
1,500	13,9	0,28	100,00	100,00	100,00	98,03	52,12	LA'-LG'
2,000	9,8	0,44	100,00	100,00	100,00	99,44	82,38	LG'
2,500	9,5	0,45	100,00	100,00	100,00	98,83	78,90	LG'
3,000	14,1	0,23	100,00	100,00	100,00	99,61	39,66	LA'-LG'

Por meio da deflexão do último geofone, D_{120} , são obtidos os valores estimados para o módulo de resiliência do subleito, empregando a equação (46) preconizada pela AASHTO (1993) e a segmentação homogênea adotada, apresentados na Tabela 6.3 a seguir.

Os resultados médios para o módulo de resiliência do subleito para as duas pistas foram distintos, 238 MPa e 162 MPa, para pista crescente e decrescente, respectivamente.

O valor máximo observado para o geofone D_{120} foi igual a 10×10^{-2} mm, dentro do limite recomendado de 17×10^{-2} mm.

Tabela 6.3 – Rigidez obtida pelo geofone D₁₂₀ na segmentação homogênea

Pista Crescente				Pista Decrescente			
Segmento Homogêneo			MR (MPa)	Segmento Homogêneo			MR (MPa)
Início	Fim	Extensão (m)		Início km	Fim km	Extensão (m)	
0,000	0,200	200	312	0,020	0,660	640	248
0,200	0,720	520	230	0,660	1,100	440	111
0,720	1,160	440	366	1,100	1,300	200	99
1,160	2,040	880	275	1,300	1,500	200	89
2,040	2,360	320	145	1,500	1,660	160	146
2,360	2,640	280	166	1,660	1,980	320	153
2,640	2,720	80	115	1,980	2,340	360	128
2,720	3,040	320	130	2,340	2,620	280	153
				2,620	2,900	280	230
				2,900	3,060	160	185

Na Tabela 6.4 e Tabela 6.5 são apresentados os valores obtidos pela retroanálise com o *software* BAKFAA 2.0 para as camadas de pavimento verificadas, com os dados de saída do programa apresentados no Anexo C. Ressalta-se que foi adotada uma amostragem com espaçamento de 200 m para cada pista, alternadamente.

Tabela 6.4 – Rigidez obtida pelo software BAKFAA – Pista Crescente

km	MR (MPa)				
	Capa	Base	Sub-Base	Reforço	Subleito
0,000	11.722	742	204	-	294
0,200	2.379	102	262	-	337
0,400	4.541	138	274	-	300
0,600	2.594	371	341	-	247
0,800	8.561	260	172	-	291
1,000	3.038	2.260	131	-	522
1,200	15.306	182	239	-	562
1,400	5.936	375	230	-	299
1,600	11.634	184	155	-	323
1,800	2.807	141	387	-	328
2,000	6.510	175	496	-	201
2,200	4.664	113	58	280	194
2,400	4.910	723	598	300	142
2,600	5.747	575	146	176	171
2,800	1.178	77	324	-	141
3,000	2.621	36	448	-	178

Em determinados locais, observa-se que a camada de revestimento asfáltico (CBUQ) apresenta elevadíssimo módulo de resiliência, característico de misturas asfálticas envelhecidas e oxidadas devido à ação do tempo e intempéries. A camada de base em solo-cimento (SC) apresenta módulo de resiliência predominantemente abaixo do esperado, com valor médio entre 400 MPa, desempenhando comportamento granular devido à sua falência. As camadas de sub-base e reforço apresentam resultado satisfatório, dentro do esperado. O subleito apresenta resultados acima dos observados nos ensaios de laboratório, com módulo de resiliência médio de 350 MPa entre o km 0,000 e o km 2,000 e resultados mais consistentes até o final do trecho, com módulo de resiliência médio de 170 MPa.

Tabela 6.5 – Rigidez obtida pelo software BAKFAA – Pista Decrescente

km	MR (MPa)				
	Capa	Base	Sub-Base	Reforço	Subleito
0,100	6.847	143	523	-	254
0,300	9.057	47	374	-	432
0,500	4.503	540	240	-	250
0,700	573	30	648	-	99
0,900	316	33	578	-	99
1,100	1.190	88	152	-	130
1,300	727	18	173	-	109
1,500	717	51	208	-	137
1,700	1.348	82	270	-	132
1,900	1.910	104	202	-	189
2,100	2.301	149	268	-	117
2,300	2.365	98	21	134	174
2,500	18.993	517	40	975	131
2,700	13.845	317	47	1.105	217
2,900	6.884	294	27	-	129
3,060	29.951	1.692	298	-	165

Em geral, observa-se que a camada de revestimento asfáltico (CBUQ) apresenta módulo de resiliência consistente, com exceção de três locais com valores acima de 10.000 MPa, podendo ser consideradas medições errôneas. Como verificado na pista crescente, a camada de base em solo-cimento (SC) apresenta módulo de resiliência predominantemente abaixo do esperado, com valor médio de 260 MPa. As camadas de sub-base e reforço apresentam resultado satisfatório, dentro do previsto. O subleito apresenta resultados consistentes, exceto em um local com valor acima de 400 MPa; expurgando-se este valor da amostragem, o módulo de resiliência médio corresponde a 155 MPa, compatível com os observados em laboratório.

Conforme exposto anteriormente, na Tabela 6.6, são apresentados os dados da envoltória da segmentação homogênea realizada em função do levantamento

deflectométrico, por sentido de tráfego, apresentando os principais parâmetros obtidos, que serão posteriormente avaliados para o dimensionamento do pavimento com camada reciclada. A Deflexão Característica do segmento homogêneo é calculada conforme preconizado na metodologia DNER PRO 11/79 (1979).

Tabela 6.6 – Envoltória dos principais dados obtidos

Envoltória			Dc	R	SCI	BDI	BCI	IGG	FC-3	PRO 11/79
km Início	km Fim	Ext. (km)	(10 ⁻² mm)	(m)	(10 ⁻² mm)	(10 ⁻² mm)	(10 ⁻² mm)		(%)	(m)
0,000	0,020	0,020	24	727	5	4	2	2	0	0,00
0,020	0,200	0,180	28	727	5	5	3	35	0	0,00
0,200	0,660	0,460	35	475	6	6	3	50	15	0,00
0,660	0,720	0,060	118	109	24	24	7	50	15	0,14
0,720	1,100	0,380	118	109	24	24	7	35	0	0,14
1,100	1,160	0,060	110	129	20	19	6	24	0	0,13
1,160	1,300	0,140	110	129	20	19	6	40	1	0,13
1,300	1,500	0,200	116	120	22	25	6	40	1	0,14
1,500	1,660	0,160	79	166	17	13	4	40	1	0,07
1,660	1,980	0,320	52	305	8	10	4	40	1	0,00
1,980	2,040	0,060	63	354	8	12	5	40	1	0,03
2,040	2,340	0,300	63	354	8	12	5	75	10	0,03
2,340	2,360	0,020	49	397	6	10	5	153	57	0,00
2,360	2,620	0,260	45	394	7	9	4	202	71	0,01
2,620	2,640	0,020	53	394	8	11	5	202	71	0,01
2,640	2,720	0,080	53	394	8	11	5	216	100	0,01
2,720	2,900	0,180	93	128	24	20	5	132	79	0,10
2,900	3,040	0,140	93	128	24	20	5	125	79	0,10
3,040	3,060	0,020	52	735	4	7	3	55	0	0,00

Para o módulo de resiliência do subleito, através dos métodos de retroanálise, foram verificadas divergências entre a pista crescente e a decrescente. Os resultados do levantamento geotécnico apresentam-se homogêneos, sem grande variação. Em favor da segurança do projeto, será adotado o menor valor obtido entre os métodos, neste caso, 88 MPa, que conforme o critério adotado corresponde a um CBR de projeto igual a 6%.

Para os segmentos homogêneos que obtiveram espessura de reforço superior a 0,10 m, será adotada solução alternativa ao reforço estrutural, devido às elevadas espessuras de reforço e má condição estrutural. Também para os segmentos que apresentarem IGG superior a 160, é indicada a reconstrução total da estrutura, devido à péssima condição funcional, denotando falência do pavimento.

A pista decrescente no trecho de base cimentada, em média, apresentou valores desfavoráveis para o parâmetro de BDI, excedente ao limite adotado, sugerindo que a integridade da camada cimentada está comprometida. Entretanto, os demais parâmetros da bacia deflectométrica, BCI, SCI e R, apresentam-se dentro do limite adotado. Prevendo-se que a camada de base existente será totalmente reciclada e a camada de sub-base apresenta desempenho satisfatório, entende-se ser adequada a solução em reciclagem profunda.

Avaliando a envoltória dos resultados, verifica-se que o método DNER PRO-11/79 (1979) apresentou solução alternativa à restauração como medida corretiva no trecho do km 0,660 ao km 1,500. O parâmetro do IGG recomenda a reconstrução no segmento do km 2,360 ao km 2,720. O segmento do km 2,720 ao km 3,040 apresenta reforço até 0,10 m e classificação funcional conceituada como ruim, também é observado elevado nível de trincas FC-3, sendo recomendada solução alternativa ao reforço estrutural.

As soluções de reciclagem com cimento devem apresentar granulometria adequada, condizente com a especificação técnica a ser adotada. No Brasil, através da especificação técnica do DER/SP ET-DE-P00/035 (2006), é preconizada a faixa granulométrica admitida, conforme indicado na Tabela 5.3, para garantir o bom desempenho da mistura. Nota-se que o tamanho máximo do agregado é inferior a 63,5 mm, podendo limitar sua execução para pavimentos existentes que apresentem rachão, macadame ou pedregulhos em sua estrutura.

O pavimento do trecho entre o km 2,720 e o km 3,040, em sua estrutura existente, apresenta rachão e macadame seco, desfavorável para aplicação da reciclagem com cimento.

Em decorrência da avaliação realizada será estudado o dimensionamento de soluções em reciclagem com cimento para o segmento do km 0,660 ao km 1,500, conforme grifado na Tabela 6.7 a seguir.

Tabela 6.7 – Resumo das soluções adotadas

Trecho (km)			Solução
Início	Fim	Extensão	
0,000	0,660	0,660	Correções de superfície
0,660	1,500	0,840	Reciclagem com cimento
1,500	2,360	0,860	Reforço até 0,07 m
2,360	3,060	0,700	Reconstrução

Para a infraestrutura remanescente da solução em reciclagem profunda é adotado o MR mínimo obtido da camada de sub-base retroanalizada no trecho proposto. As características da estrutura do pavimento existente deste segmento são homogêneas e com poucas alternâncias, constituída de materiais e espessuras médias conforme apresentados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Estrutura do pavimento adotada no trecho proposto

Camada	Material	Espessura Média (m)
Revestimento	CBUQ	0,13
Binder	CBUQ	0,05
Base	Solo Cimento	0,15
Reforço	Areia Argilosa	0,32
Subleito	Argila Arenosa	-
Total		0,65

Na reciclagem *in situ*, para as elevadas espessuras de revestimento asfáltico existentes, deve-se avaliar a necessidade de se reduzir previamente a espessura do material asfáltico por meio de fresagem, evitando-se excesso de RAP na mistura.

Conforme as informações discutidas, nesta próxima etapa do trabalho serão empregados os métodos do TRL386, TRL611, AASHTO, CALTRANS, Andalucía e Castilla y León, como também o dimensionamento proposto, para o dimensionamento estrutural de pavimento com camada reciclada com cimento,

conforme os dados abordados. Na Tabela 6.9, segue resumo das principais características a serem adotadas para o dimensionamento da camada reciclada.

Tabela 6.9 – Principais dados para o dimensionamento

Tráfego Adotado	N_{USACE}	2,0 x 10 ⁷
	N_{AASHTO}	5,0 x 10 ⁶
CBR Subleito (%)		6%
MR Infra. Remanescente (MPa)		130
Resistência e Rigidez Camada Reciclada	RCS (MPa) 7 dias	3,50
	RTF (MPa) 28 dias	0,60
	MR (MPa)	5.000
	K_{BRec}	1,40

6.1 TRL386

Inicialmente, é definida a classificação da rodovia quanto à categoria do tráfego, conforme indicado na Tabela 3.2, classificado como Tipo 1, correspondente ao tráfego de 2 x 10⁷. Ressalta-se que o método dimensiona as estruturas para um período mínimo de 20 anos.

O método limita a resistência à compressão simples da mistura reciclada de acordo com o tipo da rodovia. Neste caso, o valor médio recomendado é de 10 MPa, valor considerado elevado quando comparado aos valores preconizados pelos métodos de dimensionamento brasileiros para misturas com cimento.

Para o tipo de tráfego do projeto, o método define uma espessura mínima de infraestrutura remanescente para receber a camada reciclada em função do CBR do subleito, conforme apresentado na Tabela 3.4, obtendo 0,25 m de material granular.

A partir do ábaco de dimensionamento específico para tráfego tipo 1 e 2, é obtida a espessura do revestimento, como também da camada reciclada com cimento, conforme exemplificado na Figura 6.9 e Figura 6.10, resultando em uma espessura de revestimento asfáltico e base reciclada de 0,15 m e 0,24 m, respectivamente, totalizando 0,39 m.

Conforme recomendado, verifica-se a espessura mínima da infraestrutura remanescente está adequada, subtraindo-se a espessura total dimensionada pela espessura total do pavimento existente, resultando assim em 0,26 m, sendo satisfeita a exigência, sem necessidade de complementação na espessura da camada reciclada. Ressalta-se que é admitido não ocorrer alterações no greide.

Figura 6.9 – Dimensionamento do revestimento asfáltico para tráfegos tipos 1 e 2 (adaptado de Milton e Earland, 1999)

Figura 6.10 – Dimensionamento da camada cimentada para tráfegos tipos 1 e 2 (adaptado de Milton e Earland, 1999)

Segue na Tabela 6.10 o resumo da estrutura dimensionada.

Tabela 6.10 – Dimensionamento estrutural TRL386

Camada	Espessura (m)
Revestimento asfáltico	0,150
Reciclagem com cimento	0,240
Infraestrutura remanescente	0,260
Subleito (CBR 6%)	-

6.2 TRL611

O método determina a classificação da rodovia quanto à categoria do tráfego, conforme indicado na Tabela 3.6, classificado como Tipo 1, correspondente ao tráfego de 2×10^7 . Ressalta-se que o método dimensiona as estruturas para um período mínimo de 20 anos.

Além disso, o método define a classificação da fundação existente, realizada de acordo com a qualidade do material e sua estabilidade, sendo classificados de 1 a 4, do pior ao melhor. Além das investigações por cavas no pavimento, o método orienta quanto à avaliação por ensaios não destrutivos, como o FWD e DCP. O método define como bom desempenho valores de módulo de resiliência acima de 100 MPa para a fundação, valores inferiores indicam o mau desempenho. Conforme indicado na Tabela 3.7, adotado o módulo de resiliência do subleito de 88 MPa, em favor da segurança, adotou-se a classificação Tipo 1.

O dimensionamento da camada cimentada é realizado por meio das características de rigidez da mistura cimentada, mediante o uso de ábacos. Um dos parâmetros analisados é o módulo dinâmico da mistura, dado este não disponível para o dimensionamento, porém, uma correlação com a resistência à compressão simples é indicada na equação (11), obtendo-se o valor de 11.900 MPa. Plotando-se os valores da tensão de tração na flexão e o módulo dinâmico no ábaco apresentado na Figura 6.11, é obtida a classificação quanto à rigidez da mistura reciclada com cimento, Zona H1.

Definida a classe da mistura reciclada, a partir do ábaco de dimensionamento específico para cada tipo de fundação, é obtida a espessura da camada reciclada com cimento, como também a do revestimento asfáltico, conforme exemplificado na

Figura 6.12. Nota-se como resultado uma espessa camada de material reciclado de 0,42 m, proveniente principalmente pela classificação obtida quanto à rigidez do material.

A fim de exemplificar, adotando-se outros tipos de fundação, tipos 2, 3 e 4, são obtidas as seguintes espessuras para a camada reciclada, 0,38 m, 0,36 m e 0,33 m, respectivamente, mantendo-se ainda elevadas as espessuras obtidas, permitindo considerar a solução *in situ* inviável pela dificuldade de uma compactação adequada. Entretanto, a solução com compactação em duas camadas torna-se viável, admitindo-se uma solução de reciclagem em usina, porém onerando a solução com execução em duas etapas.

Segue na Tabela 6.11 o resumo da estrutura dimensionada.

Figura 6.11 – Classificação da mistura reciclada quanto a rigidez (adaptado de Merrill et al., 2004)

Figura 6.12 – Dimensionamento das camadas de reciclagem com cimento e revestimento asfáltico, fundação tipo 1 (adaptado de Merrill et al., 2004)

Tabela 6.11 – Dimensionamento estrutural TRL611

Camada	Espessura (m)
Revestimento asfáltico	0,150
Reciclagem com cimento	0,420
Infraestrutura remanescente	0,080
Subleito (CBR 6%)	-

6.3 AASHTO

O método determina a adoção dos parâmetros de coeficientes estruturais, drenagem e espessuras das camadas, que são estimados conforme indicado na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Parâmetros de dimensionamento AASHTO

Camada	Coeficiente estrutural	Coeficiente de drenagem	Espessura Mínima (m)
Revestimento asfáltico	0,44	-	0,075
Reciclagem com cimento	0,17	0,80	0,200
Infraestrutura remanescente	0,10	0,80	Variável

Para estimar o coeficiente de drenagem optou-se por adotar valores conservadores, para o coeficiente estrutural da camada reciclada adotou-se a faixa recomendada pela AASHTO, interpolando os valores indicados na Tabela 3.9, referenciado pela resistência à compressão simples aos 7 dias de 3,5 MPa.

A espessura mínima do revestimento asfáltico é obtida em função do tráfego AASHTO de 5×10^6 , conforme os valores indicados na Tabela 3.13. Para a camada reciclada com cimento adotou-se o mínimo recomendado neste estudo, 0,20 m.

Para obtenção do SN necessário é calculado o número de eixos padrões que a estrutura suporta, através da equação (16), obtendo-se SN de 3,38, sendo admitidos os seguintes parâmetros:

z_R = coeficiente de distribuição normal, adotado rodovia rural/autoestrada (80%);

s_0 = desvio padrão combinado das variáveis do projeto (0,40);

ΔPSI = variação de serventia admissível, adotado inicial = 4,2 e terminal = 2,5; e

MR = módulo de resiliência do subleito (psi).

Propõe-se a fresagem profunda na espessura mínima pré-dimensionada exequível, neste caso, 0,275 m. Portanto, a infraestrutura remanescente acima do subleito será de 0,375 m de espessura.

Conforme os coeficientes estimados e aplicando-o juntamente com as espessuras mínimas adotadas, em polegadas, o número estrutural efetivo SN_{ef} é igual a 1,18, apresentado na equação (60).

$$SN_{ef} = a_3 \times D_3 \times m_3 \quad (60)$$

$$SN_{ef} = 0,10 \times 14,76 \times 0,80 = 1,18$$

Portanto, o número estrutural do reforço SN_{ref} é igual a 2,20, obtido através da equação (61).

$$SN_{ref} = SN - SN_{ef}$$

$$SN_{ref} = 3,38 - 1,18 = 2,20 \quad (61)$$

Através da equação (18), em polegadas, determina-se a espessura necessária para a camada reciclada, conforme detalhado na expressão (62).

$$D_2 = \frac{SN_{ref} - a_1 \times D_1 - a_3 \times D_3 \times m_3}{a_2 \times m_2} \quad (62)$$

$$D_2 = \frac{2,20 - 0,44 \times 2,95 - 0,10 \times 14,76 \times 0,80}{0,17 \times 0,80} = zero$$

Verifica-se que em decorrência da sensibilidade da expressão (18) para a espessura das camadas e pela espessura da infraestrutura remanescente, não há necessidade de intervenção, sendo que a espessura do pavimento atual é suficiente para a proteção do subleito. Caso o pavimento existente apresenta-se espessura total de 0,40 m, o resultado seria uma espessura para a camada reciclada de 0,24 m.

Conforme os parâmetros apresentados e atendendo aos critérios propostos. Segue na Tabela 6.13 o resumo da estrutura dimensionada.

Tabela 6.13 – Dimensionamento estrutural AASHTO

Camada	Espessura física (m)
Revestimento asfáltico	0,075
Reciclagem com cimento	0,200
Infraestrutura remanescente	0,375
Subleito (CBR 6%)	-

6.4 CALTRANS

O método determina que a mistura reciclada com cimento deverá oferecer resistência à compressão simples aos 7 dias entre 2,0 e 4,1 MPa, dentro do limite estipulado em projeto de 3,5 MPa.

A profundidade mínima de execução da camada reciclada com cimento deverá ser 0,09 m superior à espessura do revestimento existente, que apresenta uma média de 0,18 m, portanto, 0,27 m de profundidade mínima para reciclagem.

O método recomenda estimar o material excessivo após a trituração do pavimento existente para um destino adequado ou aumentar a espessura real de reciclagem. Estima-se que o fator de dilatação do material é de 7%. Calculou-se o volume do

material triturado e o seu excesso, obtendo-se a espessura real de fresagem, conforme exemplificado na expressão (63) a seguir, com unidades em metro.

$$\begin{aligned} \text{Volume Material Rec.} &= 840 \times (3,60 \times 2) \times 0,27 = 1.632,96 \text{ m}^3 \\ \text{Excesso Material Rec.} &= 1.632,96 \times 7\% = 114,30 \text{ m}^3 \\ \text{Espessura Real Reciclagem} &= 0,27 \times 7\% = 0,29 \text{ m} \end{aligned} \quad (63)$$

Considerando o tráfego de $N_{USACE} = 2 \times 10^7$ de repetições de eixo padrão, através da equação (19) obteve-se o Índice de tráfego californiano (TI) igual a 12,85. Ressalta-se que o cálculo do N_{USACE} proposto refere-se à faixa de tráfego mais solicitada, com o fator de distribuição de tráfego nas faixas de rolamento (LDF) igual a 1,0. Também é importante salientar que o método californiano dimensiona as estruturas para um período mínimo de 20 anos.

O valor do R -Value, parâmetro de resistência adotado pelo método, é obtido através da equação (21), considerando o módulo de resiliência do subleito de 88 MPa, resultando o valor de 20,65.

A espessura total requerida para a proteção do subleito em termos de material granular (GE), conforme a equação (20), resulta em uma espessura total de 0,99 m.

O coeficiente estrutural da camada reciclada com cimento (G_{frec}) é obtido através da equação (23), em função da resistência à compressão simples adotada de 3,5 MPa, resultando o valor de 1,40. A partir do produto do G_{frec} e profundidade mínima de reciclagem, obtém-se uma espessura equivalente de 0,38 m para a camada reciclada (GE_{frec}).

Com os dados do pavimento existente, obtém-se a espessura da infraestrutura remanescente após a execução da reciclagem, através da somatória das espessuras das camadas do pavimento existente e da subtração da profundidade mínima de reciclagem adotada, conforme é apresentado na expressão (64).

$$\text{Esp. Remanescente} = 0,18 (CBUQ) + 0,15 (SC) + 0,32 (Ref) - 0,27 (FP) = 0,38 \text{ m} \quad (64)$$

Considerando-se para a infraestrutura remanescente o coeficiente estrutural G_{IR} igual a 1,00 e admitindo-se a estrutura remanescente como granular, obtém-se uma espessura equivalente de 0,38 m (GE_{IR}).

Para determinar a espessura equivalente do revestimento asfáltico (GE_{CBUQ}), subtrai-se da espessura total requerida em termos de material granular (GE) os valores obtidos de GE_{IR} e GE_{frec} , resultando em 0,24 m. Conforme a Tabela 3.16, onde são apresentados os modelos para obtenção do coeficiente estrutural do revestimento asfáltico, é obtido o valor de 1,58 (G_{fCBUQ}), resultando em uma espessura física de 0,149 m, arredondado para 0,15 m.

Segue na Tabela 6.14 o resumo da estrutura dimensionada, considerando que o material excedente da trituração terá destino adequado.

Tabela 6.14 – Dimensionamento estrutural CALTRANS

Camada	Coeficiente estrutural	Espessura física (m)	Espessura equivalente (m)
Revestimento asfáltico	1,58	0,150	0,237
Reciclagem com cimento	1,40	0,270	0,378
Infraestrutura remanescente	1,00	0,380	0,380
Subleito (CBR 6%)	Total	0,800	0,995

Ressalta-se que, para esta solução, há um alteamento no greide de 0,15 m, correspondente ao revestimento asfáltico. Nos casos em que há necessidade de se manter o greide existente, poderá se prever um aprofundamento da camada reciclada, recalculando-se as espessuras conforme abordado.

6.5 Andalucía

O método determina que a mistura reciclada com cimento deva oferecer resistência à compressão simples aos 7 dias mínima de 2,5 MPa, dentro do limite estipulado em projeto de 3,5 MPa. Para o tráfego previsto 2×10^7 é considerado a classificação T2, conforme a Tabela 3.17, onde o VDM entre 200 e 800 é plenamente aceitável.

A Figura 3.12 em função do tráfego recomenda estrutura de pavimento com base cimentada tipo SC-4 e camada de revestimento em concreto asfáltico. A partir da Tabela 3.18, a espessura mínima do conjunto de camadas de concreto asfáltico indicada é de 0,12 m e 0,15 m, conforme a zona climática da região de Andalucía, neste caso, será adotado o máximo previsto em favor da segurança.

Para a análise mecanicista, será adotada a estrutura mínima exigida, 0,15 m de revestimento asfáltico, 0,20 m de base reciclada com cimento e subleito com CBR igual a 6%. Conforme os modelos mecanicistas das expressões (24) e (26), calculou-se a deformação vertical no subleito (ϵ_v) e Tensão de tração (σ_t) mínimas necessárias para atendimento do tráfego previsto, como também, através do *software* Elsym-5, obteve-se os valores atuantes da tensão de tração na fibra inferior da camada cimentada e da deformação vertical de compressão no topo do subleito.

Os valores de tensão de tração obtidos foram superiores aos admissíveis, portanto, foram realizadas novas tentativas com incremento da base reciclada até obtenção da espessura 0,25 m. Os valores admissíveis e obtidos são apresentados na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 – Valores admissíveis e obtidos do dimensionamento estrutural

Modelo	Unidade	Valores admissíveis	Valores obtidos
Deformação vertical de compressão	10^{-4} cm/cm	1,951	0,805
Tensão de tração	MPa	0,378	0,376

Como os esforços atuantes são inferiores aos esforços admissíveis, verifica-se que a estrutura proposta atende às solicitações previstas pelo método. Segue na Tabela 6.16 o resumo da estrutura dimensionada.

Tabela 6.16 – Dimensionamento estrutural Andalucía

Camada	Espessura (m)
Revestimento asfáltico	0,150
Reciclagem com cimento	0,250
Infraestrutura remanescente	0,250
Subleito (CBR 6%)	-

6.6 Castilla y León

O método determina que a mistura reciclada com cimento deva oferecer resistência à compressão simples aos 7 dias entre 2,5 MPa e 4,5 MPa, dentro do limite estipulado em projeto de 3,5 MPa. Para o tráfego previsto 2×10^7 é considerado a

classificação T21, conforme a Tabela 3.17, onde o VDM entre 400 e 800 é plenamente aceitável.

Através da Figura 3.13, em função do tipo de tráfego adotado, é selecionada a solução com espessura mínima de reciclagem com cimento de 0,35 m e revestimento em concreto asfáltico de 0,12 m.

Afim de se confirmar as espessuras mínimas adotadas, realizou-se a análise mecanicista conforme os modelos das expressões (27) e (28), calculou-se a deformação vertical no subleito (ϵ_v) e a tensão de tração (σ_t) mínimas necessárias para atendimento do tráfego previsto, como também, através do *software* Elsym-5, obteve-se os valores atuantes da tensão de tração na fibra inferior da camada cimentada e da deformação vertical de compressão no topo do subleito.

Os valores de tensão de tração obtidos foram superiores aos admissíveis, portanto, foram realizadas novas tentativas com incremento ao revestimento asfáltico até obtenção da espessura de 0,18 m, pois a base reciclada já apresenta espessura máxima exequível definida pelo método. Os valores admissíveis e obtidos são apresentados na Tabela 6.17.

Tabela 6.17 – Valores admissíveis e obtidos do dimensionamento estrutural

Modelo	Unidade	Valores admissíveis	Valores obtidos
Deformação vertical de compressão	10^{-4} cm/cm	3,715	0,634
Tensão de tração	MPa	0,235	0,234

Como os esforços atuantes são inferiores aos esforços admissíveis, verifica-se que a estrutura proposta atende às solicitações previstas pelo método. Segue na Tabela 6.18 o resumo da estrutura dimensionada.

Tabela 6.18 – Dimensionamento estrutural Castilla y León

Camada	Espessura (m)
Revestimento asfáltico	0,180
Reciclagem com cimento	0,350
Infraestrutura remanescente	0,120
Subleito (CBR 6%)	-

6.7 Método proposto

No método proposto, como já estudado inicialmente neste capítulo, verifica-se a condição do pavimento existente, confirmando se está minimamente apto para o recebimento das soluções de reciclagem. Os parâmetros iniciais avaliados são:

- Deflexão característica inferior até 3 vezes a deflexão admissível do método de restauração adotado;
- $D_{120} \leq 17 \times 10^{-2}$ mm;
- Análise da Bacia deflectométrica, R, SCI, BDI e BCI satisfatória;
- CBR do subleito superior a 5%;
- Condição da superfície do pavimento com IGG inferior a 160;
- Pavimento existente possui granulometria adequada para a reciclagem com cimento, atendendo as faixas granulométricas definidas pela especificação técnica adotada; e
- Drenagem existente apresenta-se adequada ou pode ser reparada.

Não atendendo a uma ou mais condições é recomendada a avaliação criteriosa das soluções em reciclagem profunda, sendo recomendado considerar alternativas como estratégia de reabilitação do pavimento, ou até mesmo a reconstrução total do pavimento, seja pela falência da infraestrutura e/ou subleito existente, ou pela incompatibilidade granulométrica.

Observa-se nas cavas de pavimento, em média, espessura de 0,18 m de concreto asfáltico, devendo ser cotejada a opção de fresagem em parte do revestimento, a fim de se evitar excesso de RAP na mistura reciclada, preferivelmente até 50%, exceto nos casos em que a dosagem provar eficiência da mistura com porcentagens superiores de fresado asfáltico.

Atendidas as exigências, é realizado o primeiro dimensionamento, semi-empírico, que corresponde à espessura total necessária do pavimento, expressa em termos de material granular, para a proteção do subleito das tensões de cisalhamento impostas pelo tráfego.

Conforme a Tabela 5.6, é definida a espessura mínima de revestimento asfáltico, resultando para o tráfego proposto de $2,0 \times 10^7$ igual a 0,10 m. A seguir, na Tabela 6.19 são apresentados os parâmetros adotados.

Tabela 6.19 – Parâmetros para dimensionamento método semi-empírico

Parâmetro		Valor adotado
Coeficiente Estrutural	Revestimento K_R	2,00
	Camada reciclada $K_{B_{Rec}}$	1,40
	Camada Granular K_{BG}	1,10
	Infraestrutura Remanescente K_{INFRA}	1,00
Espessura (m)	Revestimento R	0,10
	Camada reciclada B_{Rec}	Mínimo 0,20
	Infraestrutura Remanescente SB	Variável
NUSACE		2×10^7
CBR (%)		6

Ressalta-se que a espessura da infraestrutura remanescente é obtida por meio do pré-dimensionamento da camada reciclada, adotando-se o valor mínimo de 0,20 m.

Propõe-se a fresagem profunda na espessura mínima pré-dimensionada exequível, neste caso, 0,30 m. Portanto, a infraestrutura remanescente acima do subleito será de 0,35 m de espessura. Através da expressão (65) é obtida a espessura mínima necessária para a camada reciclada com cimento.

$$B_{REC} = \frac{0,7767 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} - R \times K_R - IR \times K_{IR}}{K_{B_{REC}}} \quad (65)$$

$$B_{REC} = \frac{0,7767 \times (2 \times 10^7)^{0,0482} \times 6^{-0,598} - 0,10 \times 2,00 - 0,35 \times 1,00}{1,40} = 0,034 \text{ m}$$

Em decorrência da sensibilidade da expressão para a espessura total do pavimento, como resultante da espessura de infraestrutura remanescente igual a 0,35 m, obtém-se espessura da camada reciclada com 0,034 m, ou seja, a estrutura do pavimento existente é suficiente para a proteção do subleito em termos de material granular. Fica evidente que, quanto menor a espessura do pavimento existente, mais crítica é a condição para o dimensionamento pelo método semi-empírico.

Caso o pavimento existente apresenta-se espessura total de 0,40 m, o resultado seria uma espessura para a camada reciclada de 0,21 m.

O segundo dimensionamento corresponde à análise mecanicista da estrutura, através dos modelos propostos para avaliação estrutural e obtenção da espessura mínima da camada reciclada com cimento.

São avaliadas as estruturas semirrígidas e invertidas, por processo de reciclagem *in situ*, como também estruturas invertidas.

Seguem na Tabela 6.20 a seguir os valores utilizados nos modelos.

Tabela 6.20 – Parâmetros fixados para análise

Material	Módulo de Resiliência (MPa)	Resistência à tração na flexão admissível (MPa)	Espessura (m)
Concreto Asfáltico	3.000	-	0,10
Material Reciclado com Cimento	5.000	0,60	Mínimo 0,20
Material Granular	300	-	0,12
Infraestrutura Remanescente	130	-	Variável
Subleito	88	-	-

Para as estruturas semirrígidas, através das expressões (53), (54) e (55), é obtida a espessura da camada reciclada com cimento, definida pelos seguintes critérios de fadiga: D_0 , σ_t e ϵ_v , respectivamente, apresentando os seguintes resultados: 0,039 m, 0,269 m e 0,082 m.

Para o dimensionamento, será adotado o critério crítico observado, neste caso a tensão de tração (σ_t) na camada cimentada com espessura de 0,269 m, arredondado para 0,270 m.

Segue na Tabela 6.21 o resumo da estrutura dimensionada para a estrutura semirrígida.

Tabela 6.21 – Dimensionamento estrutural proposto semirrígido

Camada	Espessura física (m)
Revestimento asfáltico	0,100
Reciclagem com cimento	0,270
Infraestrutura remanescente	0,280
Subleito (CBR 6%)	-

Para as estruturas invertidas, através das expressões (56), (57), (58) e (59), é obtida a espessura da camada reciclada com cimento, definida pelos seguintes critérios de fadiga: D_0 , ε_t , σ_t e ε_v , respectivamente, apresentando os seguintes resultados: 0,032 m, 0,126 m, 0,203 m e 0,087 m.

Para o dimensionamento, será adotado o critério crítico observado, neste caso a tensão de tração (σ_t) na camada cimentada com espessura de 0,203 m, arredondado para 0,210 m.

Segue na Tabela 6.22 o resumo do pavimento dimensionado para a estrutura tipo invertida.

Tabela 6.22 – Dimensionamento estrutural proposto invertido

Camada	Espessura física (m)
Revestimento asfáltico	0,100
Base granular	0,120
Reciclagem com cimento	0,210
Infraestrutura remanescente	0,220
Subleito (CBR 6%)	-

6.8 Resumo do dimensionamento estrutural

Apresenta-se na Tabela 6.23 o resumo das estruturas dimensionadas conforme as metodologias investigadas.

Tabela 6.23 – Resumo do dimensionamento estrutural das metodologias investigadas

Metodologia	Espessura (m)			
	Revestimento asfáltico	Base granular	Reciclagem com cimento	Infraestrutura remanescente
TRL386	0,150	-	0,240	0,260
TRL611	0,150	-	0,420	0,080
AASHTO	0,075	-	0,200	0,375
CALTRANS	0,150	-	0,270	0,380
Andalucía	0,150	-	0,250	0,250
Castilla y León	0,180	-	0,350	0,120
Método proposto	Semirrígido	-	0,270	0,280
	Semirrígido invertido	0,120	0,210	0,220

Conforme observado, as espessuras para a camada de revestimento asfáltico variam entre 0,075 m e 0,180 m, respeitando a espessura mínima prevista para cada metodologia, exceção para o método de Castilla y León (2004), onde foi necessário o incremento no revestimento asfáltico para atendimento dos modelos previstos pelo método. Ressalta-se que o catálogo de soluções proposto na metodologia é baseado sobre uma fundação classificada como tipo E2 com $MR \geq 120$ MPa, deste modo, justifica-se a necessidade do incremento no revestimento asfáltico devido o CBR de projeto adotado igual a 6%.

As metodologias da AASHTO e do DNIT preconizam as menores espessuras de revestimento asfáltico obtidas, 0,075 m e 0,100 m, respectivamente, quando comparadas as outras metodologias investigadas que apresentam soluções de revestimento asfáltico partindo de 0,150 m para o tráfego previsto.

Quanto às espessuras obtidas para a camada reciclada, há grande variação nos valores obtidos, oscilando entre 0,200 m e 0,420 m. O dimensionamento da camada mais espessa é obtido pelo método inglês TRL611, podendo ser justificado pelo conceito no dimensionamento estrutural baseado na correlação entre o módulo dinâmico e a resistência a tração na flexão, limitado a valores aproximados de

60.000 MPa e 5,0 MPa, respectivamente, valores extremamente altos para os padrões rodoviários no Brasil e dos recomendados neste trabalho. Por exemplo, neste contexto, para a obtenção de espessuras de camada reciclada até 0,300 m, o método indica mistura tipo H4, que no mínimo, deve apresentar resistência à tração na flexão de 1,0 MPa para o módulo dinâmico adotado de 11.900 MPa, valores semelhantes aos adotados no Brasil para a mistura de Brita Graduada Tratada com Cimentos.

A metodologia adaptada da AASHTO e o método proposto para estrutura semirrígida invertida apresentam as menores espessuras para a camada reciclada, com resultado entre o mínimo recomendado de 0,200 m a 0,210 m, entretanto, a estrutura semirrígida invertida obtida apresenta espessura total resultante para as novas camadas implantadas de 0,430 m, superior ao obtido pela AASHTO de 0,275 m.

As metodologias do TRL386, CALTRANS, Andalucía e o método proposto para estrutura semirrígida apresentam espessuras semelhantes e plenamente exequíveis variando entre 0,240 m e 0,270 m.

6.9 Análise econômica das soluções indicadas

A seguir são apresentados os resultados da análise econômica realizada entre as soluções obtidas para os segmentos homogêneos no estudo de caso, tomando-se por base as intervenções propostas de reforço, reciclagem profunda com cimento e reconstrução total do pavimento.

Os estudos foram realizados a partir da elaboração de planilhas orçamentárias, cujos itens estão de acordo com cada alternativa sugerida. As planilhas foram compostas com base em composições de custo unitário fornecido pela tabela de preços unitários do DER/SP, com data base de setembro de 2017.

Devido a questões ambientais, há necessidade de bota-fora específico para materiais de demolição não inertes, Classe IIA, ou seja, que têm potencial para contaminar o solo e a água de onde descartados, neste contexto, o descarte de concreto asfáltico. O bota-fora específico para este tipo de material apresenta custos superiores quando comparado ao de material britado e/ou solo, classificados como

inerte Classe IIB, e deve ser avaliado com atenção, podendo acarretar custos não previstos no projeto.

Os custos com despesas de material de demolição do pavimento existente em bota-fora Classe IIA e IIB, para os trechos de reconstrução de pavimento, não são contemplados na tabela de preços unitários do DER/SP, sendo previstos somente a demolição de pavimento asfáltico, transporte, espalhamento, regularização e compactação do material em bota-fora.

Os quantitativos foram calculados para o custo do trecho proposto, conforme as soluções indicadas, com largura de faixa de rolamento de 7,0 m. Não foram levados em consideração os custos referentes ao acostamento, independentemente da alternativa de projeto analisada, desta forma a avaliação só inclui os custos envolvidos nas obras de recuperação da faixa de rolamento. Também é calculado o custo por m² implantado de cada intervenção, para melhor elucidar economicamente as soluções propostas.

Na Tabela 6.24, são apresentadas as soluções de restauração, reciclagem e reconstrução analisadas, contemplando para as soluções propostas de pavimento novo estruturas tipo flexível, semirrígido e semirrígido invertido, admitindo-se para a base e sub-base material de referência britado ou de jazidas, fornecendo maior abrangência nas soluções de reconstrução de pavimento.

Ressalta-se que para as soluções em reciclagem com cimento são previstos dois tipos de material, com e sem a necessidade de correção granulométrica, no primeiro caso com a adição de brita na mistura.

Tabela 6.24 – Resumo dos tipos de soluções analisadas

Solução	Tipo	Abreviação
Correções de superfície	Reperfilagem 0,020 m	R2
Reforço estrutural	Concreto Asfáltico 0,070 m	R7
Reciclagem	Semirrígido Cimento	RSR
	Brita + Cimento	RSRB
	Semirrígido Cimento	RSRI
	Invertido Brita + Cimento	RSRIB
Reconstrução	Pavimento Flexível Solo	PFS
	Pavimento Flexível Britado	PFB
	Pavimento Semirrígido Solo	PSRS
	Pavimento Semirrígido Britado	PSRB
	Pavimento Semirrígido Invertido Solo	PSRIS
	Pavimento Semirrígido Invertido Britado	PSRIB
Demolição	Demolição Pavimento Asfáltico	DP

Os materiais adotados para as soluções de restauração e reconstrução propostas são apresentados na Tabela 6.25.

Tabela 6.25 – Resumo dos materiais adotados

Abreviação	Material
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
BGS	Brita Graduada Simples
MS	Macadame Seco
SB	Solo Brita
SS	Solo Seleccionado
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
SBTC	Solo Brita Tratado com Cimento
RC	Reciclagem com Cimento Reciclagem com Cimento + Brita
SL	Subleito CBR $\geq$ 6%

Nos materiais de jazidas, para fins do estudo, é adotada uma distância média de transporte de 30 km.

A seguir, na Tabela 6.26, são apresentadas as soluções em reforço e reciclagem profunda dimensionadas neste capítulo.

Tabela 6.26 – Resumo das soluções de restauração e reciclagem profunda

Material	Espessura (m)			
	R2	R7	RSR	RSRI
CA	0,020	0,070	0,100	0,100
BGS	-	-	-	0,120
RC	-	-	0,270	0,210

As estruturas de pavimento novo são apresentadas na Tabela 6.27, dimensionadas adequadamente, atendendo aos critérios do DER/SP IP-DE-00/001 (2006) e de acordo com as premissas já apresentadas neste capítulo.

Tabela 6.27 – Resumo das estruturas de pavimento novo

Material	Espessura (m)					
	PFS	PFB	PSRS	PSRB	PSRIS	PSRIB
CA	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
BGS	-	0,200	-	-	-	0,120
MS	-	0,300	-	-	-	-
SB	0,200	-	-	-	0,120	-
SS	0,300	-	0,200	0,200	-	-
BGTC	-	-	-	0,200	-	0,200
SBTC	-	-	0,200	-	0,200	-
SL	-	-	-	-	-	-

A seguir, entre a Tabela 6.28 e a Tabela 6.40, são apresentadas as planilhas de composição de custo por intervenção das diversas alternativas sugeridas para o trecho em estudo. Em cada planilha é indicado o código de composição utilizado da

TPU do DER/SP. Na Tabela 6.41 é apresentado um resumo para as devidas comparações entre as alternativas propostas.

Tabela 6.28 – Planilha orçamentária para intervenção PFS

PFS									
Custo R\$/m² = 134,15 Custo Total R\$ = 657.315,40									
Item	Descrição	Unid.	Esp. (m)	Quant.	Custo Unitário R\$	Custo R\$/m²	Área (m²)	Quant.	Custo Total R\$
23.08.03.03	CAMADA ROLAMENTO - CBUQ - GRAD.C - COM DOP	m3	0,040	0,04	811,95	32,48	4.900,00	196,00	159.142,20
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	4.900,00	4.900,00	10.878,00
23.08.02	CONC.ASF.US.QUENTE - BINDER GRAD.B C/DOP	m3	0,060	0,06	755,65	45,34	4.900,00	294,00	222.161,10
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	4.900,00	4.900,00	10.878,00
23.05.01	IMPRIMADURA BETUMINOSA IMPERMEABILIZANTE	m2	-	1,00	6,07	6,07	4.900,00	4.900,00	29.743,00
23.04.02.05.02	SUB BASE OU BASE DE SOLO BRITA 50% BRITA COM TRANSP.JAZIDA	m3	0,200	0,20	130,09	26,02	4.900,00	980,00	127.488,20
23.03.01	REFORCO SUBLEITO ESCAV. SOLO ESCOLHIDO	m3	0,300	0,30	6,30	1,89	4.900,00	1.470,00	9.261,00
23.03.02.06	REFORCO DO SUBLEITO - TRANSPORTE + 15KM	m3*km	0,300	9,00	1,65	14,85	4.900,00	44.100,00	72.765,00
23.03.03	REFORCO DE SUBLEITO COMPACTACAO 100% EI	m3	0,300	0,30	5,17	1,55	4.900,00	1.470,00	7.599,90
23.02.01	MELH/PREPARO SUBLEITO - 100% EN	m2	-	1,00	1,51	1,51	4.900,00	4.900,00	7.399,00

Tabela 6.29 – Planilha orçamentária para intervenção PFB

PFB									
Custo R\$/m² = 182,21 Custo Total R\$ = 892.829,00									
Item	Descrição	Unid.	Esp. (m)	Quant.	Custo Unitário R\$	Custo R\$/m²	Área (m²)	Quant.	Custo Total R\$
23.08.03.03	CAMADA ROLAMENTO - CBUQ - GRAD.C - COM DOP	m3	0,040	0,04	811,95	32,48	4.900,00	196,00	159.142,20
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	4.900,00	4.900,00	10.878,00
23.08.02	CONC.ASF.US.QUENTE - BINDER GRAD.B C/DOP	m3	0,060	0,06	755,65	45,34	4.900,00	294,00	222.161,10
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	4.900,00	4.900,00	10.878,00
23.05.01	IMPRIMADURA BETUMINOSA IMPERMEABILIZANTE	m2	-	1,00	6,07	6,07	4.900,00	4.900,00	29.743,00
23.04.03.01	SUB-BASE OU BASE BRITA GRAD. SIMPLES	m3	0,200	0,20	190,50	38,10	4.900,00	980,00	186.690,00
23.04.06.03	SUB-BASE OU BASE DE MACADAME SECO	m3	0,300	0,30	180,91	54,27	4.900,00	1.470,00	265.937,70
23.02.01	MELH/PREPARO SUBLEITO - 100% EN	m2	-	1,00	1,51	1,51	4.900,00	4.900,00	7.399,00

Tabela 6.30 – Planilha orçamentária para intervenção PSRS

PSRS									
					Custo R\$/m² = 112,14		Custo Total R\$ = 549.471,30		
Item	Descrição	Unid.	Esp. (m)	Quant.	Custo Unitário R\$	Custo R\$/m²	Área (m²)	Quant.	Custo Total R\$
23.08.03.03	CAMADA ROLAMENTO - CBUQ - GRAD.C - COM DOP	m3	0,040	0,04	811,95	32,48	4.900,00	196,00	159.142,20
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	4.900,00	4.900,00	10.878,00
23.08.02	CONC.ASF.US.QUENTE - BINDER GRAD.B C/DOP	m3	0,060	0,06	755,65	45,34	4.900,00	294,00	222.161,10
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	4.900,00	4.900,00	10.878,00
23.04.01.03	SUB-BASE OU BASE SOLO CIM 5% - USINA	m3	0,200	0,20	80,88	16,18	4.900,00	980,00	79.262,40
23.03.01	REFORÇO SUBLEITO ESCAV. SOLO ESCOLHIDO	m3	0,200	0,20	6,30	1,26	4.900,00	980,00	6.174,00
23.03.02.06	REFORÇO DO SUBLEITO - TRANSPORTE + 15KM	m3*km	0,200	6,00	1,65	9,90	4.900,00	29.400,00	48.510,00
23.03.03	REFORÇO DE SUBLEITO COMPACTACAO 100% EI	m3	0,200	0,20	5,17	1,03	4.900,00	980,00	5.066,60
23.02.01	MELH/PREPARO SUBLEITO - 100% EN	m2	-	1,00	1,51	1,51	4.900,00	4.900,00	7.399,00

Tabela 6.31 – Planilha orçamentária para intervenção PSRB

PSRB									
					Custo R\$/m² = 166,07		Custo Total R\$ = 813.718,50		
Item	Descrição	Unid.	Esp. (m)	Quant.	Custo Unitário R\$	Custo R\$/m²	Área (m²)	Quant.	Custo Total R\$
23.08.03.03	CAMADA ROLAMENTO - CBUQ - GRAD.C - COM DOP	m3	0,040	0,04	811,95	32,48	4.900,00	196,00	159.142,20
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	4.900,00	4.900,00	10.878,00
23.08.02	CONC.ASF.US.QUENTE - BINDER GRAD.B C/DOP	m3	0,060	0,06	755,65	45,34	4.900,00	294,00	222.161,10
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	4.900,00	4.900,00	10.878,00
23.04.04.04	SUB-BASE OU BASE BRITA GRAD. C/CIM 4%VOL	m3	0,200	0,20	220,99	44,20	4.900,00	980,00	216.570,20
23.04.03.01	SUB-BASE OU BASE BRITA GRAD. SIMPLES	m3	0,200	0,20	190,50	38,10	4.900,00	980,00	186.690,00
23.02.01	MELH/PREPARO SUBLEITO - 100% EN	m2	-	1,00	1,51	1,51	4.900,00	4.900,00	7.399,00

Tabela 6.32 – Planilha orçamentária para intervenção PSRIS

PSRIS									
					Custo R\$/m² = 121,63		Custo Total R\$ = 595.956,62		
Item	Descrição	Unid.	Esp. (m)	Quant.	Custo Unitário R\$	Custo R\$/m²	Área (m²)	Quant.	Custo Total R\$
23.08.03.03	CAMADA ROLAMENTO - CBUQ - GRAD.C - COM DOP	m3	0,040	0,04	811,95	32,48	4.900,00	196,00	159.142,20
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	4.900,00	4.900,00	10.878,00
23.08.02	CONC.ASF.US.QUENTE - BINDER GRAD.B C/DOP	m3	0,060	0,06	755,65	45,34	4.900,00	294,00	222.161,10
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	4.900,00	4.900,00	10.878,00
23.05.01	IMPRIMADURA BETUMINOSA IMPERMEABILIZANTE	m2	-	1,00	6,07	6,07	4.900,00	4.900,00	29.743,00
23.04.02.05.02	SUB BASE OU BASE DE SOLO BRITA 50% BRITA COM TRANSP.JAZIDA	m3	0,120	0,12	130,09	15,61	4.900,00	588,00	76.492,92
23.04.01.03	SUB-BASE OU BASE SOLO CIM 5% - USINA	m3	0,200	0,20	80,88	16,18	4.900,00	980,00	79.262,40
23.02.01	MELH/PREPARO SUBLEITO - 100% EN	m2	-	1,00	1,51	1,51	4.900,00	4.900,00	7.399,00

Tabela 6.33 – Planilha orçamentária para intervenção PSRIB

PSRIB									
					Custo R\$/m ² = 156,90		Custo Total R\$ = 768.785,50		
Item	Descrição	Unid.	Esp. (m)	Quant.	Custo Unitário R\$	Custo R\$/m ²	Área (m ²)	Quant.	Custo Total R\$
23.08.03.03	CAMADA ROLAMENTO - CBUQ - GRAD.C - COM DOP	m3	0,040	0,04	811,95	32,48	4.900,00	196,00	159.142,20
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	4.900,00	4.900,00	10.878,00
23.08.02	CONC.ASF.US.QUENTE - BINDER GRAD.B C/DOP	m3	0,060	0,06	755,65	45,34	4.900,00	294,00	222.161,10
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	4.900,00	4.900,00	10.878,00
23.05.01	IMPRIMADURA BETUMINOSA IMPERMEABILIZANTE	m2	-	1,00	6,07	6,07	4.900,00	4.900,00	29.743,00
23.04.03.01	SUB-BASE OU BASE BRITA GRAD. SIMPLES	m3	0,120	0,12	190,50	22,86	4.900,00	588,00	112.014,00
23.04.04.04	SUB-BASE OU BASE BRITA GRAD. C/CIM 4%VOL	m3	0,200	0,20	220,99	44,20	4.900,00	980,00	216.570,20
23.02.01	MELH/PREPARO SUBLEITO - 100% EN	m2	-	1,00	1,51	1,51	4.900,00	4.900,00	7.399,00

Tabela 6.34 – Planilha orçamentária para intervenção RSR

RSR									
					Custo R\$/m ² = 113,42		Custo Total R\$ = 666.864,32		
Item	Descrição	Unid.	Esp. (m)	Quant.	Custo Unitário R\$	Custo R\$/m ²	Área (m ²)	Quant.	Custo Total R\$
23.08.03.03	CAMADA ROLAMENTO - CBUQ - GRAD.C - COM DOP	m3	0,040	0,04	811,95	32,48	5.880,00	235,20	190.970,64
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	5.880,00	5.880,00	13.053,60
23.08.02	CONC.ASF.US.QUENTE - BINDER GRAD.B C/DOP	m3	0,060	0,06	755,65	45,34	5.880,00	352,80	266.593,32
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	5.880,00	5.880,00	13.053,60
23.13.07.01	RECICLAGEM CAPA/BASE COM ADICAO DE 4% DE CIMENTO	m3	0,270	0,27	115,39	31,16	5.880,00	1.587,60	183.193,16

Tabela 6.35 – Planilha orçamentária para intervenção RSRB

RSRB									
					Custo R\$/m ² = 122,60		Custo Total R\$ = 722.842,72		
Item	Descrição	Unid.	Esp. (m)	Quant.	Custo Unitário R\$	Custo R\$/m ²	Área (m ²)	Quant.	Custo Total R\$
23.08.03.03	CAMADA ROLAMENTO - CBUQ - GRAD.C - COM DOP	m3	0,040	0,04	811,95	32,48	5.880,00	235,20	190.970,64
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	5.880,00	5.880,00	13.053,60
23.08.02	CONC.ASF.US.QUENTE - BINDER GRAD.B C/DOP	m3	0,060	0,06	755,65	45,34	5.880,00	352,80	266.593,32
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	5.880,00	5.880,00	13.053,60
23.13.07.03	RECICLAGEM DE PAVIMENTO COM ADICAO DE 20% DE BRITA E 4% DE CIMENTO	m3	0,270	0,27	149,39	40,34	5.880,00	1.587,60	237.171,56

Tabela 6.36 – Planilha orçamentária para intervenção RSRI

RSRI									
					Custo R\$/m² = 135,42		Custo Total R\$ = 796.263,13		
Item	Descrição	Unid.	Esp. (m)	Quant.	Custo Unitário R\$	Custo R\$/m²	Área (m²)	Quant.	Custo Total R\$
23.08.03.03	CAMADA ROLAMENTO - CBUQ - GRAD.C - COM DOP	m3	0,040	0,04	811,95	32,48	5.880,00	235,20	190.970,64
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	5.880,00	5.880,00	13.053,60
23.08.02	CONC.ASF.US.QUENTE - BINDER GRAD.B C/DOP	m3	0,060	0,06	755,65	45,34	5.880,00	352,80	266.593,32
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	5.880,00	5.880,00	13.053,60
23.05.01	IMPRIMADURA BETUMINOSA IMPERMEABILIZANTE	m2	-	1,00	6,07	6,07	5.880,00	5.880,00	35.691,60
23.04.03.01	SUB-BASE OU BASE BRITA GRAD. SIMPLES	m3	0,120	0,12	190,50	22,86	5.880,00	705,60	134.416,80
23.13.07.01	RECICLAGEM CAPA/BASE COM ADICAO DE 4% DE CIMENTO	m3	0,210	0,21	115,39	24,23	5.880,00	1.234,80	142.483,57

Tabela 6.37 – Planilha orçamentária para intervenção RSRIB

RSRIB									
					Custo R\$/m² = 142,56		Custo Total R\$ = 838.246,33		
Item	Descrição	Unid.	Esp. (m)	Quant.	Custo Unitário R\$	Custo R\$/m²	Área (m²)	Quant.	Custo Total R\$
23.08.03.03	CAMADA ROLAMENTO - CBUQ - GRAD.C - COM DOP	m3	0,040	0,04	811,95	32,48	5.880,00	235,20	190.970,64
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	5.880,00	5.880,00	13.053,60
23.08.02	CONC.ASF.US.QUENTE - BINDER GRAD.B C/DOP	m3	0,060	0,06	755,65	45,34	5.880,00	352,80	266.593,32
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	5.880,00	5.880,00	13.053,60
23.05.01	IMPRIMADURA BETUMINOSA IMPERMEABILIZANTE	m2	-	1,00	6,07	6,07	5.880,00	5.880,00	35.691,60
23.04.03.01	SUB-BASE OU BASE BRITA GRAD. SIMPLES	m3	0,120	0,12	190,50	22,86	5.880,00	705,60	134.416,80
23.13.07.03	RECICLAGEM DE PAVIMENTO COM ADICAO DE 20% DE BRITA E 4% DE CIMENTO	m3	0,210	0,21	149,39	31,37	5.880,00	1.234,80	184.466,77

Tabela 6.38 – Planilha orçamentária para intervenção R7

R7									
					Custo R\$/m² = 63,01		Custo Total R\$ = 379.287,09		
Item	Descrição	Unid.	Esp. (m)	Quant.	Custo Unitário R\$	Custo R\$/m²	Área (m²)	Quant.	Custo Total R\$
23.09.01	CAPA SELANTE TIPO 2	m2	-	1,00	3,98	3,98	6.020,00	6.020,00	23.959,60
23.08.03.03	CAMADA ROLAMENTO - CBUQ - GRAD.C - COM DOP	m3	0,030	0,03	811,95	24,36	6.020,00	180,60	146.638,17
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	6.020,00	6.020,00	13.364,40
23.08.02	CONC.ASF.US.QUENTE - BINDER GRAD.B C/DOP	m3	0,040	0,04	755,65	30,23	6.020,00	240,80	181.960,52
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	6.020,00	6.020,00	13.364,40

Tabela 6.39 – Planilha orçamentária para intervenção R2

R2									
					Custo R\$/m² = 22,35		Custo Total R\$ = 123.595,42		
Item	Descrição	Unid.	Esp. (m)	Quant.	Custo Unitário R\$	Custo R\$/m²	Área (m²)	Quant.	Custo Total R\$
23.09.01	CAPA SELANTE TIPO 2	m2	-	1,00	3,98	3,98	4.620,00	4.620,00	18.387,60
23.08.04.03	CAMADA ROLANTE CBUQ - GRAD. D - COM DOP	m3	0,020	0,02	807,41	16,15	5.880,00	117,60	94.951,42
23.05.02	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	-	1,00	2,22	2,22	4.620,00	4.620,00	10.256,40

Tabela 6.40 – Planilha orçamentária para intervenção DP

DP									
					Custo R\$/m ² = 25,52		Custo Total R\$ = 125.043,10		
Item	Descrição	Unid.	Esp. (m)	Quant.	Custo Unitário R\$	Custo R\$/m ²	Área (m ²)	Quant.	Custo Total R\$
21.05.07	DEMOLICAO PAVIMENTO FLEXIVEL C/TRANSPORT	m3	0,650	0,65	36,51	23,73	4.900,00	3.185,00	116.284,35
22.02.09	ESPALHAMENTO/REG./COMPAC. DE MATERIAL EM BOTA-FORA.	m3	0,650	0,65	2,75	1,79	4.900,00	3.185,00	8.758,75

Tabela 6.41 – Resumo dos custos das soluções propostas

Solução		Custo R\$/m ²	Custo R\$ total
Correções de superfície	R2	22,35	123.595,42
Reforço estrutural	R7	63,01	379.287,09
Reciclagem	RSR	113,42	666.864,32
	RSRB	122,60	720.842,72
	RSRI	135,42	796.263,13
	RSRIB	142,56	838.246,33
Reconstrução	PFS	134,15	657.315,40
	PFB	182,21	892.829,00
	PSRS	112,14	549.471,30
	PSRB	166,07	813.718,50
	PSRIS	121,63	595.956,62
	PSRIB	156,90	768.785,50
Demolição Pavimento	DP	25,52	125.043,10

Fazendo-se uma análise dos resultados apresentados acima, verifica-se que as soluções de correções de superfície (R\$ 22,36/m²) e reforço estrutural (R\$ 63,02/m²) são, obviamente, as que apresentaram menor custo de implantação, como também maior agilidade operacional, com redução de maquinário, sem necessidade de transporte de material de demolição e custos com bota-fora.

Nas soluções com reciclagem, as estruturas semirrígidas apresentam menor custo que o observado nas estruturas semirrígidas invertidas, devido principalmente à incorporação da camada de base granular.

Para as diversas sugestões de implantação de pavimento novo, as estruturas que contemplam a adoção de material proveniente de jazidas, apresentam menor custo quando comparado às soluções com material britado comercial, com destaque para a solução PSRS (R\$ 112,14/m²). A solução mais onerosa é observada na estrutura em pavimento flexível PFB (R\$ 182,21/m²), com a camada em macadame seco sendo o principal elemento para elevação do custo.

Na comparação das estruturas em reciclagem e pavimento novo, ressalta-se a solução em pavimento novo PSRS (R\$ 112,14/m²), com estrutura mais próxima a existente avaliada do trecho de estudo da SP 270, e a solução em reciclagem PSR (R\$ 113,42/m²), ambas com custos semelhantes. Entretanto, para as soluções em pavimento novo, ainda devem-se considerar os custos com a demolição do pavimento existente (R\$ 25,52/m²), que, somando-se à solução PSRS, resulta em um custo total de R\$ 137,66/m², em torno de 22 % superior à solução em reciclagem PSR.

Como comentários finais a respeito do custo econômico das soluções de reabilitação do pavimento existente estudadas para o trecho de estudo da SP 270, as soluções de reforço estrutural e correções de superfície apresentam menor custo.

As soluções em reconstrução de pavimento com material britado comercial apresentou-se mais dispendiosa, com destaque para a estrutura flexível PFB. Nos casos de pavimento novo com material de jazidas, o custo é relativamente próximo ao das soluções em reciclagem profunda, porém, deve-se ater às dificuldades de se obter material adequado, como também, ao fato de ocasionar maior interferência ao meio ambiente pela exploração de jazidas e à necessidade de disposição de bota-fora adequado.

A solução em reciclagem profunda apresentou custo intermediário entre as soluções de reforço estrutural e reconstrução, com valores até 83% inferior à reconstrução do pavimento e 80% superior ao reforço estrutural, contemplando a reutilização do material do pavimento existente, evitando-se a exploração de jazidas e bota-foras adequados, excelente ganho estrutural e homogeneização da estrutura do pavimento existente, além de ganhos ambientais não computados nesta análise de custo que, no entanto, devem ser considerados como fator relevante quando da execução de uma obra rodoviária.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões inferidas a partir da revisão bibliográfica, da experiência internacional obtida e do estudo paramétrico realizado. Além disso, também são apresentadas algumas recomendações para pesquisas futuras.

7.1 Conclusões

Pela análise bibliográfica desenvolvida verificou-se que outros países desenvolveram metodologias de dimensionamento estrutural específicas para as soluções de reabilitação em reciclagem profunda com cimento *Portland*. Embora esta tecnologia esteja relativamente consolidada no país, o dimensionamento estrutural deste tipo de solução tem sido efetuado de maneira empírica, à luz de informações e experiências divulgadas principalmente pelas empresas que comercializam o equipamento, ou por outras que executam especificamente este tipo de serviço.

O objetivo do presente trabalho foi propor critérios de projeto onde seja recomendado este tipo de solução de reabilitação para o pavimento existente, além de um procedimento de cálculo para seu respectivo dimensionamento estrutural, visando atender ao tráfego futuro previamente estabelecido.

Uma vez definida a utilização da técnica de reciclagem, o procedimento proposto conforme o item 5.9, consiste em dimensionar o pavimento como se fosse uma nova estrutura apoiada sobre o remanescente resultante da fresagem profunda, atendendo à metodologia do DNIT para pavimentos asfálticos semirrígidos e invertidos, complementada pela avaliação mecanicista, levando em consideração a teoria elástica linear e a resistência à fadiga dos materiais constituintes das diversas camadas envolvidas, fundamentada pelo estudo paramétrico de equações para correlação entre as deformações críticas esperadas na estrutura reciclada, resultando em modelos de dimensionamento para a camada reciclada com cimento.

Para os coeficientes de equivalência estrutural a serem adotados no dimensionamento em termos de material granular, considera-se que o material reciclado é estruturalmente análogo a uma solução em solo-cimento, obtendo assim os coeficientes através das relações indicada pelo DNIT em função da RCS da

mistura reciclada, como alternativa a obtenção dos coeficientes, é apresentado um método simplificado utilizando-se a teoria de sistemas de camadas elásticas.

Utilizando-se os modelos de fadiga adotados para deflexão no topo do revestimento (D_0), deformação horizontal de tração (ϵ_t), tensão de tração (σ_t) e deformação horizontal no revestimento (ϵ_r) em confronto as expressões desenvolvidas no estudo paramétrico, obtêm-se modelos para determinar a espessura mínima da camada reciclada de estruturas semirrígida e invertida, em função das características geométricas, de resistência e rigidez dos materiais componentes do pavimento reabilitado.

A análise paramétrica permitiu observar que o parâmetro de tensão de tração (σ_t) é crítico no dimensionamento da camada reciclada com cimento para a estrutura semirrígida. Nos casos de estrutura semirrígida invertida, o parâmetro de tensão de tração (σ_t) também apresenta grande influência, porém, em determinados casos a deformação horizontal de tração (ϵ_t) se mostra como parâmetro crítico, com grande influência exercida pela camada de revestimento asfáltico e base granular, requerendo critério rigoroso do projetista na definição das espessuras adotadas.

Com intuito de resumir as considerações sugeridas neste trabalho, é apresentado um fluxograma das etapas do dimensionamento estrutural, concluindo se é viável e adequada a solução de reciclagem. São apresentados critérios e recomendações para cada etapa referente à caracterização da infraestrutura existente, mistura reciclada e condições mínimas de execução. Destas etapas são avaliados:

- Suporte do subleito, CBR e D_{120} ;
- Condição estrutural, D_0 e parâmetros da bacia deflectométrica;
- Condição funcional, IGG;
- Drenagem existente;
- Dosagem da mistura reciclada com cimento, granulometria, % cimento, % RAP, resistência, rigidez; e
- Dimensionamento estrutural semi-empírico e mecanicista.

Como se observou no estudo de caso da SP 270, após aplicação dos critérios recomendados neste trabalho, as espessuras obtidas no dimensionamento estrutural da camada reciclada apresentou-se coerente com as metodologias estudadas, exceção para o método inglês do TRL611 e o espanhol de Castilla y León.

O emprego do modelo de fadiga para camada reciclada com cimento proposto por Minguela (2011), adotado neste estudo pela carência de modelos nacionais específicos, apresentou resultados satisfatórios quando comparado aos modelos nacionais existentes para outros tipos de misturas tratadas com cimento, atuando em uma faixa de desempenho consistente, resultando em espessuras coerentes para a camada reciclada entre 0,20 m e 0,30 m.

Complementando o estudo, a análise econômica realizada para soluções em reciclagem com cimento apresentou valores até 83% inferiores quando comparados a soluções de reconstrução e 80% superiores a solução de reforço estrutural, validando como uma solução economicamente viável em contrapartida as soluções de reconstrução total. Nesta análise não foram contemplados os custos com jazidas ou bota-foras nos casos de reconstrução do pavimento, podendo ainda acarretar aumento no custo global.

7.2 Recomendações para pesquisas futuras

Alguns aspectos não foram contemplados neste trabalho, portanto, como recomendações para futuras pesquisas sugerem-se:

- Estudo do comportamento dos materiais reciclados *in situ* com cimento *Portland*, seus mecanismos de degradação e ruptura para a determinação de modelos de vida útil, contextualizados com os materiais, rodovias e condições climáticas brasileiras;
- A execução e monitoramento de pistas experimentais com emprego de ensaios acelerados e trechos experimentais em rodovias para avaliação do desempenho funcional/estrutural e melhor compreensão dos mecanismos de degradação das misturas recicladas com cimento;
- A realização de estudos laboratoriais para caracterização da mistura reciclada com cimento, empregando-se materiais não convencionais para pavimentação, entre eles fresados oriundos de revestimentos modificados com borracha de pneu, agregados reciclados da construção civil e rejeitos de mineração, pela crescente utilização em rodovias;
- A complementação do estudo bibliográfico realizado, como também, a análise de outras metodologias de dimensionamento existentes na experiência internacional não destacada neste trabalho;

- Aperfeiçoamento dos modelos de fadiga para misturas de solo-cimento propostos por Ceratti (1991), porquanto apresentam elevada diferença de desempenho entre si, como também quando são comparados a outros modelos semelhantes;
- O estudo de modelos de fadiga para misturas de solo-brita tratado com cimento, atualmente pouco pesquisado no Brasil; e
- Estudo de estruturas com camadas cimentadas executadas em duas etapas, este tipo de execução possibilita a adoção de espessura final elevada e uma compactação adequada sem a utilização de maquinário exclusivo, porém, a perda de aderência entre as mesmas podem ter influência negativa no desempenho e comportamento da camada cimentada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVIM, I. M. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento portland: O estado da arte no Brasil**. Sindicato da construção civil pesada do estado de São Paulo, 21 mar. 2017. Palestra proferida no seminário “reciclagem de pavimentos com adição de cimento portland”, São Paulo, 2017.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Guide for design of pavements structures**. Washington D.C., 1993.
- ARANHA, A. L. **Avaliação laboratorial e de campo da tecnologia de reciclagem de base com cimento para a reabilitação de pavimentos**. São Paulo: Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.
- ASPHALT INSTITUTE. **Research and development of the Asphalt Institute's thickness design manual (MS-1)**. 9ª. ed. Lexington, 1982.
- ASPHALT RECLAIMING AND RECYCLING ASSOCIATION. **Basic asphalt recycling manual**. Annapolis, 2001.
- BALBO, J. T. **Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semi-rígidos**. São Paulo: Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BARKER, W. R. **Prediction of pavement roughness**. Vicksburg: U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station Geotechnical Laboratory, 1982.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.
- BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3ª edição. ed. São Paulo: Exceção Editorial, 2010.
- BORDIM, C. **Utilização do método de elementos finitos na avaliação das respostas estruturais de pavimentos flexíveis**. Ijuí: Dissertação (Mestrado) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2010.
- CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Full depth reclamation using cement**. California, 2013.

CERATTI, J. A. P. **Estudo de comportamento a fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimento**. Rio de Janeiro: Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991.

COLLINGS, D. C. Experiences gained from ten years of pavement rehabilitation by in situ recycling with cement and combinations of cement/ bituminous stabilising agents. In: 1º SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTABILIZACIÓN DE EXPLANADAS Y RECICLADOS IN SITU DE FIRMES DE CEMENTO – **Anais...** Salamanca, 2001. p. 89-103.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2016: relatório gerencial**. Brasília, p. 402. 2016.

COSTA, M. O. **Considerações sobre os métodos de dimensionamento estrutural de pavimentos com camadas recicladas a frio com espuma de asfalto**. São Paulo: Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.

DAC CHI, N. **Les graves traitées au ciment. Leurs principales caractéristiques. Leur comportement à la fatigue**. Paris: Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n. 94, mars-avril., 1978, p. 65-72.

DELLABIANCA, L. M. A. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. Brasília: Tese (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2004.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Avaliação funcional e estrutural de pavimento**: IP-DE-P00/003. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Projeto de pavimentação**: IP-DE-P00/001. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Reciclagem de pavimentos asfáltico in situ com cimento e brita**: ET-DE-P00/035. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. Tabela de preços unitários, 2018. Disponível em:

<http://www.der.sp.gov.br/Website/Acessos/Documentos/PrecosUnitarios.aspx>.

Acesso em: 15 janeiro 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis - Procedimento A:** DNER-PRO 010/79. Rio de Janeiro, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis - Procedimento B:** DNER-PRO 011/79. Rio de Janeiro, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Projeto de restauração de pavimentos flexíveis - TECNAPAV:** DNER-PRO 269/94. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento:** DNIT 006/2003 - PRO. Rio de Janeiro: , 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de estudos de tráfego:** Publicação IPR-723. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação:** Publicação IPR-719. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos:** Publicação IPR-720. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço:** DNIT 167/2013-ES. Rio de Janeiro, 2013.

DIEFENDERFER, B. K.; APEAGYEI, A. K. **Analysis of full-depth reclamation trial sections in Virginia.** Charlottesville: Virginia Center for Transportation Innovation and Research, 2011.

FABRÍCIO, J. M.; GONÇALVES, E. A.; FABRÍCIO, O. F. Metodologia não destrutiva para avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis através da interpretação das

bacias de deformação. In. REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 23., 1988, Florianópolis. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv. 1988.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento portland: definição das bases para um método de dosagem.** Porto Alegre: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

GSCHWENDT, I.; POLIACEK, I. **Pavement design optimization by an analytical method.** 5th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements - Proceedings. Delft: Vol. I. 1982.

HORAK, E. Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. **Technical paper of Journal of the South African Institution of Civil Engineering.** Pretoria: v. 50., n. 2, p. 2-9, 2008.

HORAK, E.; EMERY, S. Falling weight deflectometer bowl parameters as analysis tool for pavement structural evaluations. In: ARRB CONFERENCE, 22., 2006, Canberra. **Proceedings...** Australian Road Research Board, 2006.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design.** 2ª. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2004.

INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES. **Reciclados de firmes in situ con cemento: guías técnicas.** Madri, 2013.

JASIENSKI, A.; RENS, L. In situ recycling with cement: Belgian experience. IN: 1º SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTABILIZACIÓN DE EXPLANADAS Y RECICLADOS IN SITU DE FIRMES DE CEMENTO – **Anais...** Salamanca, 2001. p. 918-930.

JUNTA DE ANDALUCÍA. CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES. **Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía.** Sevilla, 2007.

JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN. CONSEJERÍA DE FORMENTO. **Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos.** Salamanca, 2004.

KLEINER, T. R. **Reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento: contribuição ao desenvolvimento de um método de dosagem.** Porto

Alegre: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2016.

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente**. Fortaleza: (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, 2003.

LISTER, N. W. **Deflection criteria for flexible pavements**. Transport and Road Research Laboratory Report LR 375. Crowthorne. 1972.

LOPES, F. M. **Pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico: avaliação estrutural a partir dos parâmetros de curvatura da bacia de deformação**. Campinas: Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, 2012.

MARCHIONNA, A. **Considerazioni sul comportamento strutturale ed il dimensionamento delle pavimentazioni semirigide. Verifica a fatica e riflessione delle fessure**. Roma: Autostrade. 1989. p. 69-75.

MERRIL, D.; NUNN, M.; CARSWELL, I. **A guide to the use and specification of cold recycled materials for the maintenance of road pavements**. Transportation Research Laboratory Report 611. Crowthorne. 2004.

MILTON, L. J.; EARLAND, M. **Design guide and specification for structural maintenance of highway pavements by cold in-situ recycling**. Transportation Research Laboratory Report 386. Crowthorne. 1999.

MINGUELA, J. D. **El estudio del comportamiento de los firmes reciclados in situ con cemento**. Burgos: Tese (Doutorado) - Universidad de Burgos, 2011.

MINISTRO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO. **Norma 6.3 IC: Rehabilitación de firmes**. Madrid, 2003.

MOTTA, R. S. **Estudo de misturas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético**. São Paulo: Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, 2011.

NAM, B.; AN, J.; MURPHY, M. R. **Improvements to the AASHTO subgrade resilient modulus (MR) equation**. Technical Paper of Geo-Congress 2014. Atlanta. Fevereiro 2014. p. 2414-2425.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Recycling and reclamation of asphalt pavements using in-place methods**: A synthesis of highway practice. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2011.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Uma nova classificação para finalidades rodoviárias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, 1981, v.1 – **Anais...** Rio de Janeiro, 1981. p. 30-40.

NOURELDIN, A. S. **New Scenario for Backcalculation of Layer Moduli of Flexible Pavements**. Transportation Research Record. Riyadh: UNDP Ministry of Communications. 1993. p. 23-28.

OLIVEIRA, P. C. A. D. **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, 2003.

OLIVEIRA, P. C. A. D. **Diretrizes para projetos de reciclagem com adição de brita e cimento**. Campinas: Tecnopav Engenharia, 2011.

PAIVA, C. E. L.; OLIVEIRA, P. C. A. D.; BOMFIM, V. As perspectivas de reabilitação de pavimentos no estado de São Paulo – Brasil: Enquadramento e técnicas usuais. **Construção Magazine**, Porto, v. 53, p. 34-38, 2013.

PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ROAD CONGRESSES. **Rapport nationale Espagne. Question I-classification, propriétés et essais des matériaux routiers**. Vienne: Congrès Mondial de La Route, 1979.

PEYRONNE, C.; CAROFF, G. **Dimensionnement des chaussées**. Paris: Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1989.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Guide to Full Depth Reclamation (FDR) with Cement**. Illinois, 2005.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. **Análise mecanicista à fadiga de estruturas de pavimento**: IP-08. São Paulo, 2004.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. **Dimensionamento de pavimentos flexíveis tráfego meio pesado, pesado, muito pesado e faixa exclusiva de ônibus**: IP-05. São Paulo, 2004.

SACHET, T. **Controle tecnológico de obras rodoviárias envolvendo a reciclagem in situ de bases granulares de pavimentos asfálticos**. Passo Fundo: Dissertação (Mestrado) - Universidade de Passo Fundo, 2007.

SCHIMMOLLER, V. E. et al. **Recycled materials in European highway environments uses, technologies, and policies**. Washington D.C.: Federal Highway Administration, 2000.

SEBASTA, S. **Use of microcracking to reduce shrinkage cracking in cement**. Texas: Texas Transportation Institute, 2004. 42.45 p.

SILVA, A. H. M. et al. **Avaliação dos parâmetros executivos para construção de camada espessa de base cimentada**. Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões. São Paulo. 2013. p. 1-12.

SOUTH AFRICAN NATIONAL ROADS AGENCY. **South African pavement engineering manual - Chapter 10: Pavement Design**. 2ª. ed. Pretoria, 2014.

SUZUKI, C. Y.; AZEVEDO, A. M.; KABBACH, F. I. J. **Drenagem subsuperficial de pavimentos: conceitos e dimensionamento**. São Paulo: Oficina de textos, 2013.

SYMONS, I. F. **A preliminary investigation to determine the resistance of cement-stabilized materials to repeated loading**. Crowthorne: Road Research Laboratory Report LR 61, 1967.

TRICHÊS, G. **Concreto compactado a rolo para aplicação em pavimentação: estudo do comportamento na fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento**. São José dos Campos: Tese (Doutorado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 1993.

WIRTGEN GMBH. **Wirtgen cold recycling manual**. 3ª. ed. Windhagen, 2010.

Neste anexo são apresentados os dados dos levantamentos considerados no estudo de caso na Rodovia Raposo Tavares, consistindo em:

- Avaliação Objetiva da Superfície do Pavimento, incluindo medidas das flechas nas trilhas de roda, segundo o procedimento DNIT 006/2003 – PRO (2003);
- Levantamento Deflectométrico realizado com o emprego do *Falling Weight Deflectometer* (FWD), em conformidade com a norma DNER PRO-273/96 (2006), onde se empregou uma carga de 40 kN, equivalente ao semi-eixo padrão rodoviário;
- Abertura de cavas no pavimento para identificação dos materiais componentes das camadas estruturais do pavimento e suas respectivas espessuras, bem como a coleta de amostras de solo, de acordo com o procedimento DNER-PRO 03/94 (1994), identificação das características geológica-geotécnicas e a capacidade de suporte do solo que compõe o subleito local.

Os serviços foram realizados entre janeiro e março de 2013, sendo que os resultados foram gentilmente cedidos pela empresa Planservi Engenharia Ltda.

Inventário do Pavimento - Pista Crescente

km	FC-1 Área (%)	FC-2 Área (%)	FC-3 Área (%)	ALP	ATP	O	Pavimento Área (%)	EX	Desgaste Área (%)	R	ALC	ATC	E	Flechas		IGI
														TRI (mm)	TRE (mm)	
0,00			40											4,0	4,0	85
0,04			50											3,0	5,0	86
0,08	20													2,0	2,0	23
0,12		20												2,0	3,0	54
0,16		20												3,0	3,0	54
0,20	20													2,0	2,0	23
0,24	20													3,0	2,0	24
0,28	20													4,0	3,0	25
0,32			100											5,0	5,0	87
0,36			50											4,0	3,0	85
0,40			50				0,19							2,0	8,0	196
0,44	30													2,0	4,0	25
0,48		20												3,0	3,0	54
0,52	30													2,0	3,0	24
0,56	20													2,0	2,0	23
0,60	20													3,0	4,0	25
0,64	20													2,0	2,0	23
0,68	20													3,0	2,0	24
0,72	20													2,0	2,0	23
0,76	20													1,0	2,0	22
0,80	20													2,0	2,0	23
0,84	20													2,0	3,0	24
0,88	20													2,0	3,0	24
0,92	20													3,0	3,0	24
0,96	20													3,0	2,0	24
1,00	20													2,0	2,0	23
1,04	20													2,0	3,0	24
1,08	20													3,0	3,0	24
1,12	20													3,0	3,0	24
1,16	20													2,0	2,0	23
1,20	20													1,0	1,0	21
1,24	20													2,0	2,0	23
1,28	20													3,0	2,0	24
1,32	20													3,0	2,0	24
1,36	20													4,0	3,0	25
1,40	20						0,01							3,0	2,0	124
1,44	20													2,0	2,0	23
1,48	20													3,0	3,0	24
1,52	30													3,0	2,0	24
1,56	30						0,01							2,0	2,0	123
1,60	20													3,0	2,0	24
1,64	20													2,0	2,0	23
1,68		30												3,0	3,0	54
1,72	30													2,0	2,0	23
1,76	20													2,0	2,0	23
1,80	20													2,0	3,0	24
1,84	20													2,0	2,0	23
1,88	20													2,0	2,0	23
1,92			30											1,0	3,0	84
1,96	20													1,0	2,0	22
2,00	20									X				2,0	2,0	83
2,04	20													0,0	0,0	20
2,08	20													0,0	0,0	20
2,12	20													2,0	2,0	23
2,16	20									X				2,0	3,0	84
2,20	20													1,0	1,0	21
2,24	20													1,0	1,0	21
2,28			80				0,57			X				0,0	18,0	302
2,32	20													0,0	0,0	20
2,36		30												0,0	0,0	50
2,40	20													0,0	0,0	20
2,44			100							X				8,0	15,0	168
2,48			100				0,01			X				15,0	20,0	270
2,52			100				0,01			X				8,0	15,0	268
2,56			100							X				9,0	15,0	165
2,60			100							X				18,0	20,0	166
2,64			100							X				18,0	18,0	164
2,68			100				0,05			X				20,0	20,0	267
2,72			100							X				15,0	15,0	160
2,76			80							X				8,0	7,0	150
2,80			80											5,0	5,0	87
2,84			100											5,0	6,0	88
2,88			30							X				0,0	0,0	140
2,92			80											0,0	5,0	90
2,96			80											0,0	3,0	84
3,00			80											0,0	5,0	90
3,04			80											0,0	4,0	87

Inventário do Pavimento - Pista Decrescente

km	FC-1 Área (%)	FC-2 Área (%)	FC-3 Área (%)	ALP	ATP	O	Pavimento Área (%)	EX	Desgaste Área (%)	R	ALC	ATC	E	Flechas		IGI
														TRI (mm)	TRE (mm)	
0,02	20													2,0	2,0	23
0,06	10													3,0	2,0	24
0,10	20													2,0	2,0	23
0,14	10													2,0	2,0	23
0,18	10													1,0	3,0	24
0,22	20													2,0	2,0	23
0,26	20													2,0	2,0	23
0,30	20													0,0	0,0	20
0,34		20												2,0	2,0	53
0,38		20												1,0	2,0	52
0,42		20												3,0	3,0	54
0,46		40												1,0	1,0	51
0,50		20												2,0	2,0	53
0,54	20													0,0	0,0	20
0,58	20													0,0	0,0	20
0,62		20												2,0	3,0	54
0,66	20													3,0	3,0	24
0,70		20												0,0	0,0	50
0,74	20													1,0	1,0	21
0,78	20													1,0	2,0	22
0,82	20													1,0	1,0	21
0,86	20													2,0	3,0	24
0,90	20							X						3,0	4,0	75
0,94	10													8,0	9,0	32
0,98	10													2,0	3,0	24
1,02	20													2,0	2,0	23
1,06	30													0,0	0,0	20
1,10	20													0,0	0,0	20
1,14	10													0,0	0,0	20
1,18	20													0,0	0,0	20
1,22	10													0,0	0,0	20
1,26	10													0,0	0,0	20
1,30	10													0,0	0,0	20
1,34	20													0,0	0,0	20
1,38	20													0,0	0,0	20
1,42	20													0,0	0,0	20
1,46	20													0,0	0,0	20
1,50	2													0,0	0,0	20
1,54		20												3,0	2,0	54
1,58	20													1,0	3,0	24
1,62	20													2,0	3,0	24
1,66	20													2,0	3,0	24
1,70	20													3,0	3,0	24
1,74	10													0,0	0,0	20
1,78	20													0,0	0,0	20
1,82	20													0,0	0,0	20
1,86	20													0,0	0,0	20
1,90	10													0,0	0,0	20
1,94		30												1,0	1,0	51
1,98		40												2,0	2,0	53
2,02		30												0,0	0,0	50
2,06	20													0,0	0,0	20
2,10	20													1,0	1,0	21
2,14	20													2,0	2,0	23
2,18	20													0,0	0,0	20
2,22	20													0,0	0,0	20
2,26	20													0,0	0,0	20
2,30	30									X				1,0	2,0	82
2,34	20													2,0	3,0	24
2,38	20													0,0	0,0	20
2,42	20													0,0	0,0	20
2,46			100							X				24,0	25,0	173
2,50			100							X				15,0	118,0	230
2,54			100											13,0	14,0	98
2,58			100							X				14,0	15,0	160
2,62			100											5,0	12,0	104
2,66			100											3,0	4,0	85
2,70		20												2,0	3,0	54
2,74		20												2,0	2,0	53
2,78			100				0,43							12,0	12,0	196
2,82			100											12,0	9,0	96
2,86			40		X					X			X	4,0	2,0	235
2,90		20												2,0	2,0	53
2,94		30												2,0	5,0	57
2,98		60												3,0	3,0	54
3,02		50												0,0	0,0	50
3,06		40												2,0	2,0	53

Levantamento Deflectométrico - Pista Crescente

km	Temp. Pav. °C	Carga (kgf)	Deflexões (x 10 ⁻² mm)						
			D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
0,00	33,0	4.309	12	11	10	8	6	5	4
0,04	33,0	4.324	12	10	9	7	6	4	3
0,08	32,6	4.507	15	10	8	6	5	3	2
0,12	33,5	4.526	15	12	10	8	7	5	3
0,16	32,7	4.565	24	19	14	10	8	5	3
0,20	33,5	4.543	27	21	16	11	8	5	3
0,24	33,5	4.519	34	26	18	12	8	4	3
0,28	33,6	4.339	16	14	12	9	7	5	3
0,32	33,6	4.397	22	19	16	13	11	8	6
0,36	33,5	4.479	22	19	15	11	9	6	4
0,40	33,3	3.953	17	14	12	9	7	5	3
0,44	33,4	4.404	27	21	17	12	9	6	4
0,48	33,1	4.319	22	18	15	12	9	6	4
0,52	32,8	4.273	30	24	20	16	12	8	5
0,56	33,5	4.084	27	21	17	12	10	6	4
0,60	33,5	4.545	22	17	13	10	8	6	4
0,64	33,7	4.392	21	17	15	12	10	7	4
0,68	34,0	4.213	22	16	14	12	10	6	4
0,72	34,0	4.338	24	18	15	11	9	6	3
0,76	33,8	4.338	17	15	13	10	9	6	4
0,80	33,9	4.336	16	14	12	10	8	5	4
0,84	33,7	4.240	14	11	9	7	5	3	2
0,88	34,0	4.233	19	15	12	8	6	3	2
0,92	34,2	4.451	18	16	14	10	7	4	2
0,96	34,2	4.280	22	16	14	10	8	5	3
1,00	33,9	4.240	16	12	11	8	6	4	2
1,04	33,8	4.341	18	13	11	9	7	4	2
1,08	33,9	4.357	23	17	13	10	7	4	2
1,12	33,8	4.338	21	15	12	9	7	4	2
1,16	33,8	4.309	19	16	13	9	7	4	2
1,20	33,7	4.451	12	10	9	7	5	3	2
1,24	33,5	3.986	20	15	13	10	7	4	3
1,28	33,0	4.471	17	14	12	9	7	4	3
1,32	33,5	4.511	14	11	9	8	6	4	3
1,36	33,3	4.487	13	11	9	7	6	4	3
1,40	33,6	4.252	16	13	11	9	7	5	3
1,44	33,8	4.244	19	16	14	11	9	6	3
1,48	33,8	4.267	16	13	11	9	7	5	3
1,52	33,7	4.364	16	12	11	9	7	5	3
1,56	33,0	4.245	19	17	15	12	9	6	3
1,60	33,5	4.249	13	12	11	9	7	5	4
1,64	33,9	4.378	11	10	9	8	6	5	4
1,68	33,7	4.376	10	9	8	7	6	5	3
1,72	33,6	4.559	16	12	10	8	7	5	4
1,76	33,3	4.345	16	12	10	8	6	5	3
1,80	33,2	4.390	21	15	13	9	7	4	3
1,84	33,8	4.302	18	17	15	12	10	7	5
1,88	34,0	4.331	20	16	14	11	8	6	4
1,92	34,1	4.230	15	14	12	10	8	6	4
1,96	34,2	4.255	15	13	11	9	7	5	3
2,00	34,0	4.262	16	14	12	10	9	6	5
2,04	37,2	4.122	25	22	20	16	13	9	7
2,08	37,2	4.096	34	30	23	16	11	7	5
2,12	37,1	4.089	39	30	24	18	13	9	6
2,16	37,3	4.114	24	20	17	13	11	7	5
2,20	37,4	4.061	32	27	24	17	13	8	5
2,24	37,7	3.995	38	32	26	19	15	9	6
2,28	37,8	4.112	33	28	24	18	15	10	6
2,32	37,7	4.371	40	31	26	19	15	9	6
2,36	37,9	4.183	28	25	21	17	13	9	6
2,40	38,0	4.512	27	19	18	15	13	9	6
2,44	38,1	4.114	26	18	15	12	10	7	5
2,48	38,0	4.147	22	15	13	10	8	6	4
2,52	37,9	4.137	21	16	14	11	10	7	5
2,56	37,8	4.144	34	26	22	16	12	8	5
2,60	37,7	4.231	30	23	20	15	12	8	5
2,64	37,8	4.244	20	18	17	14	11	8	6
2,68	37,7	3.986	210	75	56	33	23	13	9
2,72	37,5	4.050	49	33	26	17	12	8	6
2,76	37,6	4.244	52	42	32	19	13	9	7
2,80	37,5	4.390	69	43	31	18	13	10	7
2,84	37,6	4.451	65	49	35	20	14	10	7
2,88	37,6	4.289	75	54	40	23	17	10	7
2,92	37,5	4.515	70	52	36	21	14	9	6
2,96	37,7	4.404	88	63	44	25	17	12	8
3,00	37,6	4.145	48	37	26	16	11	7	6
3,04	38,0	4.184	65	47	33	21	15	10	6

Levantamento Deflectométrico - Pista Decrescente

km	Temp. Pav. °C	Carga (kgf)	Deflexões (x 10 ⁻² mm)						
			D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
0,02	39,3	4.164	16	13	11	9	7	5	3
0,06	39,1	4.310	15	12	11	9	8	6	4
0,10	39,1	4.108	17	13	12	10	8	6	3
0,14	38,9	4.170	17	15	14	11	9	7	5
0,18	39,1	4.218	13	12	10	9	7	5	3
0,22	39,4	4.245	13	11	10	8	6	4	2
0,26	39,3	3.988	30	23	17	12	8	5	3
0,30	39,5	4.206	16	14	12	10	8	5	3
0,34	38,9	4.123	17	13	11	9	7	5	4
0,38	39,2	4.129	12	10	9	7	6	5	3
0,42	38,8	4.211	14	11	10	8	7	5	3
0,46	38,8	4.100	20	16	14	10	7	4	3
0,50	39,1	4.177	16	13	11	9	8	5	4
0,54	39,0	4.188	17	14	13	10	9	6	5
0,58	38,7	4.112	22	19	17	14	11	7	5
0,62	38,9	4.093	28	22	18	13	10	6	4
0,66	38,9	4.089	23	17	14	11	8	6	4
0,70	38,0	3.726	73	52	37	24	18	12	8
0,74	37,9	3.725	79	61	47	31	23	15	10
0,78	38,2	3.810	61	42	30	18	13	9	6
0,82	38,4	3.739	91	64	43	23	16	10	7
0,86	38,3	3.746	76	60	46	30	21	13	9
0,90	38,4	3.743	93	56	38	24	17	11	8
0,94	38,6	3.786	63	52	40	24	17	10	6
0,98	38,7	3.739	80	62	47	29	20	12	8
1,02	38,6	3.719	75	58	43	25	16	10	6
1,06	38,7	3.716	88	63	44	27	19	12	8
1,10	38,5	3.876	50	38	28	19	14	9	7
1,14	38,5	3.802	68	53	40	26	19	12	8
1,18	38,6	3.857	72	51	38	24	18	12	8
1,22	38,4	3.961	49	38	30	21	16	11	8
1,26	38,6	3.772	92	61	42	25	18	11	8
1,30	38,2	3.722	82	68	49	29	20	13	9
1,34	38,4	3.840	73	56	41	24	17	11	8
1,38	38,5	3.750	80	61	44	27	19	13	8
1,42	38,5	3.857	92	72	52	30	22	14	9
1,46	38,3	3.837	68	51	36	24	19	13	9
1,50	37,9	3.815	57	42	29	18	14	10	6
1,54	38,2	4.216	33	26	21	15	12	8	6
1,58	38,0	3.981	56	38	27	16	11	7	5
1,62	37,9	3.884	52	37	25	16	12	7	5
1,66	37,9	4.080	25	20	17	13	11	7	5
1,70	37,8	3.913	38	30	24	17	13	10	7
1,74	37,8	3.909	41	34	29	22	17	12	8
1,78	37,6	3.938	35	28	22	15	11	7	5
1,82	37,8	3.981	35	27	21	15	12	7	4
1,86	37,7	4.024	33	24	18	12	9	6	4
1,90	37,6	4.015	30	23	19	14	10	7	5
1,94	37,3	3.946	41	31	25	18	14	9	6
1,98	37,5	4.061	35	28	23	16	12	8	5
2,02	36,8	4.040	55	43	34	24	18	11	6
2,06	33,0	4.024	37	33	28	22	18	11	8
2,10	33,5	4.101	30	24	21	17	14	10	8
2,14	33,5	4.058	32	27	23	16	12	8	6
2,18	33,3	4.155	31	28	24	18	14	9	6
2,22	33,1	4.046	39	33	26	18	14	9	6
2,26	33,6	4.015	39	34	28	19	14	9	6
2,30	33,4	3.963	53	47	39	27	18	11	7
2,34	33,5	3.999	32	28	23	16	12	8	6
2,38	33,5	4.028	30	26	21	15	11	7	5
2,42	33,7	4.064	27	24	20	14	11	7	5
2,46	33,7	4.007	33	28	24	17	13	9	6
2,50	33,2	4.054	27	24	21	17	14	10	7
2,54	33,2	4.125	18	16	15	12	9	7	5
2,58	32,8	4.017	21	18	15	12	9	6	4
2,62	33,1	4.195	28	24	21	16	12	8	5
2,66	32,9	4.036	42	36	31	23	17	11	6
2,70	32,7	4.136	26	23	19	14	11	7	4
2,74	32,7	4.132	21	15	12	9	6	3	1
2,78	32,8	4.120	32	26	20	14	9	4	1
2,82	32,4	4.090	36	30	25	17	11	5	2
2,86	32,6	4.033	37	29	22	14	9	3	1
2,90	32,4	3.946	44	39	33	24	18	12	7
2,94	32,5	4.206	12	11	10	9	7	5	4
2,98	32,7	4.103	19	15	13	10	9	6	4
3,02	32,5	4.197	18	17	14	12	10	7	4
3,06	32,4	4.480	18	16	15	13	11	9	6

Resumo dos Ensaios Geotécnicos

RESUMO DOS ENSAIOS

EMPREENDIMENTO: RODOVIA SP 270

FOLHA N°: 1/1

DATA DE INÍCIO: 26/02/2013

Amostra	Local (km)	Profundi- dade (m)	Compactação		Capacidade de Suporte		Energia	Classificação MCT Pastilhas	Granulometria				
									(% passando				
			(mm)										
			g _s max. (g/cm ³)	h _{ot} . (%)	CBR (%)	Exp (%)		CLASSIF.	9,52 mm	4,76 mm	2,00 mm	0,42 mm	0,075 mm
CV 001	0+000	0,59 - 2,09	1,942	15,0	13,5	0,30	EN	LA'-LG'	100,0	100,0	100,0	97,29	50,33
CV 002	0+500	0,59 - 2,09	1,482	25,7	10,8	0,45	EN	LG'	100,0	100,0	100,0	99,04	74,58
CV 003	1+000	0,81 - 2,31	1,511	25,5	11,1	0,41	EN	LG'	100,0	100,0	100,0	94,43	67,48
CV 004	1+500	0,56 - 2,06	1,929	16,4	13,9	0,28	EN	LA'-LG'	100,0	100,0	100,0	98,03	52,12
CV 005	2+000	0,66 - 2,16	1,458	26,6	9,8	0,44	EN	LG'	100,0	100,0	100,0	99,44	82,38
CV 006	2+500	0,63 - 2,13	1,480	25,7	9,5	0,45	EN	LG'	100,0	100,0	100,0	98,83	78,90
CV 007	3+000	0,44 - 1,94	1,912	16,4	14,1	0,23	EN	LA'-LG'	100,0	100,0	100,0	99,61	39,66

Boletins de Abertura de Cava no Pavimento

EMPREENDIMENTO: RODOVIA SP 270

TRECHO: KM 295,400 AO KM 374,600

SENTIDO: OURINHOS

AMOSTRA: CV 001

FOLHA N°: 01/01

DATA: 01/03/2013

REGISTRO: 055

PERFIL GEOTÉCNICO INDIVIDUAL

POÇO DE INSPEÇÃO - SONDAGEM A TRADO - NBR 9603

POSIÇÃO		LOCAL		OBS: Face pista	
Lado Direito		Km 0+000			
N.A (m)	Amostra	Prof. (cm)	Perfil	Descrição do Material	Classificação Geológica
-	1	0,0 a 15,0		CAPA CBUQ	-
	2	15,0 a 19,0		BINDER	-
	3	19,0 a 34,0		BASE SOLO CIMENTO	-
	4	34,0 a 59,0		REFORÇO SUBLEITO AREIA ARGILOSA	-
	5	59,0 a 209,0		SUBLEITO ARGILA ARENOSA MARROM AVERMELHADO	NH

EMPREENDIMENTO: RODOVIA SP 270
 TRECHO: KM 295,400 AO KM 374,600
 SENTIDO: OURINHOS

AMOSTRA: CV 002
 FOLHA Nº: 01/01
 DATA: 01/03/2013
 REGISTRO: 057

PERFIL GEOTÉCNICO INDIVIDUAL
POÇO DE INSPEÇÃO - SONDAGEM A TRADO - NBR 9603

POSIÇÃO Lado Esquerdo		LOCAL Km 0+500		OBS: Face pista	
N.A (m)	Amostra	Prof. (cm)	Perfil	Descrição do Material	Classificação Geológica
-	1	0,0 a 16,0		CAPA CBUQ	-
	2	16,0 a 21,0		BINDER	-
	3	21,0 a 38,0		BASE SOLO CIMENTO	-
	4	38,0 a 59,0		REFORÇO SUBLEITO AREIA ARGILOSA	-
	5	59,0 a 209,0		SUBLEITO ARGILA ARENOSA MARROM AVERMELHADO	NH

EMPREENDIMENTO: RODOVIA SP 270
 TRECHO: KM 295,400 AO KM 374,600
 SENTIDO: OURINHOS

AMOSTRA: CV 003
 FOLHA Nº: 01/01
 DATA: 01/03/2013
 REGISTRO: 058

PERFIL GEOTÉCNICO INDIVIDUAL
POÇO DE INSPEÇÃO - SONDAGEM A TRADO - NBR 9603

POSIÇÃO Lado Direito		LOCAL Km 1+000		OBS: Face pista	
N.A (m)	Amostra	Prof. (cm)	Perfil	Descrição do Material	Classificação Geológica
-	1	0,0 a 12,0		CAPA CBUQ	-
	2	12,0 a 16,0		BINDER	-
	3	16,0 a 31,0		BASE SOLO CIMENTO	-
	4	31,0 a 81,0		REFORÇO SUBLEITO AREIA ARGILOSA	-
	5	81,0 a 231,0		SUBLEITO ARGILA ARENOSA MARROM AVERMELHADO	NH

EMPREENDIMENTO: RODOVIA SP 270
 TRECHO: KM 295,400 AO KM 374,600
 SENTIDO: OURINHOS

AMOSTRA: CV 004
 FOLHA N°: 01/01
 DATA: 01/03/2013
 REGISTRO: 060

PERFIL GEOTÉCNICO INDIVIDUAL
POÇO DE INSPEÇÃO - SONDAÇÃO A TRADO - NBR 9603

POSIÇÃO Lado Esquerdo		LOCAL Km 1+500			OBS: Face pista
N.A (m)	Amostra	Prof. (cm)	Perfil	Descrição do Material	Classificação Geológica
-	1	0,0 a 12,0		CAPA CBUQ	-
	2	12,0 a 19,0		BINDER	-
	3	19,0 a 32,0		BASE SOLO CIMENTO	-
	4	32,0 a 56,0		REFORÇO SUBLEITO AREIA ARGILOSA	-
	5	56,0 a 206,0		SUBLEITO ARGILA ARENOSA MARROM AVERMELHADO	NH

EMPREENDIMENTO: RODOVIA SP 270
 TRECHO: KM 295,400 AO KM 374,600
 SENTIDO: OURINHOS

AMOSTRA: CV 005
 FOLHA N°: 01/01
 DATA: 01/03/2013
 REGISTRO: 073

PERFIL GEOTÉCNICO INDIVIDUAL
POÇO DE INSPEÇÃO - SONDAÇÃO A TRADO - NBR 9603

POSIÇÃO Lado Direito		LOCAL Km 2+000			OBS: Face pista
N.A (m)	Amostra	Prof. (cm)	Perfil	Descrição do Material	Classificação Geológica
-	1	0,0 a 21,0		CAPA CBUQ	-
	2	21,0 a 26,0		BINDER	-
	3	26,0 a 41,0		BASE SOLO CIMENTO	-
	4	41,0 a 66,0		REFORÇO SUBLEITO AREIA ARGILOSA	-
	5	66,0 a 216,0		SUBLEITO ARGILA ARENOSA MARROM AVERMELHADO	NH

EMPREENDIMENTO: RODOVIA SP 270
 TRECHO: KM 295,400 AO KM 374,600
 SENTIDO: OURINHOS

AMOSTRA: CV 006
 FOLHA N°: 01/01
 DATA: 01/03/2013
 REGISTRO: 075

PERFIL GEOTÉCNICO INDIVIDUAL
POÇO DE INSPEÇÃO - SONDAGEM A TRADO - NBR 9603

POSIÇÃO Lado Esquerdo		LOCAL Km 2+500		OBS: Face pista	
N.A (m)	Amostra	Prof. (cm)	Perfil	Descrição do Material	Classificação Geológica
-	1	0,0 a 10,0		CAPA CBUQ	-
	2	10,0 a 29,0		BASE BRITA C/ AREIA	-
	4	29,0 a 43,0		SUB-BASE RACHÃO	-
	5	43,0 a 63,0		REFORÇO SUBLEITO ARGILA ARENOSA	-
	6	63,0 a 213,0		SUBLEITO ARGILA ARENOSA MARROM AVERMELHADO	NH

EMPREENDIMENTO: RODOVIA SP 270
 TRECHO: KM 295,400 AO KM 374,600
 SENTIDO: OURINHOS

AMOSTRA: CV 007
 FOLHA N°: 01/01
 DATA: 02/03/2013
 REGISTRO: 077

PERFIL GEOTÉCNICO INDIVIDUAL
POÇO DE INSPEÇÃO - SONDAGEM A TRADO - NBR 9603

POSIÇÃO Lado Direito		LOCAL Km 3+000		OBS: Face pista	
N.A (m)	Amostra	Prof. (cm)	Perfil	Descrição do Material	Classificação Geológica
-	1	0,0 a 12,0		CAPA CBUQ	-
	2	12,0 a 23,0		BASE MACADAME	-
	3	23,0 a 44,0		REFORÇO SUBLEITO ARGILA ARENOSA	-
	4	44,0 a 194,0		SUBLEITO ARGILA ARENOSA MARROM AVERMELHADO	NH

ANEXO B – DADOS DA RETROÂNALISE

Neste anexo são apresentadas as análises estatísticas para cada uma das expressões matemáticas obtidas e correlações abordadas neste trabalho.

Caso 1 – Estrutura Semirrígida

$$\bullet \quad D_0 = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BC}^c \times MR_{BC}^d \times h_{IR}^e \times MR_{IR}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,991682912
R-Quadrado	0,983434999
R-quadrado ajustado	0,983430229
Erro padrão	0,020302625
Observações	24320

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	594,9483597	84,99262281	206194,3836	0
Resíduo	24312	10,02132362	0,000412197		
Total	24319	604,9696833			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	3,447970483	0,00524406	657,5001629	0	3,437691802	3,458249164	3,441249767	3,4546912
a	-0,175451877	0,000575784	-304,7180088	0	-0,17658045	-0,174323304	-0,176189794	-0,174713959
c	-0,46011713	0,001158327	-397,2256025	0	-0,462387522	-0,457846738	-0,461601626	-0,458632634
e	-0,045184184	0,000772662	-58,47855188	0	-0,04669865	-0,043669718	-0,046174417	-0,04419395
b	-0,181248364	0,001158327	-156,4742669	0	-0,183518756	-0,178977972	-0,18273286	-0,179763868
d	-0,173296799	0,000575784	-300,9751531	0	-0,174425372	-0,172168226	-0,174034716	-0,172558882
f	-0,058298512	0,000814686	-71,55948277	0	-0,059895346	-0,056701677	-0,059342602	-0,057254421
g	-0,596593954	0,000584674	-1020,388115	0	-0,59773995	-0,595447958	-0,597343264	-0,595844645

$$\bullet \quad \varepsilon_v = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BC}^c \times MR_{BC}^d \times h_{IR}^e \times MR_{IR}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,987218707
R-Quadrado	0,974600775
R-quadrado ajustado	0,974593462
Erro padrão	0,034064969
Observações	24320

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	1082,537573	154,6482248	133268,9359	0
Resíduo	24312	28,21218324	0,001160422		
Total	24319	1110,749757			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	1,537946402	0,008798801	174,7904584	0	1,520700211	1,555192593	1,526669979	1,549222825
a	-0,456177971	0,000966086	-472,1919814	0	-0,458071558	-0,454284383	-0,457416093	-0,454939848
c	-1,096808663	0,001943511	-564,3439814	0	-1,100618064	-1,092999262	-1,09929944	-1,094317886
e	-0,310635738	0,00129642	-239,6104662	0	-0,3131768	-0,308094675	-0,312297212	-0,308974264
b	-0,21072392	0,001943511	-108,4243589	0	-0,214533321	-0,206914519	-0,213214697	-0,208233143
d	-0,359890963	0,000966086	-372,5248428	0	-0,361784551	-0,357997375	-0,361129085	-0,35865284
f	0,027620633	0,001366929	20,20633508	4,73056E-90	0,024941367	0,030299899	0,025868795	0,029372471
g	-0,419462045	0,000981001	-427,5859323	0	-0,421384866	-0,417539223	-0,420719282	-0,418204808

$$\bullet \quad \sigma_t = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BC}^c \times MR_{BC}^d \times h_{IR}^e \times MR_{IR}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,989905759
R-Quadrado	0,979913413
R-quadrado ajustado	0,979907629
Erro padrão	0,02912027
Observações	24320

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	1005,756885	143,679555	169435,4147	0
Resíduo	24312	20,61633542	0,00084799		
Total	24319	1026,37322			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	-2,296704823	0,007521611	-305,3474627	0	-2,311447643	-2,281962002	-2,306344417	-2,287065229
a	-0,461869779	0,000825854	-559,2634761	0	-0,463488503	-0,460251055	-0,462928182	-0,460811376
c	-1,092761345	0,001661401	-657,7350144	0	-1,096017793	-1,089504898	-1,094890574	-1,090632117
e	-0,083957247	0,001108238	-75,75741859	0	-0,086129462	-0,081785033	-0,08537755	-0,082536944
b	-0,155737448	0,001661401	-93,73864929	0	-0,158993895	-0,152481	-0,157866676	-0,153608219
d	0,502165162	0,000825854	608,0558772	0	0,500546438	0,503783886	0,501106759	0,503223564
f	-0,180483049	0,001168513	-154,4553489	0	-0,182773406	-0,178192692	-0,181980599	-0,178985499
g	-0,136555198	0,000838603	-162,8364355	0	-0,138198912	-0,134911484	-0,137629941	-0,135480455

$$\bullet \quad R = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BC}^c \times MR_{BC}^d \times h_{IR}^e \times MR_{IR}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,852323549
R-Quadrado	0,726455432
R-quadrado ajustado	0,726376673
Erro padrão	0,066729543
Observações	24320

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	287,5000143	41,07143061	9223,665158	0
Resíduo	24312	108,2572496	0,004452832		
Total	24319	395,7572639			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	-0,314610119	0,017235887	-18,25320208	6,08888E-74	-0,348393518	-0,280826721	-0,336699397	-0,292520842
a	-0,050243146	0,001892456	-26,54917167	4,001E-153	-0,053952477	-0,046533815	-0,052668492	-0,0478178
c	0,211488216	0,003807125	55,55063812	0	0,204026017	0,218950415	0,206609056	0,216367375
e	-0,018066787	0,002539544	-7,11418497	1,15696E-12	-0,02304445	-0,013089124	-0,021321433	-0,014812142
b	0,467700468	0,003807125	122,8487335	0	0,460238269	0,475162667	0,462821308	0,472579627
d	0,295959209	0,001892456	156,3889308	0	0,292249878	0,29966854	0,293533863	0,298384555
f	-0,004981	0,002677665	-1,860202796	0,062868906	-0,010229388	0,000267388	-0,008412659	-0,001549341
g	0,278389721	0,001921673	144,8684414	0	0,274623124	0,282156318	0,275926931	0,28085251

$$\bullet \quad D_{60} = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BC}^c \times MR_{BC}^d \times h_{IR}^e \times MR_{IR}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,996947943
R-Quadrado	0,9939052
R-quadrado ajustado	0,993903446
Erro padrão	0,014412642
Observações	24320

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	823,5565707	117,6509387	566380,3562	0
Resíduo	24312	5,050192136	0,000207724		
Total	24319	828,6067628			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	2,995756977	0,003722709	804,7250076	0	2,988460238	3,003053716	2,990986004	3,00052795
a	-0,153249053	0,000408744	-374,9268097	0	-0,154050217	-0,15244789	-0,153772894	-0,152725213
c	-0,351312863	0,000822285	-427,2395753	0	-0,352924593	-0,349701133	-0,352366693	-0,350259033
e	-0,051077378	0,000548506	-93,12094093	0	-0,052152483	-0,050002273	-0,051780335	-0,05037442
b	-0,076756219	0,000822285	-93,34498602	0	-0,078367949	-0,075144489	-0,077810049	-0,075702389
d	-0,078083593	0,000408744	-191,0330402	0	-0,078884757	-0,07728243	-0,078607434	-0,077559753
f	-0,061026983	0,000578338	-105,5213199	0	-0,062160561	-0,059893405	-0,061768173	-0,060285793
g	-0,77575063	0,000415054	-1869,034306	0	-0,776564161	-0,774937098	-0,776282557	-0,775218702

$$\bullet D_{120} = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BC}^c \times MR_{BC}^d \times h_{IR}^e \times MR_{IR}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,997322843
R-Quadrado	0,994652854
R-quadrado ajustado	0,994651315
Erro padrão	0,015185276
Observações	24320

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	1042,834868	148,9764097	646058,9512	0
Resíduo	24312	5,606167154	0,000230593		
Total	24319	1048,441035			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	2,91499698	0,003922276	743,1901701	0	2,907309078	2,922684883	2,909970245	2,920023716
a	-0,044662902	0,000430656	-103,7090271	0	-0,045507014	-0,04381879	-0,045214824	-0,044110979
c	-0,104960784	0,000866366	-121,1505582	0	-0,106658916	-0,103262653	-0,106071108	-0,103850461
e	-0,025843127	0,00057791	-44,7182458	0	-0,026975867	-0,024710388	-0,026583769	-0,025102486
b	-0,028351165	0,000866366	-32,72421654	6,8286E-230	-0,030049296	-0,026653033	-0,029461488	-0,027240841
d	-0,01517738	0,000430656	-35,2424767	2,112E-265	-0,016021492	-0,014333268	-0,015729302	-0,014625457
f	-0,029026357	0,000609341	-47,63561509	0	-0,030220704	-0,02783201	-0,029807281	-0,028245433
g	-0,919126263	0,000437304	-2101,799291	0	-0,919983407	-0,918269119	-0,919686706	-0,918565819

$$\bullet SCI = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BC}^c \times MR_{BC}^d \times h_{IR}^e \times MR_{IR}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,857008604
R-Quadrado	0,734463747
R-quadrado ajustado	0,734387293
Erro padrão	0,066777322
Observações	24320

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	299,8646219	42,83780313	9606,588513	0
Resíduo	24312	108,4123327	0,004459211		
Total	24319	408,2769546			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	3,736231519	0,017248228	216,6153876	0	3,702423931	3,770039107	3,714126425	3,758336613
a	-0,001853083	0,001893811	-0,978494155	0,327839717	-0,00556507	0,001858903	-0,004280166	0,000573999
c	-0,307601213	0,003809851	-80,73838775	0	-0,315068755	-0,300133671	-0,312483866	-0,30271856
e	0,011323968	0,002541363	4,455864737	8,39286E-06	0,006342741	0,016305195	0,008066992	0,014580944
b	-0,444254549	0,003809851	-116,6068095	0	-0,451722091	-0,436787007	-0,449137202	-0,439371896
d	-0,318439458	0,001893811	-168,1474086	0	-0,322151445	-0,314727472	-0,320866541	-0,316012375
f	-0,005612918	0,002679582	-2,094699079	0,036208074	-0,010865064	-0,000360772	-0,009047034	-0,002178802
g	-0,261950827	0,001923049	-136,216437	0	-0,265720121	-0,258181534	-0,26441538	-0,259486274

$$\bullet \quad BDI = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BC}^c \times MR_{BC}^d \times h_{IR}^e \times MR_{IR}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,982981233
R-Quadrado	0,966252104
R-quadrado ajustado	0,966242387
Erro padrão	0,034086825
Observações	24320

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	808,793288	115,5418983	99441,20921	0
Resíduo	24312	28,24839574	0,001161912		
Total	24319	837,0416837			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	2,013696404	0,008804446	228,713589	0	1,996439148	2,03095366	2,002412746	2,024980062
a	-0,417233676	0,000966706	-431,6036478	0	-0,419128479	-0,415338874	-0,418472593	-0,415994759
c	-0,960946566	0,001944758	-494,1214627	0	-0,964758411	-0,957134721	-0,963438941	-0,958454191
e	-0,103242206	0,001297251	-79,58534338	0	-0,105784899	-0,100699513	-0,104904746	-0,101579666
b	-0,199370992	0,001944758	-102,5171323	0	-0,203182837	-0,195559147	-0,201863367	-0,196878617
d	-0,249862739	0,000966706	-258,4682775	0	-0,251757541	-0,247967936	-0,251101656	-0,248623822
f	-0,133120937	0,001367806	-97,32440126	0	-0,135801922	-0,130439952	-0,134873899	-0,131367975
g	-0,395175871	0,00098163	-402,5711158	0	-0,397099926	-0,393251816	-0,396433914	-0,393917827

$$\bullet \quad BCI = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BC}^c \times MR_{BC}^d \times h_{IR}^e \times MR_{IR}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,980628542
R-Quadrado	0,961632337
R-quadrado ajustado	0,96162129
Erro padrão	0,042925336
Observações	24320

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	1122,772599	160,3960856	87049,51502	0
Resíduo	24312	44,79691393	0,001842584		
Total	24319	1167,569513			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	2,088079779	0,011087386	188,329307	0	2,066347819	2,109811739	2,073870335	2,102289222
a	-0,536095232	0,001217367	-440,3728574	0	-0,538481346	-0,533709118	-0,537655393	-0,534535071
c	-1,23641621	0,002449022	-504,8612236	0	-1,241216443	-1,231615976	-1,239554843	-1,233277576
e	-0,095438141	0,001633621	-58,42122196	0	-0,098640139	-0,092236143	-0,097531768	-0,093344514
b	-0,233725738	0,002449022	-95,43635986	0	-0,238525972	-0,228925505	-0,236864372	-0,230587105
d	-0,416851936	0,001217367	-342,4210238	0	-0,41923805	-0,414465822	-0,418412097	-0,415291776
f	-0,139514871	0,00172247	-80,99696047	0	-0,142891019	-0,136138723	-0,141722366	-0,137307376
g	-0,180485447	0,001236161	-146,0048315	0	-0,182908398	-0,178062495	-0,182069694	-0,1789012

Caso 2 – Estrutura Invertida

$$D_0 = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BG}^c \times MR_{BG}^d \times h_{SBC}^e \times MR_{SBC}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,983189316
R-Quadrado	0,966661232
R-quadrado ajustado	0,96663562
Erro padrão	0,028713155
Observações	9120

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	217,8212818	31,11732597	37743,34825	0
Resíduo	9112	7,512345551	0,000824445		
Total	9119	225,3336274			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	3,622073614	0,012147119	298,1837695	0	3,598262536	3,645884691	3,606505326	3,637641901
a	-0,445863148	0,001325256	-336,4355123	0	-0,448460947	-0,443265349	-0,447561655	-0,444164641
c	-0,270134016	0,002672845	-101,0661173	0	-0,275373391	-0,264894641	-0,273559652	-0,26670838
e	0,142095159	0,002441278	58,20522948	0	0,137309706	0,146880613	0,138966309	0,14522401
b	-0,212935075	0,002690901	-79,13152688	0	-0,218209844	-0,207660306	-0,216383853	-0,209486297
d	-0,083645113	0,001329759	-62,90245394	0	-0,08625174	-0,081038487	-0,085349392	-0,081940835
f	-0,307328961	0,001681711	-182,7477911	0	-0,310625492	-0,304032431	-0,309484317	-0,305173606
g	-0,406642771	0,001329759	-305,8018233	0	-0,409249397	-0,404036145	-0,408347049	-0,404938492

$$\bullet \quad \varepsilon_t = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BG}^c \times MR_{BG}^d \times h_{SBC}^e \times MR_{SBC}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,930354675
R-Quadrado	0,865559821
R-quadrado ajustado	0,865456542
Erro padrão	0,065676553
Observações	9120

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	253,0477154	36,14967362	8380,765298	0
Resíduo	9112	39,30378842	0,00431341		
Total	9119	292,3515038			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	2,851024185	0,027784507	102,6120115	0	2,796560317	2,905488054	2,815414325	2,886634046
a	-0,531770795	0,003031302	-175,4265435	0	-0,537712826	-0,525828763	-0,535655846	-0,527885743
c	-0,046581322	0,006113686	-7,619187915	2,80779E-14	-0,058565518	-0,034597126	-0,054416893	-0,03874575
e	0,24650919	0,005584017	44,14549684	0	0,235563265	0,257455116	0,239352466	0,253665915
b	-0,445369039	0,006154986	-72,35906321	0	-0,457434193	-0,433303885	-0,453257543	-0,437480535
d	-0,023532704	0,003041602	-7,736943475	1,12673E-14	-0,029494927	-0,017570482	-0,027430957	-0,019634452
f	-0,548752524	0,003846633	-142,6578751	0	-0,556292789	-0,54121226	-0,553682541	-0,543822508
g	0,010603235	0,003041602	3,486068982	0,000492483	0,004641012	0,016565458	0,006704982	0,014501488

$$\bullet \quad \varepsilon_v = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BG}^c \times MR_{BG}^d \times h_{SBC}^e \times MR_{SBC}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,9837181
R-Quadrado	0,9677013
R-quadrado ajustado	0,967676487
Erro padrão	0,036693596
Observações	9120

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	367,578864	52,51126629	39000,65948	0
Resíduo	9112	12,26857865	0,00134642		
Total	9119	379,8474426			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	1,693947276	0,015523249	109,1232443	0	1,663518225	1,724376326	1,67405199	1,713842562
a	-0,453367248	0,001693593	-267,6954862	0	-0,456687071	-0,450047425	-0,455537832	-0,451196664
c	-0,982497832	0,003415726	-287,6395228	0	-0,989193421	-0,975802242	-0,986875578	-0,978120085
e	-0,340780848	0,003119799	-109,231665	0	-0,346896354	-0,334665342	-0,344779321	-0,336782375
b	-0,137785752	0,003438801	-40,06796685	0	-0,144526573	-0,131044931	-0,142193072	-0,133378432
d	-0,452832669	0,001699348	-266,4743536	0	-0,456163772	-0,449501565	-0,455010629	-0,450654709
f	-0,088609785	0,00214912	-41,23072629	0	-0,092822543	-0,084397028	-0,091364193	-0,085855377
g	-0,302796398	0,001699348	-178,1838635	0	-0,306127501	-0,299465295	-0,304974358	-0,300618438

$$\bullet \quad \sigma_t = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BG}^c \times MR_{BG}^d \times h_{SBC}^e \times MR_{SBC}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,981208974
R-Quadrado	0,96277105
R-quadrado ajustado	0,96274245
Erro padrão	0,039710382
Observações	9120

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	371,5900407	53,08429152	33663,39432	0
Resíduo	9112	14,36884408	0,001576914		
Total	9119	385,9588847			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	-2,569453313	0,016799502	-152,9481827	0	-2,602384107	-2,53652252	-2,590984302	-2,547922324
a	-0,494711673	0,001832833	-269,9164	0	-0,498304437	-0,491118909	-0,497060713	-0,492362633
c	-0,882184462	0,003696552	-238,6506234	0	-0,889430534	-0,874938391	-0,886922128	-0,877446797
e	-0,384469399	0,003376295	-113,8731574	0	-0,391087695	-0,377851103	-0,388796609	-0,380142189
b	-0,145504232	0,003721524	-39,09802571	0	-0,152799253	-0,13820921	-0,150273902	-0,140734561
d	0,484966305	0,001839061	263,7032251	0	0,481361332	0,488571277	0,482609282	0,487323327
f	-0,048862543	0,002325811	-21,00881578	9,89362E-96	-0,053421655	-0,044303431	-0,051843406	-0,045881679
g	-0,265235604	0,001839061	-144,2233895	0	-0,268840576	-0,261630632	-0,267592626	-0,262878582

$$\bullet \quad R = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BG}^c \times MR_{BG}^d \times h_{SBC}^e \times MR_{SBC}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,977909821
R-Quadrado	0,956307619
R-quadrado ajustado	0,956274054
Erro padrão	0,049541169
Observações	9120

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	489,4835625	69,92622321	28490,99219	0
Resíduo	9112	22,36383141	0,002454327		
Total	9119	511,8473939			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	0,20927701	0,020958423	9,985341526	2,32899E-23	0,168193799	0,250360221	0,182415763	0,236138257
a	0,928324342	0,002286573	405,989372	0	0,923842145	0,932806538	0,925393768	0,931254915
c	0,063109425	0,004611678	13,68469749	3,2711E-42	0,0540695	0,072149349	0,057198892	0,069019957
e	-0,23797245	0,004212138	-56,49682963	0	-0,246229186	-0,229715714	-0,243370914	-0,232573987
b	0,498554533	0,004642832	107,3815539	0	0,48945354	0,507655526	0,492604073	0,504504993
d	0,032153171	0,002294343	14,01410913	3,66619E-44	0,027655744	0,036650597	0,029212639	0,035093703
f	0,367748265	0,002901594	126,7400732	0	0,362060489	0,373436041	0,364029453	0,371467077
g	0,118653239	0,002294343	51,71556651	0	0,114155812	0,123150666	0,115712707	0,121593771

$$\bullet D_{120} = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BG}^c \times MR_{BG}^d \times h_{SBC}^e \times MR_{SBC}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,997894497
R-Quadrado	0,995793428
R-quadrado ajustado	0,995790196
Erro padrão	0,013528793
Observações	9120

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	394,7959836	56,39942622	308146,0314	0
Resíduo	9112	1,667753336	0,000183028		
Total	9119	396,4637369			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	2,865945599	0,005723364	500,7449057	0	2,854726521	2,877164678	2,858610281	2,873280918
a	-0,063768647	0,000624422	-102,1243544	0	-0,064992653	-0,062544641	-0,064568933	-0,06296836
c	-0,088230953	0,001259366	-70,05984073	0	-0,090699592	-0,085762314	-0,089845012	-0,086616894
e	-0,052438819	0,001150258	-45,58872974	0	-0,054693583	-0,050184054	-0,053913041	-0,050964596
b	-0,038152193	0,001267873	-30,09149175	9,6486E-190	-0,040637509	-0,035666877	-0,039777156	-0,036527231
d	-0,018930252	0,000626543	-30,21379452	3,362E-191	-0,020158417	-0,017702086	-0,019733257	-0,018127246
f	-0,013781029	0,000792373	-17,39210527	1,12222E-66	-0,015334257	-0,012227801	-0,014796569	-0,012765489
g	-0,915990761	0,000626543	-1461,975104	0	-0,917218927	-0,914762596	-0,916793767	-0,915187755

$$\bullet D_{60} = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BG}^c \times MR_{BG}^d \times h_{SBC}^e \times MR_{SBC}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,995875159
R-Quadrado	0,991767333
R-quadrado ajustado	0,991761008
Erro padrão	0,016589748
Observações	9120

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	302,1081836	43,15831195	156814,0225	0
Resíduo	9112	2,507802123	0,00027522		
Total	9119	304,6159858			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	2,965543188	0,007018303	422,5441822	0	2,951785739	2,979300637	2,956548219	2,974538158
a	-0,094490765	0,0007657	-123,4044339	0	-0,095991709	-0,092989821	-0,09547212	-0,09350941
c	-0,325776917	0,001544303	-210,9539981	0	-0,328804097	-0,322749736	-0,327756164	-0,323797669
e	-0,079419824	0,00141051	-56,30575535	0	-0,08218474	-0,076654908	-0,081227596	-0,077612052
b	-0,041144164	0,001554735	-26,46377106	9,5647E-149	-0,044191795	-0,038096534	-0,043136782	-0,039151546
d	-0,082738538	0,000768302	-107,6901548	0	-0,084244582	-0,081232494	-0,083723228	-0,081753848
f	-0,08520719	0,000971651	-87,6932235	0	-0,087111843	-0,083302536	-0,0864525	-0,083961879
g	-0,773874973	0,000768302	-1007,253909	0	-0,775381017	-0,772368929	-0,774859663	-0,772890283

$$\bullet \quad SCI = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BG}^c \times MR_{BG}^d \times h_{SBC}^e \times MR_{SBC}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,976130652
R-Quadrado	0,95283105
R-quadrado ajustado	0,952794814
Erro padrão	0,049736
Observações	9120

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	455,318302	65,04547171	26295,13239	0
Resíduo	9112	22,54007812	0,00247367		
Total	9119	477,8583801			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	3,360613146	0,021040846	159,7185356	0	3,319368367	3,401857926	3,333646262	3,387580031
a	-0,883084641	0,002295565	-384,6915564	0	-0,887584464	-0,878584817	-0,88602674	-0,880142542
c	-0,081888853	0,004629815	-17,68728472	7,37901E-69	-0,090964329	-0,072813378	-0,08782263	-0,075955077
e	0,26479607	0,004228703	62,61874041	0	0,256506863	0,273085277	0,259376376	0,270215765
b	-0,461387237	0,004661091	-98,98696027	0	-0,470524021	-0,452250453	-0,467361099	-0,455413375
d	-0,038526913	0,002303366	-16,72635448	7,01538E-62	-0,043042027	-0,034011799	-0,041479009	-0,035574817
f	-0,395261918	0,002913005	-135,6887032	0	-0,400972063	-0,389551774	-0,398995356	-0,391528481
g	-0,119697204	0,002303366	-51,96621541	0	-0,124212318	-0,11518209	-0,1226493	-0,116745108

$$\bullet \quad BDI = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BG}^c \times MR_{BG}^d \times h_{SBC}^e \times MR_{SBC}^f \times MR_{SL}^g$$

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,881162109
R-Quadrado	0,776446662
R-quadrado ajustado	0,776274924
Erro padrão	0,077785189
Observações	9120

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	7	191,4864277	27,35520395	4521,121091	0
Resíduo	9112	55,13248006	0,006050536		
Total	9119	246,6189077			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 80,0%	Superior 80,0%
k	3,08561896	0,032907073	93,76765092	0	3,021113713	3,150124207	3,043443791	3,127794129
a	0,003877104	0,003590176	1,07992027	0,280206269	-0,003160447	0,010914654	-0,000724225	0,008478433
c	-0,691613538	0,007240852	-95,51548951	0	-0,705807232	-0,677419843	-0,700893736	-0,682333339
e	0,341200311	0,006613529	51,59126236	0	0,328236311	0,354164312	0,332724118	0,349676504
b	-0,043783585	0,007289767	-6,006170671	1,97227E-09	-0,058073163	-0,029494006	-0,053126474	-0,034440695
d	-0,226133753	0,003602375	-62,77351086	0	-0,233195217	-0,219072289	-0,230750718	-0,221516789
f	-0,537754338	0,004555828	-118,0365709	0	-0,546684784	-0,528823893	-0,54359329	-0,531915386
g	-0,162870308	0,003602375	-45,2119195	0	-0,169931772	-0,155808844	-0,167487273	-0,158253343

$$\bullet \quad BCI = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BG}^c \times MR_{BG}^d \times h_{SBC}^e \times MR_{SBC}^f \times MR_{SL}^g$$

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,94824469
R-Quadrado	0,899167991
R-quadrado ajustado	0,89909053
Erro padrão	0,05354641
Observações	9120

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	7	232,9790353	33,28271933	11608,01847	0
Resíduo	9112	26,12609029	0,002867218		
Total	9119	259,1051256			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 80,0%</i>	<i>Superior 80,0%</i>
k	2,092523851	0,022652843	92,3735664	0	2,048119197	2,136928505	2,06349096	2,121556741
a	-0,106600052	0,002471435	-43,13285785	0	-0,111444618	-0,101755485	-0,109767552	-0,103432551
c	-0,908444334	0,004984518	-182,2532131	0	-0,918215106	-0,898673561	-0,914832713	-0,902055954
e	-0,121261983	0,004552676	-26,6353221	1,387E-150	-0,130186248	-0,112337717	-0,127096894	-0,115427071
b	-0,029668358	0,00501819	-5,912163203	3,49785E-09	-0,039505136	-0,01983158	-0,036099893	-0,023236822
d	-0,252155196	0,002479833	-101,6823332	0	-0,257016225	-0,247294167	-0,255333346	-0,248976932
f	-0,267976086	0,003136179	-85,44669197	0	-0,2741237	-0,261828472	-0,271995552	-0,26395662
g	-0,412813911	0,002479833	-166,4684382	0	-0,41767494	-0,407952883	-0,415992176	-0,409635647

Neste anexo são apresentadas as estruturas e os resultados obtidos da retroanálise do módulo de resiliência do pavimento existente, através dos dados da bacia deflectométrica e espessuras das camadas do pavimento existente, obtidos das simulações com o *software* BAKFAA 2.0.

Pista Crescente

Km 0,000

Km 0,200

Km 0,400

Km 0,600

Km 0,800

Km 1,000

Km 1,200

Km 1,400

Km 1,600

Km 1,800

Km 2,000

Km 2,200

Km 2,400

Km 2,600

Km 2,800

Km 3,000

Pista Decrescente

Km 0,100

Km 0,300

Km 0,500

Km 0,700

Km 0,900

Km 1,100

Km 1,300

Km 1,500

Km 1,700

Km 1,900

Km 2,100

Km 2,300

Km 2,500

Km 2,700

Km 2,900

Km 3,060

Neste anexo são apresentadas, em EXCEL®, as tabelas geradas para as 34.816 estruturas e os resultados dos indicadores estruturais obtidos das simulações com o *software* ESYM-5 e ainda o resultado do cálculo de cada parâmetro defletoométrico estudado.

As 1.376 estruturas excluídas do estudo estão indicadas através do grifo em laranja, para as estruturas utilizadas, os dados estão sem grifo.

A tabela a seguir apresenta as unidades de entrada dos parâmetros adotados.

Parâmetro	Unidade
h_{CAUQ} , h_{REC} , h_{INFRA}	cm
MR_{CAUQ} , MR_{REC} , MR_{INFRA} , MR_{SL}	kgf/cm ²
D_0 , D_{20} , D_{25} , D_{30} , D_{45} , D_{60} , D_{90} , D_{120} , SCI, BDI, BCI	10 ⁻² mm
ε_t , ε_v	10 ⁻⁴ cm/cm
σ_t	kgf/cm ²
R	m

(COMPACT DISK)