AILTON FRANK BARBOSA RESSUTTE

**Estudo de desempenho de pavimento asfáltico reforçado com tela
de aço em rodovia no Estado de São Paulo**

São Paulo

2017

AILTON FRANK BARBOSA RESSUTTE

**Estudo de desempenho de pavimento asfáltico reforçado com tela
de aço em rodovia no Estado de São Paulo**

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

São Paulo
2017

AILTON FRANK BARBOSA RESSUTTE

Engenheiro Civil, Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2012

Técnico em Construção Civil, Instituto Federal de São Paulo, 2006

**Estudo de desempenho de pavimento asfáltico reforçado com tela
de aço em rodovia no Estado de São Paulo**

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

Área de Concentração: Engenharia de
Transportes - Infraestrutura de Transportes

Orientador: Prof. Dr. Carlos Yukio Suzuki

São Paulo

2017

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

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Ressutte, Ailton Frank Barbosa

Estudo de desempenho de pavimento asfáltico reforçado com tela de aço em rodovia no Estado de São Paulo / A. F. B. Ressutte -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

264 p.

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

1.Pavimentos flexíveis 2.Tela de aço 3.Reforço estrutural 4.Retroanálise 5.Estudo paramétrico I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

Dedico este trabalho aos meus pais e
irmão que sempre me apoiaram na busca
de meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, deixo meus agradecimentos aos meus pais e irmão que sempre estiveram presentes no decorrer do desenvolvimento da minha carreira acadêmica sempre me apoiando a estudar mais e mais.

Quero deixar o meu agradecimento especial à Professora Rita Moura Fortes por ter acreditado na minha capacidade, me incentivando à pesquisa, compartilhando os seus conhecimentos e principalmente por ter me oferecido a oportunidade de estudar sobre esta nova tecnologia que trata de telas de aço em pavimentos asfálticos, a qual foi à base para esta dissertação.

Ao Professor Suzuki, meu orientador, quero agradecer pelo incentivo no desenvolvimento deste trabalho, pela transmissão de seu vasto conhecimento, pelos ensinamentos técnicos e profissionais transmitidos ao longo desses anos de convívio e por ter acreditado na elaboração desta pesquisa permitindo a realização da mesma.

Aos colegas da LTP/USP, em especial a Professora Liedi pela disposição e participação na qualificação deste trabalho contribuindo com recomendações que aperfeiçoaram o prosseguimento do mesmo. À Professora Rosângela que foi a primeira pessoa a abrir as portas para me receber no laboratório de pavimentação e aos colegas Deise, Edson, Igor, Prof.^a Kamilla, Kendi, Lucas, Luciana, Lívia, Robson, e demais pelo auxílio nas dúvidas que ocorreram no decorrer desta pesquisa.

Ao Instituto Brasileiro de Telas Soldadas (IBTS), em especial ao Eng. João Batista Rodrigues da Silva pelo fornecimento de informações sobre o projeto realizado na GERDAU, pelo apoio técnico ao desenvolvimento da pesquisa, pelo fornecimento das telas soldadas e pelo esclarecimento de dúvidas quanto à sua aplicação.

À CCR Nova Dutra, em especial os engenheiros Luís Miguel e Valéria Faria por ter disponibilizado o laboratório e seus técnicos para realização de ensaios.

À empresa Astec Engenharia, em especial aos engenheiros André e Paulo Mugayar pela colaboração nos levantamentos de campo com a passagem do FWD pela pista e pela realização da abertura dos poços de inspeção.

Ao Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP), em especial aos engenheiros Rubens Cahin e Cleiton Luiz de Souza, pela disponibilização do trecho experimental para aplicação desta tecnologia.

Ao engenheiro José Roberto Moreira, pela grande amizade, por ter acreditado na minha capacidade desde o início de carreira no DER, por ter me fornecido parte do seu conhecimento como engenheiro e por contribuir para o meu crescimento pessoal e profissional.

Ao engenheiro José Roberto Cincorre, por ter me aceito como parte de sua equipe no DER, onde pude obter parte do seu grande conhecimento na área de pavimentação, o que acabou contribuindo para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos engenheiros, Badaró, Carlos, Dilson, Fuzaro, José Eduardo, Mônica, Nakao, Paulão, Samyr, Yuri e todos os demais pelo apoio e convívio nesses anos de DER.

Ao grande amigo Jairo “Hunter” por ter se disponibilizado diversas vezes para ir ao trecho experimental, junto comigo, verificar os dados para continuidade desta pesquisa e pela amizade e parceria desde os tempos do ensino médio.

Ao amigo e colega de pós-graduação Eric Silva que sempre estava de prontidão no auxílio a qualquer tipo de dúvida que surgisse neste trabalho e pelo privilégio de sua amizade nesses anos de convívio da pós-graduação.

À “Dra.” Elaine pela paciência e dedicação, por estar sempre presente mesmo quando eu estive ausente.

A todos, que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho, meu muito obrigado!!

“A dúvida é o princípio da sabedoria.”

(Aristóteles)

RESUMO

A utilização da tela de aço como reforço de pavimentos asfálticos no combate ao trincamento por reflexão é uma alternativa utilizada desde 1980 em países europeus. Uma revisão da literatura a respeito de sua utilização na reabilitação de pavimentos asfálticos, mostra que, a sua utilização acaba diminuindo o aparecimento de trincas nas camadas de revestimento, agindo como uma barreira contra a sua propagação, oferece resistência ao cisalhamento especialmente sob elevadas tensões e ainda, melhora a resistência à fadiga contribuindo para a longevidade do pavimento. Entretanto, o potencial de sua utilização tem sido pouco investigado em rodovias brasileiras. Neste contexto, insere-se esta pesquisa com o objetivo de avaliar o efeito do reforço gerado pela inserção da tela em revestimentos asfálticos para o uso em pavimentos flexíveis, com o propósito de tornar as estruturas rodoviárias menos onerosas com consequente aumento da sua vida útil. Para isso, foi realizada uma pesquisa visando à análise do seu desempenho em um trecho experimental localizado na rodovia SP-354, no Estado de São Paulo entre as cidades de Campo Limpo Paulista e Jarinu, fundamentado nas melhores práticas internacionais, recorrendo à observação em campo e laboratório, análise por meio de ensaios de módulo de resiliência e cálculos por retroanálise para verificação do efeito da inserção da tela, ainda propondo, uma metodologia de dimensionamento estrutural de reforço de pavimentos asfálticos considerando a faixa de valores de módulo de resiliência integrados com a tela e o fator de deflexão (K) para cálculo de espessura de reforço. Conclui-se que esta técnica de reforço tem potencial para prolongar a vida útil de revestimentos asfálticos em pavimentos flexíveis, com benefícios também para o desempenho da camada na fase pós-trincamento. Foram obtidos modelos que permitem dimensionar o revestimento asfáltico com o propósito de avaliar o efeito da tela de aço na zona tracionada da camada. Por fim, foi verificada através de um estudo de viabilidade técnica/econômica que a incorporação da tela de aço em pavimentos flexíveis é uma alternativa eficaz e de adequada viabilidade técnica e econômica.

Palavras-chave: Pavimentos flexíveis. Tela de aço. Reforço estrutural. Retroanálise. Estudo paramétrico.

ABSTRACT

The use of the steel mesh as reinforcement of asphalt pavements to combat reflective cracks by reflection is an alternative used since 1980 in European countries. A review of the literature on the use of the steel mesh in the rehabilitation of asphalt pavements shows that its use prevents the appearance of cracks acting as a barrier against its propagation, offers resistance to shearing especially under high tensions and also improves the resistance to fatigue contributing to the longevity of the pavement. However, the potential if its use has been little investigated in Brazilian highways. In this context this project is to develop a new technology for road construction and rehabilitation. The idea is to use steel mesh reinforcement in asphalt roads in order to make road structures more cost effective by improving the lifetime of new constructed roads and by developing an optimal rehabilitation method for existing roads. For this, a research was performed aiming at the analysis of its performance in an experimental section located on the highway SP-354, in the State of São Paulo between the cities of Campo Limpo Paulista and Jarinu, based on the best international practices, using observation of its behavior in the field and laboratory, analysis by means of resilient modulus tests and calculations by backcalculation to verify the effect of the insertion of the screen, still proposing, a methodology of asphalt pavement design considering the range of integrated resilience module values with the screen and the structural deflection reduction factor (K) admissible for reinforcement projects. It was concluded that this reinforcing technique has potential for improvements crack propagation post-cracking behavior and permanent deformation in the asphalt concrete surfacing layer, with a ten fold increase on fatigue life to be expected. A model was developed that may be employed for pavement design modifying a model based on the use of conventional fatigue laws for the asphalt concrete, if the grid is positioned at the tensile zone of the surfacing layer. Finally, it was verified through a technical / economic study that the incorporation of the steel mesh in flexible pavements is an effective alternative and of adequate technical and economic viability.

Keywords: Flexible pavement. Steel mesh. Structural reinforcement. Backcalculation. Parametric model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Etapas do Trincamento. Fonte: Vilchez (1996).	38
Figura 2.2 - Movimentações possíveis de uma trinca. Fonte: adaptado de O'Dowd (1996).	38
Figura 2.3 - Tipos de trincas: (a) longitudinal, (b) transversal, (c) oblíqua, (d) bloco e (e) couro de jacaré. Fonte: adaptado de Vilchez (1996).	40
Figura 2.4 - Estágios existentes num processo de fadiga. Fonte: Bernucci et al. (2006).	42
Figura 2.5 - Mecanismo da reflexão de trincas. Fonte: Monismith e Coetzee (1980).	45
Figura 3.1 - Método de manuseamento da tela de aço em campo. Fonte: REFLEX (2002a).	51
Figura 3.2 - Disposição da tela de aço. Fonte: REFLEX (2002a).	52
Figura 3.3 - Sobreposição entre telas de aço. Fonte: REFLEX (2002a).	52
Figura 3.4 - Separação das tela de aço sem articulações. Fonte: REFLEX (2002a).	53
Figura 3.5 - Ensaio de tração controlada por deformação. Fonte: REFLEX (2002b).	57
Figura 3.6 - Compactação da placa de teste com tela de aço padrão. Fonte: REFLEX (2002b).	59
Figura 3.7 - Tensões no interior de um pavimento. Fonte: Medina e Motta (2005).	60
Figura 3.8 - Demonstração da camada equivalente na estrutura do pavimento. Fonte: adaptado de SPENS (2009).	62
Figura 3.9 - Estrutura dimensionada no trecho teste de Salmastro. Fonte: adaptado de SPENS (2009).	65
Figura 3.10 - Superfície reforçada com tela de aço (a e b). Fonte: SPENS (2009).	66
Figura 3.11 - Defeitos do trecho experimental na estrada Sueca (a e b). Fonte: REFLEX (2001b).	67
Figura 3.12 - Aplicação da tela de aço no trecho em estudo (a e b). Fonte: REFLEX (2001b).	68
Figura 3.13 - Construção do trecho experimental Português. Fonte: Alves (2007).	70
Figura 3.14 - Fixação da tela (a) e cobertura com CAUQ (b). Fonte: Alves (2007).	70
Figura 3.15 - Pavimento a) sem reforço; b) com reforço no meio da camada e c) reforço na base da camada (interface com a camada de base). Fonte: Asphalt Academy (2008).	73
Figura 3.16 - Instalação da tela de aço na pista experimental na Virginia. Fonte: Elseifi & Al-Qadi (2005).	74
Figura 3.17 - Fluxograma do estudo de comportamento in situ de diferentes tipos de telas. Fonte: IBTS (2005).	75
Figura 3.18 - Localização aproximada do trecho de estudo.	76

Figura 3.19 - Representação esquemática do trecho experimental. Fonte: adaptado de IBTS (2005).	77
Figura 3.20 - Seções de teste da pista experimental na fabrica da Gerdau. Fonte: adaptado de IBTS (2005).	77
Figura 3.21 - Instalação dos instrumentos. Fonte: adaptado de IBTS (2005).	78
Figura 3.22 - Vista dos instrumentos instalados. Fonte: adaptado de IBTS (2005).	78
Figura 3.23 - Situação de arrancamento da tela da massa por ação de engate da rosca distribuidora. Fonte: adaptado de IBTS (2005).	79
Figura 3.24 - Provas de carga estáticas com viga de Benkelman. Fonte: adaptado de IBTS (2005).	79
Figura 4.1 - Vista do pavimento com a tela (esquerda da pista) e do pavimento novo (direita da pista). Fonte: MackPesquisa (2013).	82
Figura 4.2 - Presença de trincas transversais (a) e trincamento nas emendas das telas (b). Fonte: MackPesquisa (2013).	82
Figura 4.3 - Presença de panelas. MackPesquisa (2013).	83
Figura 4.4 - Arrancamento do revestimento sobre a tela soldada. MackPesquisa (2013). ...	83
Figura 4.5 - Presença do defeito tipo jacaré no pavimento. MackPesquisa (2013).	83
Figura 4.6 - Arrancamento da camada do revestimento. MackPesquisa (2013).	84
Figura 4.7 - Emenda lateral (a) e detalhe da sobreposição de telas (b). Fonte: MackPesquisa (2013).	85
Figura 4.8 - Posição de emenda longitudinal (a) e posição de encontro e lado do fio (b). Fonte: MackPesquisa (2013).	86
Figura 4.9 - Procedimento de amarração. Fonte: MackPesquisa (2013).	86
Figura 4.10 - Sobreposição na emenda central/lateral. Fonte: MackPesquisa (2013).	87
Figura 4.11 - Local de corte (a), para diminuição de sobreposição de barras aço nas emendas transversais e laterais (b). Fonte: MackPesquisa (2013).	87
Figura 4.12 - Área de corte para evitar sobreposição de telas. Fonte: MackPesquisa (2013).	87
Figura 4.13 - Amarração das telas por meio de abraçadeira plástica. Fonte: MackPesquisa (2013).	88
Figura 4.14 - Esquema de retirada do último fio.	88
Figura 4.15 - Esquema de retirada dos fios longitudinais.	89
Figura 4.16 - Esquema de junção das telas.	89
Figura 4.17 - Esquema de junção da meia tela.	89
Figura 4.18 - Sobreposição de 2 (duas) malhas. Fonte: IBTS (1997).	89
Figura 4.19 - Posicionamento do trecho rodoviário de projeto.	91
Figura 4.20 - Localização do trecho (restauração).	92

Figura 4.21 - Localização do trecho (implantação).....	92
Figura 4.22 - Estrutura do pavimento existente – km 59,240. Fonte: adaptado de DER/SP (2009).	95
Figura 4.23 - Trilha de roda (a) e trincas do tipo jacaré (b). Fonte: adaptado de DER/SP (2009).	96
Figura 4.24 - Estrutura adotada para implantação. Fonte: adaptado de DER/SP (2009).	99
Figura 4.25 - Pavimento na SP-354, com presença de 100% do defeito “jacaré”. Fonte: MackPesquisa (2013).	102
Figura 4.26 - Presença de diversos defeitos na rodovia. Fonte: MackPesquisa (2013).....	102
Figura 4.27 - Desgaste acentuado com presença de trincas tipo bloco. Fonte: MackPesquisa (2013).	102
Figura 4.28 - Tráfego de veículos pesados na SP-354. Fonte: MackPesquisa (2013).	103
Figura 4.29 - Telas estocadas no km 60 da SP-354. Fonte: MackPesquisa (2013).	104
Figura 4.30 - Colocação das telas de aço. Fonte: MackPesquisa (2013).	105
Figura 4.31 - Pavimento existente com trincas tipo “jacaré” e com panelas. Fonte: MackPesquisa (2013).	105
Figura 4.32 - Detalhe da emenda (sobreposição de telas) (a) e vista do trecho em alicive (b). Fonte: MackPesquisa (2013).	106
Figura 4.33 - Amarração das emendas com arame recozido. Fonte: MackPesquisa (2013).	106
Figura 4.34 – Tachões (a) usado na fixação da tela (b). Fonte: MackPesquisa (2013).	107
Figura 4.35 - Fixação da tela soldada sobre o pavimento existente, com tachões. Fonte: MackPesquisa (2013).	107
Figura 4.36 - Detalhe da fixação da tela no sentido transversal do tráfego. Fonte: MackPesquisa (2013).	107
Figura 4.37 - Aplicação da pintura de ligação com emulsão RR -2C. Fonte: MackPesquisa (2013).	108
Figura 4.38 - Aplicação do recapeamento do CAUQ sobre a tela soldada. Fonte: MackPesquisa (2013).	108
Figura 4.39 - Caminhão basculante descarregando a massa asfáltica na vibro-acabadora. Fonte: MackPesquisa (2013).	109
Figura 4.40 - Deslocamento e levantamento da tela soldada e defeito gerado. Fonte: MackPesquisa (2013).	109
Figura 4.41 - Controle da temperatura (a) e da espessura de lançamento da massa asfáltica (b). Fonte: MackPesquisa (2013).	110
Figura 4.42 - Rasteleiros corrigindo o espalhamento. Fonte: MackPesquisa (2013).	110

Figura 4.43 - Compressão da massa com rolo liso (a) e com rolo de pneus (b). Fonte: MackPesquisa (2013).	111
Figura 4.44 - Compressão (compactação) da massa asfáltica com rolo de pneus. Fonte: MackPesquisa (2013).	111
Figura 4.45 - Esquema sem escala da colocação da tela sobre o pavimento no primeiro subtrecho. Fonte: MackPesquisa (2013).	112
Figura 4.46 - Esquema sem escala da colocação da tela sobre o pavimento no segundo subtrecho. Fonte: MackPesquisa (2013).	112
Figura 4.47 - Amarração das telas com arame recozido. Fonte: MackPesquisa (2013).	113
Figura 4.48 - Emenda no sentido longitudinal do tráfego. Fonte: MackPesquisa (2013).	113
Figura 4.49 - Recorde no “encontro” das quatro telas. Fonte: MackPesquisa (2013).	113
Figura 4.50 - Tela assentada e fixada sobre pavimento existente. Fonte: MackPesquisa (2013).	114
Figura 4.51 - Aplicação do ligante (a) e do recapeamento (b). Fonte: MackPesquisa (2013).	114
Figura 4.52 - Compressão com rolo de pneu. Fonte: MackPesquisa (2013).	114
Figura 4.53 - Compressão com rolo de pneus e liso. Fonte: MackPesquisa (2013).	115
Figura 4.54 - Marcação da localização das emendas das telas. Fonte: MackPesquisa (2013).	115
Figura 4.55 - Fresagem de 6 cm do pavimento existente. Fonte: MackPesquisa (2013).	117
Figura 4.56 - Limpeza com vassoura mecânica. Fonte: MackPesquisa (2013).	117
Figura 4.57 - Limpeza com jato de ar. Fonte: MackPesquisa (2013).	117
Figura 4.58 - Transporte da tela até o subtrecho a ser executado. Fonte: MackPesquisa (2013).	118
Figura 4.59 - Recorte nos trechos de sobreposição nas emendas. Fonte: MackPesquisa (2013).	118
Figura 4.60 - Fixação da tela soldada com uso de pedaços de barras de aço. Fonte: MackPesquisa (2013).	118
Figura 4.61 - Fixação da tela soldada no pavimento existente. Fonte: MackPesquisa (2013).	119
Figura 4.62 - Vista da emenda no sentido transversal (duas malhas ou 3 fios) (a) e aplicação da massa (b). Fonte: MackPesquisa (2013).	119
Figura 4.63 - Compressão da camada de recapeamento com rolo de pneus. Fonte: MackPesquisa (2013).	119
Figura 4.64 - Recorte das emendas. Fonte: MackPesquisa (2013).	120
Figura 4.65 - Remoção de barras transversais da primeira malha com aumento da franja. Fonte: MackPesquisa (2013).	120

Figura 4.66 - Presença de afundamento na trilha de roda e jacaré no pavimento existente. Fonte: MackPesquisa (2013).	122
Figura 4.67 - Fixação da tela e recorte nos pontos de sobreposição (4 telas). Fonte: MackPesquisa (2013).	122
Figura 4.68 - Fixação da tela. Fonte: MackPesquisa (2013).	122
Figura 4.69 - Marcação da localização das emendas. Fonte: MackPesquisa (2013).	123
Figura 4.70 - Aplicação de pintura de ligação com emulsão RR-2C (a) e da massa asfáltica (b). Fonte: MackPesquisa (2013).	123
Figura 4.71 - Controle da temperatura (a) e passagem de rolo de pneu (b). Fonte: MackPesquisa (2013).	123
Figura 4.72 - Fresagem do trecho. Fonte: Ressutte et al. (2015).	126
Figura 4.73 - Limpeza do trecho fresado. Fonte: Ressutte et al. (2015).	126
Figura 4.74 - Fixação da tela sobre pavimento com grampos de aço. Fonte: Ressutte et al. (2015).	127
Figura 4.75 - Recorte das telas e amarração das emendas com aço recozido. Fonte: Ressutte et al. (2015).	127
Figura 4.76 - Detalhe da emenda fixa do pavimento. Fonte: Ressutte et al. (2015).	127
Figura 4.77 - Aplicação das camadas de ligante e CAUQ. Fonte: Ressutte et al. (2015). ..	128
Figura 4.78 - Passagem do rolo tipo pneu e liso (a) para o acabamento da compactação (b). Fonte: Ressutte et al. (2015).	128
Figura 5.1 - Pavimento tipo referente ao primeiro Estudo Paramétrico.	130
Figura 5.2 - Pavimento tipo referente ao segundo Estudo Paramétrico.	130
Figura 5.3 - Distribuição do carregamento para simulação com VB.	131
Figura 5.4 - Parâmetros de entrada das camadas simuladas.	132
Figura 6.1 - Fluxograma do estudo de retroanálise.	148
Figura 6.2 - Local de coleta de materiais para realização de ensaios.	149
Figura 6.3 - Abertura de cava de inspeção.	149
Figura 6.4 - Coleta de materiais.	150
Figura 6.5 - Obtenção das espessuras constituintes do pavimento.	150
Figura 6.6 - Preparação das amostras para ensaio.	151
Figura 6.7 - Instrumentação das amostras.	151
Figura 6.8 - Ensaio em andamento.	152
Figura 6.9 - Módulo de resiliência para camada de base.	152
Figura 6.10 - Módulo de resiliência para camada de subleito.	153
Figura 6.11 - Marcação do posicionamento das emendas longitudinais. Fonte: MackPesquisa (2013).	155

Figura 6.12 - Presença de jacaré e “afofamento” no local de sobreposição de telas. Fonte: MackPesquisa (2013).	156
Figura 6.13 - Marcação do posicionamento das emendas no sentido longitudinal e no transversal. Fonte: MackPesquisa (2013).	156
Figura 6.14 - Trincas transversais nos locais de emenda da tela. Fonte: MackPesquisa (2013).	157
Figura 6.15 - Trinca transversal em toda emenda. Fonte: MackPesquisa (2013).	158
Figura 6.16 - Recapeamento realizado no trecho de implantação.	158
Figura 6.17 - Vista do trecho de implantação após 1 ano de execução.	159
Figura 6.18 - Recapeamento executado após 2,5 anos da construção do trecho.	159
Figura 6.19 - Esquema do diagrama de tensões.	160
Figura 6.20 - Vista do trecho após 3 meses de construção.	161
Figura 6.21 - Vista do trecho após 8 meses de construção.	161
Figura 6.22 - Vista do trecho após 1 ano de construção.	162
Figura 6.23 - Vista do trecho após 3 anos de construção.	162
Figura 6.24 - Comparação trincamento em 27/11/2013 e 23/04/2016.	162
Figura 6.25 - Precipitação mensal acumulada para o ano de 2013 a 2015. Fonte: PCJ (2016).	165
Figura 6.26 - Média das deflexões e seus respectivos desvios para levantamento em março de 2013.	167
Figura 6.27 - Média das deflexões e seus respectivos desvios para levantamento em abril de 2015.	168
Figura 6.28 - Média das deflexões e seus respectivos desvios para levantamento em abril de 2016.	169
Figura 6.29 - Resumos das deflexões no bordo externo nos levantamentos de 2013, 2015 e 2016.	170
Figura 6.30 - Resumos das deflexões no bordo interno nos levantamentos de 2013, 2015 e 2016.	170
Figura 6.31 - Equipamento FWD utilizado para levantamento dos dados.	171
Figura 6.32 - Média das deflexões máximas e seus respectivos desvios para levantamento em março de 2015 e julho de 2016.	175
Figura 6.33 - Bacias de deflexão média medidas em campo para o segmento em restauração.	176
Figura 6.34 - Bacias de deflexão média medidas em campo para o segmento em implantação.	176
Figura 6.35 - Medidas de deflexão máxima ao longo do Trecho Experimental.	177
Figura 6.36 - Estrutura tipo pavimento perpétuo com a inserção da tela de aço.	198

Figura 7.1 - Equivalência de preços entre CAUQ e tela de aço.	200
Figura 7.2 - Comparativo de custos de mistura asfáltica com e sem a tela.	202
Figura 7.3 - Estrutura adotada para implantação.	203
Figura 7.4 - Estrutura adotada para restauração.....	203
Figura 7.5 - Valor Presente acumulado do custo total para estrutura de implantação.	210
Figura 7.6 - Valor Presente acumulado do custo total para estrutura de restauração.	210
Figura A-0.1 - Levantamento defletoométrico no eixo da faixa de rolamento em restauração na época de projeto do DER/SP.	262
Figura A-0.2 - Levantamento defletoométrico no eixo da faixa de rolamento em restauração após 2 anos de execução do experimento.....	262
Figura A-0.3 - Levantamento defletoométrico no eixo da faixa de rolamento em restauração após 3 anos de execução do experimento.....	263
Figura A-0.4 - Levantamento defletoométrico na implantação da faixa adicional após 2 anos de execução do experimento.	263
Figura A-0.5 - Levantamento defletoométrico na implantação da faixa adicional após 3 anos de execução do experimento.	264

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Obras de reforço executadas com tela metálica. Fonte: adaptado de BÜHLER (2001).	48
Tabela 3.2 - Resumo do processo de instalação da tela de aço. Fonte: adaptado de BÜHLER (2007).	54
Tabela 3.3 - Estrutura do pavimento com tela de aço. Fonte: REFLEX (2002b).	58
Tabela 3.4 - Tipos de pavimentos dimensionados. Fonte: adaptado de IBTS (2005).	76
Tabela 4.1 - Características da Tela Soldada Q-138. Fonte: adaptado de GERDAU (2013).	84
Tabela 4.2 - Volumes e fluxos de tráfego obtidos no estudo. Fonte: adaptado de DER/SP (2009).	94
Tabela 4.3 - Número N para 10 anos. Fonte: adaptado de DER/SP (2009).	94
Tabela 4.4 - Levantamento defletométrico do subtrecho da SP-354 em estudo. Fonte: adaptado de DER/SP (2009).	96
Tabela 4.5 - Soluções adotada no trecho experimental pelo projeto original. Fonte: adaptado de DER/SP (2009).	98
Tabela 4.6 - Parâmetros adotados para dimensionamento. Fonte: adaptado de DER/SP (2009).	100
Tabela 4.7 - Solicitações atuantes e admissíveis. Fonte: adaptado de DER/SP (2009).	101
Tabela 4.8 - Estrutura proposta para trecho em restauração. Fonte: MackPesquisa (2013).	103
Tabela 4.9 - Estrutura proposta no trecho de implantação. Fonte: adaptado de Ressutte et al. (2015).	124
Tabela 4.10 - Evolução dos volumes de tráfego. Fonte: adaptado de Ressutte et al. (2015).	125
Tabela 5.1 - Distribuição do carregamento para simulação com FWD.	131
Tabela 5.2 - Indicadores de Curvatura analisados.	133
Tabela 5.3 - Expoentes e parâmetros de análises (FWD) para implantação.	134
Tabela 5.4 - Expoentes e parâmetros de análises (VB) para implantação.	135
Tabela 5.5 - Equações de Correlação entre os Esforços Solicitantes e os Indicadores de Curvatura, a partir dos estudos paramétricos para carga de FWD.	137
Tabela 5.6 - Equações de Correlação entre os Esforços Solicitantes e os Indicadores de Curvatura, a partir dos estudos paramétricos para carga de VB.	138
Tabela 5.7 - Expoentes e parâmetros de análises (FWD) para restauração.	141
Tabela 5.8 - Expoentes e parâmetros de análises (VB) para restauração.	141

Tabela 5.9 - Número “N” em Função da Deformação Específica de Tração et. Fonte: adaptado de DER/SP (2006).	142
Tabela 5.10 - Deslocamento Vertical Recuperável. Fonte: adaptado de DER/SP (2006b).	144
Tabela 5.11 - Espessuras mínimas de revestimento asfáltico para modelos deflectométricos com cargas de 2050 kgf (VB) e 4100 (FWD) kgf.....	145
Tabela 5.12 - Espessuras mínimas de revestimento asfáltico para modelos deflectométricos com carga de 3250 kgf (VB) e 6500 (FWD) kgf.....	146
Tabela 6.1 - Resultados dos ensaios realizados nas amostras de base.	154
Tabela 6.2 - Resultados dos ensaios realizados nas amostras de subleito.....	154
Tabela 6.3 - Tratamento estatístico com dados de março de 2013.	167
Tabela 6.4 - Tratamento estatístico com dados de abril de 2015.	168
Tabela 6.5 - Tratamento estatístico com dados de abril de 2016.	169
Tabela 6.6 - Tratamento estatístico com dados de março 2015 (FWD).....	172
Tabela 6.7 - Tratamento estatístico com dados de julho 2016 (FWD).....	174
Tabela 6.8 - Segmentos homogêneos em restauração analisados.	180
Tabela 6.9 - Segmentos homogêneos em implantação analisados.....	180
Tabela 6.10 - Resultado de módulo de resiliência dos ensaios de laboratório.	181
Tabela 6.11 - Resultado de módulo de resiliência segundo AASHTO (1993).	182
Tabela 6.12 - Resultado de módulo de resiliência retroanalisados.....	182
Tabela 6.13 - Resultados obtidos na retroanálise (Restauração).	184
Tabela 6.14 - Resumo dos resultados de módulo de resiliência (Restauração).	185
Tabela 6.15 - Resultados obtidos na retroanálise (Implantação).....	186
Tabela 6.16 - Resumo dos resultados de módulo de resiliência (Implantação).	187
Tabela 6.17 - Estrutura do pavimento adotado no trecho em Implantação.....	188
Tabela 6.18 - Valores atuantes.	190
Tabela 6.19 - Verificação mecanicista.	190
Tabela 6.20 - Comparativo de deflexões e tráfego com levantamentos de 2015.	192
Tabela 6.21 - Comparativo de deflexões e tráfego com levantamentos de 2016.	193
Tabela 6.22 - Vida útil estimada do pavimento com tela de aço.....	194
Tabela 6.23 - Cálculo do fator K para trechos sem a tela de aço.	196
Tabela 6.24 - Cálculo do fator K para trechos com a tela de aço.	196
Tabela 7.1 - Materiais utilizados para composição de preço.	199
Tabela 7.2 - Custos comparativos de soluções sem o uso de tela.	200
Tabela 7.3 - Custo da construção/trecho por km em implantação sem uso de tela.....	204
Tabela 7.4 - Custo da construção/trecho por km em implantação com uso de tela.....	205
Tabela 7.5 - Custo da restauração por km sem uso de tela.	205
Tabela 7.6 - Custo da restauração por km com uso de tela e fresagem.....	205

Tabela 7.7 - Resumo dos custos de implantação e restauração por km com e sem uso de tela.....	206
Tabela 7.8 - Custo para restauração por km do trecho sem uso de tela, com fresagem e recape.	206
Tabela 7.9 - Custo para conserva do trecho por km com e sem uso de tela, remendo e tapa buraco.	207
Tabela 7.10 - Custo para restauração do trecho com uso de tela, com fresagem e recape.	207
Tabela 7.11 - Custo para restauração do trecho recapeado sem uso de tela.	208
Tabela 7.12 - Custo para restauração do trecho recapeado com uso de tela.	208
Tabela 7.13 - Resumo da Análise Econômica.....	209

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ADINA	<i>Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis</i>
ADOT	<i>Arizona Department of Transportation</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BAKFAA	<i>Backcalculation of Federal Aviation Administration</i>
BGS	Brita Graduada Simples
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
DER/SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ELSYM5	<i>Elastic Layered System Model 5</i>
ESRD	Eixo Simples de Roda Dupla
RR-2C	Emulsão Asfáltica de Ruptura Rápida
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IBTS	Instituto Brasileiro de Telas Soldadas
IGG	Índice de Gravidade Global
MB	Macadame Betuminoso
MCT	Miniatura Compactada Tropical
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEPDG	<i>Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide</i>

MR	Módulo de Resiliência
REFLEX	<i>Reinforcement of Flexible Road Structures with Steel Fabrics to Prolong Service Life</i>
RPF	Reperfilamento
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
SP-354	Rodovia Edgard Máximo Zamboto
TPU	Tabela de Preços Unitários do DER/SP
TSD	Tratamento Superficial Duplo
USACE	<i>U.S. Army Corps of Engineers</i>
VB	Viga Benkelman
VDM	Volume Diário Médio
VTI	<i>Swedish National Road and Transport Research Institute</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

N_f	Vida de fadiga
ε_t	Deformação específica de tração
N	Número de repetições do eixo padrão de 80 kN
ε_v	Deformação específica vertical de compressão
σ_z	Tensão vertical de compressão à profundidade "z"
σ_h	Tensão horizontal de tração
μ	Coeficiente de Poisson
$E_{aço}$	Módulo de elasticidade do aço
I	Momento de inércia
E_{eq}	Módulo de elasticidade para camada equivalente
f_{yk}	Resistência à tração do aço

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	28
1.1	OBJETIVOS	31
1.2	METODOLOGIA	32
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	34
2	TRINCAS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	36
2.1	CAUSAS E CLASSIFICAÇÃO DO TRINCAMENTO	37
2.2	TRINCAMENTO POR FADIGA	41
2.3	TRINCAMENTO POR REFLEXÃO	43
3	TELAS DE AÇO EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	46
3.1	UTILIZAÇÃO DA TELA DE AÇO	47
3.2	PROCESSO DE INSTALAÇÃO	50
3.3	PROJETO REFLEX	55
3.3.1	Interação entre tela de aço e o concreto asfáltico	56
3.3.2	Método de dimensionamento	60
3.4	EXPERIÊNCIAS ANTERIORES UTILIZANDO A TELA DE AÇO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	65
3.4.1	Experiência Italiana	65
3.4.2	Experiência Sueca	66
3.4.3	Experiência Portuguesa	69
3.4.4	Experiência Sul-africana	71
3.4.5	Experiência Americana	73
3.4.6	Experiência Brasileira	75
4	TRECHOS EXPERIMENTAIS	81
4.1	ESTUDO DA EMENDA EM TELAS SOLDADAS	81

4.1.1	Tela de aço Q-138.....	84
4.1.2	Ações a considerar na emenda	85
4.1.3	Esquema de montagem	88
4.2	DEFINIÇÃO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS	90
4.3	PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO	93
4.3.1	Estudos de tráfego.....	93
4.3.2	Investigações geotécnicas.....	94
4.3.3	Avaliação estrutural do pavimento existente	95
4.3.4	Condição da superfície do pavimento existente	96
4.3.5	Dimensionamento do pavimento	97
4.4	EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL (RESTAURAÇÃO)	101
4.4.1	Estrutura proposta.....	103
4.4.2	Execução do primeiro subtrecho.....	104
4.4.3	Execução do segundo subtrecho	104
4.4.4	Execução do terceiro subtrecho.....	111
4.4.5	Execução do quarto subtrecho.....	115
4.4.6	Execução do quinto subtrecho	120
4.5	EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL (IMPLANTAÇÃO)	124
4.5.1	Estrutura proposta para o trecho	124
4.5.2	Execução do trecho	125
5	ESTUDOS PARAMÉTRICOS.....	129
5.1	PARÂMETROS INDEPENDENTES.....	130
5.2	PARÂMETROS ESTRUTURAIS DEPENDENTES	133
5.3	ESTUDO PARAMÉTRICO (IMPLANTAÇÃO)	134
5.4	ESTUDO PARAMÉTRICO (RESTAURAÇÃO)	140

6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	147
6.1	CARACTERIZAÇÃO DA BASE E DO SUBLEITO	148
6.2	AVALIAÇÃO FUNCIONAL - ESTADO DA SUPERFÍCIE	155
6.2.1	Trecho de restauração	155
6.2.2	Trecho de implantação	158
6.2.3	Acompanhamentos dos trechos	161
6.2.4	Recomendações construtivas	163
6.3	CONTROLE DEFLECTOMÉTRICO POR MEIO DE VIGA BENKELMAN	165
6.4	CONTROLE DEFLECTOMÉTRICO POR MEIO DE FWD	171
6.4.1	Retroanálise	178
6.4.1.1	Trecho de restauração	180
6.4.1.2	Trecho de Implantação	185
6.5	ANÁLISE MECANICISTA	187
6.5.1	Avaliação pelos métodos DNER-PRO-11/79 e PRO-269/94	191
6.5.2	Modelo proposto para CAUQ com tela de aço	195
6.5.3	Proposta de utilização da tela de aço como pavimento perpétuo	198
7	ANÁLISE ECONÔMICA	199
7.1	COMPOSIÇÃO DE PREÇO UNITÁRIO	199
7.2	MODELOS PARA EQUIVALÊNCIA DE ESPESSURAS	201
7.3	SOLUÇÕES ANALISADAS	202
7.4	VALORES INICIAIS PARA CONSTRUÇÃO	204
7.5	CUSTOS DE CONSERVAÇÃO	206
7.6	ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA	208
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	211
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	215
	APÊNDICE A - RETROANÁLISE DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS NO TRECHO EM RESTAURAÇÃO ANTES DAS OBRAS	222

APÊNDICE B - RETROANÁLISE DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS NO TRECHO EM RESTAURAÇÃO 2 ANOS APÓS O EXPERIMENTO	229
APÊNDICE C - RETROANÁLISE DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS NO TRECHO EM RESTAURAÇÃO 3 ANOS APÓS O EXPERIMENTO	240
APÊNDICE D - RETROANÁLISE DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS NO TRECHO EM IMPLANTAÇÃO 2 ANOS APÓS O EXPERIMENTO	251
APÊNDICE E - RETROANÁLISE DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS NO TRECHO EM IMPLANTAÇÃO 3 ANOS APÓS O EXPERIMENTO	254
APÊNDICE F - COMPOSIÇÃO DE PREÇO UNITÁRIO	257
APÊNDICE G - FLUXO DE CAIXA	258
ANEXO A - LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO	262

1 INTRODUÇÃO

A intensificação do fluxo de pessoas entre as diversas regiões do globo geraram a necessidade de modernizar, ampliar e de melhorar a malha rodoviária, ferroviária, portuária, aeroportuária e a rede de transporte urbano ao redor do mundo, tanto em questões técnicas como econômicas.

O transporte é uma atividade indispensável a todas as relações econômicas, ao intercâmbio entre os povos e principalmente ao comércio. No Brasil o modal mais utilizado é o rodoviário. Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (DNIT, 2015), o país possui uma malha viária de aproximadamente 1,8 milhões de km de rodovias, com apenas 213 mil km pavimentados (entre rodovias federais e estaduais).

Os inúmeros problemas enfrentados com o transporte estão intimamente relacionados à falta de planejamento estratégico das cidades em face do intenso crescimento da população urbana do país nas últimas décadas segundo Bernucci et al. (2006). A cada ano as estradas e aeroportos são expostas a um aumento não só do volume de tráfego, mas também das suas cargas correspondentes transportadas (REIS, 2009).

Tendo o Brasil em sua grande maioria, uma rede viária constituída por pavimentos flexíveis e sendo os orçamentos disponíveis para as novas construções e manutenção destas infraestruturas, cada vez mais limitados, acaba tornando-se necessária a sua construção com maior cuidado, sempre garantindo um desempenho adequado durante o ciclo de vida, quer em termos funcionais (segurança e conforto) quer em termos estruturais (FORTES e RESSUTTE, 2011).

É imprescindível que se atente para aspectos técnicos, econômicos, e de planejamento, de modo que as respostas sejam soluções competitivas tecnologicamente, duradouras, de custo total (inicial e final) atraente (DNIT, 2006).

Por motivos como estes, encontrados não apenas no Brasil, têm sido desenvolvidas investigações no sentido de implementar possíveis métodos de reforço dos pavimentos, sendo eles mais eficazes e econômicos.

Desde quando eclodiu a primeira grande crise do petróleo, em meados da década de 1970, procurou-se desenvolver novas opções para reforço de revestimentos asfálticos possibilitando melhoria contínua no desempenho estrutural, assim como, na redução de custos total do pavimento sempre prevendo a redução da espessura do revestimento ou visando o aumento da sua vida de serviço (BÜHLER, 2001).

A escolha do tipo de reforço a ser adotado depende do estado em que se encontra o pavimento, ao nível do estado estrutural e funcional e ao nível de qualidade que se pretende atingir. Segundo Fortes e Merighi (2010), as principais causas de degradação dos pavimentos flexíveis são as deformações permanentes e o aparecimento de trincas.

A reflexão de trincas das camadas antigas do revestimento para a nova estrutura é um dos problemas mais comuns quando há a aplicação de um recapeamento de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ). Este tipo de problema acaba reduzindo a vida útil do pavimento, além disso, em muitos casos há um aumento da espessura de recapeamento para tentar retardar o surgimento das trincas o que acaba se tornando algo economicamente ineficaz (WICKERT, 2003).

A restauração de pavimentos trincados por meio de recapeamentos de concreto asfáltico convencional pode ser insuficiente quando o potencial para a reflexão das trincas do pavimento antigo é elevado. Este potencial tende a aumentar à medida que o tráfego se torna mais pesado, quanto maiores forem os movimentos horizontais de abertura e fechamento das trincas, quanto maiores forem a espessuras de recapeamento e quanto maior for a severidade das trincas existentes (WICKERT, 2003).

Para combater esses tipos de problemas tem-se observado a necessidade da correta avaliação da contribuição estrutural dos diferentes tipos de materiais no desempenho dos pavimentos.

Foi acompanhada a contribuição dos materiais tradicionalmente usados na pavimentação com base nos resultados obtidos na pista experimental da *American Association of State Highway Officials (AASHO)*, AASHO Road Test, no fim dos anos 50. O método do DNIT de dimensionamento de pavimentos flexíveis expõe esta contribuição através de coeficientes estruturais. (AASHTO MEPDG, 2008a; BÜHLER, 2007).

Nos últimos anos, diversos tipos de reforço de misturas asfálticas têm surgido como alternativa. Os reforços têm em geral grades de polímeros e tecidos, assim como fibra de vidro e aço. Como exemplo de soluções que possibilitem uma maior capacidade de suportar as cargas impostas ao pavimento, tem-se a introdução da tela de aço.

O uso combinado na pavimentação das camadas de solo, que tem melhor comportamento sob compressão e fraco desempenho à tração, e de materiais de reforço como a tela de aço, que possui bom comportamento à tração, sugere um número de situações nas quais a introdução da tela pode contribuir para o aperfeiçoamento de projetos rodoviários no desenvolvimento de novas aplicações.

A aplicação de reforço em pavimentos flexíveis com a tela de aço iniciou-se nos países do norte da Europa por volta de 1970. De acordo com *Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI)* (VTI, 2015), após a aplicação em algumas estradas foi reconhecido o potencial da tela de aço como reforço para pavimentos.

Dessa maneira, esta técnica originou o interesse de organizações criando investigações como, por exemplo, o projeto patrocinado pela União Europeia denominada *Reinforcement of Flexible Road Structures with Steel Fabrics to Prolong Service Life* (REFLEX).

Este projeto mostrou conclusões interessantes acerca das melhorias verificadas pela introdução da tela de aço como reforço, tendo como base casos práticos de estradas localizadas na Suécia, Finlândia e Itália, ajudando a definir diretrizes para o dimensionamento e execução de reforço de pavimentos recorrendo à tela de aço.

1.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa teve como objetivo o estudo de uma nova tecnologia para a reabilitação/recuperação de rodovias brasileiras, se utilizando da inserção de telas de aço soldadas na estrutura de revestimento asfáltico de maneira que a tela possa aumentar a vida útil da estrutura do pavimento.

Foi analisado o desempenho da utilização da tela de aço, baseada nas melhores práticas nacionais e internacionais, recorrendo à observação do seu comportamento em laboratório, trechos experimentais e ainda quanto à modelação numérica verificando o comportamento dos trechos experimentais entre os anos de 2013 e 2016. Estas avaliações foram realizadas por meio de levantamentos de parâmetros funcionais e estruturais do pavimento para analisar as características e o funcionamento mecânico do pavimento com a inserção da tela de aço.

Por fim, este trabalho também buscou estudar e avaliar os benefícios que a tecnologia da tela de aço apresentou para construção e reabilitação de pavimentos asfálticos que envolveram:

- Análise das etapas e dos processos para a construção do trecho experimental além de seu comportamento após liberação para o tráfego;
- Análise por meio de ensaios de módulo de resiliência e cálculos por retroanálise para verificação do efeito da inserção da tela de aço durante o período de levantamento em campo;
- Proposta que contribua para a definição de uma metodologia de dimensionamento de pavimentos asfálticos com a inserção de tela de aço considerando a faixa de valores de módulo de resiliência integrados com a tela e o fator de redução de deflexão estrutural (K) admissíveis para projetos de reforço conforme preconizado pelo método DNER-PRO 011/79 (DNER, 1979);

- Estudo de viabilidade técnica e econômica de uma estrutura para reabilitação de pavimentos e/ou para implantação de uma nova estrutura, comparado com estruturas com a inserção da tela de aço.

1.2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desta dissertação foi realizado um levantamento bibliográfico sobre a literatura específica nacional e internacional apresentando o estado de arte sobre o uso da tela de aço, como alternativa para reabilitação de pavimentos asfálticos.

Foram realizadas vistorias no trecho experimental existente nas instalações da fábrica da Gerdau próximo a cidade de Araçariguama-SP com o objetivo da verificação do comportamento da tela de aço, onde posteriormente foram estudadas as emendas da tela com o propósito de definir o melhor tipo da tela de aço a ser utilizado nos trechos experimentais rodoviários.

A partir deste primeiro diagnóstico foi feita uma análise junto ao Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP), buscando uma rodovia onde fosse possível aplicar a tela de aço. Após análise, os dados observados foram comparados à revisão conceitual quanto à necessidade da aplicação da tela.

Adotou-se o estudo de caso como estratégia de pesquisa, objetivando aplicar a tela de aço em uma rodovia onde já estivesse com as obras em andamento. Foram definidos dois trechos experimentais na Rodovia Edgard Máximo Zamboto (SP-354) próximo à cidade de Campo Limpo Paulista. O primeiro trecho do km 60,40 ao km 60,80 para restauração da pista e o km 68 para implantação de uma nova estrutura devido ao elevado tráfego de veículos comerciais.

Foram realizados levantamentos da condição estrutural da rodovia por meio do equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Com os dados obtidos do levantamento foi possível realizar retroanálise das bacias deflectométricas para determinação do módulo de resiliência da mistura asfáltica incorporada à tela de aço.

O módulo de resiliência da camada de fundação obtido por meio de retroanálise através do programa computacional *Backcalculation of Federal Aviation Administration* (BAKFAA) foi comparado com os resultados obtidos em ensaios com corpos de prova oriundos de cavas de inspeção do trecho experimental, com o propósito de se obter uma melhor acurácia entre os valores encontrados.

Para melhor entendimento do comportamento da tela de aço incorporada na camada asfáltica, em compasso com a retroanálise, foi realizado um estudo paramétrico possibilitando entender a resposta mecânica da estrutura do pavimento, verificando seu comportamento estrutural e deflectométrico envolvendo simulações de estruturas compostas com módulos elevados¹.

Foi realizado o controle tecnológico de qualidade na execução e monitoramento do desempenho da tela de aço além de ensaios de laboratório e de campo para averiguação do comportamento da tela.

Posteriormente optou-se por efetuar simplificada a análise estrutural do pavimento do trecho experimental com o modelo de múltiplas camadas com comportamento elástico linear. Todos os cálculos foram realizados com o programa *Elastic Layered System Model 5* (ELSYM-5), com a finalidade de calibrar e validar a qualidade dos resultados obtidos nos ensaios de carga.

Por fim foi quantificada a eficiência da utilização de pavimento reforçado com tela de aço com base nos experimentos de laboratório e nas observações de campo onde foi possível demonstrar que a utilização da tela de aço em pavimentos asfálticos pode aumentar significativamente o número de solicitações a que o pavimento resiste.

Para finalidade de comparação, após a comprovação do benefício do aumento da vida útil do pavimento flexível através da inserção da tela de aço, foi realizado um estudo de viabilidade técnica e econômica, demonstrando que a incorporação da tela de aço em pavimentos flexíveis é uma alternativa competente, racional, e eficaz técnica e economicamente.

¹ Foi verificado através da retroanálise, que a incorporação da tela de aço no pavimento asfáltico, elevou o módulo resiliência para valores superiores quando comparado ao CAUQ tradicional.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Com a finalidade de alcançar o objetivo proposto, foram efetuadas pesquisas bibliográficas pertinentes ao conhecimento da tecnologia da tela de aço, com o propósito de analisar o seu comportamento. Sendo assim, esta dissertação é constituída de oito capítulos, com seus demais anexos e apêndices.

O primeiro capítulo traz a introdução ao tema da tela de aço, apresentando a tecnologia, seus benefícios e os estudos que estão sendo realizados em outros países. A introdução também apresenta a definição dos principais objetivos a serem alcançados e a metodologia adotada.

O segundo capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre o conceito do trincamento em pavimentos flexíveis, apresentando as causas e classificação dos trincamentos além de dar enfoque ao conceito da fadiga em camadas asfálticas e o conceito sobre a reflexão de trincas.

O terceiro capítulo remete à revisão bibliográfica sobre o tema da pesquisa definido, percorrendo sobre os fundamentos da tela de aço soldada considerando conceitos, metodologia, dimensionamento, resultados e seus principais benefícios, além de, expor experiências realizadas tanto no exterior como uma experiência nacional.

O quarto capítulo discorre sobre o estudo de emendas nas telas de aço a partir da análise do trecho experimental na fábrica da Gerdau, abordando a construção do trecho experimental com a utilização da tela de aço na Rodovia SP-354, mencionando as características construtivas, os detalhes de execução da tela aplicados no trecho em restauração e em implantação, além de, apresentar a concepção do projeto original da Rodovia e considerações mecanicistas sobre a estrutura implantada.

O quinto capítulo aborda o estudo paramétrico, apresentando as metodologias utilizadas nos estudos realizados por meio de simulação computacional de pavimentos flexíveis sob carregamento rodoviário, bem como apresenta os resultados obtidos e as regressões realizadas.

O sexto capítulo aborda a análise dos resultados referentes à metodologia aplicada nos levantamentos de campo nas campanhas deflectométricas, levantamentos funcionais, ensaios de caracterização dos solos do subleito e base do pavimento, quanto ao levantamento pluviométrico mensal ao longo do período de estudos, a retroanálise e análise mecanicista, além de apresentar uma proposta de um novo coeficiente estrutural para pavimentos flexíveis com inserção da tela de aço.

O sétimo capítulo apresenta um estudo de viabilidade técnico econômica com a comparação, entre estruturas com a inserção da tela de aço e outras sem a utilização da mesma, comprovando o seu benefício econômico na estrutura do pavimento flexível através da inserção da tela.

O oitavo capítulo sintetiza as etapas do presente estudo apresentando as conclusões finais acerca do tema abordado com resultados de laboratório e campo. Neste capítulo também são discutidos e analisados os resultados com indicação das limitações do estudo e propondo recomendações para futuros trabalhos.

2 TRINCAS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

No decorrer da vida de serviço de um pavimento pode ocorrer o aparecimento de trincas na superfície da camada asfáltica. Este tipo de degradação surge como uma microfissura que no decorrer do tempo, cresce e se interliga formando assim a trinca. Os recursos financeiros para os trabalhos de manutenção, com o propósito de inibir o surgimento desta patologia, são normalmente limitados e insuficientes para manter as estradas em um padrão de qualidade mínimo (ALVES, 2007).

As trincas existentes no revestimento asfáltico tem origem, na maioria das vezes, devido à ruptura por fadiga, que pela ação das cargas de tráfego, sofreu deslocamento alternado e repetido. Os defeitos na camada asfáltica podem surgir a curto, médio e longo prazo. A velocidade de aparecimento dos defeitos vai depender de diversos fatores, tais como: deficiências de projeto, problemas de construção, materiais de baixa qualidade, ausência de conservação e efeito da deterioração por fadiga (ANTE, 2012; BERNUCCI et al., 2006; MOLENAAR, 1993).

Conforme DNIT (2006) quando constatado em pequena porcentagem de área, o trincamento não coloca em risco o conforto e a segurança dos usuários da via, no entanto o trincamento pode progredir devido à infiltração de umidade, o que enfraquece a área do revestimento trincado originando defeitos mais severos, além de proporcionar a entrada de água nas camadas inferiores ocasionando afundamentos localizados.

Quando esses defeitos alcançam este tipo de severidade e extensão, deve-se intervir no pavimento de forma a restaurar as condições de serviço. Para selecionar a melhor tática de conservação, uma avaliação planejada que envolva um levantamento de dados climáticos, estudo de tráfego, mapas geológicos, pedológicos e geotécnicos e a avaliação estrutural das condições do pavimento precisa ser realizada (BÜHLER, 2001; COLOMBIER, 1989).

Os desajustamentos na seleção da melhor opção de conservação rodoviária podem causar novos defeitos no pavimento como a falta de revestimento asfáltico devido ao incorreto cálculo da espessura de reforço e o lançamento do mesmo de rigidez inadequada, sobre pavimento muito deteriorado, possibilitando a reflexão das trincas além de permitir a entrada de água na estrutura do pavimento (BERNUCCI et al., 2006).

2.1 CAUSAS E CLASSIFICAÇÃO DO TRINCAMENTO

As possíveis causas para o surgimento de trincas em pavimentos asfálticos segundo Colombier (1989) são:

- **Processo de Fadiga:** ocasionado pela passagem repetida das cargas dos veículos, causando a ruptura da camada após determinado número de ciclos;
- **Variação Térmica:** misturas asfálticas apresentam um comportamento frágil, e as trincas se propagam relativamente rápido;
- **Movimentação do Subleito:** provocado por fenômenos como aumento de umidade, recalques, escorregamento, retração hidráulica e expansão;
- **Defeitos na construção:** causado pela má execução de juntas longitudinais assim como pelo não travamento entre as camadas de revestimento (CAUQ).

Uma das principais origens do trincamento em pavimentos brasileiros é o fenômeno da fadiga, devido a maior parte do território brasileiro não registrar fortes variações térmicas como em países de clima temperado. O trincamento por reflexão é continuidade do processo de fadiga, com diferença de que o novo revestimento é sobreposto à camada asfáltica envelhecida e trincada, com função de aumentar a vida útil do pavimento, mas que fica sujeita à concentração de tensões nas trincas existentes na camada antiga (BASTOS, 2010).

Existem basicamente três etapas que decorrem da propagação de trincas e cada uma delas conta com um mecanismo diferente, dependendo do tipo de solicitação

atuante na camada de revestimento é, em geral, um resultado de três etapas, com mecanismos diferentes como ilustra a Figura 2.1:

- 1) Início do trincamento (Figura 2.1a);
- 2) Propagação estável da trinca (Figura 2.1b);
- 3) Propagação instável da trinca, onde ela aparece e se propaga até a superfície (Figura 2.1c).

Figura 2.1 - Etapas do Trincamento. Fonte: Vilchez (1996).

Fundamentado na Mecânica da Fratura a evolução do surgimento das trincas pode ser representada por três movimentos cinemáticos independentes impostos às faces das trincas, denominados respectivamente de modos I, II e III de carregamento ou propagação de trincas. Rodrigues (1991) mostrou que cada um dos movimentos da trinca é associado a um campo de tensões na vizinhança imediata da extremidade da trinca. Assim, o Modo I é gerado pelas tensões normais de tração, que tendem a abrir a trinca, enquanto que os Modos II e III são ocasionados por tensões cisalhantes no plano da trinca. Os três tipos de movimentos são: abertura, cisalhamento e rasgamento conforme apresentado na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Movimentações possíveis de uma trinca. Fonte: adaptado de O'Dowd (1996).

- **Modo 1:** o aparecimento da trinca é provocado pela retração térmica ou por ressecamento do ligante hidráulico, ou também por tensões normais de tração sob o centro de uma carga de roda, que tendem a abrir a trinca;
- **Modo 2:** tem a abertura da trinca provocada por cisalhamento da camada sob efeito de uma carga de roda, que ocorre quando o bordo da área carregada do pneu se encontra na direção do plano da trinca;
- **Modo 3:** o rasgamento da extremidade da trinca por solicitações de carga de roda, ocorre em trincas que já atravessaram a espessura da camada asfáltica e quando a carga de roda se encontra de forma assimétrica em apenas um dos lados da trinca, forçando um rasgamento da trinca em seu plano (CORREIA, 2010).

Existem diversas formas de se classificar o trincamento, tanto em função do tipo da trinca, de sua extensão, intensidade ou quanto à severidade. As trincas podem estar configuradas de maneira isolada ou interligadas (COLOMBIER, 1989). A norma DNIT 005/2003 TER (DNIT, 2003b), apresenta a seguinte definição para o defeito chamado de fenda em pavimentos flexíveis: “Qualquer descontinuidade na superfície do pavimento, que conduza a aberturas de menor ou maior porte, apresentando-se sob diversas formas [...]”.

As formas mencionadas na norma são classificadas em fissuras e trincas, sendo as fissuras aquelas de largura capilar, somente perceptível à vista desarmada a uma distância inferior a 1,50 m, que não originem problemas funcionais ao pavimento e as trincas, fendas facilmente visíveis, podendo-se apresentar sob a forma isolada ou interligada (ANTE, 2012; BASTOS, 2010; WICKERT, 2003).

As trincas podem apresentar diversas configurações sendo trincas isoladas ou interligadas. As isoladas podem configurar-se em longitudinais, transversais e um tipo raro, as oblíquas. As interligadas dividem-se em trincas tipo bloco ou couro de jacaré. A Figura 2.3 ilustra os principais tipos de trincas citados.

Figura 2.3 - Tipos de trincas: (a) longitudinal, (b) transversal, (c) oblíqua, (d) bloco e (e) couro de jacaré. Fonte: adaptado de Vilchez (1996).

As trincas do tipo bloco e as transversais aparecem, usualmente, devido a efeitos climáticos, onde é conhecido que há o trincamento dos pavimentos asfálticos por fadiga devido às baixas temperaturas em regiões de clima frio.

O mais provável indicado por Molenaar (1993) é que as trincas longitudinais nas trilhas de roda sejam decorrentes das cargas do tráfego, e que as forças cisalhantes horizontais sob os pneus estáticos ou em movimento sejam responsáveis pela elevada deformação e tensão de tração na superfície do pavimento. Esta deformação ocorre próximo aos bordos do pneu e produz a trinca longitudinal (VILCHEZ, 1996).

As deformações na superfície do pavimento e as tensões de tração que são provocadas pelas cargas do tráfego devido às forças horizontais de cisalhamento, fazem surgir às trincas. Estas trincas, de modo 3 de trincamento (rasgamento) se propagam na direção longitudinal do pavimento devido a estes efeitos.

As trincas tipo couro de jacaré são normalmente atribuídas à fadiga do pavimento. Na restauração de pavimentos flexíveis, cujo mecanismo de ruptura está associado a trincas por fadiga, a reflexão de trincas existentes para a nova camada a ser construída é um dos principais problemas a ser considerado (CORREIA, 2010; MOLENAAR et al., 1989; VILCHEZ, 1996; WICKERT, 2003).

2.2 TRINCAMENTO POR FADIGA

Segundo Pinto (1991) o fenômeno da fadiga é um processo de mudança estrutural permanente que sofre um material, quando submetido a um determinado número de ciclos, desta maneira, a ruptura por fadiga é a deterioração do material quando solicitado repetidamente por um carregamento. Quando ocorrem estes movimentos, surgem tensões de tração na fibra inferior da camada asfáltica, levando ao aparecimento de trincas no revestimento (BERNUCCI et al., 2006; CORREIA, 2010; RODRIGUES, 1991).

De acordo com a ASTM D7460-10 (ASTM, 2010) o processo de fadiga é definido quanto à mudança permanente estrutural, localizada e progressiva, que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis e que produzem as fissuras que conduzem à ruptura, após um determinado número de ciclos (ANTE, 2012).

A vida de fadiga pode ser definida em pavimentos asfálticos com a intensidade de tráfego, representado pela quantidade de eixos padrões, que a estrutura pode suportar antes do seu rompimento. O grau de tolerância a danos por fadiga pode variar, dependendo das cargas de tráfego de projeto (ANTE, 2012; BABURAMANI, 1999).

Foi mencionado por Bühler (2001) que o início do fissuramento ocorre durante uma pequena fração da vida de fadiga total, enquanto que o crescimento estável da trinca ocuparia uma grande parte. Devido à presença de microfissuras intrínsecas ao material, é plausível se esperar o início de uma trinca nos primeiros ciclos de aplicação de carga em composições heterogêneas como os materiais asfálticos. Logo, a distribuição estatística de tais descontinuidades internas poderia fatalmente explicar as variações estatísticas na vida de fadiga.

Segundo Ante (2012), são consideradas quatro causas principais para o início do processo de fadiga. As mesmas são:

- Vazios iniciais elevados em misturas asfálticas que podem gerar um envelhecimento prematuro do asfalto, devido ao dano gerado pela ação combinada do tráfego e pelo clima;
- Presença de fissuras iniciais nos materiais que ocorrem pela compactação da mistura com viscosidade reduzida por causa da diminuição da temperatura;
- Deformação plástica excessiva, devido às características reológicas do ligante asfáltico, sendo importante a escolha do ligante em função das características climáticas onde irá ser utilizado;
- Ocorrências de zonas de concentração de tensões na superfície (como ranhuras e sulcos) constituem fator de deterioração para o comportamento à fadiga dos materiais, quando sujeitos a esforços de tração (BALBO, 2007).

A fadiga ocorre em três estágios em uma estrutura sujeita a carregamento cíclico, convencionalmente onde podem ser diferenciados durante um processo de fadiga, conforme ilustra a Figura 2.4.

Figura 2.4 - Estágios existentes num processo de fadiga. Fonte: Bernucci et al. (2006).

A caracterização da fadiga em misturas asfálticas tem sido executada em laboratório com o auxílio de equações, onde a vida de fadiga (N_f) é relacionada às deformações horizontais de tração, (ϵ_t), ou seja, para materiais asfálticos existem dois tipos

principais de ensaios: deformação ou tensão controlada. No entanto, qualquer que seja o método de ensaio, vale a seguinte Equação (2.1) conforme a especificação DER/SP IP-DE-P00/001 (DER/SP, 2006b):

$$N = K \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^n \quad (2.1)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão de 80 kN;

ε_t = deformação específica horizontal na tração;

K e n = coeficientes determinados por regressões lineares, particulares para cada tipo de mistura asfáltica e modificados para refletir o desempenho no campo.

Como os parâmetros K e n das equações variam com o tipo de ensaio e condições de fronteira, eles não podem ser avaliados como constantes verdadeiras do material. A vantagem desses modelos de fadiga, além do controle das condições em que se realiza o ensaio, é permitir a avaliação quantitativa dos efeitos que a variação nas propriedades da mistura tem na vida de fadiga (BÜHLER, 2001).

2.3 TRINCAMENTO POR REFLEXÃO

O fenômeno da reflexão de trincas ocorre, principalmente, em circunstâncias de restauração de pavimentos onde a nova camada de revestimento asfáltico é sobreposta a uma camada antiga que apresenta trincas em sua superfície, ocasionando a propagação destas patologias para a superfície do pavimento íntegro.

Este episódio faz com que a resistência estrutural decresça, permitindo a entrada da água, aumentando gradualmente a quantidade de trincas, intensidade e severidade de cada uma delas em função da combinação de fatores internos e externos (fadiga, tráfego, clima, entre outros), além de acelerar o processo de deterioração do pavimento e consequentemente aumentar os custos para sua conservação (BALBO, 2007; BERNUCCI et al., 2006; SUZUKI et al., 2013).

Um pavimento restaurado com uma nova camada de revestimento apresenta diferentes regiões com reduzida capacidade de resistir aos esforços de tráfego, uma vez que o dimensionamento desta nova camada asfáltica é realizado considerando como critério de ruína o aparecimento de trincas por fadiga nas misturas asfálticas e o aparecimento de deformações permanentes na zona de compressão dos veículos comerciais, não sendo habitual a consideração do critério da reflexão de trincas no dimensionamento (BASTOS, 2010; PAIS & PEREIRA, 1999).

A ocorrência do trincamento por reflexão está relacionada à incapacidade das misturas asfálticas suportarem elevadas concentrações de tensões e deformações a que são submetidas, pelos movimentos diferenciais, nas direções horizontal e vertical quando da passagem das cargas ou em decorrência de movimentações de natureza térmica (BASTOS, 2010).

Uma trinca subjacente a uma camada asfáltica pode atuar de duas formas independentes para provocar a sua reflexão sendo inicialmente que existe uma ligação admissível entre uma camada de reforço e o pavimento existente, onde ocorrerá a concentração de tensões na região da extremidade da trinca, provocando a abertura de nova trinca por fadiga na camada de reforço.

Mesmo que tal concentração não ocorra, a deflexão máxima sob a roda se dará na posição da trinca, fazendo as tensões máximas de tração sob o reforço ocorrerem neste ponto, tornando-o o lugar mais provável para o surgimento e propagação de trincas, como efeito indireto da trinca existente (RODRIGUES, 1991).

As variações de temperatura e as cargas do tráfego que ocasionaram o aparecimento de trincamento na camada deteriorada do pavimento atuarão no sentido de causar a reflexão através da camada de reforço. Quando as cargas do tráfego incidem sobre o pavimento deteriorado repetidas vezes, três pulsos de alta concentração de tensões ocorrem na extremidade da trinca, a qual progredirá através da camada de reforço, como é apresentado na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Mecanismo da reflexão de trincas. Fonte: Monismith e Coetzee (1980).

O mecanismo da reflexão de trincas pode ocorrer devido a um descolamento da camada de revestimento asfáltico em relação à camada trincada subjacente, o que leva a desenvolvimento horizontal das trincas até seu redirecionamento vertical.

Quando existe uma ligação entre as camadas de revestimento, considerada perfeita, a propagação será vertical desde o início, pelo fato de ocorrer um agrupamento de tensões na região da extremidade da trinca, o que provoca a abertura de uma nova trinca por fadiga na camada de reforço. Considera-se, logo, que a maioria das trincas geradas em trilhas de rodas decorre do próprio tráfego (MONISMITH e COETZEE, 1980; VILCHEZ, 2002).

O reaparecimento das trincas subjacentes na superfície da camada asfáltica de recapeamento se deve à incapacidade que o concreto asfáltico convencional tem de resistir às tensões de tração elevadas que são geradas em torno da extremidade das trincas (RODRIGUES, 1991).

É importante destacar que a medida de reparo a ser utilizada para controle da reflexão de trincas faz parte de uma análise integral, em razão de que a resistência à propagação de trincas envolve todos os componentes da estrutura do pavimento. Inúmeras soluções têm sido propostas de forma a controlar esses mecanismos de deterioração atuantes em pavimentos asfálticos. Como este trabalho propõe uma análise quanto à utilização de telas de aço soldadas como solução de reforço, cabe esclarecer a atuação das mesmas como mecanismo de reabilitação.

3 TELAS DE AÇO EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

A degradação dos pavimentos flexíveis esta usualmente coligada ao aumento do tráfego, aumento das cargas dos veículos, temperatura etc. Os recursos financeiros para os trabalhos de manutenção são normalmente limitados e insuficientes para manter as estradas em um padrão de qualidade mínimo (ALVES, 2007).

A restauração de pavimentos flexíveis propõe prolongar a vida útil da camada de revestimento, assim como, à estrutura do pavimento tornando-o novamente seguro e confortável aos seus usuários (CORREIA, 2010; RODRIGUES, 1991).

A ideia de reforçar o pavimento, ou seja, de reduzir a atuação dos esforços principalmente nas camadas asfálticas do pavimento, com o intuito de minimizar a ação do principal mecanismo de deterioração nos pavimentos, o trincamento por fadiga, vem se desenvolvendo há várias décadas através de pesquisas e a avaliação de trechos experimentais (BÜHLER, 2001).

Deste modo, o recurso ao reforço para aplicação em novos pavimentos ou reabilitação de pavimentos existentes deve ser concebido com o intuito de aumentar o tempo de vida útil dos pavimentos (REIS, 2009).

A utilização da tela de aço como reforço de pavimentos flexíveis, em geral, segundo Asphalt Academy (2008), tem como objetivo aperfeiçoar as estradas conferindo ao pavimento um claro benefício relativo a uma ou mais características essencialmente de natureza estrutural aumentando o seu tempo de vida útil de forma que haja um gasto de recursos naturais menor, além de se tornar uma estrutura mais econômica.

A aplicação da tela de aço é recomendada no reforço de camadas betuminosas com vista, essencialmente, ao controle de assentamentos diferenciais e ao aumento da capacidade de carga do pavimento. Trabalhos de investigação na Finlândia e Suécia têm demonstrado que o reforço de pavimentos flexíveis com telas de aço é uma técnica construtiva econômica para prevenir o aparecimento de trincas longitudinais (RATHMAYER & KORKIALA-TANTTU, 2002).

Os estudos experimentais realizados em estradas e laboratório mostraram também que a aplicação da tela de aço nos pavimentos flexíveis durante a sua construção e reabilitação conferia às rodovias benefícios como o aumento da capacidade de suporte, aumento da resistência ao aparecimento de trincas e diminuição do risco de aparição de trincas nas camadas de reforço por reflexão (COST, 2006).

Desde meados dos anos 80 que países europeus como Islândia, Itália, Suécia, entre outros, tem adotado nas suas estradas as telas de aço. Na grande maioria dos casos os danos observados nas estradas eram trincas devido a infiltrações de água nas microfissuras dos pavimentos, que com as baixas temperaturas se solidificava aumentando de volume e, conseqüentemente, aumentava as dimensões das trincas (HALONEN et al. , 2000).

Muitos dos casos conhecidos têm ainda um contexto de investigação científica apoiada em estudos experimentais de acordo com Reis (2009), no entanto, tem sido observado ao longo dos anos nas experiências realizadas em rodovias existentes e em laboratório, que o problema mais sensível destes pavimentos é precisamente na interface entre o CAUQ e a tela.

3.1 UTILIZAÇÃO DA TELA DE AÇO

Dentro do escopo de pavimentação asfáltica, é utilizada como reforço estrutural a inserção das telas de aço soldadas, possibilitando, dessa forma, um acréscimo na vida de serviço do pavimento. Tanto podem ser inseridas em uma nova camada de recapeamento asfáltico como utilizadas na construção de novos pavimentos (BÜHLER, 2007; REFLEX, 2002a).

As telas de aço geralmente são utilizadas em pavimentos flexíveis, mas também podem ser utilizadas em pavimentos semirrígidos, invertidos e rígidos. O tipo de estrutura não é um limitante à utilização do reforço, mas trata-se de um condicionante à decisão do correto posicionamento da tela na estrutura (BÜHLER, 2007).

Com base em experiências realizadas em algumas das principais rodovias de Helsinki na Finlândia, Valtanen e Vehmas (1996) relataram que o reforço estrutural com grelha metálica em recapeamento asfáltico sobre placas de concreto deterioradas, apresentou desempenho satisfatório (BÜHLER, 2001). A Tabela 3.1 mostra alguns dos locais onde foi realizado algum tipo de experimento utilizando tela de aço.

Tabela 3.1 - Obras de reforço executadas com tela metálica. Fonte: adaptado de BÜHLER (2001).

País	Projeto	Execução	Quantidade (m²)	Trechos Especiais
Alemanha	Asfalto	1994/1998	128.440	Recapeamento sobre concreto
Alemanha	Concreto	1994/1997	10.595	-
Áustria	Asfalto	1998	11.200	-
Bélgica	Asfalto	1990/1998	394.525	Recapeamento sobre concreto
Bélgica	Concreto	1990/1998	688.470	Ponte
Bósnia	Asfalto	1997/1998	85.800	-
Dinamarca	Asfalto	1995	1.995	-
Espanha	Asfalto	1998	5.156	-
França	Asfalto	1998	14.135	-
Holanda	Asfalto	1982/1998	933.530	Reconstrução
Hungria	Asfalto	1994	500	Acessos a rodovias
Irlanda	Asfalto	1997/1998	105.026	-
Irlanda	Concreto	1997/1998	39.800	-
Itália	Asfalto	1992/1997	38.550	Pátio de embarque
Portugal	Asfalto	1993/1997	19.750	-
Reino Unido	Asfalto	1991/1998	110.490	-
Reino Unido	Concreto	1991/1998	24.025	-
República Tcheca	Asfalto	1998	1.050	Paradas de ônibus
Suíça	Asfalto	1996/1997	14.900	Pátio de indústrias
Suíça	Concreto	1996/1997	1.000	-

Foram realizados alguns estudos por Van de Griend e Hendriks (1989) com o propósito de verificar a utilização da tela de aço como uma camada de anti-reflexão de trincas. Os estudos demonstraram que a propagação das trincas é mais lenta em camadas intermediárias com a inserção da tela de aço.

Outros estudos realizados por Molennar et al. (1989), apresentam resultados nos quais placas reforçadas com a tela de aço apresentaram melhor desempenho quando comparadas com a reflexão de trincas em placas sem reforço.

As telas de aço podem ser utilizadas nas situações que seguem abaixo:

- Em trechos com grandes inclinações longitudinais (trecho em serra);
- Em trechos localizados com trincamento muito severo;
- Em duplicação ou alargamento de rodovias;
- Em afundamentos em trilha de roda;
- Como reforço de sub-base;
- Em aeródromos (pista de pouso, táxi).

Segundo Rathmayer et al. (2002) e COST (2006), vários casos conhecidos do estudo da tela de aço, ainda tem um contexto de pesquisa científica apoiada em estudos experimentais. Abaixo se encontram algumas observações que foram consideradas em diversos estudos acerca do reforço de pavimentos com telas de aço, sendo algumas considerações importantes do ponto de vista construtivo (ALVES, 2007; HALONEN et al. , 2000; REFLEX, 2002a; SPENS, 2009).

- a) A aplicação da tela de aço na parte superior do pavimento apresenta mais vantagens na perspectiva de redução da formação de trilhas de roda e de combate ao aparecimento de trincas; por sua vez, a colocação da tela de aço na parte inferior do pavimento (entre a camada de base e revestimento) é mais indicada ao aumento da capacidade de carga;
- b) A instalação da tela de aço deve ser feita no sentido longitudinal e os seus extremos devem ter uma sobreposição adequada; a largura da malha deve ser definida em função da largura da via, de modo a minimizar as juntas;

- c) Recomenda-se a aplicação de malhas de aço constituídas por barras de aço com diâmetro de 5 a 6 mm sendo o espaçamento entre as barras de pelo menos, cinco vezes a dimensão máxima do agregado do material onde está colocada a tela de aço;
- d) Na colocação da tela e posterior espalhamento da mistura asfáltica, deve se evitar forças horizontais originadas pela travagem, aceleração ou mudança de direção dos veículos de obra;
- e) A compactação das misturas asfálticas, onde foi aplicada tela de aço, deve ser realizada com cilindros de pneus.

3.2 PROCESSO DE INSTALAÇÃO

Devem ser analisados minuciosamente alguns fatores com o propósito de não comprometer o desempenho da tela metálica. Os cuidados na fase instalação do reforço representam a chave para o bom desempenho do mesmo. Muitas dificuldades encontradas com sistemas de interface foram esclarecidas pelo detalhamento do processo de instalação, com base nos estudos realizados no exterior através das investigações do projeto REFLEX (REFLEX, 1999 e 2002b).

Um dos maiores problemas dos revestimentos reforçados com telas de aço são a aderência e as juntas de construção. Quando a tela metálica é utilizada como reforço entre camada antiga e nova do pavimento, com a intenção de diminuir a reflexão de trincas, é importante avaliar a aderência que existe entre esses materiais (ANTE, 2012).

Quando não há uma boa aderência do material com a tela metálica, ocorre o deslocamento da mistura asfáltica, especialmente em zonas de descida ou de frenagem dos veículos, o que reduz a capacidade funcional do revestimento. Outro problema do uso da tela metálica pode ocorrer nas juntas, em decorrência do aparecimento de trincas longitudinais ou transversais. Os itens a seguir são alguns, dos que devem ser levados em consideração para a instalação da tela de aço, a fim de evitar os problemas mencionados (REFLEX, 2002a; SPENS, 2009):

- a) Se a superfície do pavimento possui trilhas de rodas ou outro tipo de irregularidade, estes devem ser nivelados antes da inserção das telas. A superfície subjacente também deve ser firme e estável;
- b) Antes do posicionamento da tela de aço sobre a camada asfáltica muito deteriorada, a superfície deve estar nivelada evitando a compactação inadequada do reforço, o que ocasiona o surgimento prematuro de trincas e irregularidade longitudinal;
- c) As telas de aço devem ser entregues por guindaste ou empilhadeiras assim como o seu manuseamento em campo deve ser feito por estes equipamentos, com o propósito de eliminar dobras das telas (Figura 3.1);

Figura 3.1 - Método de manuseamento da tela de aço em campo. Fonte: REFLEX (2002a).

- d) Verificar se a extremidade livre da tela não está dobrada para cima. Se assim for, ela tem de ser imediatamente dobrada para a posição correta;
- e) A quantidade de asfalto disposto na tela pelo maquinário não deve ser muito abundante, pois isso pode fazer com que a tela sobressaia do revestimento;
- f) Na pavimentação das camadas asfálticas, a tela de aço deve ser disposta na direção da vibro-acabadora com o propósito de haver a sobreposição do último tecido sobre o anterior. Isto irá facilitar o livre deslizamento da tela de aço em frente ao maquinário (Figura 3.2);

Figura 3.2 - Disposição da tela de aço. Fonte: REFLEX (2002a).

- g) Deve-se evitar a movimentação da tela pela passagem da vibro-acabadora durante a aplicação da camada de recapeamento. Caso haja movimentação da tela no interior da camada asfáltica o serviço deve ser interrompido;
- h) Em juntas transversais em camadas asfálticas, à sobreposição entre as telas de aço deve ser cerca de 270 mm nas articulações (Figura 3.3). Em camadas não aderidas, a articulação fica separada sem sobreposição (Figura 3.4);
- i) Não deverá ser passado o rolo compactador sobre a tela de aço antes da pavimentação das mesmas, caso contrário, fará com que a tela seja danificada;
- j) Deve se evitar juntas longitudinais (no sentido da rodovia) entre as telas de aço;

Figura 3.3 - Sobreposição entre telas de aço. Fonte: REFLEX (2002a).

Figura 3.4 - Separação das tela de aço sem articulações. Fonte: REFLEX (2002a).

- k) Evitar girar as rodas da vibro-acabadora, assim como, ambas as rodas devem estar sincronizadas. Isso deve ser evitado para que não haja movimentação da tela de aço e evitando que a mesma possa dobrar;
- l) Durante o processo de pavimentação, duas pessoas devem caminhar ao lado da vibro-acabadora (uma de cada lado) verificando se as telas estão sendo compactadas e pressionando-as para baixo caso seja necessário;
- m) Deverá ser realizada uma inspeção após a pavimentação asfáltica na tela de aço para verificar se toda a tela foi coberta pela camada asfáltica.

Um ponto de bastante importância na utilização da tela metálica é o processo de fixação da mesma no revestimento. O posicionamento da referida tela influencia diretamente em seu desempenho e condiciona seu mecanismo de atuação, sendo esta etapa a mais relevante quanto à parte técnica, pois a condição do pavimento antigo condiciona a capacidade de suporte que os grampos e/ou pregos podem transferir à tela (BÜHLER, 2007).

Como alternativa de minimizar os danos na fixação do reforço no pavimento foi testada a aplicação de uma camada de lama asfáltica (DER/SP ET-DE-P00/024) (DER/SP, 2006a) sobre a tela metálica. As vantagens deste sistema em relação à fixação por grampos são:

- a) Fácil utilização e viabilidade econômica já que garante melhor produtividade e eficiência;

- b) Proporciona uma melhor e mais homogênea ligação com o pavimento existente;
- c) Forma uma camada menos permeável;
- d) Possibilita a redução da espessura da camada asfáltica de recobrimento em até 1 cm, a espessura mínima requerida passa de 6 cm para 5 cm;
- e) Aumenta o potencial de fresagem e reciclagem, já que se sabe a correta posição da grelha no interior da camada.

Após a fixação do reforço metálico, é executada uma pintura de ligação, geralmente com emulsão asfáltica de ruptura rápida (RR-2C), com taxa residual de 0,5 kg/m², sendo que sua definição é dependente da condição do pavimento existente. Como etapa final do serviço tem-se a execução do recapeamento asfáltico. A Tabela 3.2 apresenta um breve resumo do processo de instalação da tela metálica.

Tabela 3.2 - Resumo do processo de instalação da tela de aço. Fonte: adaptado de BÜHLER (2007).

Etapas	Tela de aço	
	Grampos	Lama asfáltica
1	Limpeza ou Fresa	Limpeza ou Fresa
2	Tela metálica	Pintura de ligação
3	Fixação (grampos)	Tela metálica
4	Pintura de ligação	Lama asfáltica
5	Recapeamento	Recapeamento

Durante a conservação ou restauração de uma camada asfáltica pode ser necessária à remoção de parte do pavimento existente por intermédio de fresadoras. De acordo com Bühler (2007), REFLEX (2002a) e SPENS (2009) foram realizadas avaliações sobre a possibilidade da fresagem e reciclagem de um pavimento reforçado com tela de aço. Testes realizados mostraram que, a fresagem geralmente é uma alternativa possível em camadas asfálticas reforçadas, mas, por outro, deve ser avaliada a conveniência da utilização do material moído como material de construção da nova camada reciclada.

Diferentes materiais foram utilizados em algumas seções testes, com o intuito de estimar o potencial de reciclagem com a inserção de telas metálicas. Nos experimentos o reforço metálico foi envolvido em lama asfáltica com uma espessura de 6 cm. Deste teste, algumas observações puderam ser feitas (ANTE, 2012):

- Devido à alta resistência do aço, não é recomendado cortar a tela, sob o risco de prejudicar a fresadora e reduzir a eficiência do processo;
- Deve-se nivelar a superfície 1 cm acima da tela, sem atingi-la;
- Não há qualquer problema em arrancar a tela metálica usando um guindaste.

As conclusões finais deste experimento demonstrou a eficiência de executar uma camada de lama asfáltica sobre o reforço metálico, principalmente no caso de uma futura intervenção que contemple a reciclagem ou mesmo a fresagem.

3.3 PROJETO REFLEX

O projeto REFLEX, financiado pela União Europeia foi iniciado em março de 1999 e foi realizado durante um período de três anos até fevereiro de 2002, onde muitos países do sul, do norte e do oriente europeu participaram desta pesquisa.

O objetivo principal do projeto foi o desenvolvimento de uma nova metodologia na construção e restauração de estradas com o uso de tela de aço, para fazer com que as estruturas rodoviárias obtivessem um aumento no seu tempo de vida útil, levando a uma redução no uso de recursos naturais, redução da necessidade de manutenção, redução de acidentes e uma melhoria da segurança do tráfego rodoviário (REFLEX, 2002a).

Durante a pesquisa diversos experimentos foram realizados em rodovias europeias sob diferentes condições de tráfego e clima, a fim de comparar o comportamento de pavimentos reforçados e não reforçados com a inserção da tela metálica. Alguns dos experimentos foram monitorados por ferramentas relacionadas com sensores colocados nas várias camadas que avaliaram as tensões e deformações no interior das camadas asfálticas.

Os resultados experimentais demonstraram que a introdução da tela de aço na estrutura do pavimento age como uma camada para reforçar a sua estrutura, portanto, prolongando a sua vida de serviço (REFLEX, 2000a e 2002c).

Um dos objetivos específicos desta pesquisa foi o de fornecer um modelo adequado para efeito de análise estrutural de pavimentos flexíveis reforçados pela tela de aço. Este modelo foi essencial, a fim de facilitar a análise custo-benefício realizada por autoridades rodoviárias europeias. A avaliação econômica de estruturas de pavimento, com ou sem reforço demonstraram quais as vantagens reais devido à tela de aço (REFLEX, 2002f).

As pesquisas realizadas na Finlândia e Suécia indicaram que o reforço de pavimentos flexíveis com tela de aço é um método de baixo custo para evitar trincas longitudinais. Ensaio de campo e em laboratório ainda mostraram outras aplicações na construção e restauração de estradas:

- Aumento da capacidade de carga;
- Aumento da resistência à formação de trilhas de roda;
- Aumento da resistência ao aparecimento de trincas;
- Aumento da resistência aos assentamentos laterais;
- Diminuição do risco de aparecimento de trincas nas camadas de reforço por reflexão.

3.3.1 Interação entre tela de aço e o concreto asfáltico

Devido a sua complexidade, não há abordagens teóricas eficientes disponíveis, para descrever a interação entre a mistura asfáltica e as telas de aço na concepção de pavimentos rodoviários. Como a descrição do comportamento do asfalto precisa de modelos reológicos complexos a incorporação de um parâmetro adicional (tela de aço) houve dificuldades para criar uma modelagem. Por conseguinte, modelos mais simples, são capazes de descrever apenas um intervalo limitado das características do asfalto junto à tela de aço.

Com a intenção de estudar a interação da tela de aço com o concreto asfáltico, foram realizados ensaios para verificar as propriedades de um asfalto composto com tela de aço e outro sem essa incorporação para assim, produzir informações e parâmetros de base essencial para os trabalhos seguintes desta pesquisa como a modelagem matemática e estudos em trechos experimentais (REFLEX 2000d, 2001a, e 2000e).

Abaixo são apresentados alguns dos testes realizados assim como os seus resultados. Os mesmos podem ser visto, em detalhes, nas suas respectivas bibliografias.

Ensaio de tração

Foi realizado ensaio de tração modificado para avaliar a influência da tela de aço em uma mistura asfáltica convencional sendo que os corpos de prova foram carregados por uma força de tração longitudinal. Uma barra de aço padrão de 6 mm de diâmetro foi disposta no centro da seção transversal.

A imposição da carga pelos lados longitudinais do teste faz com que a força de tração seja transferida para a barra de aço, especialmente após a fratura do material asfáltico, pelo vínculo ativado por forças de cisalhamento entre a barra de aço e asfalto conforme Figura 3.5.

Figura 3.5 - Ensaio de tração controlada por deformação. Fonte: REFLEX (2002b).

Os resultados mostraram que a força de tração máxima foi determinada como sendo o maior valor da força de tração medida durante cada fase de carga (deformação longitudinal ≤ 2 mm) (REFLEX 1999 e 2002b).

Deformação permanente

Para determinação da deformação permanente na mistura asfáltica incorporada à tela de aço, foi construído um trecho experimental para sua análise. Neste trecho de 45 m de comprimento, foi utilizado um único projeto para trecho com e sem a tela de aço, conforme dados da Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Estrutura do pavimento com tela de aço. Fonte: REFLEX (2002b).

esp. (cm)	Material
3,0	CAUQ
5,0	Binder
-	Tela metálica
14,0	Base

Foram realizadas as medições nas seções transversais na superfície no início e no final de cada teste. Foi utilizado 20.000 ciclos de carga com 30 kN de carga de roda e frequência de carregamento de 0,3 Hz, simulando condições de verão por aquecimento da superfície da amostra até 30°C. Os resultados mostraram que a integração da barra de aço foi melhor no interior do material da camada de CAUQ comparado ao Binder.

Profundidade das trilhas de roda, ou seja, a diferença entre o nível da superfície antes e depois do ensaio, para amostras reforçadas com a tela de aço são cerca de 30% menor, em comparação com amostras não reforçadas. O reforço é, obviamente, capaz de reduzir ou evitar as deformações horizontais no interior da camada de reforço, mas não entre a superfície e o reforço (REFLEX, 2000a e 2002c).

Reflexão de trincas

Para análise do trincamento, foram realizados ensaios para quantificar o efeito do reforço da tela de aço no concreto asfáltico a fim de verificar o surgimento de trincas nas camadas asfálticas. Foi estudado um método desenvolvido no projeto REFLEX para estudar o efeito do reforço com tela de aço para retardar a propagação de fissuras através das camadas betuminosas.

Foram moldadas placas (com e sem reforço metálico) para o ensaio, na dimensão de 700x500x60 mm. As placas foram submetidas a uma carga repetida conforme ilustra a Figura 3.6. Este teste simulou a influência da carga de tráfego no crescimento de trincas em uma camada de asfalto. Extensômetros foram colocados para medir deformações longitudinais e transversais sobre a placa com a tela de aço.

O experimento foi realizado com uma pressão dos pneus de 0,6 MPa. Diferentes cargas foram utilizadas para introduzir vários níveis de tensão na placa. A largura da área de contato entre o pneu e a placa é de cerca de 168 mm em relação ao pneu de um caminhão tipo que no campo é cerca de 300 mm.

Figura 3.6 - Compactação da placa de teste com tela de aço padrão. Fonte: REFLEX (2002b).

Com os resultados concluiu-se que a tela de aço aumentou a vida de fadiga da laje de asfalto por retardar a propagação de trincas através da mistura asfáltica. Também foi mostrado que as trincas que surgiram após a passagem do compactador foram menores na placa com o reforço metálico comparado ao sem o reforço. A conclusão é que a resistência do concreto asfáltico contra o aparecimento de fissuras usando reforço com tela de aço é aumentado por um fator de cerca de 35% (REFLEX, 2000a e 2002c).

3.3.2 Método de dimensionamento

Praticamente todos os projetos de pavimentos flexíveis são baseados em métodos analítico-empíricos. Os métodos analíticos, que se utilizam da teoria de multicamadas analisam as tensões e deformações na estrutura do pavimento, devido à ação do tráfego ou dos efeitos climáticos. Por conta do carregamento oriundo do tráfego, ocorrem tensões de compressão e de tração nas fibras inferiores da camada asfáltica.

Nos métodos empíricos as tensões e deformações calculadas são utilizadas como entrada em fórmulas empíricas que permite calcular a vida de serviço do pavimento, sendo resultado o número total de repetições de carga que evitarão o rompimento da estrutura por fadiga (HUANG, 2004; YODER e WITCZAK, 1975). A Figura 3.7 representa a distribuição das tensões no interior de um pavimento.

Figura 3.7 - Tensões no interior de um pavimento. Fonte: Medina e Motta (2005).

Atualmente na Europa, muitos métodos de dimensionamento de pavimentos são utilizados, sendo que eles demonstram uma ampla variedade de soluções para problemas de dimensionamento semelhantes. Segundo COST (1999) a comunidade europeia realizou um extenso estudo com o objetivo principal de contribuir para o desenvolvimento de um novo método de dimensionamento europeu para pavimentos flexíveis, tendo em conta os últimos avanços tecnológicos.

O estudo demonstrou várias sugestões de modelos para obtenção do comportamento dos materiais granulares e dos tipos de solo, no entanto, todos estes métodos necessitam de parâmetros, tais como o fator de concentração de tensões, anisotropia, coeficiente de pressão lateral, relações não lineares, etc., que são muito difíceis de serem determinados e solicitam uma grande capacidade computacional, a fim de se obter os resultados desejados.

O projeto REFLEX proporcionou um modelo para efeito de análise da estrutura de pavimentos flexíveis reforçados com telas de aço. Resultados a partir destas investigações indicam que a teoria de multicamadas é uma opção para análise, bem como o Método dos Elementos Finitos (MEF), no entanto, o MEF envolve procedimentos elaborados e por conta disso, não é adequado para a utilização na prática diária.

Para avaliação de estruturas de pavimento reforçado com tela de aço, os procedimentos convencionais podem ser utilizados com a vantagem de serem bem conhecidos e aceitos, sendo eles de fácil utilização em diversos métodos de dimensionamento, além de poderem realizar comparações de desempenho estrutural com base nos mesmos procedimentos de projeto. Com base nos resultados da pesquisa REFLEX a incorporação da tela de aço na camada asfáltica, pode ser resolvida simplesmente através da utilização de uma camada equivalente quando for avaliada a estrutura do pavimento (REFLEX, 2002e).

Basicamente, as estruturas de pavimentos rodoviários são compostas de múltiplas camadas horizontais. Estas camadas consistem frequentemente de materiais estabilizados na parte superior do pavimento (CAUQ) e materiais não estabilizados nas camadas inferiores (BASE e SUBBASE).

Para a modelagem teórica e o dimensionamento da estrutura do pavimento pelo método mecanicista, as propriedades fundamentais dos materiais de engenharia são necessárias para avaliar as respostas do pavimento. Os valores adequados do módulo de resiliência (MR), coeficiente de Poisson (ν) e espessura das camadas são necessários, dados esses (exceto as espessuras das camadas), complexos de serem determinados quando a estrutura é reforçada com tela de aço.

A complexidade refere-se às propriedades da tela, que têm de ser expressa em termos de uma camada apropriada, podendo ser modelada utilizando a abordagem empírica mecanicista convencional, tal como descrito acima. Para esta finalidade, sugere-se (dentro do projeto REFLEX) para expressar a tela de aço, como uma camada adicional especificada pelo módulo de resiliência apropriado e uma espessura de camada adequada. A ideia de camada equivalente é apresentada esquematicamente na Figura 3.8.

Figura 3.8 - Demonstração da camada equivalente na estrutura do pavimento. Fonte: adaptado de SPENS (2009).

Estas características são calculadas utilizando as propriedades básicas da tela de aço, tais como o módulo de elasticidade do aço (E) e o Momento de Inércia (I). Sugere-se que o módulo de elasticidade para camada Equivalente (E_{eq}) seja calculado como se segue nas Equações (3.1) e (3.2) (para camadas aderidas):

$$E_{eq} = \frac{E_{aço} \cdot I_{aço} + E_{asfalto} \cdot I_{asfalto}}{I_{eq}} \quad (3.1)$$

Onde:

$E_{aço}$ = módulo de elasticidade do aço, (MPa);

$I_{aço}$ = momento Inércia do aço, (mm⁴);

$E_{asfalto}$ = módulo de resiliência do asfalto, (MPa);

$I_{asfalto}$ = momento Inércia do asfalto, (mm⁴);

E_{eq} = módulo de elasticidade da camada equivalente, (MPa);

I_{eq} = momento Inércia da camada equivalente, (mm⁴).

$$I = \frac{b x h^3}{12} \quad (3.2)$$

Onde:

b = espessura, (mm);

h = largura, (mm).

Convertendo a seção transversal da barra de aço para uma seção quadrada tem-se:

$$A_o = A_{\#} \Rightarrow \pi . r^2 = a \times b \quad (3.3)$$

Onde:

a = largura da seção quadrada, (mm);

b = altura, (mm);

r = raio da barra de aço, (mm).

Exemplo de cálculo:

A partir da Equação (3.3) a seção transversal da barra de aço é convertida numa seção quadrada equivalente como se segue:

$$A_o = A_{\#} \Rightarrow \pi . r^2 = a \times b$$

$$\pi . 3^2 = 6 \times b \Rightarrow b = 4,7 \text{ mm}$$

Assumindo que a espessura da camada é igual ao equivalente à altura da barra de aço, para uma tela de malha # 100 mm e 6 mm de diâmetro o módulo de elasticidade da camada equivalente é então calculada como se segue na Equação (3.4):

$$E_{aço} \cdot \frac{4,7 \cdot 6^3}{12} + E_{asfalto} \cdot \frac{(100 - 4,7) \cdot 6^3}{12} = E_{eq} \cdot \frac{100 \cdot 6^3}{12}$$

$$E_{eq} = \frac{1}{100} \cdot (E_{aço} \cdot 4,7 + E_{asfalto} \cdot 95,3) \quad (3.4)$$

Como mencionado acima, a espessura (h) para este exemplo particular é assumida como sendo a mesma que a altura da barra de aço. A espessura pode ser escolhida de forma diferente, dependendo da situação, bem como o parecer do projetista. No entanto, se a espessura difere a partir da altura da tela de aço, uma análise de sensibilidade deve ser realizada.

Seguindo um procedimento semelhante ao mencionado acima, o módulo de elasticidade para a camada Equivalente pode ser calculado quando o reforço é colocado entre materiais granulares, como segue (para camadas não aderidas):

$$E_{eq} = \frac{E_{aço} \cdot A_{aço} + E_{gr} \cdot I_{eq}}{A_{eq}} \quad (3.5)$$

Onde:

$E_{aço}$ = módulo de elasticidade do aço, (MPa);

$A_{aço}$ = área de seção transversal da barra de aço, (m²);

E_{gr} = módulo de elasticidade do material granular, (MPa);

E_{eq} = módulo de elasticidade da camada equivalente, (MPa);

A_{eq} = área de uma camada de correspondência equivalente ao tamanho da malha da tela de aço, (m²).

A aplicação direta do conceito da camada equivalente é possível em praticamente qualquer programa computacional disponível para conceito de multicamadas. Estes programas adotam a abordagem mecanicista empírica. Todos os procedimentos descritos para o cálculo da camada equivalente foram validados a partir de testes de laboratório do projeto REFLEX.

Os resultados obtidos nos testes demonstraram que o efeito da tela de aço inserida em materiais granulares reduz os esforços de tráfego em cerca de 5 a 10%. O procedimento acima mencionado para modelagem teórica foi verificado contra os resultados de testes de laboratório onde eles apresentaram estar de acordo (REFLEX, 2001c).

3.4 EXPERIÊNCIAS ANTERIORES UTILIZANDO A TELA DE AÇO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

3.4.1 Experiência Italiana

Em 1998 foi estudado um trecho experimental em uma estrada localizada em Salmastro juntamente com o início do projeto REFLEX. Todas as extensões experimentais foram observadas nos anos seguintes onde demonstram resultados interessantes para a pesquisa. A Figura 3.9 apresenta a estrutura dimensionada com a inserção de tela de aço no trecho teste.

Figura 3.9 - Estrutura dimensionada no trecho teste de Salmastro. Fonte: adaptado de SPENS (2009).

Após 8 anos, as seções de teste reforçadas com a tecnologia da tela de aço permaneceram com boas condições funcionais e estruturais comparadas ao momento da inserção da tela (Figura 3.10), enquanto outros trechos utilizando a tecnologia rotineira de recapeamento, necessitaram de pequenos reparos depois de 4 anos a partir da reabilitação (SPENS, 2009).

Figura 3.10 - Superfície reforçada com tela de aço (a e b). Fonte: SPENS (2009).

O experimento demonstrou que a inserção de tela de aço na construção de estradas é uma solução que possui uma boa eficácia, uma vez que diminui a formação de fissuras, o que causa uma rápida degradação da superfície da estrada.

Esta experiência foi interessante, no ponto de vista construtivo, por causa da baixa capacidade de suporte do solo local. Este fato é de grande importância porque demonstra a causa e uma possível ação corretiva para uma rápida deterioração do pavimento.

3.4.2 Experiência Sueca

Desde meados da década de 1980 vários trechos experimentais foram construídos com a inserção da tela de aço na Suécia em projetos de reabilitação ou de conservação. Na maioria dos casos, os danos das estradas mantidas foram trincamentos causados pela geada.

No outono de 1999, Departamento de Estradas Sueco começou a medir a capacidade de carga de alguns dos trechos testes utilizando o equipamento FWD. O

objetivo da inserção da tela na parte betuminosa do pavimento foi o de aumentar a capacidade de carga, principalmente para evitar trincas devido a geadas.

A comparação, no que diz respeito à capacidade de carga, entre uma estrutura reforçada e uma estrutura de estrada tradicionalmente construída é de particular interesse relativo à eficiência econômica. Um dos trechos escolhido para a aplicação da tela de aço, esta localizado em uma estrada ao norte do país.

Este trecho como pode ser visto na Figura 3.11 foi escolhido por ter grandes 'solavancos', diversas rachaduras e danos causados pela geada. Sondagens realizadas no local mostraram que os materiais constituintes do pavimento eram formados por siltes e argilas (REFLEX, 2001b).

Figura 3.11 - Defeitos do trecho experimental na estrada Sueca (a e b). Fonte: REFLEX (2001b).

Para a aplicação da tela de aço, a equipe de projeto decidiu usar uma tela com as características de resistência à tração do aço $f_yk = 500$ MPa, diâmetro de 5 mm, e malha de 100 milímetros.

Assim que teve início a colocação da tela de aço, levaram-se cerca de três horas até o término da instalação como pode ser observado na Figura 3.12 em sua primeira seção de estudo. Após esta primeira etapa, na semana seguinte houve a aplicação da tela nos trechos restantes, totalizando num total de 7 seções de estudo.

Figura 3.12 - Aplicação da tela de aço no trecho em estudo (a e b). Fonte: REFLEX (2001b).

Durante a instalação da tela, foram feitas algumas observações. Devido ao mau posicionamento da tela, ela tendeu a ser dobrada para cima devido à carga aplicada pelos caminhões enquanto os mesmos passavam por cima do pavimento no momento da aplicação da camada asfáltica. Estes defeitos foram corrigidos posteriormente, em cada seção de estudo, aplicando-se uma camada de cascalho sobre a tela, a fim de evitar futuras imperfeições.

Foram realizados diversos ensaios entre junho de 2000 até agosto de 2001, a fim de verificar as condições do reforço estrutural da tela de aço. Os resultados das medições de ensaios de carga com o FWD mostraram que a capacidade de suporte melhorou, mas eles não mostram grandes diferenças entre as várias seções de estudo.

Na inspeção visual, foi mostrado que o reforço de aço não pode evitar trincas transversais resultantes da geada. No entanto, há tendências claras para reforço de aço, quanto o impedimento da fissuração longitudinal. Observou-se ainda que a tela de aço é um reforço que tem a capacidade de controlar as rachaduras nas bordas do revestimento (REFLEX, 2001a).

3.4.3 Experiência Portuguesa

Em seguida, descreve-se um caso de obra onde se procedeu à construção de um trecho experimental com o objetivo principal de avaliar o efeito da tela de aço na capacidade de carga, e o estudo através do recurso a modelação pelo Método dos Elementos Finitos no pavimento reforçado.

As ações consideradas na modelação do pavimento foram às mesmas consideradas nos ensaios experimentais, levando em conta simplificações adotadas no modelo. As ações correspondentes ao ensaio foram obtidas pelo deflectômetro de impacto FWD.

Na modelação numérica com recurso do MEF foi utilizado o programa comercial *Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis* (ADINA) de acordo com Reis (2009). Com base em modelos, foi feito um estudo paramétrico onde foi avaliada a influência da abertura da malha e da sua posição no pavimento.

O trecho em estudo do pavimento experimental foi dividido em várias partes de igual comprimento, onde foram combinadas diferentes espessuras da camada de regularização em Macadame Betuminoso (MB), em simultâneo com a aplicação de malhas com diferentes diâmetros das barras, conforme descreveu Alves (2007).

A obra analisada esta localizada no povoado de Amêndoa, no Concelho de Vila de Rei em Portugal. O trecho estudado na Figura 3.13 foi construído em 2005. De um modo geral, o trecho estudado tratava-se de uma estrada não pavimentada com alguns anos de construção, tendo sido apenas executados trabalhos relacionados com a pavimentação e pequenas correções do traçado.

Figura 3.13 - Construção do trecho experimental Português. Fonte: Alves (2007).

A tela de aço soldada utilizada foi pré-fabricada tendo como finalidade uma maior facilidade construtiva, o que se traduz numa situação economicamente mais vantajosa (Figura 3.14). Foi assim utilizada tela soldada com barras de diâmetros 3,0 mm, 3,8 mm e 5,0 mm, com abertura da malha de 100 mm nas duas direções ortogonais.

Figura 3.14 - Fixação da tela (a) e cobrimento com CAUQ (b). Fonte: Alves (2007).

A fundação do pavimento experimental foi constituída por solos resultantes de formações de xistos medianamente alterados, apresentando elementos à base de quartzito.

A base é formada por um agregado britado de origem calcária. A camada asfáltica utilizada foi da classe de penetração 50/70, sendo os agregados constituintes britados e de origem quartzítica. Após a conclusão da aplicação da tela no trecho experimental, e de modo a poder ser avaliada a capacidade de carga do pavimento, foram realizados ensaios de carga com deflectômetro de impacto FWD.

A modelação computacional do pavimento foi efetuada com uma simplificação de bissimetria, de modo a permitir a utilização de menos memória por parte do programa ADINA segundo Reis (2009). Para a modelação não foram utilizadas as dimensões totais, mas sim uma parte com as dimensões apropriadas de forma aos resultados experimentais coincidirem ou estarem muito próximos dos obtidos através do modelo de elementos finitos.

Analisando os resultados obtidos, verificou-se que a modelação teórica traduz o comportamento observado quando dos ensaios experimentais. Após a calibração dos modelos foi possível verificar as vantagens da utilização da tela de aço como elemento de reforço, traduzindo-se numa menor deformação do pavimento. A principal conclusão que se pode extrair é que a tela de aço pode ser considerada como um elemento de reforço eficaz, especialmente quando posicionada na interface da camada de desgaste com a camada de regularização e com uma abertura de tela de 5 cm.

3.4.4 Experiência Sul-africana

Em meados de novembro de 2003, na África do Sul, um grupo de técnicos em estradas resolveu investigar o desenvolvimento de uma orientação sobre a utilização de reforços asfálticos. Esta investigação levou em conta as principais funções do reforço (evitar as trincas por reflexão, proteger as camadas asfálticas contra o tráfego intenso, etc.). Esta investigação foi desenvolvida, pois, mesmo com uma grande quantidade de pesquisas sendo realizadas sobre a utilização do reforço estrutural, não estava havendo uma divulgação eficaz destas praticas de construção na África do Sul. Isto acabou levando à falta de compreensão da tecnologia, falta de consciência dos resultados das pesquisas, implementação de má qualidade, dentre outros.

O objetivo da orientação desenvolvida foi fornecer uma síntese das práticas para a utilização dos reforços na pavimentação com base em práticas internacionais sendo, portanto, o objetivo principal, a contribuição para uma redução no custo da reconstrução, levando a reabilitação das estradas tendo em vista as condições de sustentabilidade desenvolvidas na África do Sul de acordo com Asphalt Academy (2008).

O foco da orientação está na construção e reabilitação de estradas com camadas asfálticas, sendo que ela foi feita usando o conhecimento acumulado de profissionais da área, incluindo representantes dos fabricantes da tela de aço, organizações internacionais de pesquisa, autoridades rodoviárias, consultores de engenharia, indústria de asfalto e outros que têm uma longa experiência de trabalhar no campo dos reforços asfálticos.

De acordo com a orientação, foi constatado que a aplicação de reforço com tela de aço, melhora a vida útil do pavimento. A estrutura da tela aberta alcança o agregado de asfalto, resultando em uma alta resistência ao cisalhamento na interface do reforço e no asfalto assim bem como o bloqueio melhora a transferência de carga para o reforço (ASPHALT ACADEMY, 2008).

Foi demonstrado que a estrutura da tela de aço aberta permite que cada fio integre-se no asfalto, e, portanto, efetivamente atua como um pedaço de agregado contínuo com a matriz asfáltica, que constitui aproximadamente 40% da composição em uma forma contínua de massa asfáltica. A tela de aço, quando instalada e revestida por betume, acaba inibindo o efeito da corrosão.

Experiências mostraram que nenhum betume adicional é necessário para o asfalto, já que o betume da superfície revestida pela tela de aço é maior que a área de superfície revestida da tela. Os sul-africanos realizaram ensaios sob as mesmas condições de temperatura e carga. Ficou evidente que a seção não reforçada faliu por trincamento, apresentando deformação permanente significativa conforme mostrado na Figura 3.15.

Figura 3.15 - Pavimento a) sem reforço; b) com reforço no meio da camada e c) reforço na base da camada (interface com a camada de base). Fonte: Asphalt Academy (2008).

3.4.5 Experiência Americana

A técnica quanto à utilização da tela de aço como reforço de pavimentos, surgiu no início dos anos de 1950 nos Estados Unidos, onde a mesma foi utilizada para melhorar a resistência do pavimento quanto à reflexão de trincas. No entanto, verificou-se que devido a dificuldades de instalação, esta técnica foi abandonada no início de 1970 (ELSEIFI & AL-QADI, 2005).

Após vinte anos, a técnica da inserção da tela em pavimentos flexíveis, reapareceu na Europa com uma nova classe de produtos de telas de aço para reforço. Muitos dos problemas associados com a utilização da tela como reforço foram resolvidos, demonstrado a partir de experiências satisfatórias com uma nova classe de reforço de aço (ELSEIFI, 2013).

Em 2001 foi investigada a eficácia do reforço com a tela de aço para melhorar a resistência à fadiga da camada asfáltica em testes realizados em laboratório. Com base nos resultados deste estudo, os autores demonstraram que o reforço pode melhorar a vida de fadiga até 3 vezes mais comparado a um pavimento sem a tela de aço (AL-QADI et al., 2004).

Em 2004 foi investigada a eficácia da tela de aço como reforço em duas seções da pista experimental *Virginia Smart Road* localizado no sudoeste da Virgínia, onde a

mesma se trata de uma instalação de pesquisa única em larga escala para avaliação e pesquisa para pavimentação.

O trecho com a tela foi instrumentado e construído incorporando três tipos diferentes de telas de aço. O carregamento de veículos, combinado com modelagem pelo MEF, foram utilizados para avaliar a eficácia do reforço de aço para melhorar o desempenho do pavimento flexível e resistir ao trincamento causado pela fadiga iniciando na parte inferior das camadas asfálticas.

Depois que os modelos do MEF foram calibrados com base nas respostas do instrumento ao carregamento de veículos, a comparação foi estabelecida entre os casos reforçados e não reforçados. Em uma das seções, em que o reforço de aço foi usado na parte superior da base de um pavimento tratado com cimento, o desempenho quanto à fadiga da estrutura melhorou de 6 a 55% na direção transversal da via, e 25 a 82% na direção longitudinal.

Em outra seção, em que o reforço de aço foi utilizado na parte inferior das camadas asfálticas, a melhoria para a estrutura de pavimento era entre 15 e 257% na direção transversal, e entre 12 e 261% na direção longitudinal. É importante salientar que, devido ao reforço utilizado em duas estruturas de pavimentos e em diferentes locais na estrutura do pavimento, foi demonstrado que a contribuição de reforço com a tela é eficaz ao combate devido ao aparecimento precoce de trincas por fadiga.

Figura 3.16 - Instalação da tela de aço na pista experimental na Virginia. Fonte: Elseifi & Al-Qadi (2005).

3.4.6 Experiência Brasileira

Em 2005 foi realizado um estudo do comportamento da tela de aço em pavimentos asfálticos em um trecho experimental localizado nas dependências da fábrica da Gerdau em Araçariguama-SP. Neste experimento foram estudados três tipos de telas de aço.

Os processos de investigação adotados neste experimento consistiram em duas etapas principais: (i) seleção de três tipos distintos de telas de aço e (ii) levantamento e análise do seu comportamento *in situ* para posterior escolha de um tipo de tela a ser utilizado em trechos experimentais rodoviários. A Figura 3.17 apresenta o resumo investigativo.

Figura 3.17 - Fluxograma do estudo de comportamento *in situ* de diferentes tipos de telas. Fonte: IBTS (2005).

As informações do projeto e execução do mesmo foram fornecidas pelos engenheiros do Instituto Brasileiro de Telas Soldadas (IBTS) a fim de que fosse selecionado nesta pesquisa o melhor tipo de tela para utilização em futuros estudos em trechos experimentais rodoviários.

O propósito desta pesquisa foi o de avaliar o trecho experimental localizado nas instalações da fábrica da Gerdau Aços Longos localizada na Rodovia Pres. Castelo Branco, km 52, s/nº na cidade de Araçariguama, cidade interior do Estado de São Paulo. A Figura 3.18 apresenta a localização da área de estudo.

Figura 3.18 - Localização aproximada do trecho de estudo.

Na época do projeto foram fornecidas informações pelos técnicos da empresa, relacionadas ao projeto viário e ao tráfego de caminhões que solicitariam os acessos para entrada na fábrica. Concluiu-se, naquela data, que para um período de operações de 12 horas (diárias) trafegariam 540 caminhões.

Com base em tais considerações e tendo-se em conta o critério oficial brasileiro para o dimensionamento de pavimentos asfálticos, chegou-se a um número equivalente de repetições de carga do eixo padrão de 80 kN igual a $7,2 \times 10^6$. Após cálculo do número N, foram definidas as espessuras dos pavimentos, contemplando-se duas situações conforme mostrado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Tipos de pavimentos dimensionados. Fonte: adaptado de IBTS (2005).

Camada	Tipo de pavimento	
	Semi-rígido	Flexível
Revestimento	CAUQ, 75 mm	CAUQ, 75 mm
Base	BGTC, 150 mm	BGS, 250 mm
Reforço	Solo, CBR $\geq 12\%$	Solo, CBR $\geq 12\%$
Subleito	Solo, CBR $\geq 5\%$	Solo, CBR $\geq 5\%$

Foram selecionados três tipos de telas soldadas: Q-92, Q-138 e Q-159 (Figura 3.3). A pista de acesso, no trecho experimental, com 150 m de extensão, foi construída contemplando em meia pista o pavimento semirrígido e na outra meia pista o pavimento flexível.

Tais pistas foram divididas em quatro trechos, com 37,5 m cada um deles, sendo que no primeiro não foi empregada a tela de aço (trecho de controle) em ambos os lados. No segundo, terceiro e quarto trecho, respectivamente, foram empregadas as telas mencionadas, cada uma delas para ambas as pistas, em pavimento semirrígido e em pavimento flexível (Figuras 3.19 e 3.20).

Figura 3.19 - Representação esquemática do trecho experimental. Fonte: adaptado de IBTS (2005).

O revestimento, em sua primeira camada, foi constituído de mistura asfáltica com espessura final de 25 mm, sobre a qual, nos trechos selecionados, foram instaladas as telas soldadas. Após imprimação betuminosa do conjunto, foi aplicada a segunda camada de CAUQ, com 50 mm de espessura.

Figura 3.20 - Seções de teste da pista experimental na fábrica da Gerdau. Fonte: adaptado de IBTS (2005).

Para melhor análise do comportamento do trecho, foram previstos a instalação de 9 *strain-gages* no trecho experimental, para repetição de dez provas de carga sobre cada um dos conjuntos, que permitiram precisar os níveis de deformação nas telas, para análise de possível fratura imediata ou futura (Figuras 3.21 e 3.22) .

Figura 3.21 - Instalação dos instrumentos. Fonte: adaptado de IBTS (2005).

Figura 3.22 - Vista dos instrumentos instalados. Fonte: adaptado de IBTS (2005).

A massa asfáltica foi posteriormente compactada e durante a rolagem do material betuminoso foram observados, em áreas limitadas, e em geral, próximas à borda longitudinal entre a faixa de rolamento e a sarjeta de concreto, problemas construtivos resultantes do enroscamento da rosca sem fim da distribuidora de massa com a tela, o que causou o arrancamento da tela de sua posição original conforme Figura 3.23. Isso exigiu a paralisação dos trabalhos e a remoção cuidadosa do pedaço de tela afetado nesses locais.

Figura 3.23 - Situação de arrancamento da tela da massa por ação de engate da rosca distribuidora. Fonte: adaptado de IBTS (2005).

Com isso pode-se verificar que a amarração das telas junto às bordas de faixas de rolamento é um método de evitar tais transtornos durante o emprego do material, pois os padrões de altura de mesa distribuidora e da rosca das vibro-acabadoras são bastante variáveis em obras.

A avaliação das deflexões com viga Benkelman (Figura 3.24) nas seções experimentais foi o método de determinação da capacidade de recuperação elástica de pavimentos reforçados com as telas de aço.

Figura 3.24 - Provas de carga estáticas com viga de Benkelman. Fonte: adaptado de IBTS (2005).

As deformações em barras de aço foram medidas, para cada seção de teste, por meio de dez provas de carga semelhantes, com veículo de prova passante sobre os sensores eletrônicos, nas posições mais críticas.

Com base nos testes em verdadeira grandeza realizados, sob condições críticas no que tange ao carregamento e respostas do subleito nos pavimentos, pode-se concluir, favoravelmente que:

- A presença das telas de aço em meio a misturas asfálticas, proporciona uma substancial redução de deflexões, portanto, uma melhoria expressiva na recuperação elástica, dos pavimentos. Isto por si só é um dado bastante positivo, que permite uma perspectiva de maior durabilidade das estruturas reforçadas com telas soldadas;
- Não seria qualquer tipo de tela soldada favorável em qualquer situação. No caso do experimento, a tela soldada Q-92 resultou extremamente solicitada, o que a tornaria descartável, a princípio, para situações de pavimentos semelhantes e tráfego pesado. Isto não quer dizer que não fosse viável em outras condições diferentes daquelas experimentadas neste projeto experimental em Araçariguama;
- Em estruturas mais rígidas, com baixos valores de deflexão, todavia, a tela Q-92 não resultou desfavorável, pelo contrário, resultou nas menores solicitações em pista, para os pavimentos semi-rígidos, embora nestes casos, os valores de picos de tensão muito próximos entre si (cerca de 400 MPa), não permitem de pronto afirmar qual seria a melhor tela a ser empregada.

4 TRECHOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo trata da metodologia aplicada à investigação de campo a partir da escolha do tipo de tela de aço definido por estudos de emendas da tela em laboratório e posterior aplicação nos trechos experimentais. Os materiais aplicados às estruturas propostas e os métodos construtivos foram acompanhados através da realização de controle de qualidade.

A execução dos trechos monitorados foi possível, com apoio e concordância no auxílio da execução dos trechos, através da parceria com DER/SP por intermédio da Divisão Regional de Campinas. O objetivo da execução do trecho experimental foi o estudo de alternativa de uma solução de pavimentação que poderá ser utilizada na reabilitação de pavimentos em outras rodovias e obras futuras.

4.1 ESTUDO DA EMENDA EM TELAS SOLDADAS

Com base nos resultados obtidos à época do experimento realizado em Araçariguama-SP, foi possível afirmar que as expectativas foram promissoras para uma abertura do experimento com telas soldadas de aço como método anti-reflexão de trincas de pavimentos asfálticos para novas camadas de recapeamento.

Após 4 anos da execução desse trecho experimental, em 2009, observou-se que nos pontos das emendas entre telas nas bordas, ocorreram reflexão de fissuras principalmente nas posições de transpasse das telas (emenda).

Devido a problemas de execução no decorrer do projeto de pesquisa, em dezembro de 2012, o revestimento compreendendo a tela soldada foi substituído e posteriormente a camada do pavimento foi reconstruída usando a tecnologia convencional, sem a utilização de telas soldadas. No entanto, cabe salientar que o objetivo central desta pesquisa foi atingido, uma vez que, a finalidade desta pesquisa era de se obter o melhor tipo de tela a ser utilizada em trechos rodoviários.

No dia 10 de dezembro de 2013, foi efetuada nova visita ao pavimento situado na Gerdau e nessa ocasião, este estava sendo demolido. Na Figura 4.1 observa-se a pista de acesso à fábrica, com a tecnologia da tela e a de saída, com pavimento novo, sem a presença da tela.

Figura 4.1 - Vista do pavimento com a tela (esquerda da pista) e do pavimento novo (direita da pista).
Fonte: MackPesquisa (2013).

Foi efetuada uma última inspeção visual, sendo que o mesmo apresentou nessa ocasião um Índice de Gravidade Global (IGG) superior a 180, com a presença de diversas placas, com o arrancamento do revestimento e exposição da tela, nos locais de sobreposição das mesmas (emenda), quando esta superava a espessura de 3 fios (Figuras 4.2 a 4.6).

Figura 4.2 - Presença de trincas transversais (a) e trincamento nas emendas das telas (b). Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.3 - Presença de panelas. MackPesquisa (2013).

Figura 4.4 - Arrancamento do revestimento sobre a tela soldada. MackPesquisa (2013).

Figura 4.5 - Presença do defeito tipo jacaré no pavimento. MackPesquisa (2013).

Figura 4.6 - Arrancamento da camada do revestimento. MackPesquisa (2013).

Como conclusão foi constatada através do levantamento do inventário da superfície e da avaliação estrutural, que o pavimento apresentou maior índice de defeitos nos pontos de emenda das telas soldadas (transpasse).

Como base nos resultados apresentados no experimento realizado decidiu-se utilizar a tela soldada Q-138 para execução dos trechos experimentais rodoviários. Com a tela de aço definida, foi realizado um estudo com o objetivo de verificar as condições da emenda a ser empregada nos trechos experimentais com a intenção de definir a maneira adequada de efetuar as emendas entre as telas e analisar a eficiência dessas na tecnologia da inserção da tela de aço nas camadas asfálticas do pavimento. Esses estudos foram orientados por IBTS (1997).

4.1.1 Tela de aço Q-138

A Tabela 4.1 a seguir, apresenta as principais características da tela de aço Q-138:

Tabela 4.1 - Características da Tela Soldada Q-138. Fonte: adaptado de GERDAU (2013).

AÇO CA-60		Espaçamentos entre fios (cm)		Diâmetro (mm)		Seção (cm ² /m)		Apresentação	Dimensões (m)		Peso	
Série	Desig.	L.	T.	L.	T.	L.	T.		Larg.	Comp.	kg/m ²	kg/peça
138	Q-138	10	10	4,20	4,20	1,38	1,38	Painel	2,45	6,00	2,20	32,30

L. Longitudinal T. Transversal

4.1.2 Ações a considerar na emenda

Um painel de tela soldada cobre uma determinada área de armadura sobre o pavimento, para que o método da inserção da tela de aço no pavimento seja executada, é necessário fazer uma montagem dos painéis de tela soldada, a fim de que toda área seja coberta.

Quando a distribuição da tela soldada sobre o pavimento é realizada, para que a armadura se torne contínua em toda sua extensão, é necessária a emenda entre os painéis que se dá pela sobreposição de malhas.

Emendas da armadura na longitudinal devem ser amarradas com arames recozidos, no mesmo plano. Já as emendas transversais os fios emendados devem estar também no mesmo plano.

Os serviços de corte das aberturas e a amarração deverão ser executados na obra. A Figura 4.7 mostra a emenda lateral e detalhe da sobreposição de telas. Essa sobreposição deve ser evitada, pois foi observado que os buracos ocorreram no revestimento onde houve a sobreposição de telas soldadas, resultando em uma espessura de mais de 3 fios. A figura 4.8 apresenta detalhe de emenda no sentido longitudinal (sentido do tráfego).

Figura 4.7 - Emenda lateral (a) e detalhe da sobreposição de telas (b). Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.8 - Posição de emenda longitudinal (a) e posição de encontro e lado do fio (b). Fonte: MackPesquisa (2013).

Na Figura 4.9 pode ser observado detalhe do procedimento para amarração de telas com aço recozido, da maneira em que é realizada normalmente em armações com telas ou barras de aço.

Figura 4.9 - Procedimento de amarração. Fonte: MackPesquisa (2013).

A Figura 4.10 mostra detalhe de sobreposição na emenda central/lateral. As Figuras 4.11 e 4.12 ilustram o local de corte, para diminuição de sobreposição de barras aço nas emendas transversais e laterais e a área de corte para evitar sobreposição de telas, respectivamente. A Figura 4.13 apresenta outra maneira de efetuar a amarração das telas por meio de abraçadeira plástica.

Figura 4.10 - Sobreposição na emenda central/lateral. Fonte: MackPesquisa (2013).

(a)

(b)

Figura 4.11 - Local de corte (a), para diminuição de sobreposição de barras aço nas emendas transversais e laterais (b). Fonte: MackPesquisa (2013).

(a)

(b)

Figura 4.12 - Área de corte para evitar sobreposição de telas. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.13 - Amarração das telas por meio de abraçadeira plástica. Fonte: MackPesquisa (2013).

4.1.3 Esquema de montagem

Para a realização do trecho experimental realizado em trecho rodoviário, como base no estudo das emendas, foi idealizada uma rotina de trabalho para esquema de montagem da tela tipo Q-138 em rodovias com faixa de tráfego de 3,50 m. Abaixo são apresentados os passos que foram realizados para montagem das emendas.

- 1) Inicialmente foram retirados os últimos fios transversais do painel padrão (6 x 2,45 m) da tela Q-138 que foram utilizados para junção das telas (Figura 4.14);

Figura 4.14 - Esquema de retirada do último fio.

- 2) O mesmo procedimento da etapa anterior, foi realizado na $\frac{1}{2}$ tela padrão (6 x 1,225 m), além da remoção dos últimos dois fios longitudinais, para posterior junção na emenda (Figura 4.15);

Figura 4.15 - Esquema de retirada dos fios longitudinais.

- 3) Após a remoção do último fio transversal as telas foram emendadas sem este último fio deixando um espaçamento de 15 cm (Figura 4.16);

Figura 4.16 - Esquema de junção das telas.

- 4) Assim como na etapa anterior, após a remoção do último fio transversal as $\frac{1}{2}$ telas foram emendadas sem este último fio e com 15 cm dos dois últimos fios longitudinais cortados;

Figura 4.17 - Esquema de junção da meia tela.

- 5) Por fim, foram sobrepostos os $\frac{1}{2}$ painéis padrões sobre os painéis padrões, considerando emenda longitudinal de duas malhas mais uma franja (Figura 4.18).

Figura 4.18 - Sobreposição de 2 (duas) malhas. Fonte: IBTS (1997).

4.2 DEFINIÇÃO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS

Foi feita uma análise junto ao DER/SP, com a intenção de encontrar um trecho onde fosse possível aplicar a tela de aço. Adotou-se o estudo de caso como estratégia de pesquisa, objetivando aplicar a tela de aço em uma rodovia onde já estivesse com as obras em andamento.

Ficaram definidos dois trechos da Rodovia Edgard Máximo Zamboto (SP-354), pista no sentido Jarinu - Campo Limpo Paulista (pista mais carregada), onde os mesmos foram divididos da seguinte forma: restauração da pista, entre o km 60 e 62 (i) primeiro subtrecho (trecho de controle) no km 60,68 ao km 60,76, (ii) segundo no km 60,80 ao km 60,88, (iii) terceiro no km 60,92 ao km 61,02, (iv) quarto no km 61,04 ao km 61,12 e quinto (v) no km 61,16 ao km 61,22.

Com o propósito de se obter resultados mais significativos, o segundo trecho foi definido onde havia a necessidade da implantação de uma faixa adicional devido ao elevado tráfego de veículos pesados. O mesmo ficou localizado no km 68. Primeiro subtrecho de controle no (i) km 68,20 ao km 68,28 e o segundo subtrecho com tela de aço no (ii) km 68,32 ao km 68,40. Em suma, os trechos ficaram dispostos da seguinte maneira:

- Trecho de Restauração (km 60,20 ao km 61,22)
 - 5 subtrechos (incluindo trecho de referência);
- Trecho de Implantação (km 60,68 ao km 68,40)
 - 2 subtrechos (incluindo trecho de controle);

O projeto de reabilitação da SP-354, situado no município de Campo Limpo Paulista, perfaz uma extensão de 30 km, onde se localiza ao norte da capital do estado de São Paulo e une setores em crescente atividade econômica, como também possibilita a interligação das rodovias SP-065 (Dom Pedro I) e SP-348 (Rodovia dos Bandeirantes) que constituem importantes corredores da malha viária regional local (Figura 4.19).

Figura 4.19 - Posicionamento do trecho rodoviário de projeto.

Para escolha da localização do trecho em restauração, optou-se por um segmento em tangente, além de, para ambos os trechos (restauração e implantação), com boas condições de drenagem. Ambos os locais. A Figura 4.20 e 4.21 apresenta um croqui de localização dos trechos experimentais.

Figura 4.20 - Localização do trecho (restauração).

Figura 4.21 - Localização do trecho (implantação).

4.3 PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO

Para melhor escolha do trecho definido na SP-354, foi analisado o projeto original concebido pelo DER/SP entre os anos de 2008 e 2009, a fim de analisar as soluções adotadas nos trechos experimentais para que no final do projeto fossem realizadas comparações entre a solução original e a solução com a inserção da tela de aço.

4.3.1 Estudos de tráfego

A metodologia aplicada no estudo foi estabelecida e complementada com procedimentos recomendados pelo DER/SP para a elaboração de estudos técnicos e análises para implantação de faixas adicionais em segmentos de rampas acentuadas, como também para dimensionamento de pavimentos flexíveis.

O tráfego da rodovia é composto por viagens de curta distância entre os municípios lindeiros e também viagens de longa distância, uma vez que a SP-354 faz a ligação entre as Rodovias Anhanguera e Dom Pedro I. O percentual de tráfego pesado é de cerca de 30% do total de veículos. Os dados referentes aos volumes de tráfego do trecho em estudo foram extraídos de contagens realizadas com a classificação dos veículos por categoria, durante um período de 12 horas (das 07:00 às 19:00h) no ano de 2009.

De acordo com a variação do tráfego ao longo do trecho em estudo da SP-354, foi considerada a seção de tráfego homogêneo na cidade de Campo Limpo Paulista a cidade de Jarinu (km 57 ao km 74, entre a cidade de Campo Limpo Paulista e o acesso a Jarinu).

Devido à inexistência de estatísticas permanentes de tráfego na SP-354, optou-se por adotar os dados de fluxos ininterruptos da SP-127 para expandir os fluxos das contagens para o período de 24h. A escolha dos dados da SP-127 foi feita pela similaridade das características de tráfego com a SP-354.

Para obtenção dos fluxos horários de projeto, foram adotados 10% e 8% do Volume Diário Médio (VDM) respectivamente para veículos leves e pesados. O fluxo unidirecional foi calculado atribuindo-se um fator de distribuição direcional crítico 0,55. Os volumes e fluxos de tráfego obtidos no estudo são dados na Tabela 4.2 a seguir:

Tabela 4.2 - Volumes e fluxos de tráfego obtidos no estudo. Fonte: adaptado de DER/SP (2009).

Fluxo bidirecional					
2008	2010	2012	2014	2016	2018
702	738	775	814	856	899

Com esses dados, foram calculados os fatores de veículos pelos métodos *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) e AASHTO e determinados em cada seção homogênea o número N de operações do eixo padrão de 80 kN. O número N em cada segmento, projetado para o período de 10 anos e calculado pelos métodos USACE e AASHTO é mostrado na Tabela 4.3:

Tabela 4.3 - Número N para 10 anos. Fonte: adaptado de DER/SP (2009).

Seção de tráfego	Método	
	USACE	AASHTO
km 57 ao km 74	2,89E+07	1,01E+07

4.3.2 Investigações geotécnicas

As investigações quanto à estrutura do pavimento existente e quanto às propriedades geotécnicas dos solos do subleito na Rodovia SP-354 foram realizadas durante o mês de novembro de 2008.

As cavas de inspeção realizadas ao longo da SP-354 mostraram que há diversos tipos de materiais com espessuras de diversas camadas constituintes da estrutura do pavimento existente. Próximo ao trecho experimental de restauração (km 59,240) o pavimento existente possuía a seguinte estrutura (Figura 4.22).

Figura 4.22 - Estrutura do pavimento existente – km 59,240. Fonte: adaptado de DER/SP (2009).

Verificou-se através dos ensaios geotécnicos que os solos do subleito são dos tipos LG' e NS'-NG' de acordo com a classificação de solos Miniatura Compactada Tropical (MCT).

Verificou-se também que a capacidade de suporte *California Bearing Ratio* (CBR) dos solos do subleito no segmento do trecho experimental, oscila entre 5,5 e 11,3% e que a expansão destes solos varia entre 0,10 e 1,70%. Cabe ressaltar que todos os ensaios geotécnicos (CBR e expansão) dos solos do subleito foram realizados em amostras de solos moldadas na Energia do Proctor Normal.

4.3.3 Avaliação estrutural do pavimento existente

O levantamento das condições estruturais do pavimento existente foi realizado durante os meses de novembro e dezembro de 2008, ou seja, durante o período chuvoso do ano. Por se tratar de um período crítico para realização de levantamento deflectométrico, não foi aplicado fator de correção sazonal sobre os valores deflectométricos inventariados.

Foi constatado que devido aos elevados resultados de deflexões recuperáveis, verificou-se a necessidade de reconstrução do pavimento existente em diversos segmentos das Faixas Norte e Sul da SP-354, respectivamente, para os quais os

valores determinados de deflexão recuperável foram superiores a 140×10^{-2} mm ou os valores do Raio de Curvatura inferiores a 100 m, o que acarretou também necessidade de reconstrução destes segmentos. A Tabela 4.4 indica os valores de deflexão encontrados no trecho experimental.

Tabela 4.4 - Levantamento defletométrico do subtrecho da SP-354 em estudo. Fonte: adaptado de DER/SP (2009).

km	Força (kgf)	Deflexões (x 10 ⁻² mm)							Raio (m)
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀	
60,7	4651,0	59,0	33,1	23,8	13,8	8,9	6,8	5,6	102,3
60,8	4826,0	62,1	34,4	23,7	11,8	4,7	2,4	2,2	94,6
60,8	4567,0	75,5	44,6	29,7	17,6	11,4	7,7	5,7	81,5
60,9	3952,0	86,2	50,0	34,0	22,1	14,7	10,1	7,2	70,7
61,0	4049,0	68,9	40,5	29,2	18,4	11,1	8,0	6,0	91,8
61,1	4633,0	79,6	47,9	34,0	17,0	11,0	7,9	5,9	80,9
61,2	3930,0	79,9	48,2	29,8	14,0	8,4	5,8	4,4	76,4

4.3.4 Condição da superfície do pavimento existente

O levantamento de superfície foi efetuado a partir do procedimento do DNIT 006/2003-PRO (DNIT, 2003a) e a partir da Instrução de Projeto DER/SP IP-DE-P00/004 (DER/SP, 2006d). Através do levantamento de superfície verificou-se a presença acentuada de trincas dos tipos FC-1, FC-2 e FC-3 formando “couro de jacaré” ao longo de todo o trecho em segmentos alternados do pavimento de ambas as faixas de rolamento da Rodovia SP-354 (Figura 4.23).

Figura 4.23 - Trilha de roda (a) e trincas do tipo jacaré (b). Fonte: adaptado de DER/SP (2009).

O revestimento asfáltico apresentava-se com painelas, remendos, áreas com desgaste superficial e ondulações em segmentos alternados do pavimento. Em alguns segmentos localizados observou-se praticamente a deterioração completa da estrutura do pavimento, com áreas localizadas apresentando afundamentos de consolidação locais e nas trilhas de roda, ondulações e afundamentos plásticos locais e nas trilhas de roda além de trincas interligadas do tipo FC-3 formando “couro de jacaré”.

Logo o revestimento asfáltico das Faixas Norte e Sul da Rodovia SP-354 se encontrava em condições, quanto ao estado superficial, variando de ruins a péssimas para a maior parte da extensão do trecho, com alguns segmentos alternados de pequena extensão em boas condições e outros em condições regulares.

4.3.5 Dimensionamento do pavimento

Restauração do pavimento

Para os diversos segmentos homogêneos da Rodovia SP-354 foi adotada a solução de reconstrução do pavimento existente para os casos em que os valores de deflexão característica são extremamente elevados, valores estes que resultaram em espessuras de reforço superiores às espessuras obtidas para a camada de concreto asfáltico de uma nova estrutura de pavimento, ou para valores médios de raio de curvatura extremamente baixos, denotando uma péssima condição estrutural do pavimento existente, ou seja, para valores de raio de curvatura inferiores a 90 m.

Para os casos em que o pavimento existente se encontrou em más condições funcionais ($80 < \text{IGG} < 160$) com incidência acentuada e de elevada severidade de trincamento do revestimento asfáltico existente, porém não apresenta valores de deflexão característica extremamente elevados, que resultem em espessuras de reforço superiores às espessuras obtidas para a camada de concreto asfáltico de uma nova estrutura de pavimento, foi adotada a solução obtida através do Procedimento DNER PRO-269/94 (DNER, 1994b) contemplando a fresagem do revestimento asfáltico existente.

Nos segmentos em que a condição funcional do pavimento existente é regular ($40 < \text{IGG} < 80$) com presença moderada de trincas na superfície do revestimento asfáltico existente e que os valores de deflexão característica resultaram em espessuras de reforço inferiores às espessuras obtidas para a camada de concreto asfáltico de uma nova estrutura de pavimento, foi adotada a solução obtida pelo Procedimento DNER PRO-269/94 contemplando apenas a execução de reforço estrutural em CAUQ.

Deve-se ressaltar que geralmente estão sendo empregadas as espessuras de reforço obtidas pelo Procedimento DNER PRO-269/94. Porém para os casos em que foi julgado necessário repor o déficit estrutural do pavimento existente através de maiores espessuras de reforço estrutural, foram adotadas as espessuras obtidas pelo Procedimento DNER PRO-011/79 (DNER, 1979).

A Tabela 4.5, ilustra as soluções obtidas pelos Procedimentos DNER PRO-011/79 e DNER PRO-269/94, bem como a solução de restauração adotada para cada segmento homogêneo da Rodovia SP-354 compreendido entre o trecho experimental em que será utilizada a tela de aço.

Tabela 4.5 - Soluções adotada no trecho experimental pelo projeto original. Fonte: adaptado de DER/SP (2009).

Segm. Homogêneo		Estaca		Extensão	Rc médio	Dc	"N" 10 anos	Condição Funcional	
km Inicial	km Final	Inicial	Final					(m)	(m)
59,880	60,360	504	528	480	132,1	83,8	2,89E+07	90	Mau
60,360	60,400	528	542	280	135,9	64	2,89E+07	111	Mau
60,400	61,160	542	568	520	127,2	92,2	2,89E+07	115	Mau
61,160	61,800	568	600	640	119,8	104,2	2,89E+07	100	Mau

Revest. Existente		Esp. Calculadas (cm)				Solução de Restauração Adotada
CAUQ (cm)	MB	PRO-11	PRO-269	PRO-269 (c/fresa)		
				Fresa	Reforço	
4	8	9	8	4	4	2,0 cm RPF + 2,0 TSD + 6,0 CAUQ
6	7	4	3	5	1	2,0 cm RPF + 2,0 TSD + 4,0 CAUQ
6	7	11	8	5	4	2,0 cm RPF + 2,0 TSD + 6,0 CAUQ
6	7	13	10	5	4	2,0 cm RPF + 2,0 TSD + 8,0 CAUQ

Implantação do pavimento

Ao longo da Rodovia SP-354, foram implantadas faixas adicionais sendo que o dimensionamento da estrutura de pavimento implantada seguiu a Instrução de Projeto DER/SP IP-DE-P00/001 (DER/SP, 2006b), utilizando-se a capacidade de suporte CBR dos solos do subleito e o tráfego incidente em cada segmento de implantação. A Figura 4.24 ilustra a estrutura do pavimento dimensionada.

Figura 4.24 - Estrutura adotada para implantação. Fonte: adaptado de DER/SP (2009).

A estrutura obtida com o emprego do método empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DER/SP, foi verificada através de Procedimentos Mecanicistas, utilizando-se para tal, o programa computacional ELSYM-5 e modelos de fadiga.

O procedimento de cálculo adotado pelo programa ELSYM-5 idealiza o pavimento como um sistema elástico tridimensional de camadas sobrepostas, semi-infinito no plano horizontal. Os materiais são assumidos como sendo isotrópicos e homogêneos, com comportamento elástico linear. Os parâmetros de carregamento e geometria considerados na análise foram os seguintes:

- Carga do semi-eixo simples padrão de 4,10 tf, representada por 2 x 2,05 tf;
- Pressão de contato pneu/pavimento = 5,6 kgf/cm²;
- Área de contato circular = 10,79 cm;
- Distância de eixo entre as rodas = 28,8 cm;
- Distância utilizada na análise dos pontos = 14,4 cm;
- 80²% do Número “N”_{USACE} = 2,31x10⁷;
- 80% do Número “N”_{AASHTO} = 8,08x10⁶.

Os parâmetros adotados na análise mecanicista são os valores convencionalmente utilizados em diversos órgãos rodoviários, constantes em diversas publicações técnicas. Os materiais utilizados nas diversas camadas da estrutura do pavimento, seus respectivos módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson, adotados para a análise mecanicista através do Programa Computacional ELSYM-5, acham-se indicados na Tabela 4.5.

Tabela 4.6 - Parâmetros adotados para dimensionamento. Fonte: adaptado de DER/SP (2009).

Camada	Material	MR (MPa)	Poisson	Espessura (cm)
Revestimento	CAUQ	4.000	0,35	13,0
Base	BGS	300	0,40	20,0
Reforço	Rachão	250	0,40	20,0
Subleito	Solo	70	0,45	-

Para determinação dos esforços admissíveis, utilizaram-se os modelos de fadiga indicados a seguir: (i) deslocamento vertical na superfície do pavimento (deflexão) D_0 ($\times 10^{-2}$ mm), método TECNAPAV (PRO269/94), Equação (4.1), (ii) deformação específica normal horizontal de tração na fibra inferior da camada de revestimento ϵ_t ($\times 10^{-4}$ cm/cm), método da *Federal Highway Administration* (FHWA), Equação (4.2) e (iii) deformação específica normal vertical de compressão no topo do subleito ϵ_v ($\times 10^{-4}$ cm/cm), método *Shell ksla* (Dormon & Metcalf), Equação (4.3).

$$\log(D_{adm}) = 3,148 - 0,188 \times \log(N_{USACE}) \quad (4.1)$$

² A época do projeto e como critério de cálculo os engenheiros projetistas junto com os técnicos dos DER/SP decidiram utilizar 80% do tráfego de veículos comerciais para dimensionamento das estruturas de implantação.

$$N_{AASHTO} = 1,092 \times 10^{-6} \varepsilon_v^{-3,512} \quad (4.2)$$

$$N_{USACE} = 6,069 \times 10^{-10} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_{vadm}} \right)^{4,762} \quad (4.3)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão de 80 kN;

ε_t = deformação horizontal máxima na fibra inferior da camada betuminosa ($\times 10^{-4}$ cm/cm);

ε_{vadm} = deformação vertical admissível de compressão no topo da camada de subleito, ($\times 10^{-4}$ cm/cm);

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

Na Tabela 4.7, são apresentados os parâmetros de deslocamentos e deformações avaliados nas diversas camadas do pavimento para as estruturas dimensionadas, apresentando os valores atuantes e admissíveis.

Tabela 4.7 - Solicitações atuantes e admissíveis. Fonte: adaptado de DER/SP (2009).

Tipo de solicitação	Atuante	Admissível
Deflexão máxima da estrutura – D_0 ($\times 10^{-2}$ mm)	49	58
Deformação específica horizontal de tração na fibra inferior do revestimento – ε_t ($\times 10^{-4}$ cm/cm)	1,72	2,17
Deformação específica vertical no topo do subleito – ε_v ($\times 10^{-4}$ cm/cm)	3,03	3,29

4.4 EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL (RESTAURAÇÃO)

No dia 23 de novembro de 2012, foi realizada a primeira visita ao trecho experimental na Rodovia SP-354 e constatou-se a presença de um pavimento bem mais deteriorado, comparando-se ao relatório de projeto do ano de 2009, com a presença de diversos defeitos como trincas do tipo jacaré, trinca tipo bloco, desgaste, etc. (Figuras 4.25 a 4.27). Além disso, também se verificou uma grande quantidade de veículos comerciais trafegando na rodovia (Figura 4.28).

Figura 4.25 - Pavimento na SP-354, com presença de 100% do defeito “jacaré”. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.26 - Presença de diversos defeitos na rodovia. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.27 - Desgaste acentuado com presença de trincas tipo bloco. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.28 - Tráfego de veículos pesados na SP-354. Fonte: MackPesquisa (2013).

4.4.1 Estrutura proposta

Com o intuito da inserção da tela de aço para o desenvolvimento da pesquisa, foram propostas estruturas alternativas ao projeto, apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Estrutura proposta para trecho em restauração. Fonte: MackPesquisa (2013).

Projeto original	Espessura (cm)	Proposta	Espessura (cm)
CAUQ	4,0 a 6,0	CAUQ	7,0
TSD	2,0	TELA DE AÇO	-
RPF	2,0	-	-

A estrutura proposta foi estudada para aumentar a gama de soluções para reabilitação de pavimentos e também verificar o desempenho deste material, sem ser uma forma de comparação direta com o projeto original.

Para realização do estudo foram fornecidas, pelo IBTS telas soldadas, tipo Q-138, para a execução dos trechos experimentais. As telas foram estocadas no km 60 da SP-354, próximo ao canteiro de obras (Figura 4.29). Para facilitar o estudo, este trecho foi subdividido em 5 subtrechos.

Figura 4.29 - Telas estocadas no km 60 da SP-354. Fonte: MackPesquisa (2013).

4.4.2 Execução do primeiro subtrecho

Como apresentado no item 4.2 o primeiro subtrecho foi o trecho de controle onde no mesmo foi adotada a solução original conforme apresentado no item 4.3.5, ou seja, o trecho foi restaurado com: 2,0 cm Reperfilamento (RPF), 2,0 cm de Tratamento Superficial Duplo (TSD) e 6,0 cm de CAUQ.

4.4.3 Execução do segundo subtrecho

O segundo subtrecho foi realizado dia 26/02/2013, compreendendo o km 60,80 ao km 60,92. Este subtrecho compreende uma rampa de 1,2% (active), representando a faixa com o tráfego mais carregado (sentido Jarinu / Campo Limpo Paulista / São Paulo).

Nesse subtrecho foram assentadas as telas de aço soldadas sobre o pavimento existente, que estava bastante deteriorado, com a presença de FC-3 (trinca do tipo jacaré), buracos ou panelas, trincas em bloco, etc. (Figuras 4.30 e 4.31).

Figura 4.30 - Colocação das telas de aço. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.31 - Pavimento existente com trincas tipo “jacaré” e com panelas. Fonte: MackPesquisa (2013).

Cabe salientar que metade da pista (no sentido Jarinu – Campo Limpo Paulista) o recapeamento foi aplicado com a colocação da tela soldada Q-138 na interface entre o pavimento existente, completamente trincado, com presença de panelas na camada do revestimento, sendo que houve somente o assentamento das telas, aplicação de pintura de ligação sobre a tela assentada e fixada, e recapeamento com concreto asfáltico usinado a quente faixa “III” do DER-SP.

Houve o assentamento das telas soldadas sobre o pavimento deteriorado, tendo a amarração nas emendas (Figura 4.32), sido feita com arame recozido 18 (Figura 4.33). Neste subtrecho, o pavimento existente apresenta o defeito FC-3 “jacaré” em toda a sua largura (área total).

Figura 4.32 - Detalhe da emenda (sobreposição de telas) (a) e vista do trecho em alicive (b). Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.33 - Amarração das emendas com arame recozido. Fonte: MackPesquisa (2013).

A fixação das telas no pavimento existente foi realizada pregando-se “tachões”, sempre se mantendo a sobreposição das telas no sentido transversal do tráfego (Figuras 4.34 a 4.36).

Figura 4.34 – Tachões (a) usado na fixação da tela (b). Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.35 - Fixação da tela soldada sobre o pavimento existente, com tachões. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.36 - Detalhe da fixação da tela no sentido transversal do tráfego. Fonte: MackPesquisa (2013).

Foi aplicada, com a utilização de caneta, a pintura de ligação RR-2C com taxa de aproximadamente $0,9 \text{ l/m}^2$, taxa esta com o propósito de preencher os vazios na camada existente de CAUQ e melhorar o assentamento da tela (Figura 4.37).

Figura 4.37 - Aplicação da pintura de ligação com emulsão RR -2C. Fonte: MackPesquisa (2013).

O recapeamento foi realizado com a aplicação de CAUQ faixa III do DER/SP, na temperatura entre $150 - 160 \text{ C}^\circ$ e espessura total de 7 cm compactada. (Figuras 4.38 e 4.39).

Figura 4.38 - Aplicação do recapeamento do CAUQ sobre a tela soldada. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.39 - Caminhão basculante descarregando a massa asfáltica na vibro-acabadora. Fonte: MackPesquisa (2013).

Foram utilizados os seguintes equipamentos: (i) vibro-acabadora, (ii) rolo de chapa (liso) e (iii) rolo pneumático. A fixação da tela realizada com tachões não se mostrou adequada, uma vez que com a movimentação do caminhão basculante sobre a tela, para descarregamento da massa asfáltica na vibro-acabadora, esses tachões acabavam se soltando e a tela se movimentando, conforme pode ser observado no fato ocorrido em dois pontos (Figura 4.40). Nesses pontos os pedaços de tela foram removidos.

Figura 4.40 - Deslocamento e levantamento da tela soldada e defeito gerado. Fonte: MackPesquisa (2013).

No período de execução do recapeamento com concreto asfáltico, das 13h35 as 14h30, o serviço foi executado sob forte chuva. Foram realizados os controles tecnológicos pertinentes, tais como o controle da temperatura e da espessura de lançamento da massa (Figura 4.41 e 4.42).

Figura 4.41 - Controle da temperatura (a) e da espessura de lançamento da massa asfáltica (b).
Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.42 - Rasteiros corrigindo o espalhamento. Fonte: MackPesquisa (2013).

As Figuras 4.43 e 4.44 apresentam mais alguns detalhes da execução desse primeiro subtrecho (compressão da camada com rolo liso e de pneus). O tráfego foi liberado após as 17 h desse mesmo dia.

Figura 4.43 - Compressão da massa com rolo liso (a) e com rolo de pneus (b). Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.44 - Compressão (compactação) da massa asfáltica com rolo de pneus. Fonte: MackPesquisa (2013).

4.4.4 Execução do terceiro subtrecho

O terceiro subtrecho foi realizado dia 27/02/2013, compreendendo o km 60,96 ao km 61,02. Este subtrecho compreende uma rampa de 1,2% (active), sendo a faixa mais carregada (sentido Jarinu – Campo Limpo Paulista / São Paulo), no mesmo sentido do primeiro subtrecho. Assim como no anterior, nesse subtrecho foram assentadas as telas de aço soldadas sobre o pavimento existente.

A diferença entre o processo executivo desse subtrecho para o anterior foi essencialmente a mudança de posicionamento da tela. Adotou-se a colocação da tela com as barras transversais para baixo e na sequência, com as barras para cima, invertendo-se o lado. Esse cuidado se deu procurando diminuir a espessura na

colocação das telas, evitando-se a sobreposição. Também se aumentou o cobrimento na emenda no sentido longitudinal, que passou a ser de uma malha. Além disso, houve uma melhoria na fixação da mesma, e o cuidado no recorte destas, nos cantos, onde ocorria sobreposição de todas as telas para que houvesse a sobreposição de no máximo dois fios (Figuras 4.27 e 4.28).

Figura 4.45 - Esquema sem escala da colocação da tela sobre o pavimento no primeiro subtrecho.
Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.46 - Esquema sem escala da colocação da tela sobre o pavimento no segundo subtrecho.
Fonte: MackPesquisa (2013).

O subtrecho em questão estava nivelado, sem presença de defeitos do tipo “jacarés” e buracos. O procedimento de execução seguiu o do subtrecho anterior, ocorrendo as seguintes etapas:

- 1) Assentamento das telas de aço, com sobreposição de uma malha (2 fios) no sentido longitudinal (do tráfego) e duas malhas no sentido transversal, fixadas sobre o pavimento existente, com tachões.
- 2) Pintura de ligação com emulsão RR-2C, com taxa de cerca de $0,9 \text{ l/m}^2$.
- 3) Lançamento de CAUQ, faixa III do DER-SP, com o uso da vibro acabadora, com espessura de 7 cm compactada, tendo sido mantida a temperatura de aplicação entre 150°C a 165°C , com compressão da camada de recapeamento realizada com o rolo de chapa e o de pneus. O subtrecho foi liberado no mesmo dia ao tráfego.

As ilustrações das diversas etapas estão apresentadas nas Figuras 4.47 a 4.54.

Figura 4.47 - Amarração das telas com arame recozido. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.48 - Emenda no sentido longitudinal do tráfego. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.49 - Recorde no “encontro” das quatro telas. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.50 - Tela assentada e fixada sobre pavimento existente. Fonte: MackPesquisa (2013).

(a)

(b)

Figura 4.51 - Aplicação do ligante (a) e do recapeamento (b). Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.52 - Compressão com rolo de pneu. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.53 - Compressão com rolo de pneus e liso. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.54 - Marcação da localização das emendas das telas. Fonte: MackPesquisa (2013).

4.4.5 Execução do quarto subtrecho

O quarto subtrecho foi realizado dia 28/02/2013, compreendendo o km 61,04 ao km 61,12. Este subtrecho compreende uma rampa de 1,2% (active), sendo a faixa mais carregada (sentido Jarinu – Campo Limpo Paulista / São Paulo), no mesmo sentido do primeiro subtrecho.

Nesse subtrecho foram assentadas as telas de aço soldadas sobre o pavimento fresado. Foi realizada uma fresagem de 6 cm de espessura. A diferença entre o processo executivo desse subtrecho para o anterior foi essencialmente a introdução da fresagem do pavimento existente.

Adotou-se a mudança de posicionamento da tela, conforme havia sido executado no segundo subtrecho, ou seja, a colocação da tela com as barras transversais para baixo e na sequência, com as barras para cima, invertendo-se o lado.

Esse cuidado se deu procurando diminuir a espessura na colocação das telas, evitando-se a sobreposição. O cobrimento na emenda no sentido longitudinal voltou a ser conforme executado no segundo subtrecho, sem sobreposição de nenhuma malha.

Além disso, houve uma melhoria na fixação das mesmas, passando-se a usar barras de aço de 5mm, cravadas no pavimento fresado. Houve também o cuidado no recorte das telas, nos cantos, onde ocorria sobreposição de todas as telas, para que houvesse a sobreposição de no máximo dois fios. O procedimento de execução seguiu o do subtrecho anterior, ocorrendo as seguintes etapas:

- 1) Fresagem de 6 cm do pavimento existente e limpeza com jato de ar e vassoura mecânica;
- 2) Assentamento das telas de aço, sem sobreposição de malha no sentido longitudinal (do tráfego) e duas malhas no sentido transversal, fixadas sobre o pavimento existente, com uso de barras de aço de 5mm, cravadas no pavimento fresado;
- 3) Pintura de ligação com emulsão RR-2C, com taxa de cerca de 0,9 l/m²;
- 4) Lançamento de CAUQ, faixa III do DER-SP, com o uso da vibro acabadora, com espessura de 7 cm compactada, tendo sido mantida a temperatura de aplicação entre 150°C a 165°C, com compressão da camada de recapeamento realizada com o rolo de chapa e o de pneus. O subtrecho foi liberado no mesmo dia ao tráfego.

As ilustrações das diversas etapas estão apresentadas nas Figuras 4.55 a 4.63.

Figura 4.55 - Fresagem de 6 cm do pavimento existente. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.56 - Limpeza com vassoura mecânica. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.57 - Limpeza com jato de ar. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.58 - Transporte da tela até o subtrecho a ser executado. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.59 - Recorte nos trechos de sobreposição nas emendas. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.60 - Fixação da tela soldada com uso de pedaços de barras de aço. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.61 - Fixação da tela soldada no pavimento existente. Fonte: MackPesquisa (2013).

(a)

(b)

Figura 4.62 - Vista da emenda no sentido transversal (duas malhas ou 3 fios) (a) e aplicação da massa (b). Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.63 - Compressão da camada de recapeamento com rolo de pneus. Fonte: MackPesquisa (2013).

4.4.6 Execução do quinto subtrecho

O quinto subtrecho foi realizado dia 13/03/2013, compreendendo o km 61,16 ao km 61,22. Este subtrecho compreende uma rampa de 1,2% (active), sendo a faixa mais carregada no mesmo sentido do primeiro subtrecho.

Nesse subtrecho foram assentadas as telas sobre o pavimento existente, que se apresentava com elevada presença defeitos. A diferença entre o processo executivo desse subtrecho para o anterior, no sentido de diminuir ou mesmo “sanar” o problema de aparecimento das trincas transversais, foi essencialmente a remoção de barras transversais da primeira malha, aumentando a franja (retirada do fio periférico transversal ao sentido do tráfego) (Figuras 4.64 e 4.65).

Figura 4.64 - Recorte das emendas. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.65 - Remoção de barras transversais da primeira malha com aumento da franja. Fonte: MackPesquisa (2013).

O cobrimento na emenda no sentido longitudinal ocorreu sem sobreposição de malha. Além disso, houve uma melhoria na fixação das mesmas, passando-se a usar barras de aço de 5mm, cravadas no pavimento. Houve também o cuidado no recorte das telas, nos cantos, onde ocorria sobreposição de todas as telas, para que houvesse a sobreposição de no máximo dois fios na espessura.

Observando-se os sutrechos executados, definiu-se que esse subtrecho seria construído com a sobreposição da tela ao pavimento existente, pois essa tecnologia poderá vir a preencher a necessidade de solução para recuperação do mesmo, que dispense a fresagem.

O procedimento de execução seguiu o do subtrecho anterior, ocorrendo as seguintes etapas:

- 1) Assentamento e travamento (fixação) das telas de aço soldada, sem sobreposição de malha no sentido longitudinal (do tráfego), mas com o “franção” e duas malhas no sentido transversal. Na fixação foi realizada com a cravação de barras de aço lisa. O pavimento existente se encontrava bastante deteriorado, com presença de afundamento na trilha de roda e jacaré;
- 2) Pintura de ligação com emulsão RR-2C, com taxa de cerca de 0,9 l/m²;
- 3) Lançamento de CAUQ, faixa III do DER-SP, com o uso da vibro acabadora, com espessura de 7 cm compactada, tendo sido mantida a temperatura de aplicação entre 150 a 155°C, com compressão da camada de recapeamento realizada com o rolo de chapa e o de pneus. O subtrecho foi liberado no mesmo dia ao tráfego.

As ilustrações das diversas etapas estão apresentadas nas Figuras 4.66 a 4.71.

Figura 4.66 - Presença de afundamento na trilha de roda e jacaré no pavimento existente. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.67 - Fixação da tela e recorte nos pontos de sobreposição (4 telas). Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.68 - Fixação da tela. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 4.69 - Marcação da localização das emendas. Fonte: MackPesquisa (2013).

(a)

(b)

Figura 4.70 - Aplicação de pintura de ligação com emulsão RR-2C (a) e da massa asfáltica (b). Fonte: MackPesquisa (2013).

(a)

(b)

Figura 4.71 - Controle da temperatura (a) e passagem de rolo de pneu (b). Fonte: MackPesquisa (2013).

4.5 EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL (IMPLANTAÇÃO)

As melhorias realizadas na Rodovia SP-354 ocasionaram na implantação de faixas adicionais com largura total da plataforma de 4,70 m, sendo a largura de 3,50 m destinada ao tráfego dos veículos comerciais e 1,20 m de faixa de segurança. Para a avaliação da condição geral da estrutura do pavimento, foi realizado levantamento funcional do segmento de implantação em faixa adicional no km 68 para posterior inserção da tela de aço.

Foi verificado que após um ano da implantação da faixa adicional (2013), o revestimento asfáltico apresentava remendos, áreas com desgaste superficial e ondulações em segmentos alternados do pavimento. Em alguns segmentos localizados observaram-se áreas apresentando afundamentos de consolidação locais e nas trilhas de roda, ondulações e afundamentos plásticos com trincas interligadas do tipo FC-3 formando “couro de jacaré”.

4.5.1 Estrutura proposta para o trecho

Com o intuito de recuperar o segmento de implantação da faixa adicional foi proposta a inserção da tela para o desenvolvimento da pesquisa, como uma estrutura alternativa de reabilitação do trecho conforme apresentado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Estrutura proposta no trecho de implantação. Fonte: adaptado de Ressutte et al. (2015).

Projeto original	Espessura (cm)	Proposta	Espessura (cm)
CAUQ	6,0	Fresa/Recompõe	6,0
-	-	Tela de aço	-
BINDER	7,0	BINDER	7,0
BGS	20,0	BGS	20,0
Rachão	20,0	Rachão	20,0

O principal motivo para a aplicação da tela no segmento de faixa adicional foi que devido às novas melhorias feitas pelo DER/SP na SP-354 no ano de 2012, onde parte do tráfego de veículos comerciais de rodovias lindeiras como a Rodovia

Anhanguera (SP-330) foi desviado causando aumento das solicitações no pavimento além do previsto em projeto.

De acordo com dados oficiais do DER/SP, houve aumento da passagem de veículos comerciais de 37% no ano de 2012 (Tabela 4.10). Este novo cenário levou o pavimento a apresentar elevada presença de afundamentos e trincamentos.

Tabela 4.10 - Evolução dos volumes de tráfego. Fonte: adaptado de Ressutte et al. (2015).

Ano	VDM			Taxa de crescimento anual		
	Passeio	Comercial	Total	Passeio	Comercial	Total
2.007	5.342	1.420	6.762	-	-	-
2.008	5.645	1.501	7.146	6%	6%	6%
2.009	5.973	1.588	7.561	6%	6%	6%
2.010	6.357	1.690	8.047	6%	6%	6%
2.011	6.581	1.750	8.331	4%	4%	4%
2.012	7.906	2.393	10.299	20%	37%	24%
2.013	8.309	2.515	10.824	5%	5%	5%
2.014	8.592	2.584	11.176	3%	3%	3%

Levando esses dados em consideração, decidiu-se que neste segmento iriam ser assentadas as telas de aço sobre o revestimento existente parcialmente fresado. Essa opção foi adotada devido ao primeiro experimento realizado na SP-354, onde foi verificado que no subtrecho fresado o comportamento da tela foi superior aos demais, pois deste modo, evitou-se a movimentação da tela e consequentemente, o aparecimento de trincas.

4.5.2 Execução do trecho

O experimento foi realizado dia 23/10/2013, estando localizado próximo ao km 68 com rampa de 3,6% (active), (sentido Jarinu – Campo Limpo Paulista / São Paulo), no mesmo sentido dos primeiro trecho em restauração.

Foi realizada fresagem com 6 cm de espessura (Figura 4.72 e 4.78). Adotou-se uma pequena alteração no posicionamento da tela, conforme havia sido executado no primeiro experimento, ou seja, a colocação da tela com as barras transversais para baixo e na sequência, com as barras para cima, invertendo-se o lado.

Figura 4.72 - Fresagem do trecho. Fonte: Ressutte et al. (2015).

Figura 4.73 - Limpeza do trecho fresado. Fonte: Ressutte et al. (2015).

Esse cuidado se deu procurando diminuir a espessura na colocação das telas, evitando-se a sobreposição. O cobrimento na emenda no sentido longitudinal foi executado sem sobreposição de nenhuma tela.

Além disso, houve uma melhoria na fixação das mesmas, passando-se a usar grampos de aço de 5 mm, cravadas no pavimento fresado. Houve também o cuidado no recorte das telas, nos cantos, onde ocorria sobreposição de todas as telas, evitando-se a sobreposição de no máximo dois fios (Figura 4.74 e 4.76).

Figura 4.74 - Fixação da tela sobre pavimento com grampos de aço. Fonte: Ressutte et al. (2015).

Figura 4.75 - Recorte das telas e amarração das emendas com aço recozido. Fonte: Ressutte et al. (2015).

Figura 4.76 - Detalhe da emenda fixa do pavimento. Fonte: Ressutte et al. (2015).

Posteriormente à fixação da tela foram aplicadas as camadas de imprimadura ligante, além da camada de CAUQ na espessura compactado de 6 cm (Figura 4.77 e 4.78).

Figura 4.77 - Aplicação das camadas de ligante e CAUQ. Fonte: Ressutte et al. (2015).

Figura 4.78 - Passagem do rolo tipo pneu e liso (a) para o acabamento da compactação (b). Fonte: Ressutte et al. (2015).

5 ESTUDOS PARAMÉTRICOS

Os estudos paramétricos são ferramentas que possibilitam compreender de forma mais rápida a resposta mecânica da estrutura de pavimento em análise, além de também prever a influência das variáveis intervenientes nos modelos e seus graus de responsabilidades ante as demais (DAIBERT, 2014; LOPES, 2012; VILLELA, 2012).

Para obter uma melhor análise da incorporação da tela de aço no revestimento asfáltico, buscando-se a determinação de esforços atuantes gerados no interior da estrutura de pavimento como tensões, deformações e deslocamentos, foram elaborados dois estudos paramétricos de indicadores estruturais em pavimentos flexíveis:

- **Primeiro estudo paramétrico:** baseou-se na análise e verificação do comportamento estrutural e defletoométrico do pavimento, constituído de 3 camadas, envolvendo simulações de estruturas compostas de camada asfáltica com módulo elevado (incorporação da tela de aço) camada de base granular e um substrato remanescente.
- **Segundo estudo paramétrico:** refere-se a uma estrutura de pavimento flexível composta por duas camadas, representando um revestimento asfáltico com módulo elevado (incorporação da tela de aço) sobre um substrato remanescente, analisando qual a espessura mínima de revestimento asfáltico a ser utilizado para restauração quando da utilização da tela de aço.

Para o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos nas estruturas simuladas, fez-se uso do software ELSYM-5. As hipóteses relativas ao sistema são as mesmas da solução de Burmister, no qual admitem que os materiais sejam homogêneos, uniformes e isotrópicos (LOPES, 2012).

Para melhor compreensão dos resultados, todos os valores estão em unidades usuais em projetos de pavimentação, ou seja, módulos de resiliência em kgf/cm^2 e carga em kgf e espessuras em cm .

5.1 PARÂMETROS INDEPENDENTES

Para os estudos desenvolvidos, os parâmetros independentes foram distribuídos em duas características da estrutura tipo proposta:

- Característica geométrica, onde foram variadas as espessuras de base e de revestimento para estrutura de implantação e estrutura remanescente e de camada de rolamento para estrutura de restauração;
- Característica mecânica, que apresenta os diversos valores de módulo de resiliência para as camadas restauradas e também para a estrutura remanescente.

As Figuras 5.1 e 5.2 ilustram as estruturas propostas com os valores estabelecidos para as características geométrica e mecânica em estudo.

Figura 5.1 - Pavimento tipo referente ao primeiro Estudo Paramétrico.

Figura 5.2 - Pavimento tipo referente ao segundo Estudo Paramétrico.

As simulações de carregamento foram deduzidas a partir de dois equipamentos utilizados com a finalidade de investigação estrutural do pavimento, FWD e a Viga Benkelman (VB). Em ambos os casos, as simulações foram desenvolvidas tanto para o eixo padrão adotado no Brasil (8,2 tf), quanto para o eixo padrão francês (13 tf), um vez que já foi estudada esta solução de restauração de pavimentos com a inserção da tela de aço, em países da Europa que adotaram esta carga de referência.

Na simulação com o equipamento FWD, as duas cargas utilizadas para análise do efeito do eixo padrão adotado no Brasil e francês foram equivalentes a 4,1 tf e 6,5 tf, respectivamente. As disposições geométricas destes esforços verticais obedeceram às coordenadas, em mm, apresentadas na Tabela 5.1, lembrando que essas coordenadas são as mais utilizadas para análise no Brasil, dado que, na Europa e nos Estados Unidos o espaçamento dos geofones pode ser diferente.

Tabela 5.1 - Distribuição do carregamento para simulação com FWD.

Geofone	DF1	DF2	DF3	DF4	DF5	DF6	DF7	DF8	DF9
Distância (cm)	0	20	25	30	45	60	90	120	150

Em vista da maior praticidade de manuseio, para a VB, no Eixo Simples de Roda Dupla (ESRD) simulado, foram utilizadas duas cargas por roda dupla, espaçadas de 28,8 cm, sendo o número de cargas aplicadas caracterizada por quatro esforços verticais de 2,05 tf (ou de 3,25 tf, conforme o caso do eixo padrão francês) dispostos geometricamente conforme Figura 5.3.

Figura 5.3 - Distribuição do carregamento para simulação com VB.

Os demais parâmetros considerados para o plano fatorial de modelagem estão apresentados na Figura 5.4. Tal plano fatorial resultou em 4544 combinações de diferentes estruturas de pavimento asfáltico flexível. Essas estruturas foram todas submetidas à simulação de carregamento no programa ELSYM-5 e os resultados formaram um banco de dados, com os valores das características geométricas e elásticas das camadas, os valores de deformações ϵ_t e ϵ_v e das deflexões afastadas a diversas distâncias do ponto de aplicação da carga para caracterização da bacia deflectométrica.

Estrutura	Camada	Variável	Unidade	Valor						Quantidade	
Implantação	Revestimento	h_{rev}	cm	6		10		15		20	4
		MR_{rev}	kgf/cm ²	30.000		60.000		90.000		120.000	4
		μ_{REV}		0,35						1	
	Base	h_{base}	cm	15		30		45		60	4
		MR_{base}	kgf/cm ²	1.500		2.500		3.500		4.500	4
		μ_{base}		0,40						1	
	Subleito	h_{sub}	cm	(semi-infinito)						1	
		MR_{sub}	kgf/cm ²	500		1.000		1.500		2.000	4
		μ_{sub}		0,45						1	
Sub-total de simulações (IMPLANTAÇÃO)											1024
Estrutura	Camada	Variável	Unidade	Valor						Quantidade	
Restauração	Revestimento	h_{rev}	cm	6		10		15		20	4
		MR_{rev}	kgf/cm ²	30.000		60.000		90.000		120.000	4
		μ_{REV}		0,35						1	
	Subleito	h_{sub}	cm	(semi-infinito)						1	
		Mr_{sub}	kgf/cm ²	250	750	1.250	2.250	3.000	3.750	4.500	7
		μ_{sub}		0,45						1	
Sub-total de simulações (RESTAURAÇÃO)											112
Simulação de Carregamento											
VB	Simulação I	$Q_1/4$	kgf	2050						2	
		p_1	kgf/cm ²	5,6							
	Simulação II	$Q_2/4$	kgf	3250							
		p_2	kgf/cm ²	6,6							
FWD	Simulação III	$Q_1/2$	kgf	4100						2	
		R	cm	15							
	Simulação IV	$Q_2/2$	kgf	6500							
		R	cm	15							
Total de Simulações (IMPLANTAÇÃO)											4096
Total de Simulações (RESTAURAÇÃO)											448
Total de Simulações (GERAL)											4544

Figura 5.4 - Parâmetros de entrada das camadas simuladas.

5.2 PARÂMETROS ESTRUTURAIS DEPENDENTES

Para melhor compreensão do efeito da camada asfáltica incorporada à tela de aço, para esta pesquisa, procurou-se verificar os valores máximos dos indicadores estruturais correspondentes à fadiga e deformação permanente da estrutura nos pontos críticos a seguir relacionados:

- Deslocamento vertical recuperável máximo na superfície do pavimento (D_0);
- Deformação específica máxima de tração (ϵ_t), na fibra inferior da camada asfáltica para avaliação da fadiga;
- Deformação vertical máxima de compressão (ϵ_v), no topo do subleito nas estruturas de implantação.

Considerando que o valor da deflexão máxima (D_0) pode não ser suficiente para a avaliação estrutural do pavimento, quando analisado isoladamente, procurou-se utilizar indicadores complementares a partir das características da linha de deformação elástica da estrutura, quando submetida à ação de um carregamento. Assim sendo, além da magnitude das deflexões máximas, os seguintes Indicadores de Curvatura (IC) foram adotados como variáveis dependentes no estudo:

Tabela 5.2 - Indicadores de Curvatura analisados.

Indicador	Fórmula	Unidades
D_0 - Deflexão Máxima	-	$D_0 [10^{-2} \text{ mm}]$
R - Raio de Curvatura	$R = 6250 / 2 \times (D_0 - D_{25})$	R [m]
SCI - Índice de Curvatura da Superfície	$SCI = D_0 - D_{30}$	SCI [10^{-2} mm]
BDI - Índice de Danos a Base	$BDI = D_{30} - D_{60}$	BDI [10^{-2} mm]
BCI - Índice da Curvatura da Base	$BCI = D_{60} - D_{90}$	BCI [10^{-2} mm]
D_{120}	-	$D_{120} [10^{-2} \text{ mm}]$
$R \times D_0$	-	$R \times D_0 [\text{m} \times 10^{-2} \text{ mm}]$

5.3 ESTUDO PARAMÉTRICO (IMPLANTAÇÃO)

Este primeiro estudo foi fundamentado na análise do comportamento estrutural e deflectométrico do pavimento envolvendo simulações de estruturas compostas de camada asfáltica levando em consideração a incorporação da tela de aço (módulo elevado), camada de base granular e do subleito.

Os resultados foram processados obtendo equações de correlação entre os indicadores estruturais e os indicadores de curvatura. As Tabelas 5.3 a 5.4 apresentam resumidamente os coeficientes dos modelos de regressão e parâmetros estatísticos de análise para os indicadores estruturais e de curvatura, tanto para VB quanto para o equipamento FWD.

A partir dos resultados simulados, foram efetuadas regressões múltiplas de modo a obter relações entre os parâmetros de saída D_0 , ϵ_t , ϵ_v e as variáveis elásticas das camadas, conforme o modelo genérico (5.1) mostrado a seguir, lembrando que a equação apresentada é do tipo potencial, onde as letras (a, b, c, d, e, f), são os expoentes da equação.

$$\text{Parâmetro} = k \times (h_{rev}^a \times MR_{rev}^b) \times (h_{base}^c \times MR_{base}^d) \times MR_{sub}^e \times Q^f \quad (5.1)$$

Tabela 5.3 - Expoentes e parâmetros de análises (FWD) para implantação.

FWD									
INDICADORES ESTRUTURAIS									
Parâmetro	Interseção	Coeficiente k	Expoentes						R ²
			a	b	c	d	e	f	
D_0	2,368	233,483	-0,615	-0,221	-0,163	-0,275	-0,503	0,99999	0,976
$\epsilon_t (10^{-4})$	1,555	35,877	-0,809	-0,511	-0,101	-0,390	-0,061	1,00000	0,948
$\epsilon_v (10^{-4})$	2,504	319,132	-0,923	-0,288	-0,817	-0,192	-0,474	1,00000	0,953
INDICADORES DE CURVATURA									
Parâmetro	Interseção	Coeficiente k	Expoentes						R ²
			a	b	c	d	e	f	
R	0,589	3,885	1,340	0,572	0,059	0,273	0,134	-1,00002	0,969
SCI	2,956	903,823	-1,320	-0,543	-0,082	-0,299	-0,135	1,00004	0,968
BDI	2,079	119,852	-0,783	-0,242	-0,277	-0,456	-0,270	0,99992	0,900
BCI	1,076	11,901	-0,284	-0,095	-0,318	-0,359	-0,521	1,00008	0,889
D_{120}	0,334	2,159	0,037	0,008	-0,026	-0,011	-0,993	1,00000	0,995
R x D_0	2,958	907,029	0,725	0,351	-0,103	<u>-0,002</u>	-0,369	<u>-0,00003</u>	0,956

Tabela 5.4 - Expoentes e parâmetros de análises (VB) para implantação.

VB									
INDICADORES ESTRUTURAIS									
Parâmetro	Interseção	Coeficiente k	Expoentes						R ²
			a	b	c	d	e	f	
D ₀	2,3384979	218,021	-0,438	-0,139	-0,139	-0,228	-0,636	0,99483	0,980
ε _t (10 ⁻⁴)	1,1389643	13,771	-0,779	-0,493	-0,114	-0,398	-0,073	0,89321	0,952
ε _v (10 ⁻⁴)	2,5049503	319,853	-0,832	-0,258	-0,700	-0,188	-0,511	0,97880	0,953
INDICADORES DE CURVATURA									
Parâmetro	Interseção	Coeficiente k	Expoentes						R ²
			a	b	c	d	e	f	
R	0,5230523	3,335	1,318	0,480	0,066	0,305	0,192	-0,98366	0,956
SCI	3,0213576	1050,407	-1,271	-0,452	-0,096	-0,332	-0,192	0,98358	0,957
BDI	2,1962213	157,116	-0,674	-0,205	-0,284	-0,442	-0,326	0,99676	0,894
BCI	1,2689291	18,575	-0,235	-0,079	-0,295	-0,322	-0,579	1,00192	0,908
D ₁₂₀	0,790	6,159	0,035	0,009	-0,003	0,005	-1,012	1,00046	0,998
R x D ₀	2,8615502	727,026	0,880	0,341	-0,073	0,077	-0,443	<u>0,01117</u>	0,950

Nota-se pelos resultados mostrados nas Tabelas 5.3 e 5.4, em relação aos indicadores estruturais, que todos os expoentes correspondentes às espessuras e módulos de resiliência das camadas, apresentam valores negativos, ou seja, tais variáveis independentes são inversamente proporcionais aos indicadores estruturais estudados (ε_t, ε_v e D₀).

Todos os modelos resultantes apresentaram expoente de carregamento “Q” próximos de 1, ou seja, os parâmetros estudados são praticamente proporcionais ao carregamento, com exceção do modelo de parâmetro RxD₀ tanto para FWD como para VB. Para efeito de continuidade de cálculos estatísticos, esse parâmetro foi desconsiderado para as demais análises.

Em todos os casos, as relações obtidas apresentaram valores de coeficientes de determinação, R², superiores a 0,89, indicando que tais modelos são satisfatórios para os parâmetros estudados. Com intuito de obter modelos paramétricos mais precisos que determinassem os esforços atuantes na estrutura em estudo, a partir dos indicadores de curvatura, foram desenvolvidos novos estudos.

De acordo com o apresentado na Tabela 5.2, foram adotados sete indicadores de curvatura, logo, formando sete elementos a serem combinados. Por análise combinatória, expressa pela Equação 5.2, verifica-se que as combinações simples destes 7 elementos geraram 127 combinações para cada um dos 2 esforços atuantes (ϵ_t e ϵ_v).

$$C_1^7 + C_2^7 + C_3^7 + C_4^7 + C_5^7 + C_6^7 + C_7^7 = 127 \text{ combinações} \quad (5.2)$$

Todos os modelos foram gerados em função do módulo do CAUQ, com o propósito de se obter modelos que demonstrem os esforços atuantes em função da inserção da tela de aço. As mesmas 127 combinações foram estudadas, tanto para carregamentos simulados com VB quanto com FWD, totalizando 254 modelos para ϵ_t e 254 modelos para ϵ_v , totalizando 508 modelos.

Para hierarquizar os modelos teóricos que melhor responderam aos esforços analisados foram realizadas todas 508 simulações através do programa *Microsoft Excel*, indicando as expressões matemáticas obtidas.

Dos resultados pode-se verificar que dos modelos gerados, a maioria apresentou fortes coeficientes de determinação (R^2), quando atrelados a cinco ou mais variáveis (D_0 , R , SCI , etc.). Resultados com apenas 1 ou 2 parâmetros na equação, apresentaram R^2 inferiores a 0,70. Também constatou-se que as equações que possuíam como parâmetros os indicadores de curvatura do BCI, D_{120} e RxD_0 apresentaram coeficientes de determinação muito baixos.

Como critério de exclusão, foi estabelecido que todas as equações que possuam como parâmetro os indicadores de curvatura do BCI, D_{120} e RxD_0 não serão considerados, logo, o número de expressões matemáticas foi reduzido para 60, essas por sua vez foram hierarquizadas, em ordem decrescente de valores de R^2 conforme Tabelas 5.5 (equações para FWD) e 5.6 (equações para VB).

Tabela 5.5 - Equações de Correlação entre os Esforços Solicitantes e os Indicadores de Curvatura, a partir dos estudos paramétricos para carga de FWD.

ES = f (IC)		Equação de correlação	R ²
$\epsilon_t (10^{-4})$	f(D0 ; R ; SCI ; BDI)	$5,21E+10 \times D0^{-0,279} \times R^{-3,100} \times SCI^{-2,807} \times BDI^{0,806}$	0,9477
	f(D0 ; R ; BDI)	$2,00E+01 \times D0^{-0,149} \times R^{-0,497} \times BDI^{0,455}$	0,9448
	f(D0 ; SCI ; BDI)	$3,19E-01 \times D0^{-0,124} \times SCI^{0,532} \times BDI^{0,392}$	0,9436
	f(R ; SCI ; BDI)	$4,39E+02 \times R^{-0,907} \times SCI^{-0,447} \times BDI^{0,375}$	0,9425
	f(R ; BDI)	$1,45E+01 \times R^{-0,493} \times BDI^{0,335}$	0,9424
	f(SCI ; BDI)	$2,51E-01 \times SCI^{0,530} \times BDI^{0,291}$	0,9420
	f(D0 ; R ; SCI)	$2,14E-07 \times D0^{0,073} \times R^{1,686} \times SCI^{2,396}$	0,9355
	f(R ; SCI)	$2,17E-08 \times R^{1,983} \times SCI^{2,739}$	0,9344
	f(D0 ; SCI)	$2,11E-01 \times D0^{0,142} \times SCI^{0,647}$	0,9297
	f(SCI)	$2,95E-01 \times SCI^{0,727}$	0,9247
	f(D0 ; R)	$3,19E+01 \times D0^{0,177} \times R^{-0,615}$	0,9246
	f(R)	$1,09E+02 \times R^{-0,713}$	0,9165
	f(D0 ; BDI)	$2,82E-01 \times D0^{-0,101} \times BDI^{1,000}$	0,8428
	f(BDI)	$2,32E-01 \times BDI^{0,916}$	0,8417
	f(D0)	$5,23E-02 \times D0^{0,938}$	0,7057
$\epsilon_v (10^{-4})$	f(D0 ; R ; SCI ; BDI)	$9,41E+03 \times D0^{0,294} \times R^{-1,358} \times SCI^{-1,589} \times BDI^{1,199}$	0,8010
	f(D0 ; SCI ; BDI)	$1,15E-01 \times D0^{0,362} \times SCI^{-0,126} \times BDI^{1,017}$	0,8006
	f(D0 ; R ; BDI)	$4,40E-02 \times D0^{0,367} \times R^{0,116} \times BDI^{1,000}$	0,8005
	f(R ; SCI ; BDI)	$2,95E+12 \times R^{-3,666} \times SCI^{-4,072} \times BDI^{1,653}$	0,7977
	f(D0 ; BDI)	$1,19E-01 \times D0^{0,356} \times BDI^{0,873}$	0,7973
	f(SCI ; BDI)	$2,30E-01 \times SCI^{-0,121} \times BDI^{1,312}$	0,7923
	f(R ; BDI)	$9,63E-02 \times R^{0,106} \times BDI^{1,294}$	0,7920
	f(BDI)	$2,35E-01 \times BDI^{1,169}$	0,7893
	f(D0 ; R ; SCI)	$1,32E-22 \times D0^{0,818} \times R^{5,759} \times SCI^{6,147}$	0,7855
	f(D0 ; SCI)	$3,94E-02 \times D0^{1,052} \times SCI^{0,172}$	0,7462
	f(D0 ; R)	$1,23E-01 \times D0^{1,085} \times R^{-0,145}$	0,7441
	f(D0)	$2,72E-02 \times D0^{1,264}$	0,7371
	f(R ; SCI)	$1,07E-33 \times R^{9,076} \times SCI^{9,975}$	0,7067
	f(SCI)	$4,77E-01 \times SCI^{0,765}$	0,5900
	f(R)	$2,28E+02 \times R^{-0,741}$	0,5700

Tabela 5.6 - Equações de Correlação entre os Esforços Solicitantes e os Indicadores de Curvatura, a partir dos estudos paramétricos para carga de VB.

ES = f (IC)		Equação de correlação	R ²
$\epsilon_t (10^{-4})$	f(D0 ; R ; SCI ; BDI)	$9,08E-07 \times D0^{-0,114} \times R^{1,282} \times SCI^{1,985} \times BDI^{0,166}$	0,9346
	f(D0 ; R ; SCI)	$7,69E-10 \times D0^{-0,056} \times R^{2,126} \times SCI^{2,934}$	0,9341
	f(D0 ; SCI ; BDI)	$4,07E-02 \times D0^{-0,178} \times SCI^{0,560} \times BDI^{0,377}$	0,9337
	f(R ; SCI ; BDI)	$1,50E-10 \times R^{2,308} \times SCI^{3,134} \times BDI^{-0,062}$	0,9333
	f(R ; SCI)	$4,05E-09 \times R^{1,908} \times SCI^{2,682}$	0,9331
	f(D0 ; R ; BDI)	$2,70E+00 \times D0^{-0,204} \times R^{-0,502} \times BDI^{0,462}$	0,9328
	f(SCI ; BDI)	$2,82E-02 \times SCI^{0,583} \times BDI^{0,206}$	0,9279
	f(R ; BDI)	$2,09E+00 \times R^{-0,522} \times BDI^{0,274}$	0,9251
	f(D0 ; SCI)	$3,01E-02 \times D0^{0,030} \times SCI^{0,704}$	0,9187
	f(SCI)	$3,27E-02 \times SCI^{0,719}$	0,9184
	f(D0 ; R)	$6,76E+00 \times D0^{0,068} \times R^{-0,661}$	0,9076
	f(R)	$1,07E+01 \times R^{-0,693}$	0,9057
	f(D0 ; BDI)	$4,67E-02 \times D0^{-0,333} \times BDI^{1,162}$	0,8123
	f(BDI)	$2,33E-02 \times BDI^{0,894}$	0,7913
	f(D0)	$8,05E-03 \times D0^{0,782}$	0,5067
$\epsilon_v (10^{-4})$	f(D0 ; R ; SCI ; BDI)	$4,84E-01 \times D0^{0,232} \times R^{-0,149} \times SCI^{-0,149} \times BDI^{0,971}$	0,8329
	f(D0 ; R ; BDI)	$1,58E-01 \times D0^{0,239} \times R^{-0,015} \times BDI^{0,949}$	0,8329
	f(D0 ; SCI ; BDI)	$1,40E-01 \times D0^{0,240} \times SCI^{0,016} \times BDI^{0,946}$	0,8329
	f(D0 ; BDI)	$1,41E-01 \times D0^{0,235} \times BDI^{0,969}$	0,8329
	f(R ; SCI ; BDI)	$2,59E+07 \times R^{-2,247} \times SCI^{-2,498} \times BDI^{1,437}$	0,8296
	f(SCI ; BDI)	$2,29E-01 \times SCI^{-0,015} \times BDI^{1,176}$	0,8264
	f(R ; BDI)	$2,13E-01 \times R^{0,009} \times BDI^{1,169}$	0,8264
	f(BDI)	$2,30E-01 \times BDI^{1,158}$	0,8263
	f(D0 ; R ; SCI)	$5,07E-19 \times D0^{0,568} \times R^{4,791} \times SCI^{5,403}$	0,8229
	f(D0 ; SCI)	$6,57E-02 \times D0^{0,762} \times SCI^{0,377}$	0,7742
	f(D0 ; R)	$1,04E+00 \times D0^{0,797} \times R^{-0,341}$	0,7668
	f(R ; SCI)	$2,56E-26 \times R^{6,992} \times SCI^{7,951}$	0,7570
	f(D0)	$3,24E-02 \times D0^{1,165}$	0,7005
	f(SCI)	$5,27E-01 \times SCI^{0,757}$	0,6341
	f(R)	$2,19E+02 \times R^{-0,719}$	0,6072

Dessa hierarquização estabelecida pode-se deduzir que os parâmetros que melhor correlacionam com os esforços solicitantes são:

- Para ε_t :

$$\varepsilon_{tFWD} = 2,00E - 03 \times D0^{-0,149} \times R^{-0,497} \times BDI^{0,455} / R^2 = 0,9448 \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_{tVB} = 2,70E - 04 \times D0^{-0,204} \times R^{-0,502} \times BDI^{0,462} / R^2 = 0,9328 \quad (5.4)$$

- Para ε_v :

$$\varepsilon_{vFWD} = 4,40E - 06 \times D0^{0,367} \times R^{0,116} \times BDI^{1,000} / R^2 = 0,8005 \quad (5.5)$$

$$\varepsilon_{vVB} = 1,58E - 05 \times D0^{0,239} \times R^{-0,015} \times BDI^{0,949} / R^2 = 0,8329 \quad (5.6)$$

Onde:

ε_t = deformação horizontal máxima na fibra inferior da camada betuminosa (cm/cm);

ε_v = deformação específica vertical de compressão (cm/cm);

$D0$ = deflexão máxima do topo da camada betuminosa (10^{-2} mm);

R = raio de curvatura (m);

BDI = índice de danos a base (10^{-2} mm).

Analisando as Tabelas 5.5 e 5.6 verifica-se que os valores de R^2 da primeira equação para as escolhidas são muito próximos. Por esta razão optou-se por adotar uma equação com o menor número de variáveis, mas com mesmo potencial de explicação do fenômeno em questão. A partir dos modelos selecionados, percebe-se que a obtenção dos esforços solicitantes pode ser diretamente efetuada por meio dos modelos apresentados em função de parâmetros exclusivamente defletoométricos obtidos com equipamento tipo FWD ou mesmo VB o qual é ainda muito utilizado nas obras rodoviárias brasileiras por sua praticidade e custo inferior ao do FWD.

Das equações apresentada pode-se também concluir que em todas as situações os modelos que obtiveram menor coeficiente de determinação foram aqueles em função de somente um parâmetro e principalmente em função da deflexão máxima (D_0), parâmetro no qual muitos projetistas se baseiam para determinação de soluções de restauração em projetos de pavimentação.

Todos os demais, em função de dois ou mais parâmetros de curvatura, invariavelmente apresentaram melhores R^2 . Isto demonstra que para a melhor explicação dos esforços solicitantes de uma estrutura é interessante estudar o comportamento da bacia deflectométrica e não somente a sua deflexão máxima D_0 (VILLELA, 2012).

5.4 ESTUDO PARAMÉTRICO (RESTAURAÇÃO)

Para melhor compreensão e acurácia quanto aos estudos propostos, além do estudo paramétrico desenvolvido para implantação de novas estruturas, com o propósito de se obter modelos para determinação dos esforços solicitantes teóricos, foi realizado esse estudo visando avaliar qual é a espessura mínima de revestimento asfáltico necessária quando se incorpora a tela de aço em recapeamento de pavimentos flexíveis. Para tal, foram observadas algumas das principais metodologias brasileiras para dimensionamento de pavimentos.

Os parâmetros críticos que afetam a vida útil do revestimento asfáltico, e, portanto avaliados neste estudo, são a deflexão máxima medida no topo da camada asfáltica (D_0), e a deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada asfáltica (ϵ_t). Para este estudo foi realizado um conjunto de simulações se utilizando o software ELSYM-5, utilizando carregamento correspondente ao eixo simples padrão de rodas duplas (80 kN).

O pavimento flexível deste estudo paramétrico é composto por duas camadas, sendo a primeira o revestimento asfáltico, e a segunda a infraestrutura remanescente. Os valores de módulo de resiliência adotados para as camadas, espessuras, e os respectivos coeficientes de Poisson foram apresentados anteriormente na Figura 5.2. No total foram simulados 448 casos, sendo 224 para carregamento em VB e os outros 224 para carregamento em FWD, conforme as mesmas diretrizes apontadas no primeiro Estudo Paramétrico assim como apresentado na Figura 5.4. Nesse estudo foram determinadas as deformações horizontais na fibra inferior da camada de concreto asfáltico (ϵ_t) e as deflexões na superfície (D_0).

Assim como realizado no estudo anterior (implantação), a partir dos resultados simulados, foram efetuadas regressões múltiplas de modo a obter relações entre os parâmetros de saída D_0 e ε_t conforme o modelo genérico (5.7) mostrado a seguir, lembrando que a equação apresentada é do tipo potencial, onde as letras (a, b, c, d), são os expoentes da equação.

$$\text{Parâmetro} = k \times (h_{rev}^a \times MR_{rev}^b) \times MR_{sub}^c \times Q^d \quad (5.7)$$

Tabela 5.7 - Expoentes e parâmetros de análises (FWD) para restauração.

FWD							
INDICADORES ESTRUTURAIS							
Parâmetro	Interseção	Coeficiente k	Expoentes				R ²
			a	b	c	d	
D_0	2,334	2,16E+02	-0,753	-0,283	-0,706	1,000	0,9951
$\varepsilon_t (10^{-4})$	1,658	4,55E+01	-0,977	-0,608	-0,337	1,000	0,9588

Tabela 5.8 - Expoentes e parâmetros de análises (VB) para restauração.

VB							
INDICADORES ESTRUTURAIS							
Parâmetro	Interseção	Coeficiente k	Expoentes				R ²
			a	b	c	d	
D_0	2,293	1,96E+02	-0,563	-0,189	-0,797	0,993	0,9966
$\varepsilon_t (10^{-4})$	1,223	1,67E+01	-0,946	-0,592	-0,358	0,898	0,9671

Nota-se pelos resultados mostrados nas Tabelas 5.7 e 5.8, que assim como os resultados apresentados no estudo para implantação, todos os coeficientes correspondentes às espessuras e módulos de resiliência das camadas, apresentam valores negativos, ou seja, tais variáveis independentes são inversamente proporcionais aos indicadores estruturais estudados (D_0 e ε_t).

Todos os modelos resultantes apresentaram expoente de carregamento “Q” próximos de 1, ou seja, os parâmetros estudados são praticamente proporcionais ao carregamento. Em todos os casos, as relações obtidas apresentaram valores de coeficientes de determinação, R^2 , superiores a 0,96, indicando que tais modelos são satisfatórios para os parâmetros estudados. Por meio da análise dos dados de saída foram efetuadas regressões múltiplas, expressas pelas Equações 5.8 a 5.11.

- Para D_0 :

$$D_{0/FWD} = 2,16E + 02 \times H_{CAUQ}^{-0,753} \times MR_{CAUQ}^{-0,283} \times MR_{INFRA}^{-0,706} \times Q^{1,0} / R^2 = 0,9951 \quad (5.8)$$

$$D_{0/VB} = 1,96E + 02 \times H_{CAUQ}^{-0,563} \times MR_{CAUQ}^{-0,189} \times MR_{INFRA}^{-0,797} \times Q^{0,993} / R^2 = 0,9966 \quad (5.9)$$

- Para ε_t :

$$\varepsilon_{t/FWD} = 4,55E - 03 \times H_{CAUQ}^{-0,977} \times MR_{CAUQ}^{-0,608} \times MR_{INFRA}^{-0,337} \times Q^{1,0} / R^2 = 0,9588 \quad (5.10)$$

$$\varepsilon_{t/VB} = 1,67 E - 03 \times H_{CAUQ}^{-0,946} \times MR_{CAUQ}^{-0,592} \times MR_{INFRA}^{-0,358} \times Q^{0,898} / R^2 = 0,9671 \quad (5.11)$$

Onde:

D_0 = deflexão máxima do topo da camada betuminosa (10^{-2} mm);

ε_t = deformação horizontal máxima na fibra inferior da camada betuminosa (cm/cm);

H = espessura da camada betuminosa (cm);

MR = módulo de resiliência da camada betuminosa (kgf/cm^2);

Q = carregamento (kgf).

A Instrução de Projeto de Pavimentação do DER/SP IP-DE-P00/001 (DER/SP, 2006b), recomenda para a camada de revestimento de concreto asfáltico o emprego de algumas expressões matemáticas cujos parâmetros são indicados na Tabela 5.9 para a análise mecanicista.

Tabela 5.9 - Número "N" em Função da Deformação Específica de Tração ε_t . Fonte: adaptado de DER/SP (2006).

Equação	Autor	Ano	K	n
1	FHWA (<i>Federal Highway Administration</i>)	1976	$1,092 \times 10^{-6}$	3,512
2	<i>Asphalt Institute</i>	1976	$1,08 \times 10^{-6}$	3,291
3	Barker, Brabston & Chou	1977	$2,961 \times 10^{-5}$	4,03
4	Pinto & Preussler – CAP 50-70	1980	$2,85 \times 10^{-7}$	3,69

Para a análise que segue, foi empregado o modelo proposto pela *Federal Highway Administration*³ (1976), que é um dos modelos sugeridos pela metodologia do DER/SP.

$$N = 1,092 \times 10^{-6} \times \varepsilon_t^{-3,512} \quad (5.12)$$

Logo, a Equação (5.12) pode ser reescrita, na forma da equação (5.13).

$$\varepsilon_t = 2,007 \times 10^{-2} \times N^{-0,285} \quad (5.13)$$

Onde:

ε_t = deformação horizontal máxima na fibra inferior da camada betuminosa (cm/cm);

N = número de solicitações do eixo padrão de 80 kN;

Uma vez desenvolvido o modelo de deformações horizontais atuantes no pavimento proposto [Equação (5.10) e (5.11)], e definido um modelo de ruptura à fadiga do material [Equação (5.13)], a situação limite é aquela na qual ambos se igualam, conforme desenvolvido nas Equações 5.14 e 5.15.

$$H_{CAUQ/FWD} = 2,65E - 01 \times N^{0,291} \times MR_{CAUQ}^{-0,620} \times MR_{INFRA}^{-0,344} \times Q^{1,02} \quad (5.14)$$

$$H_{CAUQ/VB} = 1,25E - 01 \times N^{0,302} \times MR_{CAUQ}^{-0,628} \times MR_{INFRA}^{-0,379} \times Q^{0,952} \quad (5.15)$$

Onde:

H = espessura da camada betuminosa (cm);

N = número de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf;

MR_{CAUQ} = módulo de resiliência da camada betuminosa (kgf/cm²);

MR_{INFRA} = módulo de resiliência da infraestrutura (kgf/cm²);

Q = carregamento (kgf).

³ De acordo com os técnicos da Diretoria de Engenharia do DER/SP, esta equação é a mais utilizada pelos projetistas para dimensionamento de pavimentos.

Utilizando a expressão 5.12 é possível determinar espessuras mínimas de revestimento asfáltico segundo a análise mecanicista efetuada para ϵt . Como base nesse mesmo estudo, seguindo as diretrizes da IP-DE-P00/001 (2006b), do DER/SP, a deflexão admissível atuante na superfície do pavimento pode ser determinada pelos modelos constantes nas normas rodoviárias DNER-PRO 011/79 e DNER-PRO 269/94, conforme Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Deslocamento Vertical Recuperável. Fonte: adaptado de DER/SP (2006b).

Equação	Procedimento	K	n
1	DNER-PRO 011/79	3,01	0,176
2	DNER-PRO 269/94	3,148	0,188

Simplificadamente as equação apresentadas na Tabela 5.10 podem ser reescritas, na forma das Equações (5.16) e (5.17).

$$D = 1023 \times N^{-0,176} \quad (5.16)$$

$$D = 1406 \times N^{-0,188} \quad (5.17)$$

Onde:

D = deflexão de projeto determinada na superfície do pavimento (10^{-2} mm);

N = número de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf.

De forma análoga à realizada anteriormente com o parâmetro da deformação, igualando-se o modelo de deflexões atuantes (Equações 5.8 e 5.9) aos modelos de deflexão máxima admissível (Equações 5.16 e 5.17), situação correspondente ao limite do material, obtém-se as expressões 5.18 e 5.19 (em função do DNER-PRO 011/79) e 5.20 e 5.21 (em função DNER-PRO 269/94).

$$H_{CAUQ/FWD/PRO11} = 0,126 \times N^{0,234} \times MR_{CAUQ}^{-0,376} \times MR_{INFRA}^{-0,939} \times Q^{1,33} \quad (5.18)$$

$$H_{CAUQ/FWD/PRO269} = 0,053 \times N^{0,313} \times MR_{CAUQ}^{-0,336} \times MR_{INFRA}^{-1,419} \times Q^{1,768} \quad (5.19)$$

$$H_{CAUQ/VB/PRO11} = 0,083 \times N^{0,250} \times MR_{CAUQ}^{-0,376} \times MR_{INFRA}^{-0,939} \times Q^{1,33} \quad (5.20)$$

$$H_{CAUQ/VB/PRO269} = 0,03 \times N^{0,335} \times MR_{CAUQ}^{-0,336} \times MR_{INFRA}^{-1,419} \times Q^{1,768} \quad (5.21)$$

Onde:

H = espessura da camada betuminosa (cm);

N = número de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf.

MR_{CAUQ} = módulo de resiliência da camada betuminosa (kgf/cm²);

MR_{INFRA} = módulo de resiliência da infraestrutura (kgf/cm²);

Q = carregamento (kgf).

Com o propósito de comparar as espessuras de revestimento asfáltico incorporadas com tela de aço com base nos parâmetros de deflexão e de deformação horizontal de tração, os modelos desenvolvidos foram comparados com as espessuras mínimas recomendadas pela instrução de projeto de pavimentação do DER/SP.

Para essa comparação, foi fixado o valor do módulo do CAUQ (120.000 kgf/cm²) e o módulo da infraestrutura (3.000 kgf/cm²), sendo que ambos os valores, foram comparados com as cargas (Q) de 4100 kgf e 6500 kgf para equações em função do FWD e cargas (Q) de 2050 kgf e 3250 kgf para equações em função da VB. Os resultados obtidos, arredondados para cima, são apresentados nas Tabelas 5.11 e 5.12.

Tabela 5.11 - Espessuras mínimas de revestimento asfáltico para modelos deflectométricos com cargas de 2050 kgf (VB) e 4100 (FWD) kgf.

Número "N"	Espessura Mínima - Revestimento Asfáltico (cm)						
	DER/SP	eq. 5.14 (FWD/FHWA)	eq. 5.15 (VB/FHWA)	eq. 5.18 (FWD/PRO11)	eq. 5.19 (FWD/PRO269)	eq. 5.20 (VB/PRO11)	eq. 5.21 (VB/PRO269)
5×10^6	5,0	6,00	2,00	2,00	4,00	2,00	3,00
1×10^7	7,5	7,00	2,00	3,00	5,00	2,00	4,00
$2,5 \times 10^7$	10,0	9,00	2,00	3,00	7,00	3,00	6,00
5×10^7	12,5	11,00	3,00	4,00	8,00	3,00	7,00
$N > 5 \times 10^7$	15,0	13,00	3,00	5,00	10,00	4,00	9,00

Tabela 5.12 - Espessuras mínimas de revestimento asfáltico para modelos deflectométricos com carga de 3250 kgf (VB) e 6500 (FWD) kgf.

Número "N"	Espessura Mínima - Revestimento Asfáltico (cm)						
	DER/SP	eq. 5.14 (FWD/FHWA)	eq. 5.15 (VB/FHWA)	eq. 5.18 (FWD/PRO11)	eq. 5.19 (FWD/PRO269)	eq. 5.20 (VB/PRO11)	eq. 5.21 (VB/PRO269)
5×10^6	5,0	9,00	2,00	4,00	9,00	4,00	7,00
1×10^7	7,5	11,00	3,00	5,00	11,00	4,00	9,00
$2,5 \times 10^7$	10,0	14,00	3,00	6,00	14,00	5,00	12,00
5×10^7	12,5	17,00	4,00	7,00	18,00	6,00	15,00
$N > 5 \times 10^7$	15,0	20,00	5,00	8,00	22,00	7,00	19,00

Observa-se pelas tabelas apresentadas que há uma clara influência da inserção da tela de aço na camada asfáltica. Note-se da Tabela 5.11 que tanto para carga do eixo padrão adotado no Brasil, assim como, da carga adotada para FWD de 4100 kgf, todos os valores de espessura mínima de revestimento, com exceção da eq. 5.14 para um Número "N" de 5×10^6 , foram inferiores aos preconizados pela instrução de projeto do DER/SP. Destaca-se que esta análise foi realizada com a adoção de módulos elevados da camada asfáltica, ou seja, com a inserção da tela de aço.

Diferentemente dos dados apresentados na Tabela 5.11, os valores de espessuras mínimas encontrados na Tabela 5.12 apresentam-se distintos da primeira análise. Destes dados destaque-se que para cargas mais pesadas (3250 e 6500 kgf), todos os valores obtidos nas equações 5.14 e 5.19 foram superiores as espessuras mínimas adotadas pela instrução de projeto do DER/SP. Analisando-se as equações, tal fato indica que estes modelos são considerados mais conservadores visto que, com a adoção das cargas usuais no Brasil, os mesmo apresentaram espessuras superiores às outras equações.

De modo geral, os modelos estudados neste capítulo demonstram a influência positiva da inserção da tela de aço nos revestimentos asfálticos, uma vez que, devido a inclusão da tela, há uma sensível diminuição das espessuras usuais de revestimento, todavia, modelos como estes podem determinar rapidamente os esforços solicitantes críticos na estrutura do pavimento, além de, estimar valores do Número "N" através de modelos de fadiga correlacionando estas deformações com número de solicitações do eixo padrão.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com a importância de fornecer um maior controle dos materiais locados na estrutura dos trechos experimentais, foi realizada a caracterização do subleito e da base do pavimento, para posterior cálculo por retroanálise do módulo do CAUQ com inserção da tela de aço.

Foram realizados para caracterização e controle executivo ensaios de compactação CBR, expansão, granulometria, limites de Atterberg, além da estimativa dos módulos de resiliência dos respectivos materiais.

Todos os ensaios foram realizados no laboratório de pavimentação da CCR Nova Dutra. Também, foram realizados levantamentos estruturais por meio de Viga Benkelman e FWD no revestimento antes e após aplicação da tela de aço.

Com o propósito de se comparar os valores encontrados nos estudos paramétricos (valores teóricos) com aqueles advindos de levantamentos de campo, a partir de estruturas de pavimentos conhecidas e processados por programas computacionais (valores retroanalísados), foram utilizados programas computacionais (ELSYM-5 e BAKFAA), que consideram a elasticidade linear para os critérios envolvidos. A Figura 6.1 apresenta o resumo dos trabalhos desenvolvidos.

Figura 6.1 - Fluxograma do estudo de retroanálise.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DA BASE E DO SUBLEITO

Para determinação dos módulos de resiliência dos materiais de base e subleito, foram coletadas três amostras deformadas do solo local em cada segmento específico do experimento. Foram demarcados três pontos de coleta na pista no sentido contrário a inserção da tela de aço no pavimento.

Esses locais foram selecionados, pois, ambas as faixas de tráfego foram recapeadas havendo similaridade entre as características da base e subleito. O mais importante neste caso, era obter as espessuras dessas camadas assim como seus respectivos módulos. A Figura 6.2 apresenta os locais de realização da coleta dos materiais.

Figura 6.2 - Local de coleta de materiais para realização de ensaios.

Todas as Cavas de Inspeção (CV) foram abertas na borda entre o acostamento e a pista de rolamento com a finalidade de se obter as espessuras das camadas do pavimento para posterior utilização na retroanálise. Após a remoção da capa asfáltica e posterior escavação, as amostras de solo foram armazenadas em sacos de rafia, conforme ilustrado nas Figuras 6.3 a 6.5.

Figura 6.3 - Abertura de cava de inspeção.

Figura 6.4 - Coleta de materiais.

Figura 6.5 - Obtenção das espessuras constituintes do pavimento.

Com o material coletado, foram realizados ensaios de caracterização do solo conforme metodologia preconizada pelo procedimento *Highway Research Board* (HRB) AASHTO M-145/91 (AASHTO, 2008b).

Com o material de campo foram executados ensaios de compactação nas energias Proctor normal e intermediária procurando-se os respectivos valores de CBR e expansão nas condições seca e úmida. Quanto à classificação HRB, os materiais se apresentaram como A2-6, A-6 e A7-5, solos de bom comportamento como subleito. A base foi considerada como uma areia argilo-siltosa com pouco pedregulho e subleito uma argila areno-siltosa.

Os materiais em média apresentaram peso específico seco máximo igual a 18,03 kN/m³ e uma umidade ótima de 15,4%. Nos pontos ótimos, a expansão atingiu 0,25%, e os valores CBR foram da ordem de 40% e 24%, respectivamente.

Quanto ao módulo de resiliência, as amostras foram ensaiadas de acordo com a especificação AASHTO TP46, T307. A norma preconiza que os corpos de prova tenham formato cilíndrico e dimensões cuja relação entre altura e diâmetro seja dois.

Os valores de deformação foram coletados para cada tensão de desvio (σ_d) aplicada, em cada combinação de tensão confinante (σ_3). A partir dos dados coletados, foram calculados os valores de módulo de resiliência para cada amostra. As Figuras 6.6 a 6.8 apresentam as sequências do ensaio.

Figura 6.6 - Preparação das amostras para ensaio.

Figura 6.7 - Instrumentação das amostras.

Figura 6.8 - Ensaio em andamento.

Os resultados demonstram que há uma grande variabilidade entre os módulos de cada amostra coletada. Para a camada de base os resultados apresentaram em média módulos de 110 MPa e para subleito, módulos de 101 MPa, ambos compatíveis com a IP-DE-P00/001 (DER/SP, 2006b). As Figuras 6.9 e 6.10 apresentam os resultados dos módulos ensaiados.

Figura 6.9 - Módulo de resiliência para camada de base.

Figura 6.10 - Módulo de resiliência para camada de subleito.

As Tabelas 6.1 e 6.2 apresentam o resumo dos resultados dos ensaios realizados com as três amostras.

Tabela 6.1 - Resultados dos ensaios realizados nas amostras de base.

Amostra	Camada	Local (km)	Posição (Lado)	Profundidade (m)	Compactação		Capacidade de Suporte		Energia	Limites de Atterberg			Classificação	Módulo de Resiliência (MPa)			Granulometria (%) passando						
					g _s max. (g/cm³)	h _{ot} (%)	CBR (%)	Exp (%)		LL (%)	LP (%)	IP (%)		MR (max)	MR (min)	MR (hot.)	25,4 mm	9,52 mm	4,76 mm	2,00 mm	0,42 mm	0,15 mm	0,075 mm
CV 001	Base	61+000	Esquerdo	0,23 - 0,70	1,873	13,8	31,0	0,20	E.I	36	25	11	A-6	137	89	92	100,0	98,6	92,7	88,2	62,40	46,90	37,80
CV 002	Base	61+050	Esquerdo	0,26 - 0,56	1,976	11,1	38,0	0,10	E.I	34	22	12	A2-6	111	84	84	100,0	95,9	91,6	84,4	54,30	34,70	25,70
CV 003	Base	61+150	Esquerdo	0,22 - 0,40	1,972	10,5	54,0	0,10	E.I	34	17	17	A2-6	157	117	119	100,0	97,6	93,5	87,2	60,90	40,10	31,70

E.N = Energia Normal / E.I = Energia Intermediária

Tabela 6.2 - Resultados dos ensaios realizados nas amostras de subleito.

Amostra	Camada	Local (km)	Posição (Lado)	Profundidade (m)	Compactação		Capacidade de Suporte		Energia	Limites de Atterberg			Classificação	Módulo de Resiliência (MPa)			Granulometria (%) passando						
					g _s max. (g/cm³)	h _{ot} (%)	CBR (%)	Exp (%)		LL (%)	LP (%)	IP (%)		MR (max)	MR (min)	MR (hot.)	25,4 mm	9,52 mm	4,76 mm	2,00 mm	0,42 mm	0,15 mm	0,075 mm
CV 001	Subleito	61+000	Esquerdo	0,70 - 1,50	1,746	15,8	27,0	0,90	E.N	36	14	22	A-6	71	51	63	100,0	98,9	96,9	94,8	68,20	53,20	45,70
CV 002	Subleito	61+050	Esquerdo	0,56 - 0,90	1,614	21,5	22,0	0,10	E.N	45	32	13	A7-5	155	111	160	100,0	99,7	99,2	97,3	76,10	66,90	61,60
CV 003	Subleito	61+150	Esquerdo	0,40 - 0,82	1,638	19,8	24,0	0,10	E.N	60	34	26	A7-5	129	85	85	100,0	98,8	98,4	96,7	73,70	63,70	58,70

E.N = Energia Normal / E.I = Energia Intermediária

6.2 AVALIAÇÃO FUNCIONAL - ESTADO DA SUPERFÍCIE

Para a avaliação do estado da superfície do pavimento, foi realizado levantamento de defeitos existentes na superfície, baseado na norma DNIT 006/2003 PRO (DNIT, 2003a) em todos os trechos do experimento em restauração e na implantação. Nos próximos itens serão apresentados os resultados destes parâmetros obtidos após a execução de cada trecho experimental entre os anos de 2013 e 2016, complementando as informações dos capítulos 4.4 e 4.5.

6.2.1 Trecho de restauração

Segundo subtrecho

No dia seguinte (27/02/2013) após execução do subtrecho, foi observado o aparecimento de fissuras localizadas nos pontos de emenda longitudinal (Figura 6.11). Ocorreu o aparecimento do defeito “jacaré” ou o “afofamento” do revestimento em alguns locais de sobreposição das telas (mais de dois fios), onde a mesma não se encontrava bem fixada no pavimento existente, ou seja, o afofamento se deu devido à movimentação da tela quando da execução (Figura 6.12).

Figura 6.11 - Marcação do posicionamento das emendas longitudinais. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 6.12 - Presença de jacaré e “afofamento” no local de sobreposição de telas. Fonte: MackPesquisa (2013).

Terceiro subtrecho

Um dia após (28/02/2013) a execução do subtrecho, foi observado que o aumento do cobrimento (sobreposição) de telas no sentido longitudinal, para uma malha, apresentou desempenho inferior ao apresentado no caso do primeiro trecho, quando não houve essa sobreposição, pois ocorreu o surgimento de trincas transversais, com espessura maior que a apresentada no trecho anterior. As Figuras 6.13 e 6.14 apresentam o estado do pavimento após um dia de abertura ao tráfego.

Figura 6.13 - Marcação do posicionamento das emendas no sentido longitudinal e no transversal. Fonte: MackPesquisa (2013).

Figura 6.14 - Trincas transversais nos locais de emenda da tela. Fonte: MackPesquisa (2013).

Quarto subtrecho

Um dia após (01/03/2013) a execução do subtrecho, não foi observado o surgimento de fissuras, o que conduz ao raciocínio de que o fato da tela ter sido colocada “confinada”, uma vez que foi colocada em cima do pavimento fresado, ou seja, encaixada, reduziu sua movimentação contribuindo para que não surgissem fissuras nas emendas. Dessa maneira, conclui-se que além do problema de sobreposição das telas, a sua fixação é de suma importância.

Quinto subtrecho

No dia seguinte (14/03/2013), após execução do subtrecho foram encontrados defeitos nas emendas das telas no sentido do tráfego. Este subtrecho apresentou desempenho superior ao apresentado no caso do primeiro trecho, pois houve remoção de barras transversais da primeira malha, aumentando a franja. A Figura 6.15 apresenta o estado do pavimento após um dia de abertura ao tráfego, onde se pode constatar a presença trincas transversais na emenda da tela.

Figura 6.15 - Trinca transversal em toda emenda. Fonte: MackPesquisa (2013).

6.2.2 Trecho de implantação

No dia seguinte (24/10/2013), após execução do trecho, não foi observado o surgimento de fissuras, o que conduz ao mesmo raciocínio do quarto subtrecho em restauração. Como a tela foi colocada “confinada”, em cima do pavimento fresado, ou seja, encaixada, reduziu sua movimentação contribuindo para que não surgissem fissuras nas emendas.

Após oito meses de execução do trecho (junho de 2014), foi constatado que apareceram trincamentos isolados no revestimento devido ao alto volume de caminhões que trafegavam pela via. O serviço de conservação de rotina do DER/SP realizou o serviço de recapeamento na extensão do trecho com tela. O mesmo pode ser observado pela Figura 6.16.

Figura 6.16 - Recapeamento realizado no trecho de implantação.

Após um ano da execução do trecho (outubro de 2014), foi realizada uma nova vistoria onde se constatou que o pavimento se encontrava com as mesmas características após o recapeamento realizado pelo DER/SP conforme Figura 6.17.

Figura 6.17 - Vista do trecho de implantação após 1 ano de execução.

Após dois anos e meio da execução (abril de 2016), foi observado que o serviço de conservação de rotina do DER/SP realizou mais um recapeamento sobre o trecho com a tela de aço. O motivo deste recape foi pela deterioração do trecho ocasionado pelo elevado tráfego de veículos pesados, além do intenso período de chuvas que afetou a região no início do ano de 2016. A Figura 6.18 mostra o recapeamento executado.

Figura 6.18 - Recapeamento executado após 2,5 anos da construção do trecho.

Após análise da execução do trecho, chegou-se a conclusão que o uso combinado da inserção da tela nas camadas de revestimento possui bom comportamento a tração, como averiguado na literatura sobre o assunto, demonstrando que há um número de situações nas quais a introdução da tela pode contribuir para o aperfeiçoamento de projetos rodoviários.

Entretanto, a conclusão obtida neste segmento de implantação foi que o aparecimento das patologias ocorreu devido ao posicionamento da inserção da tela na camada asfáltica. Analisando o projeto de implantação da faixa adicional, verificou-se que a inserção da tela estava localizada entre as camadas de Binder e CAUQ, ou seja, com a posterior fresagem de 6 cm e recomposição com introdução da tela de aço, na interface entre as camadas, foi constatado que a mesma estava na posição da linha neutra como pode se observar na Figura 6.19.

Figura 6.19 - Esquema do diagrama de tensões.

Para execução de futuros trechos de implantação de pavimentos com a utilização da tela, é recomendado que a posição da mesma seja na camada tracionada do revestimento asfáltico, uma vez que, a inserção dela é proposta para combate ao trincamento por reflexão, possibilitando melhoria continua no desempenho estrutural do pavimento dimensionado evitando o aparecimento de trincas e o combate a ruptura por fadiga nas camadas tracionadas da estrutura do pavimento.

É recomendado que seja realizado estudo para o cálculo da linha neutra entre as camadas asfálticas, para posterior inserção da tela, uma vez que, o correto posicionamento da tela combaterá com mais eficácia o aparecimento de trincas na camada asfáltica.

6.2.3 Acompanhamentos dos trechos

Após a conclusão de todos os trechos foram realizadas vistorias *in loco* no decorrer dos anos de 2013 a 2016. Observou-se nas visitas efetuadas que após três anos da execução do pavimento, não houve evolução dos defeitos que surgiram logo após a execução, ou seja, do trincamento, devido à emenda das telas, principalmente no trecho em restauração (Figuras 6.20 a 6.24). É importante salientar que houve a consolidação dos trincamentos que surgiram espaçados a cada 6 metros, ou seja, o comprimento da tela de aço.

Figura 6.20 - Vista do trecho após 3 meses de construção.

Figura 6.21 - Vista do trecho após 8 meses de construção.

Figura 6.22 - Vista do trecho após 1 ano de construção.

Figura 6.23 - Vista do trecho após 3 anos de construção.

Figura 6.24 - Comparação trincamento em 27/11/2013 e 23/04/2016.

Considerando que essa rodovia não é pedagiada e além de não possuir um controle de balança, após ter sido recuperada, tem ocorrido um grande desvio de tráfego de cargas pesadas fazendo com que o volume de veículos comerciais seja mais intenso.

Em geral, observa-se que os trechos executados estão em boas condições e os defeitos existentes são trincamentos que surgiram logo após a execução devido a emendas longitudinais, sendo que com exceção dos defeitos mais severos (trincas “jacaré” e panelas), esses defeitos não foram tratados e não sofreram até o momento da última visita (23/04/2016) nenhuma evolução.

6.2.4 Recomendações construtivas

Embora a execução tenha seguido as recomendações das especificações para o tratamento de pavimentos com o propósito de evitar a propagação de trincas, foram registrados alguns problemas construtivos quando da inserção da tela de aço na camada asfáltica.

É importante salientar que a eficiência desta técnica depende muito de uma boa instalação, da qualidade dos materiais utilizados além da interação entre os materiais e a tela de aço, portanto, para a eficaz execução dos trabalhos foram adotadas as seguintes recomendações construtivas:

- a) Antes de iniciar a aplicação da tela de aço para recuperação da superfície do pavimento, deve-se observar a existência panelas, depressões, deformações na trilha de rodas ou escorregamentos existentes antes da execução da recuperação do pavimento;
- b) A superfície deve estar nivelada evitando a compactação inadequada do reforço, o que ocasiona o surgimento prematuro de trincas e irregularidade longitudinal;
- c) É recomendado que para trechos com fresagem da superfície asfáltica, a espessura da mesma seja de no mínimo com 6 cm, com o propósito que haja o confinamento da tela após a aplicação da camada de recapeamento;

- d) Limpeza da pista com ar comprimido para retirada de poeira, com o objetivo de garantir perfeita aderência na superfície;
- e) Em juntas transversais em camadas asfálticas, à sobreposição entre as telas de aço (transpasse) deve ser cerca de 150 mm nas articulações, conforme apresentado no item 4.1.3 (Esquema de montagem);
- f) Deve-se evitar tanto o transpasse longitudinal como o transversal, no entanto, caso não seja possível, o mesmo deve ter o comprimento entre uma e duas malhas. A sobreposição deve ser executada sempre no sentido do tráfego;
- g) Emendas da armadura na longitudinal devem ser amarradas com arames recozidos, no mesmo plano;
- h) É de extrema importância que haja a fixação da tela de aço na superfície do pavimento a ser recapeado ou fresado, com o propósito que ocorra uma boa aderência entre as camadas. A tela deve ser fixada sobre o pavimento existente, com uso de barras de aço de 5mm;
- i) Não deverá ser passado o rolo compactador sobre a tela de aço antes da pavimentação das mesmas, caso contrário, fará com que a tela seja danificada;
- j) Aplicação da camada de CAUQ correspondente ao reforço sobre a tela de aço, na espessura indicada em projeto. É recomendado uma espessura de no mínimo 6 cm compactado;
- k) Passar o rolo de pneus para garantir a aderência completa entre a camada intermediária e a camada antiga do pavimento;
- l) Deve-se evitar a abertura ao tráfego enquanto a tela de aço não estiver coberta pela nova camada de CAUQ.

6.3 CONTROLE DEFLECTOMÉTRICO POR MEIO DE VIGA BENKELMAN

Com o intuito de avaliar a capacidade de suporte do pavimento, foram realizadas medidas de deflexão através de Viga Benkelman no trecho em restauração. Os levantamentos das deflexões máximas (D_0) foram realizados atendendo à norma ME 024 (DNER, 1994a).

Tal norma recomenda carga no eixo traseiro (80 kN) e a pressão de contato dos pneus (0,56 MPa). Foram realizadas três campanhas de deflectometria sendo a primeira realizada na primeira semana de março de 2013 (após a execução do trecho), a segunda em abril de 2015 (dois anos após a construção) e a terceira em abril de 2016 (três anos após a construção).

A precipitação pluviométrica verificada nos meses próximos ao levantamento foi alta, característica do período chuvoso, conforme mostrado na Figura 6.25, logo, não foi adotado fator de correção sazonal.

Figura 6.25 - Precipitação mensal acumulada para o ano de 2013 a 2015. Fonte: PCJ (2016).

Os segmentos homogêneos foram definidos conforme subtrechos executados em campo, além de sido feito um tratamento estatístico, seguindo a metodologia proposta por Grubbs (1969), onde foi realizada a exclusão das estações que não possuíam comportamento similar. O nível de significância assumido foi igual a 2,5%. A Tabela 6.3 apresenta o resumo do levantamento executado em março de 2013 e os resultados obtidos após tratamento estatístico.

Observa-se que nas primeiras idades do pavimento, a diferença de comportamento estrutural entre os trechos com e sem tela não foram significativas. A tendência é que essa diferença crescesse com a idade do pavimento, apresentando melhores valores estruturais para o pavimento com a tela. A Tabela 6.4 apresenta o resumo do levantamento executado em abril de 2015 e a Tabela 6.5 o resumo do levantamento executado em abril de 2016. As Figuras (6.26 a 6.28) apresentam os resultados em forma gráfica.

Tabela 6.3 - Tratamento estatístico com dados de março de 2013.

Segmento homogêneo (Pista Simples)	D ₀ (x10 ⁻² mm)		Média (x̄)	Desvio padrão (σ)	Coef. variação (C.V.)	Valor crítico (T)	
	Bordo Externo	Bordo Interno					
Subtrecho-1 (sem tela de aço)	26	22	26,21	6,94	26%	0,03	0,61
	23	20				0,46	0,90
	32	29				0,83	0,40
	31	30				0,69	0,55
	15	12				1,62	2,05
	34	33				1,12	0,98
	33	27				0,98	0,11
GRUBBS n=14 N.S.=2,5% - T=2,507							
Subtrecho-2	23	29	24,67	5,33	22%	0,31	0,81
	32	30				1,38	1,00
	24	21				0,13	0,69
	16	27				1,63	0,44
	27	30				0,44	1,00
	20	17				0,88	1,44
GRUBBS n=12 N.S.=2,5% - T=2,412							
Subtrecho-3	13	15	20,80	5,57	27%	1,40	1,04
	14	25				1,22	0,75
	27	20				1,11	0,14
	28	26				1,29	0,93
	19	21				0,32	0,04
GRUBBS n=10 N.S.=2,5% - T=2,290							
Subtrecho-4	34	28	25,58	4,76	19%	1,77	0,51
	18	30				1,59	0,93
	23	26				0,54	0,09
	28	19				0,51	1,38
	22	26				0,75	0,09
	30	23				0,93	0,54
GRUBBS n=12 N.S.=2,5% - T=2,412							
Subtrecho-5	28	30	25,70	4,07	16%	0,56	1,06
	25	27				0,17	0,32
	27	22				0,32	0,91
	30	28				1,06	0,56
	21	19				1,15	1,64
GRUBBS n=10 N.S.=2,5% - T=2,290

Figura 6.26 - Média das deflexões e seus respectivos desvios para levantamento em março de 2013.

Tabela 6.4 - Tratamento estatístico com dados de abril de 2015.

Segmento homogêneo (Pista Simples)	D ₀ (x10 ⁻² mm)		Média (x̄)	Desvio padrão (σ)	Coef. variação (C.V.)	Valor crítico (T)	
	Bordo Externo	Bordo Interno					
Subtrecho-1 (sem tela de aço)	65	81	71,00	17,90	25%	0,34	0,56
	69	60				0,11	0,61
	101	50				1,68	1,17
Subtrecho-2	44	20	47,17	19,76	42%	0,16	1,37
	48	40				0,04	0,36
	81	50				1,71	0,14
Subtrecho-3	63	44	57,00	10,88	19%	0,55	1,19
	60	73				0,28	1,47
	56	46				0,09	1,01
Subtrecho-4	69	46	56,00	10,02	18%	1,30	1,00
	46	50				1,00	0,60
	65	60				0,90	0,40
Subtrecho-5	50	44	43,33	3,72	9%	1,79	0,18
	40	40				0,90	0,90
	44	42				0,18	0,36
GRUBBS n=3 (por subtrecho) N.S.=2,5% - T=1,154							

Os valores encontrados apresentam dados acima do valor crítico aceitável ($T = 1,154$). Extraíndo esses valores dos cálculos foi verificada uma média nas deflexões de 50×10^{-2} mm, valor considerado aceitável para os trechos com a inserção da tela de aço, uma vez que esses valores são inferiores aos encontrados no subtrecho sem a inserção da tela.

Figura 6.27 - Média das deflexões e seus respectivos desvios para levantamento em abril de 2015.

Tabela 6.5 - Tratamento estatístico com dados de abril de 2016.

Segmento homogêneo (Pista Simples)	D ₀ (x10 ⁻² mm)		Média (x̄)	Desvio padrão (σ)	Coef. variação (C.V.)	Valor crítico (T)	
	Bordo Externo	Bordo Interno					
Subtrecho-1 (sem tela de aço)	81	91	81,50	18,84	23%	0,03	0,50
	77	67				0,24	0,77
	113	60				1,67	1,14
Subtrecho-2	44	56	53,83	14,03	26%	0,70	0,15
	48	44				0,42	0,70
	81	50				1,94	0,27
Subtrecho-3	75	56	59,17	8,91	15%	1,78	0,36
	60	60				0,09	0,09
	56	48				0,36	1,25
Subtrecho-4	69	67	61,17	10,50	17%	0,75	0,56
	46	52				1,44	0,87
	73	60				1,13	0,11
Subtrecho-5	52	69	48,00	13,78	29%	0,29	1,52
	26	46				1,60	0,15
	46	49				0,15	0,07
GRUBBS n=3 (por subtrecho) N.S.=2,5% - T=1,154							

Assim como no tratamento estatístico realizado na Tabela 6.5, foram calculados valores acima do valor crítico aceitável ($T = 1,154$). Extraindo esses valores dos cálculos foi verificada uma média nas deflexões de 54×10^{-2} mm, valor considerado aceitável para os trechos com a inserção da tela de aço, uma vez que esses valores são inferiores aos encontrados no subtrecho sem a inserção da tela. Nas Figuras 6.29 e 6.30 são apresentados os resumos dos levantamentos realizados nos períodos de análise.

Figura 6.28 - Média das deflexões e seus respectivos desvios para levantamento em abril de 2016.

Figura 6.29 - Resumos das deflexões no bordo externo nos levantamentos de 2013, 2015 e 2016.

Figura 6.30 - Resumos das deflexões no bordo interno nos levantamentos de 2013, 2015 e 2016.

É importante assinalar que o primeiro levantamento em março de 2013, foi realizado logo após o término da construção do trecho experimental, logo, a média dos valores encontrados à época do levantamento (25×10^{-2} mm), foi considerado como valores abaixo da média para fins de comparação com os anos de 2015 e 2016.

Por fim, pode averiguar-se, preliminarmente pelo levantamento através da Viga Benkelman, que à inserção da tela de aço com reforço da camada asfáltica propiciou uma melhora na condição estrutural do pavimento, uma vez que houve a diminuição das deflexões na estrutura, comparando-se com os dados sem a inserção da tela.

6.4 CONTROLE DEFLECTOMÉTRICO POR MEIO DE FWD

Para melhor entendimento do comportamento da tela de aço no pavimento, foram realizadas campanhas de levantamento completo da bacia de deflexão em campo. O levantamento foi realizado em março de 2015 e julho de 2016 nos segmentos da pista restaurada e implantada.

O inventário deflectométrico foi realizado utilizando-se o equipamento FWD, apresentado a Figura 6.31. Em cada estação foram levantadas as deflexões máximas recuperáveis para cada ponto de análise assim como suas respectivas bacias de deflexão conforme os procedimentos requeridos pela norma ASTM D4695 (ASTM, 2008). Foi levantado o eixo da pista restaurada no sentido da cidade de Campo Limpo Paulista, nos trechos com a tela de aço e sem a utilização da mesma.

Figura 6.31 - Equipamento FWD utilizado para levantamento dos dados.

O primeiro levantamento deflectométrico com o FWD foi realizado aproximadamente 2 anos após a execução do primeiro trecho em restauração e 1,5 anos após a conclusão do trecho em implantação. Foram medidas as deflexões no eixo da pista restaurada e da faixa adicional implantada, de 40 em 40 metros com carga de impacto de 40 kN. Como o mês de março é um período normalmente de muitas chuvas, não foi levado em consideração o fator de correção sazonal para critério de cálculo.

Após levantamento em campo, durante o tratamento de dados deflectométricos, foi realizado um expurgo estatístico de cada segmento homogêneo para eliminação de

valores não significativos, conforme critério de Grubbs (1969). A Tabela 6.6 apresenta os resultados de deflexão máxima para os segmentos em restauração e implantação. Observa-se, que com o nível de significância de 2,5%, nenhuma bacia necessitou ser excluída do processo.

Tabela 6.6 - Tratamento estatístico com dados de março 2015 (FWD).

Segmento homogêneo	D ₀ (x10 ⁻² mm)	D ₂₅ (x10 ⁻² mm)	Raio (m)	Média ($\bar{x}$)	Desvio padrão (σ)	Coef. variação (C.V.)	Valor crítico (T)
Subtrecho-1	64,9	37,2	112,8	56,50	9,69	17%	0,87
(Pista Simples)	45,9	32,4	231,5				1,09
(sem tela de aço)	58,7	43,5	204,9				0,23
Subtrecho-2	22,6	14,9	403,2	23,03	1,02	4%	0,42
(Pista Simples)	24,2	16,2	388,2				1,14
	22,3	15,1	431,0				0,72
Subtrecho-3	19,1	13,9	595,2	19,67	2,50	13%	0,23
(Pista Simples)	17,5	11,1	488,3				0,87
	22,4	14,7	403,2				1,09
Subtrecho-4	17,3	12,2	612,7	19,87	2,65	13%	0,97
(Pista Simples)	22,6	14,6	390,6				1,03
	19,7	13,2	480,8				0,06
Subtrecho-5	26,1	15,1	282,8	25,45	0,92	4%	0,71
(Pista Simples)	24,8	15,3	327,2				0,71
Trecho Faixa	51,5	31,7	157,8	48,37	2,80	6%	1,12
Adicional	47,5	33,7	225,6				0,31
(com tela de aço)	46,1	32,9	235,8				0,81
Trecho Faixa	71,0	40,4	102,0	72,73	3,09	4%	0,56
Adicional	70,9	42,0	107,9				0,59
(sem tela de aço)	76,3	49,0	114,3				1,15
GRUBBS n=3 N.S.=2,5% - T=1,154							

Com o levantamento do FWD foi possível analisar, pela bacia de deflexão e pelo raio de curvatura, o comportamento da camada de CAUQ incorporada com a tela de aço *in situ*. Além disso, foi possível verificar os diferentes trechos e analisar as bacias médias separadamente.

Analisando os resultados apresentados, é possível verificar que as deflexões e os raios de curvatura nas seções de restauração com a inserção da tela de aço são muito similares, além de mostrar que, comparado ao trecho sem a tela, as deflexões e raios estão com valores mais satisfatórios, demonstrando que o comportamento da tela de aço no pavimento desenvolve uma melhora estrutural. O mesmo equivale para o segmento em implantação onde há deflexões baixas com raios altos no segmento com a tela de aço.

O segundo levantamento foi realizado 1 ano após a realização do primeiro levantamento defletoométrico seguindo as mesmas diretrizes de execução. Foram medidas as deflexões no eixo, pista restaurada e faixa adicional implantada, de 40 em 40 metros. Como o levantamento foi realizado no mês de julho de 2016, mês com pouca incidência de chuvas, as deflexões foram corrigidas em função da temperatura do revestimento asfáltico, com o auxílio do modelo apresentado na norma do DER/SP IP-DE-P00/003 (DER/SP, 2006c), cujas Equações 6.1 e 6.2 são apresentadas a seguir:

$$F_{a10} = e^{[0,008358x(25-T)]} \quad (6.1)$$

$$F_{a15} = e^{[0,011504x(25-T)]} \quad (6.2)$$

Onde:

F_{a10} , F_{a15} = fatores de correção para espessura de revestimento igual a 10 e 15 cm;

T = temperatura medida em campo (°C).

A Equação (6.1) foi utilizada para correção do trecho em restauração (Pista Simples) e a Equação (6.2), para o trecho em implantação (Faixa Adicional), devido às espessuras serem distintas em ambos os trechos.

Durante a execução do levantamento defletoométrico a temperatura do revestimento asfáltico medida oscilou entre 16,2°C e 18,8°C. Após levantamento em campo, assim também como no levantamento anterior foi realizado o tratamento estatístico dos dados. A Tabela 6.6 apresenta os resultados de deflexão máxima para os segmentos em restauração e implantação. Observa-se, que com o nível de significância de 2,5%, nenhuma bacia necessitou ser excluída do processo.

Tabela 6.7 - Tratamento estatístico com dados de julho 2016 (FWD).

Segmento homogêneo	D ₀ (x10 ⁻² mm)	D ₂₅ (x10 ⁻² mm)	Raio (m)	Média ($\bar{x}$)	Desvio padrão (σ)	Coef. variação (C.V.)	Valor crítico (T)
Subtrecho-1	81,1	62,1	164,8	70,98	11,18	16%	0,91
(Pista Simples)	59,0	42,1	185,4				1,07
(sem tela de aço)	72,9	47,5	123,3				0,17
Subtrecho-2	24,7	19,3	581,7	26,06	1,69	6%	0,80
(Pista Simples)	28,0	21,0	447,1				1,12
	25,5	20,2	588,0				0,33
Subtrecho-3	21,0	14,7	494,9	22,58	2,34	10%	0,66
(Pista Simples)	21,4	14,5	448,9				0,50
	25,3	21,1	741,8				1,15
Subtrecho-4	18,3	14,0	725,9	23,99	5,06	21%	1,13
(Pista Simples)	28,0	21,0	447,1				0,79
	25,7	19,3	486,3				0,34
Subtrecho-5	22,3	17,0	588,0	25,43	4,39	17%	0,71
(Pista Simples)	28,5	19,5	347,9				0,71
Trecho Faixa	58,6	41,5	182,2	54,02	4,01	7%	1,15
Adicional	51,9	40,3	269,3				0,52
(com tela de aço)	51,5	39,4	259,4				0,64
Trecho Faixa	85,0	50,7	91,0	90,65	7,16	8%	0,79
Adicional	98,7	59,3	79,4				1,13
(sem tela de aço)	88,2	57,9	103,1				0,34
GRUBBS n=3 N.S.=2,5% - T=1,154							

Comparando-se à deflexão máxima de cada segmento para os dois períodos de levantamento, observa-se que, nos trechos com a inserção da tela de aço, ocorreu redução da deflexão em algumas das estações inventariadas. Segundo Bernucci et al. (2006) as respostas deflectométricas nas estruturas de pavimentos flexíveis estão associadas a capacidade de suporte do subleito, no entanto, após os procedimentos de retroanálise (capítulo 6.4.1), ficou constatado que há um aumento significativo da rigidez da camada asfáltica devido ao efeito da inserção da tela.

Era de se esperar que devido à alta precipitação pluviométrica a época do primeiro levantamento (Figura 6.25), as deflexões realizadas em 2016, seriam maiores em todo o trecho, mas foi constatado que houve a redução de alguns seguimentos com a tela de aço e ocorreu o aumento da deflexão nos segmentos sem a utilização da mesma. A Figura 6.32 apresenta a distribuição da média das deflexões máximas ao longo dos segmentos medidos, a fim de possibilitar comparação entre os trechos.

Figura 6.32 - Média das deflexões máximas e seus respectivos desvios para levantamento em março de 2015 e julho de 2016.

Comparando-se à deflexão máxima média de cada subtrecho nos trechos de restauração, observa-se a existência do ganho de rigidez a partir das deflexões nas estações inventariadas com a inserção da tela de aço. Pode-se notar, nesses subtrechos com a tela, uma média nas deflexões de 22×10^{-2} mm nos levantamentos de março de 2015 e uma média nas deflexões de 25×10^{-2} mm nos levantamentos de julho de 2016, diferentemente dos subtrechos sem a tela que teve uma média na deflexão de 57×10^{-2} mm no primeiro levantamento e 71×10^{-2} mm no segundo levantamento.

Também é mostrado que há uma significativa diferença entre a estação medida no trecho em implantação. O segmento sem a inserção da tela ficou com uma deflexão média de 82×10^{-2} mm, enquanto o segmento com a tela de aço ficou com uma deflexão média de 52×10^{-2} mm, logo, a inserção da tela de aço como reabilitação de pavimentos, indica possibilidade de ganho em desempenho estrutural. A Figura 6.33 apresenta as bacias de deflexão média, medidas nas duas campanhas, no eixo da pista dos segmentos com a tela de aço e sem a mesma no trecho em restauração.

Figura 6.33 - Bacias de deflexão média medidas em campo para o segmento em restauração.

Pelo gráfico apresentado é possível observar que há uma diferença entre o subtrecho 1 (sem tela de aço) e os demais segmentos. É notável que após dois anos de aplicação da tecnologia da tela de aço, o pavimento praticamente não apresentou mudanças estruturais significativas, uma vez que, as deflexões máximas médias se encontram com valores em torno de 24×10^{-2} mm contra 64×10^{-2} mm do segmento sem a inserção da tela de aço. A Figura 6.34 apresenta a mesma comparação no trecho em implantação.

Figura 6.34 - Bacias de deflexão média medidas em campo para o segmento em implantação.

Observando a Figura 6.34 verifica-se que a média das deflexões medidas no trecho em implantação demonstra que a inserção da tela de aço ocasionou uma melhora nas camadas de revestimento, uma vez que este trecho em específico trata-se da implantação de uma estrutura inteira. Este fato é notado nos pontos mais afastados da bacia, onde os mesmos representam a base e o subleito da estrutura. As deflexões nestes pontos são praticamente idênticas.

Figura 6.35 - Medidas de deflexão máxima ao longo do Trecho Experimental.

A Figura 6.35 mostra a evolução deflectométrica nos diversos subtrechos em análise. Observa-se que de maneira geral as deflexões, nos trechos com a tela de aço, são inferiores aos trechos sem a inserção da mesma, tanto nos trechos de restauração como de implantação, sendo que alguns pontos possuem deflexões inferiores ao primeiro levantamento realizado em março de 2015.

A partir desta primeira análise foi decidido realizar o processo de retroanálise das bacias de todos os trechos que representam os segmentos homogêneos, com a finalidade de estipular os valores de módulo das camadas estruturais *in situ*.

6.4.1 Retroanálise

Um dos importantes empregos dos parâmetros deflectométricos é a possibilidade de avaliar o comportamento mecânico da estrutura do pavimento. Conhecendo as bacias de deflexão de certo segmento homogêneo, além das espessuras das camadas constituintes do pavimento, é possível realizar a retroanálise (LEITE, 2007).

Por meio de consecutivas tentativas, procura-se determinar os módulos de resiliência médios de cada camada que reproduza a mesma bacia de deflexão. Assim, a retroanálise permite a avaliação dos valores de módulo de resiliência das camadas do pavimento, para as suas condições *in situ* (LEITE, 2007).

Duas ferramentas computacionais foram utilizadas no processo de retroanálise, BAKFAA e ELSYM-5. Ambas promovem um alinhamento da bacia de campo com a bacia de deflexão teórica do programa, submetendo às interações necessárias para ajustes dos módulos de resiliência, ou módulo elástico efetivo das camadas estruturais do pavimento (DNIT, 2006 e BEJA, 2014).

A conferência da bacia retroanalizada pelo BAKFAA é feita pelo ELSYM-5 e fornece tensões, deformações e deflexões de acordo com a teoria da elasticidade linear aplicada a um sistema de múltiplas camadas elásticas. As ferramentas computacionais BAKFAA e o ELSYM-5 estabelecem os seguintes dados de entrada para a análise de pavimentos (BALBO, 2007):

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

Com o intuito de se determinar o módulo de resiliência da camada de CAUQ com a inserção da tela de aço de acordo com as bacias de deflexões em campo, realizou-se o processamento iterativo de retroanálise sobre o revestimento, seguindo os conceitos apresentados na norma ASTM D5858 (ASTM, 2015), onde esta define limites de aceitação bem como procedimentos, metodologias e práticas de cálculo do processo de retroanálise.

Foram adotados dois critérios para definição de um ajuste entre a bacia medida de campo e a calculada pelos programas BAKFAA / ELSYM-5 para garantia da precisão entre o levantamento e o procedimento de retroanálise. O primeiro é o erro relativo, Equação (6.3), calculado para cada ponto da bacia, e o segundo é o erro correspondente a raiz média quadrática, Equação (6.4), conforme mostrado a seguir:

$$\varepsilon(\%) = 100 \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{medi} - d_{calci}}{d_{medi}} \right) \quad (6.3)$$

$$RMSE (\%) = 100 \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{d_{medi} - d_{calci}}{d_{medi}} \right) \right]^2 \right\}^{0,5} \quad (6.4)$$

Onde:

n = número de sensores do equipamento FWD;

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

$RMSE$ = erro quadrático médio percentual;

d_{medi} = deflexão medida no ponto i da bacia medida em campo, ($\times 10^{-2}$ mm);

d_{calci} = deflexão calculada no ponto i da bacia do BAKFAA / ELSYM-5 ($\times 10^{-2}$ mm).

A norma ASTM D5858 (ASTM, 2015) define que o erro relativo para cada ponto da bacia esteja entre 7 a 14% para o caso de se utilizar sete sensores para a coleta da bacia de deflexão. O erro quadrático médio percentual se situa entre 1 e 2%, como recomendado por norma. No entanto, no Brasil, tal parâmetro é difícil de ser atingido, devido à variabilidade construtiva e baixa eficiência de controle das propriedades dos materiais aplicados à estrutura (BEJA, 2014).

Os resultados obtidos com o FWD nas cinco seções-tipo de restauração e duas de implantação foram estudados separadamente. Cada trecho correspondente a uma seção-tipo foi considerado como um segmento homogêneo. Os segmentos homogêneos são apresentados nas Tabelas 6.8 e 6.9.

Tabela 6.8 - Segmentos homogêneos em restauração analisados.

Segmentos	Localização		Solução								
	km inicial	km final	Extensão (m)	Subleito (cm)	Base Solo (cm)	MB (cm)	Fresa (cm)	RPF - Fx IV (cm)	TSD (cm)	Tela de aço	CAUQ - Fx III (cm)
Seg. 1 (R / ST)	60,68	60,76	80	-	20	8	-	2	2	Sem tela	6
Seg. 2 (R)	60,80	60,88	80	-	20	8	-	-	-	Com tela	7
Seg. 3 (R)	60,92	61,02	100	-	47	13	-	-	-	Com tela	7
Seg. 4 (R)	61,04	61,12	80	-	30	16	6	-	-	Com tela	7
Seg. 5 (R)	61,16	61,22	60	-	18	12	-	-	-	Com tela	7

R (Restauração); ST (Sem Tela de Aço)

Tabela 6.9 - Segmentos homogêneos em implantação analisados.

Segmentos	Localização		Solução							
	km inicial	km final	Extensão (m)	Subleito (cm)	Rachão (cm)	BGS (cm)	Binder (cm)	Fresa (cm)	Tela de aço	CAUQ - Fx III (cm)
Seg. 6 (IMP / ST)	68,20	68,28	80	-	20	20	7	-	Sem tela	6
Seg. 7 (IMP)	68,32	68,40	80	-	20	20	7	6	Com tela	6

IMP (Implantação); ST (Sem Tela de Aço)

6.4.1.1 Trecho de restauração

Para uma melhor análise da obtenção do módulo da camada de revestimento com a inserção da tela de aço, inicialmente foram estudados os módulos de resiliência obtidos através de ensaios executados com materiais das camadas de base e subleitos, comparando-se os mesmos ao processo de retroanálise realizado com os dados medidos em campo pelo FWD antes do início das obras de melhorias na SP-354, além de compará-los com modelos do Guia da AASHTO (1993), onde o

mesmo apresenta um procedimento simplificado para retroanalisar os módulos do subleito e base, conforme Equações (6.5 e 6.6):

$$E_{SL} = \frac{0,24 \times P}{d_r \times r} \quad (6.5)$$

$$E_B = 0,2 \times (H_b)^{0,45} \times E_{SL} \quad (6.6)$$

Onde:

E_{sl} = módulo do subleito, (MPa);

P = carga aplicada no ensaio, (N);

r = distância do ponto de aplicação da carga, (mm);

d_r = deflexão a distância r , (mm);

E_b = módulo da base, (MPa);

H_b = altura da camada de base, (mm);

O método de ensaio de módulo de resiliência foi descrito no capítulo 6.1. Para efeito de comparação com os módulos retroanalizados, a Tabela 6.10 apresenta os valores obtidos dos módulos máximos de resiliência para os 6 corpos de prova ensaiados para base e subleito da SP-354, extraídos das Tabelas 6.1 e 6.2.

Tabela 6.10 - Resultado de módulo de resiliência dos ensaios de laboratório.

Tipo	M.R. (MPa)	Média (MPa)	Desv. Pad. (MPa)
Base	137	135	23
Base	111		
Base	157		
Subleito	71	120	45
Subleito	160		
Subleito	129		

A Tabela 6.11 apresenta os módulos obtidos através das Equações (6.5) e (6.6), com os dados do levantamento defletoométrico do pavimento obtidos da Tabela 4.5 (capítulo 4.3.5), totalizando sete estações de levantamento.

Tabela 6.11 - Resultado de módulo de resiliência segundo AASHTO (1993).

Tipo	M.R. (MPa)	Média (MPa)	Desv. Pad. (MPa)
Base	360	460	219
Base	952		
Base	348		
Base	350		
Base	430		
Base	409		
Base	370		
Subleito	166	192	111
Subleito	439		
Subleito	160		
Subleito	110		
Subleito	135		
Subleito	157		
Subleito	179		

A Tabela 6.12 apresenta os módulos obtidos através da retroanálise das bacias de deflexão do levantamento deflectométrico do pavimento obtido da Tabela 4.4. Por simplificação, as camadas de CAUQ e MB foram consideradas como uma única camada. Os resultados detalhados da retroanálise se encontram no Apêndice A.

Tabela 6.12 - Resultado de módulo de resiliência retroanalizados.

Tipo	M.R. (MPa)	Média (MPa)	Desv. Pad. (MPa)
Base	170	102	40
Base	68		
Base	102		
Base	108		
Base	127		
Base	91		
Base	45		
Subleito	209	203	86
Subleito	385		
Subleito	171		
Subleito	118		
Subleito	152		
Subleito	184		
Subleito	201		

A partir dos resultados apresentados é possível notar que a camada de subleito, em alguns pontos, está com módulo de resiliência mais elevado do que o da base, o que indica que possivelmente esta camada pouco influenciou nos defeitos do tipo,

afundamento de trilha de roda ou ondulações. Tais defeitos neste caso podem ter sido ocasionados devido ao processo de envelhecimento do revestimento ou deformações plásticas. Esta diferença nos valores dos módulos de resiliência já foi observada em estudos de outros pesquisadores (NOBREGA, 2003).

É importante citar que as camadas de base e subleito analisadas, são da estrutura de um pavimento muito antigo, logo os seus valores podem ser considerados aceitáveis e próximos dos valores encontrados na literatura onde indicam para camadas de base em solo entre 150 e 300 MPa. Para efeito de cálculo, os dados da camada de base segundo AASHTO (1993) da Tabela 6.11, não foram considerados por estarem com valores acima do aceitável.

Calculados os módulos da base e subleito, foi verificado o módulo da camada de revestimento com a inserção da tela de aço. Inicialmente foi utilizado o modelo proposto com base nos resultados da pesquisa REFLEX onde incorporação da tela de aço na camada asfáltica, pode ser resolvida através da utilização de uma camada equivalente quando for avaliada a estrutura do pavimento conforme a Equação (3.1) apresentada no item 3.3.2.

Utilizando os dados da Tabela 4.1 do item 4.1.1, na Equação (3.1), chega-se a Equação (6.7):

$$E_{eq} = \frac{1}{100} \cdot (E_{aço} \cdot 3,3 + E_{CAUQ} \cdot 96,7) \quad (6.7)$$

Onde:

E_{eq} = módulo de elasticidade da camada equivalente, (MPa).

$E_{aço}$ = módulo de elasticidade do aço, (MPa);

E_{CAUQ} = módulo de resiliência do concreto asfáltico, (MPa);

Para o cálculo, foi adotado o valor de 210.000 MPa, para o módulo de elasticidade do aço e 3.500 MPa para o módulo de resiliência do revestimento de CAUQ. Logo se

chegou ao valor do módulo da camada equivalente de 10.315 MPa, valor adotado para iniciar a retroanálise pelo programa BAKFAA.

Para verificar se o valor do modelo REFLEX era compatível com o levantamento realizado em março de 2015 e julho de 2016 foi feito a retroanálise das bacias obtidas por meio de levantamento de FWD a cada 40 metros para a obtenção do módulo de resiliência, através dos programas BAKFAA / ELSYM-5. Como parâmetros de entrada, foram adotados como valores de partida os módulos de resiliência dos estudos apresentados anteriormente, além de, considerar as camadas de CAUQ com a tela de aço e MB aderidas.

Os Apêndices B e C apresentam os valores de módulo de resiliência de cada camada, para cada ponto de leitura de FWD, tanto no trecho de referência quanto no trecho experimental, espaçados a cada 40 metros. A Tabela 6.13 apresenta os resultados dos módulos de resiliências do revestimento com a inserção da tela de aço obtido por meio de retroanálise.

Tabela 6.13 - Resultados obtidos na retroanálise (Restauração).

Bacia	Módulo de Resiliência (MPa)							
	CAUQ (c/ tela)		Macadame Betuminoso		Base Solo Local		Subleito	
	mar/15	jul/16	mar/15	jul/16	mar/15	jul/16	mar/15	jul/16
1	11.984	11.889	1.449	4.969	287	618	300	164
2	11.108	9.848	1.504	4.407	254	85	280	271
3	9.045	13.887	3.745	5.387	120	370	348	170
4	11.556	12.023	2.497	1.965	229	310	290	260
5	9.812	12.625	1.197	1.099	545	438	292	257
6	9.863	15.574	1.262	4.384	224	98	333	184
7	10.175	16.446	3.125	3.785	289	470	362	250
8	9.825	10.574	1.044	2.857	390	105	259	283
9	12.110	9.646	1.290	3.504	484	195	269	218
10	9.375	11.212	567	3.188	262	109	308	283
11	9.550	8.838	1.187	2.012	136	70	329	290

Pode-se observar da tabela que os valores do módulo de subleito encontrados variam entre 164 a 362 MPa, valores considerados altos, no entanto, pelo tempo decorrido entre a restauração do trecho e as medições em campo, as camadas já se encontram consolidadas, o mesmo raciocínio equivale para a camada de base em solo local.

Todavia, nota-se a presença de alguns pontos (levantamento de julho de 2016) onde o módulo de resiliência da camada de base esta bem mais elevado do que os demais. Analisando os estudos desenvolvidos pela metodologia REFLEX, há ocorrência dessa alta variabilidade dos módulos ocorre devido à inserção da tela na nova camada de CAUQ, logo, todo confinamento pelo movimento de rigidez diminui a tensão desvio explicando o aumento do módulo.

O mesmo comportamento ocorre nas camadas de MB com módulos acima de 3.000 MPa, sendo que, em sua maioria os valores retroanalísados estão abaixo dos 3.000 MPa e apresentam valores típicos da literatura. Para a camada de CAUQ, foi calculada a média dos módulos para comparação de resultados. A Tabela 6.14 apresenta resumo dos resultados comparado à média dos valores calculados pela retroanálise com o valor encontra pela Equação (6.7) retirada do modelo REFLEX.

Tabela 6.14 - Resumo dos resultados de módulo de resiliência (Restauração).

Resultados	Média dos módulos retroanalísados (MPa)	Módulo obtido pelo modelo REFLEX (MPa)
	11.226	10.315

Pode-se observar da Tabela 6.14 que a média dos valores dos módulos retroanalísados é relativamente parecida ao valor do módulo calculado pelo modelo REFLEX. Em princípio, isso demonstra que a inserção da tela de aço na camada asfáltica do pavimento faz com que a mesma obtenha uma elevada rigidez, produzindo uma melhora no comportamento estrutural do pavimento, fato demonstrado pelos levantamentos deflectométricos apresentados no Anexo A.

6.4.1.2 Trecho de Implantação

Diferentemente da análise realizada no item anterior, quanto ao cálculo do módulo no revestimento empregando-se a tela de aço em camadas de reforço, neste item foi estudado o valor da inserção da tela em um pavimento novo implantado na rodovia, como mostrado no item 4.5 e na Tabela 6.9.

Assim como no item anterior foi utilizado o mesmo modelo proposto com base nos resultados da pesquisa REFLEX se chegou ao valor do módulo da camada asfáltica com a inserção da tela de aço no mesmo valor de 10.315 MPa, valor adotado para iniciar a retroanálise pelo programa BAKFAA.

Para verificar se o valor do modelo REFLEX era compatível com o levantamento realizado em março de 2015 e julho de 2016 foram feitas retroanálises das bacias obtidas por meio de levantamento de FWD a cada 40 metros para a obtenção do módulo de resiliência, através dos programas BAKFAA / ELSYM-5.

Os Apêndices D e E apresentam os valores de módulo de resiliência de cada camada, para cada ponto de leitura de FWD. A Tabela 6.15 exhibe os resultados dos módulos de resiliências do revestimento com a inserção da tela de aço obtido por meio de retroanálise.

Tabela 6.15 - Resultados obtidos na retroanálise (Implantação).

Bacia	Módulo de Resiliência (MPa)									
	CAUQ (c/ tela)		Binder		BGS		Rachão		Subleito	
	mar/15	jul/16	mar/15	jul/16	mar/15	jul/16	mar/15	jul/16	mar/15	jul/16
1	10.332	11.760	118	714	214	215	119	57	171	120
2	10.112	13.048	1.257	2.139	120	186	64	121	178	140
3	10.075	11.955	1.227	4.189	149	49	58	261	178	109

Pode-se observar da tabela que os valores de módulos retroanalizados das camadas de subleito estão com valores elevados possivelmente devido à contribuição da tela inserida na camada asfáltica, que ocasionou o aumento do módulo do revestimento. Também é importante citar que as bacias 2 e 3 estão com resultados mais aceitáveis para a camada de Binder, BGS e Rachão, uma vez que a inserção da tela ocorreu um ano após a construção da faixa adicional, logo as camadas já estão consolidadas.

Assim como no item anterior, foi calculado o valor médio do módulo da camada de CAUQ. A Tabela 6.16 apresenta resumo dos resultados comparando-se a média dos valores calculados pela retroanálise, com o valor encontrado pela Equação (6.7) retirada do modelo REFLEX.

Tabela 6.16 - Resumo dos resultados de módulo de resiliência (Implantação).

Resultados	Média dos módulos retroanalizados (MPa)	Módulo obtido pelo modelo REFLEX (MPa)
	11.214	10.315

Pode-se observar da Tabela 6.16 que a média dos valores dos módulos retroanalizados, ficou um pouco menor em relação ao trecho de restauração. Isso se deve provavelmente ao fato de que, devido esse trecho ser em implantação, todas as camadas são conhecidas de acordo com o projeto fornecido pelo DER (conforme item 5.3.5), logo, não há grandes variabilidades de espessuras e materiais utilizados na estrutura do pavimento.

Para continuidade dos estudos, foi adotado o valor calculado a partir do modelo REFLEX, uma vez que, o mesmo possui melhor coeficiente de segurança comparado aos valores retroanalizados.

6.5 ANÁLISE MECANICISTA

Os métodos de dimensionamento de reforço com tela de aço, citados na bibliografia, são baseados, sobretudo na experiência de observação de obras e de realização de ensaios laboratoriais. Com o objetivo de avaliar os segmentos de implantação de pavimento no trecho experimental, segundo uma metodologia de análise mecanicista de pavimentos, foram adotadas algumas diretrizes da especificação IP-DE-P00/001 (DER/SP, 2006b).

A utilização de modelos numéricos afigura-se como o meio adequado à análise estrutural de pavimentos reforçados com tela segundo Alves (2007). Neste trabalho optou-se por efetuar simplificadamente a análise estrutural do pavimento do trecho experimental com o modelo de múltiplas camadas com comportamento elástico linear. Todos os cálculos foram realizados utilizando-se o programa ELSYM-5.

Os parâmetros mecânicos dos materiais em diferentes camadas são descritos pela sua espessura, módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson, logo como parâmetro de cálculo, considerou-se o módulo equivalente da mistura asfáltica com tela de aço onde ele pode ser determinado seguindo os modelos de REFLEX (2002c), apresentado no item 3.3.2. O efeito do reforço com tela de aço foi analisado para a estrutura típica do projeto de pavimento flexível do DER/SP.

A estrutura é composta de 13 cm de camada asfáltica, 20 cm de base de BGS e 20 cm de sub-base de Rachão. As propriedades mecânicas dos materiais podem ser verificadas na Tabela 6.17.

Tabela 6.17 - Estrutura do pavimento adotado no trecho em Implantação.

Camada	Espessura (cm)	Módulo de resiliência (MPa)	Coeficiente de Poisson (u)
Concreto Asfáltico (CAUQ c/tela de aço)	6,0	10.315	0,35
Concreto Asfáltico (Binder)	7,0	3.500	0,35
Base de BGS	20,0	300	0,40
Sub-base de Rachão Intertravado	20,0	250	0,40
Subleito	-	70	0,45

Para quantificar a contribuição do reforço da tela para o início da fase de vida útil do pavimento, foi adotada para este estudo, uma equação de fadiga onde se tem o número de ciclos (N) para o início de trincamento em função da deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada asfáltica (ϵ_t). Esta equação, que foi adotada pelo Departamento de Transporte do Arizona (ADOT), foi calibrada pelo comportamento à fadiga de 20 trechos experimentais (ELSEIFI & AL-QADI, 2005).

Deve notar-se que, embora haja uma grande variação entre equações de fadiga dos materiais asfálticos, a Equação (6.8) foi utilizada para comparação relativa entre pavimento reforçado com tela de aço e casos sem o reforço.

$$N_{AASHTO} = 9,33 \times 10^{-7} \epsilon_t^{-3,84} \quad (6.8)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão de 80 kN;

ε_t = deformação horizontal máxima na fibra inferior da camada betuminosa (cm/cm).

Para o cálculo do deslocamento vertical no topo do revestimento, foram utilizadas as Equações (6.09 e 6.10) do modelo de fadiga do DNER-PRO 011/079 e do método TECNAPAV (PRO269/94) respectivamente extraídos da IP-DE-P00/001 (DER-SP, 2006).

$$\log(D_{adm}) = 3,01 - 0,176 \times \log(N_{USACE}) \quad (6.09)$$

$$\log(D_{adm}) = 3,148 - 0,188 \times \log(N_{USACE}) \quad (6.10)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão de 80 kN;

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

Tomando como referência o ano de 2014 (ano de implantação da estrutura), foram utilizados os dados da Tabela 4.10 do item 4.5.1 para calcular um novo Número “N” (Tabela 6.18) no trecho de implantação.

Com base nos critérios de dimensionamento à fadiga do revestimento e de deformação específica vertical de compressão no subleito utilizando-se o modelo de Dormon & Metcalf representado pela Equação (6.11), foram calculados os valores de admissíveis (N_{adm}) mostrados na Tabela 6.19, para ambos os critérios, admitindo que os diferentes pavimentos pudessem suportar a mesma solicitação de tráfego.

$$N_{USACE} = 6,067 \times 10^{-10} \varepsilon_v^{-4,762} \quad (6.11)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão de 80 kN;

ε_{vadm} = deformação vertical admissível de compressão no topo da camada de subleito, (cm/cm).

Tabela 6.18 - Valores atuantes.

Pavimento Tipo	Número "N" ano de projeto	
	USACE	AASHTO
Sem Tela de Aço	5,35E+07	1,34E+07
Com Tela de Aço		

Para comparação com os valores, no cálculo da deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada asfáltica, para o pavimento sem a tela de aço, foi utilizado o modelo da Equação (6.12) do *Asphalt Institute* extraído da IP-DE-P00/001 (DER-SP, 2006b).

$$N_{AASHTO} = 2,961 \times 10^{-5} \varepsilon_v^{-3,291} \quad (6.12)$$

Onde:

N = número de solicitações do eixo padrão de 80 kN;

ε_{vadm} = deformação vertical admissível de compressão no topo da camada de subleito, (cm/cm).

Tabela 6.19 - Verificação mecanicista.

Deslocamentos e deformações		Admissível	Solicitante	Modelos de fadiga
Deslocamento vertical no topo do revestimento (10^{-2} mm)	Com tela	44,6	37,4	DNER - PRO 011/79
	Sem tela		40,6	
	Com tela	49,6	37,4	DNER - PRO 269/94
	Sem tela		40,6	
Deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento (10^{-4} cm/cm)	Com tela	3,75	1,67	ELSEIFI, 2005
	Sem tela	2,87	1,82	Asphalt Institute
Deformação de compressão no topo do subleito (10^{-4} cm/cm)	Com tela	2,76	2,70	Dormon & Metcalf
	Sem tela		3,14	

Verifica-se através dos resultados obtidos com o programa computacional ELSYM-5 que os valores atuantes da deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada de CAUQ ($\varepsilon_t = 1,67 \times 10^{-4}$ e $1,82 \times 10^{-4}$) respectivamente para os trechos com e sem tela de aço são inferiores aos valores admissíveis.

Na análise da deformação específica vertical de compressão no subleito (ϵ_v) o valor atuante da opção sem tela ($\epsilon_v = 3,14 \times 10^{-4}$) foi superior ao valor admissível ($\epsilon_v = 2,76 \times 10^{-4}$), portanto a estrutura de pavimento dimensionada com utilização da tela de aço de acordo com a IP-DE-P00/001 (DER-SP, 2006b) foi aceitável para atender ao tráfego no ano de projeto, demonstrando a importância da inserção da tela como atenuadora no estado de tensões e deformações atuantes na estrutura.

6.5.1 Avaliação pelos métodos DNER-PRO-11/79 e PRO-269/94

Os procedimentos PRO-11 (DNER, 1979) e PRO-269 (DNER, 1994b) tratam-se de métodos de cálculo de espessura de reforço estrutural. Os procedimentos preconizados por estas normas foram desenvolvidos baseados no critério de deformabilidade dos pavimentos flexíveis, expressos na prática pela medida de deflexões recuperáveis.

O procedimento de análise dos pavimentos usado nessas normas baseia-se, basicamente, na comparação entre as deformações solicitantes e as admissíveis pela estrutura do pavimento, de forma a não ocorrer a “ruptura” por fadiga dos materiais constituintes.

A partir desses modelos, cuja formulas já foram apresentadas no item anterior, foram desenvolvidas as Tabelas (6.20 e 6.21) com o propósito de demonstrar o comparativo entre a deflexão e o tráfego, considerando-se os procedimentos de cálculo estrutural PROs 011 e 269. Os dados de deflexão utilizados são advindos das Tabelas 6.4 a 6.7, considerando a média dos valores por segmentação homogênea.

Ressalta-se que para o cálculo do número “N” com os dados em FWD, os métodos utilizados consideram as deflexões utilizando-se da correlação entre FWD e VB. Estudos, desenvolvidos no estado de São Paulo demonstram que as deflexões lidas com a Viga Benkelman costumam ser em média, cerca de 20% maiores que as deflexões lidas com aparelho tipo FWD (SUZUKI et al., 2006).

Este fenômeno se deve principalmente ao fato de que a carga estacionária utilizada no ensaio de Viga mobiliza tanto o deslocamento da parcela elástica quanto o da parcela viscosa do revestimento, enquanto que o ensaio dinâmico (FWD), de modo geral, mobiliza apenas o deslocamento da parcela elástica. Desta maneira, as deflexões medidas com os dois equipamentos devem ser ajustadas considerando-se a seguinte Equação (6.13).

$$D_{VB} = 1,20 \times D_{FWD} \quad (6.13)$$

Onde:

D_{VB} = deflexão máxima medida com a viga Benkelman (10^{-2} mm);

D_{FWD} = deflexão máxima com o FWD (10^{-2} mm).

Tabela 6.20 - Comparativo de deflexões e tráfego com levantamentos de 2015.

Segmentos	Deflexão (x10 ⁻² mm)		Número "N" - Solicitante		Número "N" - Admissível				
	VB ₂₀₁₅	FWD ₂₀₁₅	2009 _{Projeto}	2014 _{FimObras}	PRO11 _{VB}	PRO11 _{FWD}	PRO269 _{VB}	PRO269 _{FWD}	
Restauração	1 - Sem Tela	71,00	56,50	2,89E+07	5,35E+07	3,83E+06	4,98E+06	7,90E+06	1,86E+06
	2	47,17	23,03	2,89E+07	5,35E+07	3,92E+07	8,17E+08	6,95E+07	2,20E+08
	3	57,00	19,67	2,89E+07	5,35E+07	1,34E+07	2,00E+09	2,54E+07	5,10E+08
	4	56,00	19,87	2,89E+07	5,35E+07	1,48E+07	1,89E+09	2,79E+07	4,83E+08
	5	43,33	25,45	2,89E+07	5,35E+07	6,34E+07	4,63E+08	1,09E+08	1,30E+08
Novo	6 - Sem Tela	-	72,73	2,89E+07	5,35E+07	-	1,19E+06	-	4,86E+05
	7	-	48,37	2,89E+07	5,35E+07	-	1,20E+07	-	4,26E+06

Tabela 6.21 - Comparativo de deflexões e tráfego com levantamentos de 2016.

Segmentos	Deflexão (x10 ⁻² mm)		Número "N" - Solicitante		Número "N" - Admissível				
	VB ₂₀₁₆	FWD ₂₀₁₆	2009 _{Projeto}	2014 _{FimObras}	PRO11 _{VB}	PRO11 _{FWD}	PRO269 _{VB}	PRO269 _{FWD}	
Restauração	1 - Sem Tela	81,50	70,98	2,89E+07	5,35E+07	1,75E+06	1,36E+06	3,79E+06	5,54E+05
	2	53,83	26,06	2,89E+07	5,35E+07	1,85E+07	4,04E+08	3,44E+07	1,14E+08
	3	59,17	22,58	2,89E+07	5,35E+07	1,08E+07	9,14E+08	2,08E+07	2,45E+08
	4	61,17	23,99	2,89E+07	5,35E+07	8,94E+06	6,48E+08	1,75E+07	1,77E+08
	5	48,00	25,43	2,89E+07	5,35E+07	3,55E+07	4,65E+08	6,34E+07	1,30E+08
Novo	6 - Sem Tela	-	90,65	2,89E+07	5,35E+07	-	3,40E+05	-	1,51E+05
	7	-	54,02	2,89E+07	5,35E+07	-	6,43E+06	-	2,36E+06

Analisando as tabelas, pode-se observar dos dados de levantamentos realizados em 2015 e 2016, que nos trechos com a utilização da tela, há expectativa de ocorrer um aumento significativo da vida útil (Número "N") da estrutura do pavimento. Nota-se que em comparação ao ano de 2009 (finalização do projeto executivo) com o ano de 2014 (final das obras), ocorreu expressivo aumento de tráfego na rodovia.

É demonstrado que com a utilização dos dados defletoométricos de 2015 e 2016 as solicitações no pavimento, em alguns segmentos, não resistiriam ao aumento de esforços comparando-se aos dados de projeto de 2009, o que ocasionaria o rompimento da estrutura, caso ocorrido e já relatado no item 4.5 onde trata da utilização da tela em trecho de implantação devido ao aumento de tráfego não calculado em projeto.

Partindo-se para uma análise com base no Procedimento PRO-11, o mesmo emprega os seguintes modelos empíricos (Equações 6.14 a 6.16), para dimensionamento de reforços de estruturas de comportamento flexível.

$$h = k \times \log \frac{D_p}{D_{adm}} \quad (6.14)$$

$$D = 1023 \times N^{-0,176} \quad (6.15)$$

$$N = 1,263 \times 10^{17} \times D^{-5,682} \quad (6.16)$$

Onde:

k = fator de redução de deflexão, próprio do material usado no reforço;

h_{ref} = espessura do reforço do pavimento (cm);

D_p = deflexão de projeto antes da execução do reforço (10^{-2} mm);

D_{adm} = deflexão admissível após a execução do reforço do pavimento (10^{-2} mm);

D = deflexão de projeto determinada na superfície do pavimento (10^{-2} mm);

N = número de solicitações do eixo padrão de 80 kN.

Com base nos modelos apresentados é possível estabelecer outros modelos (Equações 6.17 e 6.18) com o propósito de previsão da redução da deflexão após a execução do reforço estrutural além de poder estimar a vida útil de serviço da nova estrutura de pavimento.

$$D = 10^{-0,025h} \times D_p \quad (6.17)$$

$$N = 1,263 \times 10^{17} \times D_p^{-5,682} \times 10^{0,142h} \quad (6.18)$$

Com base nos modelos apresentados e utilizando-se dos valores de deflexão medidas nos levantamentos de 2009 (antes da inserção da tela de aço, Tabela 4.4) e 2016, último levantamento realizado no trecho em restauração com a tela de aço, chega-se aos valores da Tabela 6.22. Lembrando que para o trecho experimental em restauração empregou-se uma espessura de 7 cm com a inserção da tela de aço.

Tabela 6.22 - Vida útil estimada do pavimento com tela de aço.

Segmentos	Deflexão (x10 ⁻² mm)		esp. (cm)	D _d (eq. 6.19)	Número "N"		$\frac{D_{campo}}{D_{modelo}}$	$\frac{N_{campo}}{N_{modelo}}$	
	FWD ₂₀₀₉	FWD ₂₀₁₆		FWD ₂₀₁₆	FWD ₂₀₁₆				
					FWD ₂₀₀₉	(eq. 6.20)	(eq. 6.18)		
Restauração	2	75,5	28,00	7,00	50,46	2,66E+07	7,56E+08	0,555	28,43
	3	86,2	21,00	7,00	57,61	1,25E+07	3,88E+09	0,365	309,53
	4	79,6	28,00	7,00	53,20	1,97E+07	7,56E+08	0,526	38,39
	5	79,9	22,30	7,00	53,40	1,93E+07	2,76E+09	0,418	142,96

Conforme se pode constatar pelos dados calculados na tabela, a deflexão encontrada no campo foi em média, 53% menor do que a prevista em modelo, resultado em uma vida útil esperada superior a 100%.

6.5.2 Modelo proposto para CAUQ com tela de aço

A partir da metodologia do PRO-11/79 a espessura de reforço do pavimento deve ser constituída de uma camada de CAUQ convencional, sendo que essa mesma metodologia recomenda a adoção de um valor de $K = 40$. Para o caso de da adoção de novos materiais que não sejam do tipo CAUQ convencional que poderá ser utilizado como reforço estrutural, tem-se a Equação (6.19) para o calculo do valor K .

$$k = \frac{h_{ref}}{\log \frac{D_a}{D_d}} \quad (6.19)$$

Onde:

k = fator de redução de deflexão, próprio do material usado no reforço;

h_{ref} = espessura do reforço do pavimento (cm);

D_a = deflexão de projeto antes da execução do reforço (10^{-2} mm);

D_d = deflexão admissível após a execução do reforço (10^{-2} mm).

O procedimento PRO-11/79 (DNER, 1979) define que as deflexões sejam levantadas com VB, no entanto, a deflexão de projeto levantada na superfície do pavimento primitivo antes da execução do reforço em 2009 foi realizada com o equipamento tipo FWD, logo, foi adotado como ponto inicial o cálculo do valor de K para a seção anterior a execução do trecho experimental, sendo a mesma executada com asfalto convencional na espessura de 6,0 cm.

Tabela 6.23 - Cálculo do fator K para trechos sem a tela de aço.

Segmentos Sem tela de aço		km	h _{ref} (cm)	Deflexões (x 10 ⁻² mm)			k ₂₀₁₅	k ₂₀₁₆
				FWD ₂₀₀₉	FWD ₂₀₁₅	FWD ₂₀₁₆		
Restauração Sem tela	Aferição 1	59,88	6,0	70,7	46,8	53,0	33,5	47,9
	Aferição 2	60,04	6,0	69,0	47,7	51,0	37,4	45,7
	Aferição 3	60,60	6,0	50,7	38,8	40,0	51,6	58,3

A Tabela (6.23) apresenta uma faixa de valores de K encontrados, compreendida entre 33,5 e 58,3 com o valor da média de K=44,2. Como o valor da média é 10% superior ao valor recomendado no procedimento PRO 11 (K=40), tomou-se como aceitável o levantamento deflectométrico com FWD para analisar o potencial de redução de deflexão.

Tabela 6.24 - Cálculo do fator K para trechos com a tela de aço.

Segmentos Com tela de aço		km	h _{ref} (cm)	Deflexões (x 10 ⁻² mm)			k ₂₀₁₅	k ₂₀₁₆
				FWD ₂₀₀₉	FWD ₂₀₁₅	FWD ₂₀₁₆		
Restauração	2	60,84	7,0	75,5	24,2	28,0	14,2	16,2
	3	60,92	7,0	86,2	19,1	21,0	10,7	11,4
		61,00	7,0	68,9	22,4	25,3	14,3	16,1
	4	61,08	7,0	79,6	22,6	28,0	12,8	15,4
	5	61,16	7,0	79,9	26,1	22,3	14,4	12,6

A mesma análise foi realizada no trecho com tela e de acordo com a Tabela (6.24), foi verificada uma faixa de valores de K compreendida entre 10,7 e 16,2, com o valor da média de K=14. O valor demonstra a contribuição da presença da tela como fator de redução de deflexão, comparado com valor k acima de 40 (PRO-11), encontrado sem a incorporação da tela.

Considerando que os valores de k encontrados com as medições de campo foram da ordem de 14, está sendo proposta a adoção de um fator de calibração campo/laboratório igual a 2, no procedimento de reforço do pavimento, para compatibilizar com os modelos teóricos do estudo paramétrico mecanicista com base nas equações (5.18 a 5.21), onde podem ser encontradas as Equações (7.4 e 7.6), que são demonstradas no capítulo 7.

Apesar das reduções dos níveis deflectométricos no campo terem sido significativas da ordem de 50%, conforme se verifica na Tabela 6.22, recomenda-se em nível preliminar a utilização de um fator k igual a 28 em vez de 40, na equação do PRO-11 de avaliação estrutural de pavimentos, para efeito de cálculo da espessura de reforço considerando a incorporação da tela.

É recomendado que sejam realizadas novas análises em outros trechos experimentais, para calibração efetiva do fator k para pavimentos com a tela de aço, uma vez que, o mesmo é direcionado para cálculos de pavimentos flexíveis não considerando outros tipos de estruturas como pavimentos invertidos ou semi-rígidos. A Equação (6.20) apresenta o modelo empírico para o dimensionamento em pavimentos flexíveis com a inserção da tela de aço.

$$h_{ref} = 28x \left[\log \frac{D_p}{D_{adm}} \right] \quad (6.20)$$

Onde:

h_{ref} = espessura do reforço do pavimento (cm);

D_p = deflexão de projeto antes da execução do reforço (10^{-2} mm);

D_{adm} = deflexão admissível após a execução do reforço do pavimento (10^{-2} mm);

N = número de solicitações do eixo padrão de 80 kN.

A partir da fórmula verifica-se o potencial de redução das deflexões quando da execução de reforços com a inserção da camada betuminosa com tela de aço em relação ao procedimento PRO-11 convencional. Verifica-se que com a aplicação da equação encontrada, independentemente da relação do valor deflectométrico medido na superfície do pavimento antes e após o recapeamento, a utilização da tela de aço, permite a redução de 30% da espessura da camada de reforço em relação à espessura de CAUQ convencional.

6.5.3 Proposta de utilização da tela de aço como pavimento perpétuo

Pavimentos perpétuos (*Full-depth*) são pavimentos construídos inserindo-se camadas espessas de materiais asfálticos acima do solo ou da camada de Sub-base. Levando em consideração a inserção da tela de aço em pavimentos flexíveis, e o conceito do pavimento perpétuo que trata de uma estrutura dimensionada para durar por longos períodos, é interessante analisar esta técnica por possuir vantagens sobre a pavimentação tradicional, rotineiramente utilizada no Brasil.

O pavimento perpétuo é um pavimento asfáltico dimensionado e construído para durar mais de 50 anos sem requerer grandes reabilitações ou reconstruções estruturais, necessitando apenas de renovação periódica de sua camada superficial devido a danos causados no revestimento asfáltico (Asphalt Pavement Alliance, 2000).

A partir do conceito da inserção da tela de aço em pavimentos flexíveis, é possível dimensionar, a partir das equações apresentadas no capítulo anterior, uma estrutura utilizando a inserção da tela, na qual, como camada final de revestimento, seja inserido uma camada de desgaste do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA) na espessura de 4 cm acima da estrutura dimensionada com a tela. Essa camada servirá como uma camada de sacrifício, onde poderá ser fresada e substituída sem interferir da camada de revestimento com a tela de aço (Figura 6.36).

Figura 6.36 - Estrutura tipo pavimento perpétuo com a inserção da tela de aço.

7 ANÁLISE ECONÔMICA

A falta de recursos e a precariedade das operações de manutenção exigem que se busque um tipo de pavimento que tenha durabilidade e baixo custo de conservação, além de manter íntegra sua estrutura ao longo do tempo, cumprindo o conceito de proporcionar ao usuário conforto, segurança e economia. Apresenta-se a seguir a análise do impacto da utilização da tela de aço na estrutura de pavimentos flexíveis quanto a questões técnicas e econômicas. Para esse estudo, foi feita a composição do preço unitário com a utilização da tela de aço e posterior comparativo de valores com base nos estudos paramétricos realizados no capítulo 5.

Ainda em função do valor calculado na composição do preço, foi feita uma análise comparativa entre as alternativas de pavimento para restauração e implantação de nova estrutura com e sem a tela de aço, avaliando seus custos de conservação e custos iniciais (custos de construção), durante um período de análise de 20 anos, lembrando que todos os estudos foram realizados com base na política de investimentos adotada no DER/SP.

7.1 COMPOSIÇÃO DE PREÇO UNITÁRIO

Com o apoio do DER/SP foi realizada pesquisa de mercado com o objetivo de elaborar a composição de preço unitário contemplando a inserção da tela de aço. Inicialmente, foram catalogados os produtos utilizados no trecho experimental para desenvolvimento da composição. Os materiais utilizados são apresentados na Tabela 7.1. É importante frisar que todos os itens estão com base na Tabela de Preços Unitários do DER/SP (TPU-DER/SP), com data-base de preços referentes ao mês de Setembro de 2016.

Tabela 7.1 - Materiais utilizados para composição de preço.

Material	Unidade	Preço (R\$)
Tela de Aço Q138	m ²	114,33
Barra de Aço CA-60 - diâmetro 5mm	kg	5,79
Arame Recozido nº18	kg	5,10

Com base nos materiais utilizados e levando em consideração como mão-de-obra um encarregado de turma, armador e servente, chegou-se ao valor do custo por metro quadrado de tela de R\$ 20,20. A memória de cálculo para a obtenção do valor se encontra no Apêndice F. A partir do resultado obtido foi feita a comparação entre o preço/m² do CAUQ com o valor encontrado da tela. Os itens utilizados são mostrados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Custos comparativos de soluções sem o uso de tela.

Item	Material	Unidade	Preço (R\$)
23.08.03.03.98	CAUQ - DER/SP	m ³	847,02
-	Tela de aço	m ²	20,20

$$\frac{Tela_{R\$}}{CAUQ_{R\$}} = \frac{20,20 \text{ m}^2}{847,02 \text{ m}^3} = 0,0238 \text{ m} = 2,38 \text{ cm} \cong 2,50 \text{ cm}$$

A partir do valor encontrado observa-se que a inserção da tela de aço em pavimentos asfálticos, equivale à aproximadamente 2,5 cm de CAUQ. Portanto para as estruturas de restauração adotadas nos trechos experimentais (item 4.4.1), onde se utilizou a espessura de 7 cm de CAUQ tem-se a Figura 7.1.

Figura 7.1 - Equivalência de preços entre CAUQ e tela de aço.

Nota-se que o valor encontrado por metro quadrado de solução para um revestimento com e sem a inserção da tela de aço é praticamente idêntico, com isso, em uma primeira análise conclui-se que a inserção da tela tem potencial de redução da espessura da camada asfáltica, no entanto, para uma melhor análise do potencial de aplicação da tela, foi realizado o comparativo das espessuras se utilizando dos modelos paramétricos advindos do capítulo 5.

7.2 MODELOS PARA EQUIVALÊNCIA DE ESPESSURAS

Utilizando-se dos modelos deflectométricos gerados a partir dos estudos realizados no capítulo 5, foram estabelecidas relações para situações onde foram variados apenas os valores da espessura da camada asfáltica e módulos com e sem a utilização da tela de aço. Para isso com base nas equações (5.18 a 5.21), foram determinadas as seguintes expressões.

$$H = f(MR_{CAUQ})^{-0,376} \quad (7.1)$$

$$H = f(MR_{CAUQ})^{-0,336} \quad (7.2)$$

Como base nos valores de módulo encontrados nos estudos de retroanálise foi adotado o valor de 10.375 MPa para uma camada com tela de aço e para a camada sem a sua utilização foi considerado o valor estabelecido na especificação IP-DE-P00/001 (DER-SP, 2006b) de 3.500 MPa, chegando-se as seguintes expressões:

$$\left(\frac{H_1}{H_2}\right) = \left(\frac{M_{R1}}{M_{R2}}\right)^{-0,376} \quad (7.3)$$

$$H_1 = 0,67 \times H_2 \quad (7.4)$$

$$\left(\frac{H_1}{H_2}\right) = \left(\frac{M_{R1}}{M_{R2}}\right)^{-0,336} \quad (7.5)$$

$$H_1 = 0,70 \times H_2 \quad (7.6)$$

Onde:

H_1 = espessura do CAUQ com a tela de aço (cm);

H_2 = espessura do CAUQ sem a tela de aço (cm);

M_{R1} = módulo equivalente do CAUQ com a tela de aço (MPa);

M_{R2} = módulo de resiliência do CAUQ (MPa).

A partir das equações 7.4 e 7.6 foram plotados os valores das funções no gráfico da Figura 7.2 com o propósito de ter uma melhor visualização dos comparativos de custos dos serviços.

Figura 7.2 - Comparativo de custos de mistura asfáltica com e sem a tela.

A partir da Figura 7.2, pode-se verificar que a inserção da tela de aço é economicamente viável para espessuras de revestimento acima de 5 cm, tanto para o modelo da equação 7.4 como da equação 7.6. Com essa análise evidencia-se o que já havia sido verificado nos estudos paramétricos e na execução dos trechos experimentais, onde foi determinado que a espessura mínima de revestimento com a utilização da tela era de 6 cm.

7.3 SOLUÇÕES ANALISADAS

Para efeito comparativo, foram analisadas dois tipos de soluções, sendo a primeira para um segmento de implantação de pavimento novo com a inserção da tela de aço e a segunda em um pavimento a ser restaurado com a tela. Ambas as soluções foram comparadas com suas respectivas estruturas sem a inserção da tela.

Ressalta-se que as análises foram feitas levando-se em conta apenas os custos de construção e conservação do pavimento. Outras parcelas do custo tais como custo de operação da via, custo operacional de veículos, custos ambientais, segurança ao usuário, dentre outros não foram considerados nesse estudo.

Os valores apresentados são estimativos para efeito comparativo entre as alternativas de pavimento apresentadas, atendo-se apenas às camadas de suas estruturas, conforme mostradas adiante.

As Figuras 7.3 e 7.4 apresentam as soluções analisadas para os trechos em implantação e restauração do pavimento. Ambas as estruturas são as mesmas dimensionadas quanto ao projeto de pavimentação do DER/SP apresentado no item 4.3. Importante salientar que a tela de aço é incorporada entre o CAUQ e Binder na estrutura de implantação e entre o CAUQ e TSD na estrutura para restauração.

Figura 7.3 - Estrutura adotada para implantação.

Figura 7.4 - Estrutura adotada para restauração.

7.4 VALORES INICIAIS PARA CONSTRUÇÃO

A partir das estruturas dimensionadas foram orçados os custos de construção para cada trecho com extensão de 1,0 km e largura de pista de rolamento de 7 m para ambos os trechos.

Para todos os cálculos desenvolvidos considerando-se uma taxa de 41,79% de BDI, uma vez que, na tabela de preços do DER/SP, os valores unitários mais usuais na elaboração de orçamentos e licitações de serviços e obras na área de transportes também incluem este valor de BDI.

Para o preço da tela de aço/m² foi utilizado o valor já apresentado anteriormente, ou seja, R\$ 20,20/m². A seguir, as Tabelas 7.3 e 7.4 apresentam os valores de custo de construção para os trechos analisados.

Tabela 7.3 - Custo da construção/trecho por km em implantação sem uso de tela.

[illegible]

Tabela 7.4 - Custo da construção/trecho por km em implantação com uso de tela.

Item	Descrição	Unidade	Preço Unit. (R\$)	Largura Faixa (m)	Extensão (m)	Espessura (m)	R\$/km
23.08.03.03.99	CAM.ROL.CBUQ-C-C/DOP	M3	847,02	7,00	1.000,00	0,06	355.748,40
XX.XX.XX.XX	TELA DE AÇO	M2	20,20	7,00	1.000,00	-	141.400,00
23.05.02.99	IMPRIM.LIGANTE	M2	2,39	7,00	1.000,00	-	16.730,00
23.08.02.99	BINDER GRAD.B C/ DOP	M3	787,51	7,00	1.000,00	0,07	385.879,90
23.05.02.99	IMPRIM.LIGANTE	M2	2,39	7,00	1.000,00	-	16.730,00
23.05.01.99	IMPRIM.IMPERMEAB.	M2	6,47	7,00	1.000,00	-	45.290,00
23.04.03.01.99	BASE BRITA-GRAD.SIMP	M3	194,16	7,00	1.000,00	0,20	271.824,00
23.04.03.04.99	BASE PEDRA RACHAO	M3	187,23	7,00	1.000,00	0,20	262.122,00
23.02.01.99	MELH SUB-LEIT 100%EN	M2	1,48	7,00	1.000,00	-	10.360,00
TOTAL							1.506.084,30

A seguir, as Tabelas 7.5 a 7.6 apresentam os valores de custos para restauração dos trechos analisados, ainda levando em consideração a restauração do trecho com fresagem de 6 cm.

Tabela 7.5 - Custo da restauração por km sem uso de tela.

Item	Descrição	Unidade	Preço Unit. (R\$)	Largura Faixa (m)	Extensão (m)	Espessura (m)	R\$/km
23.08.03.03.99	CAM.ROL.CBUQ-C-C/DOP	M3	847,02	7,00	1.000,00	0,06	355.748,40
23.05.02.99	IMPRIM.LIGANTE	M2	2,39	7,00	1.000,00	-	16.730,00
23.06.02.99	TRATAM SUP DUPLO	M3	539,65	7,00	1.000,00	0,02	75.551,00
23.05.02.99	IMPRIM.LIGANTE	M2	2,39	7,00	1.000,00	-	16.730,00
23.08.04.04.99	CAM.ROL.CBUQ-D C/POL	M3	874,24	7,00	1.000,00	0,02	122.393,60
23.05.03.99	IMPRIM.AUX.LIGACAO	M2	1,29	7,00	1.000,00	-	9.030,00
TOTAL							596.183,00

Tabela 7.6 - Custo da restauração por km com uso de tela e fresagem.

Item	Descrição	Unidade	Preço Unit. (R\$)	Largura Faixa (m)	Extensão (m)	Espessura (m)	R\$/km
23.08.03.03.99	CAM.ROL.CBUQ-C-C/DOP	M3	847,02	7,00	1.000,00	0,07	415.039,80
XX.XX.XX.XX	TELA DE AÇO	M2	20,20	7,00	1.000,00	-	141.400,00
23.05.02.99	IMPRIM.LIGANTE	M2	2,39	7,00	1.000,00	-	16.730,00
23.10.01.99	FRES.CONT.PAVIMENTO	M3	172,58	7,00	1.000,00	0,06	72.483,60
TOTAL							645.653,40

A Tabela 7.7 apresenta o resumo de todos os tipos de estruturas utilizados nesse estudo com seus respectivos valores.

Tabela 7.7 - Resumo dos custos de implantação e restauração por km com e sem uso de tela.

Tipo de Estrutura - Implantação	
Sem Tela de Aço	Com Tela de Aço
R\$ 1.364.684,30	R\$ 1.506.084,30
Tipo de Estrutura - Restauração	
Sem Tela de Aço	Com Tela de Aço
R\$ 596.183,00	R\$ 645.653,40

7.5 CUSTOS DE CONSERVAÇÃO

Para uma estrutura nova de implantação, o pavimento asfáltico sem a inserção da tela de aço somente terá desempenho satisfatório se forem cumpridas rigorosamente intervenções de conservação, sendo prevista ao longo do ciclo de vida a restauração com fresagem e recapeamento com CAUQ, no 7º, 14º e 20º ano, na espessura de 6 cm.

Além desses serviços é considerada a conservação rotineira (50% de remendos e 50% de tapa-buracos) em 5% da área de pavimento a partir do terceiro ano após a construção do pavimento novo ou da restauração do mesmo. As Tabelas 7.8 e 7.9 apresentam os valores para a conservação do pavimento.⁴

Tabela 7.8 - Custo para restauração por km do trecho sem uso de tela, com fresagem e recape.

Item	Descrição	Unidade	Custo Unit. (R\$)	Largura Faixa (m)	Extensão (m)	Espessura (m)	R\$/km
23.08.03.03.99	CAM.ROL.CBUQ-C-C/DOP	M3	847,02	7,00	1.000,00	0,05	296.457,00
23.05.03.99	IMPRIM.AUX.LIGACAO	M2	1,29	7,00	1.000,00	-	9.030,00
23.08.02.99	BINDER GRAD.B C/ DOP	M3	787,51	7,00	1.000,00	0,05	275.628,50
23.05.02.99	IMPRIM.LIGANTE	M2	2,39	7,00	1.000,00	-	16.730,00
23.10.01.99	FRES.CONT.PAVIMENTO	M3	172,58	7,00	1.000,00	0,06	72.483,60
TOTAL							670.329,10

⁴ De acordo com os técnicos da Diretoria de Operações do DER/SP, as soluções apresentadas são as mais utilizadas pelas residências de conservação do órgão.

Tabela 7.9 - Custo para conserva do trecho por km com e sem uso de tela, remendo e tapa buraco.

Item	Descrição	Unidade	Custo Unit. (R\$)	Largura Faixa (m)	Extensão (m)	Espessura (m)	R\$/km
37.03.01.99	REMENDO PRE-M.QUENTE	M3	1.619,25	7,00	50,00	0,05	28.336,88
37.03.12.99	IMPRIM.LIGANTE	M2	2,39	7,00	50,00	-	836,50
37.03.04	REP.EM.PAV.TAPA BUR.	M3	1.132,73	7,00	50,00	0,20	79.291,10
TOTAL							108.464,48

Com base nos estudos desenvolvidos nesta dissertação, foi realizado o acompanhamento dos trechos experimentas durante 4 anos, sendo que nesse período o pavimento não apresentou defeitos estruturais significativos, sendo os mesmos corrigidos pontualmente através de reparos localizados pelas equipes de conservação do DER/SP.

Com essa análise, foi previsto para o cálculo dos custos de restauração de trechos com a inserção da tela de aço, que no 7º e 14º ano de vida útil do pavimento, será realizada fresagem de 4 cm e posterior recapeamento com CAUQ na espessura de 5 cm, além de considerar a mesma estrutura dos serviços de conservação rotineira do trecho sem a inserção da tela de aço. A Tabela 7.10 apresenta os valores para a restauração do pavimento com a inserção da tela.

Tabela 7.10 - Custo para restauração do trecho com uso de tela, com fresagem e recape.

Item	Descrição	Unidade	Custo Unit. (R\$)	Largura Faixa (m)	Extensão (m)	Espessura (m)	R\$/km
23.10.01.99	FRES.CONT.PAVIMENTO	M3	172,58	7,00	1.000,00	0,04	48.322,40
23.05.02.99	IMPRIM.LIGANTE	M2	2,39	7,00	1.000,00	-	16.730,00
23.08.03.03.99	CAM.ROL.CBUQ-C-C/DOP	M3	847,02	7,00	1.000,00	0,05	296.457,00
TOTAL							361.509,40

Para uma estrutura em restauração sem a utilização da tela de aço, é recomendado que a cada 4 anos seja realizado um serviço de fresagem do pavimento na espessura de 5 cm, com posterior recapeamento de 6 cm, além de se manter os serviços de conservação rotineira no pavimento da rodovia.

Para uma estrutura em restauração com a utilização da tela de aço, com base nos acompanhamentos de campo realizados nos trechos experimentais, é recomendado que a cada 5 anos seja realizado um serviço de fresagem na espessura de 4 cm, com o propósito de eliminar as imperfeições que houverem na camada asfáltica, com posterior recape de 4 cm além de haver os serviços de conservação rotineira na rodovia. As Tabelas 7.11 e 7.12 apresentam os valores para a restauração do pavimento.

Tabela 7.11 - Custo para restauração do trecho recapeado sem uso de tela.

Item	Descrição	Unidade	Custo Unit. (R\$)	Largura Faixa (m)	Extensão (m)	Espessura (m)	R\$/km
23.10.01.99	FRES.CONT.PAVIMENTO	M3	172,58	7,00	1.000,00	0,05	60.403,00
23.05.03.99	IMPRIM.AUX.LIGACAO	M2	1,29	7,00	1.000,00	-	9.030,00
23.08.03.03.99	CAM.ROL.CBUQ-C-C/DOP	M3	847,02	7,00	1.000,00	0,06	355.748,40
TOTAL							425.181,40

Tabela 7.12 - Custo para restauração do trecho recapeado com uso de tela.

Item	Descrição	Unidade	Custo Unit. (R\$)	Largura Faixa (m)	Extensão (m)	Espessura (m)	R\$/km
23.10.01.99	FRES.CONT.PAVIMENTO	M3	172,58	7,00	1.000,00	0,04	48.322,40
23.05.03.99	IMPRIM.AUX.LIGACAO	M2	1,29	7,00	1.000,00	-	9.030,00
23.08.03.03.99	CAM.ROL.CBUQ-C-C/DOP	M3	847,02	7,00	1.000,00	0,04	237.165,60
TOTAL							294.518,00

7.6 ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA

O Valor Presente (VP) do investimento total requerido para cada alternativa foi calculado com base nos custos iniciais (custos de construção) e de restauração e conservação de cada estrutura de pavimento durante um período de 20 anos. Para esses cálculos adotou-se uma taxa de desconto igual a 6% ao ano.

Os custos de restauração e de conservação referem-se aos custos das atividades necessárias para manter o pavimento nas condições desejadas de operação. A Tabela 7.13 apresenta o resumo da análise econômica para cada trecho (implantação e restauração). São apresentados os valores de construção e o VP total do investimento necessário durante o período de 20 anos.

Tabela 7.13 - Resumo da Análise Econômica.

IMPLANTAÇÃO		
Tipo de Solução	Custo da Construção	Valor Presente
Com Tela	R\$ 1.506.084,30	R\$ 2.385.575,23
Sem Tela	R\$ 1.364.684,30	R\$ 2.987.075,70
Diferença	R\$ 141.400,00	-R\$ 601.500,48
	10%	-20%
RESTAURAÇÃO E CONSERVAÇÃO		
Tipo de Solução	Custo da Construção	Valor Presente
Com Tela	R\$ 645.653,40	R\$ 1.989.677,20
Sem Tela	R\$ 596.183,00	R\$ 2.206.070,59
Diferença	R\$ 49.470,40	-R\$ 216.393,39
	8%	-10%

Pode-se verificar pelo resumo da análise econômica que o investimento inicial para a reabilitação da rodovia nos trechos em implantação de estrutura nova e restauração do revestimento existente com CAUQ e com tela de aço, tem custos de 10% e 8% superior ao pavimento asfáltico convencional sem a inserção da tela de aço.

Considerando-se as atividades de conservação e restauração de cada estrutura, verifica-se que o investimento total necessário da solução com a inserção da tela em ambos os trechos (implantação e restauração) é consideravelmente inferior ao necessário para a estrutura de pavimento asfáltico convencional, considerando as necessidades relativas ao desempenho do pavimento durante todo o ciclo de análise.

As Figuras 7.5 e 7.6 ilustram o VP acumulado durante o período de 20 anos, para as duas soluções analisadas em cada trecho. As Figuras 7.9 e 7.10 apresentam o VP acumulado dos serviços de restauração e conservação nas estruturas de pavimento durante o período de 20 anos. No Apêndice G são apresentados os fluxos de caixa para as alternativas de pavimento estudadas.

Figura 7.5 - Valor Presente acumulado do custo total para estrutura de implantação.

Figura 7.6 - Valor Presente acumulado do custo total para estrutura de restauração.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho, foi apresentada a tecnologia da inserção da tela de aço em camadas asfálticas de pavimentos flexíveis, como alternativa para restauração de pavimentos. Os estudos elaborados nesta dissertação contou com a execução de um trecho experimental, localizado na rodovia SP-354, no Estado de São Paulo entre as cidades de Campo Limpo Paulista e Jarinu.

O objetivo principal deste trabalho foi demonstrar, teoricamente em caráter experimental, o comportamento do revestimento parcialmente comprometido (trincas/afundamentos) quando restaurado com aplicação de tela de aço em comparação aos processos convencionais.

Pode-se inferir que os segmentos reabilitados através da aplicação da tela de aço, até a análise do último levantamento realizado no trecho experimental, apresentou comportamento satisfatório, quando comparado ao método convencional, evidenciando o efeito benéfico da tela incorporada ao revestimento asfáltico.

Os estudos desenvolvidos permitem concluir acerca da viabilidade técnica da aplicação da tela de aço, que quando devidamente executada, a estrutura pode ficar com os seus níveis de deflexão, tensão e deformação abaixo de níveis admissíveis advindos das equações para cálculos de esforços.

O melhor desempenho no trecho experimental se deu no segmento de restauração onde foi realizada a fresagem prévia da estrutura existente, pelo fato da tela soldada ficar encaixada, confinada e sem movimentação sobre a superfície fresada, causada pela retirada de material fresado. Entretanto, foram removidas pequenas irregularidades durante a fresagem, fazendo com que o pavimento ficasse nivelado, o que resultou em um melhor assentamento da tela, evitando-se ondulações que ocorrem principalmente devido à irregularidade da superfície e também durante a execução pela movimentação da tela devido ao tráfego dos equipamentos (caminhão basculante e vibro-acabadora) sobre a mesma.

Observou-se em alguns locais do trecho experimental executado o deslocamento da tela ocasionando ondulação da mesma e diminuição da espessura do recape, resultando em pequenas patologias iniciais que evoluíram para panelas/buracos.

Em alguns locais das emendas, também ocorreram trincas devido a falhas de aderência entre a camada subjacente (pavimento existente) e o recape, permitindo a infiltração da água da chuva, entretanto, esses defeitos foram tratados e não sofreram até o momento da última vistoria de campo, nenhuma evolução.

A partir dos estudos paramétricos, foram desenvolvidos modelos com o propósito de determinar os esforços solicitantes sob o efeito das cargas de tráfego com base em indicadores deflectométricos. Foram desenvolvidos diversos modelos, sendo que os esforços solicitantes que melhor apresentaram coeficientes de determinação foram aqueles em função da deflexão máxima (D_0), o Raio de Curvatura (R) e o Índice de Danos a Base (BDI). Seus coeficientes de determinação variaram de 80,05 a 94,48%, entretanto a análise desenvolvida restringiu-se ao estudo da deflexão máxima.

A análise paramétrica também permitiu verificar as espessuras mínimas necessárias de revestimento asfáltico com a inserção da tela, além de comparar com as espessuras mínimas estabelecidas pelo método de dimensionamento do DER/SP. De acordo com os resultados obtidos, as espessuras mínimas atendem ao número máximo de solicitações do eixo padrão, com base nas instruções de projeto do DER/SP, sendo que, de modo geral, os modelos estudados demonstram a influência positiva da inserção da tela de aço nos revestimentos asfálticos, uma vez que, devido à inclusão da tela, há uma sensível diminuição das espessuras usuais de revestimento.

Com base nos estudos de retroanálise efetuadas a partir dos levantamentos deflectométricos realizados, de modo geral, pode-se concluir que a inserção da tela na camada asfáltica elevou o módulo de resiliência, com valores encontrados que variam de 8.838 a 14.178MPa, sendo que tal ordem de grandeza é compatível com valores verificados na literatura.

A análise numérica demonstrou a efetividade e a contribuição da tela na atenuação dos esforços solicitantes (ϵ_t e ϵ_v) e com base nas avaliações feitas a partir das metodologias PRO-011 e PRO-269, observou-se que com os dados de levantamentos realizados no trecho experimental, ocorreu um aumento significativo da vida útil (Número “N”) da estrutura do pavimento.

Em uma análise posterior realizada empregando-se a metodologia PRO-11, verificou-se que, é possível reduzir em média de 30% da espessura de revestimento com a utilização da tela em comparação com uma estrutura executada com CAUQ convencional. Esta observação conduz à conclusão de que a mistura asfáltica incorporada com a tela de aço tende a apresentar um desempenho estrutural melhor se comparado ao concreto asfáltico convencional.

Nesta fase do estudo, sugere-se para utilização da equação do PRO-11 um valor de k da ordem de 28, para fins de cálculo de espessura de reforço com a utilização de tela de aço incorporado na mistura asfáltica.

Na análise econômica efetuada neste estudo, pode-se verificar que a inserção da tela de aço é economicamente viável para espessuras de revestimento acima de 5 cm, evidencia-se o que já havia sido verificado nos estudos paramétricos, onde foi determinado que a espessura mínima de revestimento com a utilização da tela era de 6 cm, além de constatar que ao longo do ciclo de vida de 20 anos, o investimento total para a reabilitação de uma rodovia em CAUQ com tela de aço, tem um custo de 10% a 20% inferior ao pavimento asfáltico convencional.

Do ponto de vista construtivo, as maiores dificuldades em obra ficaram por conta da fixação da tela de aço à camada betuminosa subjacente, indispensável para evitar a seu deslocamento ou levantamento durante a circulação dos equipamentos de obra. A tela necessita ser fixada no pavimento antigo, evitando a ocorrência de movimentações, que podem ser geradas pelo tráfego de equipamentos durante a execução das próximas camadas. É recomendado que a fixação seja feita com barras de aço de 5mm, para garantir uma boa aderência facilitando a execução da camada de recobrimento.

Considera-se que os resultados alcançados nesta pesquisa foram satisfatórios, sendo que a execução de trechos com a adoção desta técnica ainda, encontram-se em fase de testes. Neste sentido, é importante a execução e o acompanhamento de novos trechos experimentais para ter uma melhor análise dos resultados obtidos com o propósito de gerar novos modelos de dimensionamento ou mesmo aferir os modelos obtidos nesta dissertação.

Para melhor entendimento do desempenho do trecho experimental realizado neste trabalho, há a necessidade de serem realizados novos levantamentos periódicos e análises complementares ao longo do período de vida útil da estrutura.

Como resultado parcial, chegou-se a conclusão que a camada com tela inserida no pavimento poderia trabalhar como um pavimento de vida longa (*long life*) ou pavimento perpétuo. Esta que é uma técnica que pode ser melhor analisada em trabalhos futuros, com o propósito de demonstrar que o pavimento com a tela de aço pode ter a sua vida prolongada com base em conceitos de pavimentos de vida longa.

Para trabalhos futuros sugere-se o desenvolvimento de critério numérico apropriado que considere a presença da tela de aço na estrutura do pavimento, como por exemplo, através de programas com utilização do método dos elementos finitos.

É importante que sejam analisados outros trechos experimentais para melhor calibração do fator k encontrado nesta dissertação, assim como trabalhos futuros podem estudar a questão da aderência aço/mistura asfáltica além da questão da corrosão e oxidação da tela.

Outro fator que pode ser estudado em trabalhos futuros é a questão da fresagem e reciclagem de trechos com a utilização da tela, uma vez que, se trata de um fator restritivo para a utilização da mesma, caso não haja um projeto de pavimentação detalhado onde demonstre a espessura do revestimento que incorpore a tela.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-QADI, I. L.; LOULIZI, A.; ELSEIFI, M.; LAHOUAR, S. **The Virginia smart road: the impact of pavement instrumentation on understanding pavement performance**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Virginia, Estados Unidos, 2004.

ALVES, A. R. D. **Reforço de Misturas Betuminosas com Malhas de Aço**. 2007. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

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

_____. **Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice**. Washington D.C., 2008a.

_____. **Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes**. Washington D.C., 2008b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7460-10**. Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending. West Conshohocken, 2010. 14 p.

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

_____. **ASTM D 5858**: standard guide for calculating *in situ* equivalent elastic moduli of pavement materials using layered elastic theory. West Conshohocken, 2015. 7 p.

ANTE, J. R. O. **Geossintéticos como reforço de revestimentos em pavimentação**. 2012. 116 f. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

ASPHALT ACADEMY. **Asphalt reinforcement for road construction**. T3 first edition, ASPHALT ACADEMY. Petroria. Africa do Sul. T3 first edition, 2008.

ASPHALT PAVEMENT ALLIANCE, **Asphalt Pavement Alliance Perpetual Pavement Award Winners**. Disponível em: <<http://www.asphaltroads.org/perpetual-pavement/award-winners/>>. Acesso em 02/04/2017.

BABURAMANI, P. **Asphalt fatigue life prediction models – a literature review**. ARRB transport research Ltd, Vermont South, Victoria, Australia, Research report ARR 334, 1999. 40 p.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Oficina de textos, Rio de Janeiro, 2007. 560 p.

BASTOS, G. A. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas para Pavimentos Flexíveis**. 2010. 247 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2010.

BEJA, I. A. **Agregado reciclado de construção e demolição com adição de aglomerantes hidráulicos como sub-base de pavimentos**. 2014. 219 f. Dissertação (Mestrado) - USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

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

BÜHLER, A. **Estudo do efeito da grelha metálica de reforço em revestimentos asfálticos**. 2001. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2001.

_____. **Estudo do efeito de grelhas de reforço na restauração de pavimentos**. 2007. 323 f. Tese (Doutorado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2007.

COLOMBIER, G. **Fissuration des Chaussées: Nature et Origine des Fissures; Moyens pour Maitriser leur Remontée**. First International Conference on Reflective Cracking in Pavement. Ed. Rigo and R. Degeimbre, Rilem, Liege, Belgium, pp. 3-22, 1989.

COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ (PCJ). **Sala de Situação PCJ: Boletim mensal**. São Paulo, 2016.

CORREIA, N. de S. **Comportamento de geotêxteis não tecidos impregnados com emulsão asfáltica usados como sistema anti-reflexão de trincas**. 2010. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

COST ACTION 333 (COST). **Development of New Bituminous Pavement Design Method**. Office for Official Publications of European Communities 1999.

COST ACTION 348 (COST). **Reinforcement of pavements with steel meshes and geosynthetics**. Work Package 4: Selection of Design Models and Design Procedures. Final WG4-document, 2006.

DAIBERT, R. F. **Influência da temperatura e velocidade de operação no dimensionamento de pavimentos asfálticos de corredores de ônibus**. 2014. 159 f. Dissertação (Mestrado) - USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (DER/SP). **ET-DE-P00/024**. Especificação técnica: tratamento superficial com lama asfáltica. São Paulo, 2006a. 22p.

_____. **IP-DE-P00/001**. Instrução de projeto: projeto de pavimentação. São Paulo, 2006b. 53p.

_____. **IP-DE-P00/003**. Instrução de projeto: avaliação funcional e estrutural de pavimento. São Paulo, 2006c. 29p.

_____. **IP-DE-P00/004**: Avaliação de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos por Meio de Levantamento Visual Contínuo de Defeitos da Superfície. São Paulo, 2006d. 28 p.

_____. **Projeto de restauração e implantação de pavimentos**: relatório técnico. São Paulo: DER/SP, 2009. 90 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. DNER-PRO 011/79. **Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis**: Procedimento B. Rio de Janeiro, 1979.

_____. **DNER-ME 24**. Pavimento: determinações das deflexões pela viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994a. 6p.

_____. **DNER-PRO 269/94**. Projeto de restauração de pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro, 1994b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES (DNIT). **IPR-720: Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006. 314 p.

_____. **DNIT 006/2003-PRO**: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003a.

_____. **DNIT 005/2003-TER**: Defeitos nos pavimento flexíveis e semi-rígidos - Terminologia. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. **Planejamento da Malha Rodoviária**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/planejamento-e-pesquisa/planejamento/evolucao-da-malha-rodoviaria>>. Acesso em: 21 de dez. 2015.

ELSEIFI, M. **Performance quantification of interlayer systems in flexible Pavements using finite element analysis, instrument response, and non destructive testing**. 2003. 411 f. Tese (Doutorado) - Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2013.

ELSEIFI, M.; AL-QADI, I. L. **Effectiveness of steel reinforcing netting in combating fatigue cracking in new flexible pavement systems**. Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 131, 2005.

FORTES, R. M.; MERIGHI, J. V. - **“Notas de Aulas”** - Apostila adotada na disciplina de Estradas II e III do curso de Engenharia Civil da Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2010.

FORTES, R. M.; RESSUTTE, A. F. B. **Reflex ou Ari: Uma visão sobre a utilização de pavimento asfáltico reforçado com malha de aço (Reflex or Ari: A view on the use of asphalt pavement reinforced with steel mesh)**. Trabalho apresentado ao V Congresso de Infraestrutura de Transportes, CONINFRA 2011, São Paulo, 2011.

GERDAU. **Catálogo de produtos**: catálogo. São Paulo, 2013. 66p. Linha de produtos da Comercial Gerdau.

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

HALONEN, P.; HUHTALA, M.; PIHLAJAMAKI, J. **HVS-NORDIC, results from the first year in Finland – GS2-4**. Finland: Technical Research Centre of Finland (VTT), 2000.

HUANG, Y. H. **Pavements analysis and design**. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE TELAS SOLDADAS (IBTS). **Telas soldadas. Emendas: Boletim técnico. 3ª edição, São Paulo**, 1997. 28 p.

_____. **Relatório REFLEX Final**: relatório técnico. São Paulo: IBTS, 2005. 34 p.

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

LOPES, F. L. **Pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico – avaliação estrutural a partir dos parâmetros de curvatura da bacia de deformação**. 2012. 402 f. Dissertação (Mestrado) - UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 2ª Edição, Rio de Janeiro, 2005.

MOLENAAR, A. A. A. **Evaluation of pavement structure with emphasis on reflective cracking**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENT – RILEM, 2, 1993, London. **Proceedings...** London: Ed J.M. Rigo and R. Degeimbre, London, 1993, p. 21-48.

MOLENAAR, A. A. A., MOENS, J., VAN DER WALLE, M., VAN DRONGELEN, J. **Steel Reinforcement for the Prevention of Reflective Cracking in Asphalt Overlays**. First International Conf. on Reflective Cracking in Pavement. Ed. Rigo and R. Degeimbre, Rilem, Liege, Belgium, pp. 296-302, 1989.

MONISMITH, C. L.; COETZEE, N. F. **Reflection cracking: Analyses, laboratory studies, and design considerations**. In: *Asphalt Paving Technology*, Louisville, 1980. **Proceedings...** Louisville, p. 268-313.

NOBREGA, E. S. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos**. 2003. 384 f. Tese (Mestrado) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

O'DOWD, N. **Advanced fracture mechanics**. Imperial College London. Department of mechanical engineering, 1996.

PAIS, J. C.; PEREIRA, P. A. A. **Avaliação da actividade das fendas para estudo do reforço de pavimentos considerando a reflexão de fendas**. 3º Simpósio internacional de avaliação de pavimentos e projetos de reforço – 3º SINAPRE. ABPv. Belém, 1999.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. 1991. 489 f. Tese (Doutorado) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

RATHMAYER, H. G.; KORKIALA-TANTTU, L. **Steel grids, an efficient way to improve the durability of the pavement**. VTT – Technical Research Center of Finland, Building and Transport, Espoo, Finland, 2002.

REINFORCEMENT OF FLEXIBLE ROAD STRUCTURES WITH STEEL FABRICS TO PROLONG SERVICE LIFE (REFLEX). **Report T9:02, Final Report**. Guidelines. 2002a.

_____. **Report T2:01**. Investigation of material specification of steel and the configuration of steel fabric. 1999.

_____. **Report T2:02 Final Report**. Investigation of material specification of steel and the configuration of steel fabric. 2002b.

_____. **Report T3:01**. Experimental activity required for the input to the theoretical modelling and for the planning of accelerated tests and test roads. 2000a.

_____. **Report T3:02**. Laboratory studies on asphalt – steel net compound system and unbound granular material - steel net compound system, Final report. 2002c.

_____. **Report T4:01**. Full Scale Accelerated Tests. 2000b.

_____. **Final Report T4:02**. Full Scale Accelerated Tests. 2000c.

_____. **Report T5:01**. Performance of Existing Reinforced Roads. 2000d.

_____. **Final Report T5:02**. Performance of Existing Reinforced Roads. 2001a.

_____. **Report T6:01**. Design and Construction of Full Scale Test Roads. 2000e.

_____. **Report T6:02**. Performance of Full Scale Test Roads. 2001b.

_____. **Final Report T6:03**. Performance of Full Scale Test Roads. 2002d.

_____. **Report T7:01.** Modelling of Flexible Pavement Reinforced by Steel Net. 2001c.

_____. **Final Report T7:02.** Modelling of Flexible Pavement Reinforced by Steel Net. 2002e.

_____. **Final Report T8:02.** Economical and environmental aspects. 2002f.

REIS, N. F. dos S. **Aplicação a um Pavimento Reforçado com Malha de Aço.** 2009. 119 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.

RESSUTTE, A. F. B.; FORTES, R. M.; SUZUKI, C. Y; da SILVA, J. B. R. **Analysis over the use of reinforced flexible pavement with steel mesh in climbing lanes.** Anais do VI International Conference "Bituminous Mixtures and Pavements", ICONFBMP, Thessaloniki, Greece, 10-12 June 2015.

RODRIGUES, R. M. **Estudo do trincamento dos pavimentos.** 1991. 208 f. Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

SEMANA MACK PESQUISA (MACKPESQUISA), 2013, São Paulo. **Estudo de desempenho sobre a utilização de pavimento asfáltico reforçado com malha de aço em rodovias brasileiras.** São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2013.

SUZUKI, C. Y. et. al. **Relação entre deflexões medidas com viga Benkelman e FWD: estudo de caso durante implantação do sistema de gerência de pavimentos do DER/SP.** Anais da V Jornada Luso-Brasileira de Pavimentos: Políticas e Tecnologias, Recife, 5-7 de Julho, 2006.

SUZUKI, C. Y; AZEVEDO, A. M; KABBACH JÚNIOR, F. I. **Drenagem superficial de pavimentos - conceitos e dimensionamento.** 1ª ed. São Paulo: Oficina de textos, São Paulo, 2013. 240 p.

SUSTAINABLE PAVEMENTS FOR EUROPEAN NEW MEMBER STATES (SPENS). **Long-term performance of reinforced pavements.** Sixth Framework Programme Sustainable Surface Transport. Final version, 2009.

SWEDISH NATIONAL ROAD AND TRANSPORT RESEARCH INSTITUTE (VTI). **VTI rapport 477A - 2001. Accelerated load testing of pavements.** Disponível em: < <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:675215/FULLTEXT01.pdf> >. Acesso em: 22 abr. 2015.

VALTONEN, J., VEHMAS, M. **Application of grids to prevent longitudinal cracking caused by an old concrete slab.** Proceedings of the Third International RILEM Conference, Maastricht, Netherlands, pp. 193-198, 1996.

VAN DE GRIEND, A. A., HENDRIKS, J. J. A. **Practical investigations concerning geotextiles and reinforcing grids in asphaltic overlays.** Reflective Cracking in Pavements. Assessment and Control. Liege, Belgium, pp. 335-342, 1989.

VILCHEZ, G. E. M. **Estudo de sistemas anti-reflexão de trincas na restauração de pavimentos asfálticos**. 1996. 158f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1996.

_____. **Contribuição para a elaboração de método de projeto de restauração de pavimentos asfálticos utilizando geossintéticos em sistemas anti- reflexão de trincas**. 2002. 118 f. Tese (Doutorado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2002.

VILLELA, A. R. A. **Estudo de camada de base asfáltica de módulo elevado para restauração de rodovias de tráfego muito pesado**. 2012. 218 f. Tese (Doutorado) - USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

WICKERT, F. **Fatores de influência no comportamento de camadas anti-reflexão de trincas com geossintéticos**. 2003. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.

YODER, E.; WITCZAK, M. **Principles of pavement design**. New York: John Willey & Sons, 1975. ISBN 0-471-97780-2.

APÊNDICE A - RETROANÁLISE DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS NO TRECHO EM RESTAURAÇÃO ANTES DAS OBRAS

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - DER - 1ª Bacia - ANTES DA OBRA			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ	810	12
Camada 2	Base	170	20
Camada 3	Subleito	209	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	59,00	33,10	23,80	13,80	8,90	6,80	5,60
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	58,89	33,78	22,79	14,03	9,88	6,35	0,75
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,11	-0,68	1,01	-0,23	-0,98	0,45	4,86
Erro (%)	0,18%	-2,04%	4,24%	-1,69%	-11,01%	6,65%	86,70%
(Erro) ²	3,23E-06	4,17E-04	1,80E-03	2,85E-04	1,21E-02	4,42E-03	7,52E-01
						RMSE	33,18%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	58,8	33,7	22,7	14	9,81	6,3	4,72
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,20	-0,60	1,10	-0,20	-0,91	0,50	0,88
Erro (%)	0,34%	-1,81%	4,62%	-1,45%	-10,22%	7,35%	15,71%
(Erro) ²	1,15E-05	3,29E-04	2,14E-03	2,10E-04	1,05E-02	5,41E-03	2,47E-02
						RMSE	7,86%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - DER - 2ª Bacia - ANTES DA OBRA			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ	1.306	12
Camada 2	Base	68	20
Camada 3	Subleito	385	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	62,10	34,40	23,70	11,80	4,70	2,40	2,20
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	61,52	36,26	22,64	10,56	5,36	2,99	2,56
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,58	-1,86	1,06	1,24	-0,66	-0,59	-0,36
Erro (%)	0,93%	-5,41%	4,46%	10,48%	-14,13%	-24,67%	-16,32%
(Erro) ²	8,63E-05	2,92E-03	1,99E-03	1,10E-02	2,00E-02	6,08E-02	2,66E-02
						RMSE	13,28%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	61,1	36	22,5	10,5	5,34	2,99	2,56
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	1,00	-1,60	1,20	1,30	-0,64	-0,59	-0,36
Erro (%)	1,61%	-4,65%	5,06%	11,02%	-13,62%	-24,58%	-16,36%
(Erro) ²	2,59E-04	2,16E-03	2,56E-03	1,21E-02	1,85E-02	6,04E-02	2,68E-02
						RMSE	13,25%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - DER - 3ª Bacia - ANTES DA OBRA			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ	770	12
Camada 2	Base	102	20
Camada 3	Subleito	171	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d _{mi} (10 ⁻² mm)	75,50	44,60	29,70	17,60	11,40	7,70	5,70
BAKFAA							
d _{ci} (10 ⁻² mm)	75,51	44,56	29,77	17,44	11,74	7,43	5,63
d _{mi} - d _{ci} (10 ⁻² mm)	-0,01	0,04	-0,07	0,16	-0,34	0,27	0,07
Erro (%)	-0,01%	0,08%	-0,25%	0,90%	-2,98%	3,47%	1,28%
(Erro) ²	1,75E-08	6,88E-07	6,04E-06	8,16E-05	8,90E-04	1,20E-03	1,64E-04
						RMSE	1,83%
ELSYM5							
d _{ci} (10 ⁻² mm)	75,4	44,6	29,7	17,6	11,4	7,7	5,7
d _{mi} - d _{ci} (10 ⁻² mm)	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Erro (%)	0,13%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
(Erro) ²	1,75E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
						RMSE	0,05%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - DER - 4ª Bacia - ANTES DA OBRA			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ	460	12
Camada 2	Base	108	47
Camada 3	Subleito	118	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	86,20	50,00	34,00	22,10	14,70	10,10	7,20
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	86,20	49,92	34,23	21,57	15,33	9,76	7,23
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,00	0,08	-0,23	0,53	-0,63	0,34	-0,02
Erro (%)	0,00%	0,16%	-0,67%	2,38%	-4,31%	3,35%	-0,35%
(Erro) ²	0,00E+00	2,56E-06	4,50E-05	5,69E-04	1,86E-03	1,12E-03	1,21E-05
						RMSE	2,27%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	86,2	50	34,3	21,6	15,3	9,76	7,24
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,00	0,00	-0,30	0,50	-0,60	0,34	-0,04
Erro (%)	0,00%	0,00%	-0,88%	2,26%	-4,08%	3,37%	-0,56%
(Erro) ²	0,00E+00	0,00E+00	7,79E-05	5,12E-04	1,67E-03	1,13E-03	3,09E-05
						RMSE	2,21%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - DER - 5ª Bacia - ANTES DA OBRA			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ	692	12
Camada 2	Base	127	47
Camada 3	Subleito	152	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	68,90	40,50	29,20	18,40	11,10	8,00	6,00
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	68,76	41,22	28,51	17,76	12,38	7,71	5,69
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,14	-0,72	0,69	0,64	-1,28	0,29	0,31
Erro (%)	0,20%	-1,78%	2,38%	3,47%	-11,50%	3,66%	5,15%
(Erro) ²	4,19E-06	3,18E-04	5,65E-04	1,20E-03	1,32E-02	1,34E-03	2,65E-03
						RMSE	5,25%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	68,9	41,3	28,6	17,8	12,4	7,71	5,71
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,00	-0,80	0,60	0,60	-1,30	0,29	0,29
Erro (%)	0,00%	-1,98%	2,05%	3,26%	-11,71%	3,63%	4,83%
(Erro) ²	0,00E+00	3,90E-04	4,22E-04	1,06E-03	1,37E-02	1,31E-03	2,34E-03
						RMSE	5,24%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - DER - 6ª Bacia - ANTES DA OBRA			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ	860	12
Camada 2	Base	91	30
Camada 3	Subleito	184	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	79,60	47,90	34,00	17,00	11,00	7,90	5,90
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	79,59	48,44	32,53	18,41	11,61	6,82	5,22
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,01	-0,54	1,47	-1,41	-0,61	1,08	0,69
Erro (%)	0,02%	-1,12%	4,33%	-8,28%	-5,52%	13,63%	11,61%
(Erro) ²	3,09E-08	1,25E-04	1,87E-03	6,85E-03	3,05E-03	1,86E-02	1,35E-02
						RMSE	7,92%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	79,5	48,3	32,4	18,3	11,5	6,78	5,2
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,10	-0,40	1,60	-1,30	-0,50	1,12	0,70
Erro (%)	0,13%	-0,84%	4,71%	-7,65%	-4,55%	14,18%	11,86%
(Erro) ²	1,58E-06	6,97E-05	2,21E-03	5,85E-03	2,07E-03	2,01E-02	1,41E-02
						RMSE	7,96%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - DER - 7ª Bacia - ANTES DA OBRA			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ	790	12
Camada 2	Base	45	18
Camada 3	Subleito	201	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
$d_{mi} (10^{-2}mm)$	79,90	48,20	29,80	14,00	8,40	5,80	4,40
BAKFAA							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	80,20	47,38	30,03	14,89	8,38	5,01	4,06
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	-0,30	0,82	-0,23	-0,89	0,03	0,80	0,34
Erro (%)	-0,38%	1,70%	-0,76%	-6,35%	0,30%	13,71%	7,82%
(Erro) ²	1,41E-05	2,90E-04	5,80E-05	4,03E-03	8,86E-06	1,88E-02	6,11E-03
						RMSE	6,47%
ELSYM5							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	79,9	47,2	29,9	14,8	8,35	4,99	4,05
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	0,00	1,00	-0,10	-0,80	0,05	0,81	0,35
Erro (%)	0,00%	2,07%	-0,34%	-5,71%	0,60%	13,97%	7,95%
(Erro) ²	0,00E+00	4,30E-04	1,13E-05	3,27E-03	3,54E-05	1,95E-02	6,33E-03
						RMSE	6,50%

Comparativo das Bacias de Deflexão

APÊNDICE B - RETROANÁLISE DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS NO TRECHO EM RESTAURAÇÃO 2 ANOS APÓS O EXPERIMENTO

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 1ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	11.984	7
Camada 2	MB	1.449	8
Camada 3	Base	287	20
Camada 4	Subleito	300	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	22,60	16,60	13,10	9,30	6,80	4,10	3,00
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	22,54	16,73	13,10	9,21	6,75	4,19	3,03
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,06	-0,13	0,01	0,09	0,05	-0,09	-0,03
Erro (%)	0,27%	-0,78%	0,04%	1,00%	0,81%	-2,12%	-1,03%
(Erro) ²	7,29E-06	6,04E-05	1,46E-07	1,00E-04	6,54E-05	4,50E-04	1,07E-04
						RMSE	1,06%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	22,5	16,7	13,1	9,21	6,75	4,19	3,03
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,10	-0,10	0,00	0,09	0,05	-0,09	-0,03
Erro (%)	0,44%	-0,60%	0,00%	0,97%	0,74%	-2,20%	-1,00%
(Erro) ²	1,96E-05	3,63E-05	0,00E+00	9,37E-05	5,41E-05	4,82E-04	1,00E-04
						RMSE	1,06%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 2ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	11.108	7
Camada 2	MB	1.504	8
Camada 3	Base	254	20
Camada 4	Subleito	280	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	24,20	18,00	14,30	10,00	7,20	4,50	3,40
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	24,20	18,06	14,19	10,01	7,32	4,52	3,26
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,00	-0,06	0,11	0,00	-0,12	-0,01	0,14
Erro (%)	0,01%	-0,33%	0,76%	-0,05%	-1,65%	-0,33%	4,18%
(Erro) ²	1,54E-08	1,07E-05	5,70E-05	2,50E-07	2,73E-04	1,11E-05	1,74E-03
RMSE						1,73%	
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	24,2	18,1	14,2	10	7,33	4,52	3,26
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,00	-0,10	0,10	0,00	-0,13	-0,02	0,14
Erro (%)	0,00%	-0,56%	0,70%	0,00%	-1,81%	-0,44%	4,12%
(Erro) ²	0,00E+00	3,09E-05	4,89E-05	0,00E+00	3,26E-04	1,98E-05	1,70E-03
RMSE						1,74%	

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 3ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	9.045	7
Camada 2	MB	3.745	8
Camada 3	Base	120	20
Camada 4	Subleito	348	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	22,30	16,40	13,70	9,90	6,80	3,60	2,40
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	22,03	16,99	13,65	9,61	6,76	3,70	2,50
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,27	-0,59	0,05	0,29	0,04	-0,10	-0,10
Erro (%)	1,22%	-3,60%	0,39%	2,94%	0,54%	-2,78%	-4,00%
(Erro) ²	1,50E-04	1,30E-03	1,55E-05	8,64E-04	2,96E-05	7,72E-04	1,60E-03
RMSE						2,60%	
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	22	17	13,6	9,61	6,76	3,7	2,5
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,30	-0,60	0,10	0,29	0,04	-0,10	-0,10
Erro (%)	1,35%	-3,66%	0,73%	2,93%	0,59%	-2,78%	-4,17%
(Erro) ²	1,81E-04	1,34E-03	5,33E-05	8,58E-04	3,46E-05	7,72E-04	1,74E-03
RMSE						2,67%	

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 4ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	11.556	7
Camada 2	MB	2.497	13
Camada 3	Base	229	47
Camada 4	Subleito	290	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	19,10	15,00	12,70	9,80	7,50	4,70	3,40
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	19,08	15,10	12,63	9,74	7,57	4,79	3,32
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,02	-0,10	0,07	0,06	-0,07	-0,09	0,08
Erro (%)	0,10%	-0,64%	0,54%	0,65%	-0,88%	-1,98%	2,32%
(Erro) ²	1,10E-06	4,10E-05	2,87E-05	4,26E-05	7,74E-05	3,92E-04	5,40E-04
RMSE						1,27%	
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	19	15,1	12,6	9,72	7,56	4,81	3,34
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,10	-0,10	0,10	0,08	-0,06	-0,11	0,06
Erro (%)	0,52%	-0,67%	0,79%	0,82%	-0,80%	-2,34%	1,76%
(Erro) ²	2,74E-05	4,44E-05	6,20E-05	6,66E-05	6,40E-05	5,48E-04	3,11E-04
RMSE						1,27%	

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 5ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	9.812	7
Camada 2	MB	1.197	13
Camada 3	Base	545	47
Camada 4	Subleito	292	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	17,50	12,40	9,80	7,40	6,10	4,30	3,50
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	17,48	12,51	9,87	7,42	5,95	4,24	3,26
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,02	-0,11	-0,07	-0,02	0,15	0,06	0,24
Erro (%)	0,13%	-0,88%	-0,69%	-0,31%	2,54%	1,42%	6,97%
(Erro) ²	1,73E-06	7,73E-05	4,81E-05	9,66E-06	6,46E-04	2,01E-04	4,86E-03
						RMSE	2,89%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	17,5	12,5	9,86	7,42	5,94	4,24	3,26
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,00	-0,10	-0,06	-0,02	0,16	0,06	0,24
Erro (%)	0,00%	-0,81%	-0,61%	-0,27%	2,62%	1,40%	6,86%
(Erro) ²	0,00E+00	6,50E-05	3,75E-05	7,30E-06	6,88E-04	1,95E-04	4,70E-03
						RMSE	2,85%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 6ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	9.863	7
Camada 2	MB	1.262	13
Camada 3	Base	224	47
Camada 4	Subleito	333	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
$d_{mi} (10^{-2}mm)$	22,40	16,30	13,00	9,40	6,70	4,00	2,90
BAKFAA							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	22,32	16,52	13,05	9,31	6,82	4,04	2,77
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	0,08	-0,22	-0,04	0,09	-0,12	-0,04	0,13
Erro (%)	0,36%	-1,37%	-0,35%	0,93%	-1,82%	-1,05%	4,52%
$(Erro)^2$	1,31E-05	1,89E-04	1,20E-05	8,57E-05	3,32E-04	1,10E-04	2,04E-03
						RMSE	1,99%
ELSYM5							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	22,3	16,5	13	9,31	6,82	4,04	2,77
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	0,10	-0,20	0,00	0,09	-0,12	-0,04	0,13
Erro (%)	0,45%	-1,23%	0,00%	0,96%	-1,79%	-1,00%	4,48%
$(Erro)^2$	1,99E-05	1,51E-04	0,00E+00	9,17E-05	3,21E-04	1,00E-04	2,01E-03
						RMSE	1,96%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 7ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	10.175	7
Camada 2	MB	3.125	10
Camada 3	Base	289	30
Camada 4	Subleito	362	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
$d_{mi} (10^{-2}mm)$	17,30	13,40	11,00	7,80	5,70	3,70	2,80
BAKFAA							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	17,36	13,29	10,80	7,95	5,95	3,65	2,56
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	-0,06	0,11	0,20	-0,15	-0,25	0,05	0,24
Erro (%)	-0,35%	0,81%	1,83%	-1,90%	-4,35%	1,43%	8,46%
$(Erro)^2$	1,24E-05	6,62E-05	3,34E-04	3,60E-04	1,89E-03	2,05E-04	7,16E-03
						RMSE	3,79%
ELSYM5							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	17,4	13,3	10,8	7,95	5,95	3,65	2,56
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	-0,10	0,10	0,20	-0,15	-0,25	0,05	0,24
Erro (%)	-0,58%	0,75%	1,82%	-1,92%	-4,39%	1,35%	8,57%
$(Erro)^2$	3,34E-05	5,57E-05	3,31E-04	3,70E-04	1,92E-03	1,83E-04	7,35E-03
						RMSE	3,83%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 8ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	9.825	7
Camada 2	MB	1.044	10
Camada 3	Base	390	30
Camada 4	Subleito	259	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	22,60	16,00	13,20	9,80	7,40	5,00	3,70
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	22,49	16,45	12,95	9,48	7,31	4,89	3,61
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,11	-0,45	0,25	0,33	0,09	0,11	0,09
Erro (%)	0,49%	-2,79%	1,86%	3,32%	1,19%	2,24%	2,43%
(Erro) ²	2,41E-05	7,77E-04	3,47E-04	1,10E-03	1,41E-04	5,02E-04	5,92E-04
						RMSE	2,23%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	22,5	16,4	13	9,47	7,31	4,89	3,61
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,10	-0,40	0,20	0,33	0,09	0,11	0,09
Erro (%)	0,44%	-2,50%	1,52%	3,37%	1,22%	2,20%	2,43%
(Erro) ²	1,96E-05	6,25E-04	2,30E-04	1,13E-03	1,48E-04	4,84E-04	5,92E-04
						RMSE	2,15%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 9ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	12.110	7
Camada 2	MB	1.290	10
Camada 3	Base	484	30
Camada 4	Subleito	269	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	19,70	14,50	11,90	8,90	6,90	4,70	3,60
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	19,65	14,67	11,78	8,84	6,96	4,76	3,54
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,05	-0,17	0,12	0,06	-0,06	-0,06	0,06
Erro (%)	0,27%	-1,20%	1,04%	0,69%	-0,87%	-1,26%	1,69%
(Erro) ²	7,51E-06	1,44E-04	1,09E-04	4,70E-05	7,56E-05	1,58E-04	2,87E-04
RMSE						1,09%	
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	19,6	14,7	11,8	8,84	6,96	4,76	3,54
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,10	-0,20	0,10	0,06	-0,06	-0,06	0,06
Erro (%)	0,51%	-1,38%	0,84%	0,67%	-0,87%	-1,28%	1,67%
(Erro) ²	2,58E-05	1,90E-04	7,06E-05	4,54E-05	7,56E-05	1,63E-04	2,78E-04
RMSE						1,10%	

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 10ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	9.375	7
Camada 2	MB	567	12
Camada 3	Base	262	18
Camada 4	Subleito	308	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	26,10	17,20	12,90	8,80	6,40	3,90	3,10
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	25,88	18,00	13,37	8,90	6,38	3,97	2,91
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,22	-0,80	-0,47	-0,10	0,03	-0,07	0,19
Erro (%)	0,86%	-4,63%	-3,61%	-1,15%	0,39%	-1,74%	6,26%
(Erro) ²	7,37E-05	2,15E-03	1,30E-03	1,32E-04	1,53E-05	3,04E-04	3,92E-03
RMSE						3,36%	
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	25,9	18	13,4	8,9	6,37	3,97	2,91
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,20	-0,80	-0,50	-0,10	0,03	-0,07	0,19
Erro (%)	0,77%	-4,65%	-3,88%	-1,14%	0,47%	-1,79%	6,13%
(Erro) ²	5,87E-05	2,16E-03	1,50E-03	1,29E-04	2,20E-05	3,22E-04	3,76E-03
RMSE						3,37%	

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 11ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	9.550	7
Camada 2	MB	1.187	12
Camada 3	Base	136	18
Camada 4	Subleito	329	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	24,80	17,00	13,50	9,60	7,00	3,90	2,50
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	24,40	17,88	13,86	9,51	6,70	3,83	2,67
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,40	-0,88	-0,36	0,09	0,30	0,07	-0,17
Erro (%)	1,62%	-5,19%	-2,67%	0,90%	4,27%	1,92%	-6,88%
(Erro) ²	2,63E-04	2,69E-03	7,11E-04	8,03E-05	1,82E-03	3,70E-04	4,73E-03
						RMSE	3,90%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	24,4	17,9	13,9	9,51	6,7	3,82	2,67
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,40	-0,90	-0,40	0,09	0,30	0,08	-0,17
Erro (%)	1,61%	-5,29%	-2,96%	0,94%	4,29%	2,05%	-6,80%
(Erro) ²	2,60E-04	2,80E-03	8,78E-04	8,79E-05	1,84E-03	4,21E-04	4,62E-03
						RMSE	3,95%

Comparativo das Bacias de Deflexão

APÊNDICE C - RETROANÁLISE DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS NO TRECHO EM RESTAURAÇÃO 3 ANOS APÓS O EXPERIMENTO

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 1ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	11.889	7
Camada 2	MB	4.969	8
Camada 3	Base	618	20
Camada 4	Subleito	164	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	23,00	19,00	17,00	15,00	12,00	8,00	6,00
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	22,92	19,39	17,09	14,19	11,85	8,48	6,32
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,08	-0,39	-0,09	0,81	0,15	-0,48	-0,32
Erro (%)	0,36%	-2,07%	-0,55%	5,41%	1,27%	-5,96%	-5,25%
(Erro) ²	1,27E-05	4,30E-04	2,99E-05	2,93E-03	1,60E-04	3,56E-03	2,76E-03
						RMSE	3,76%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	23,3	19,8	17,4	14,5	12,1	8,65	6,44
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	-0,30	-0,80	-0,40	0,50	-0,10	-0,65	-0,44
Erro (%)	-1,30%	-4,21%	-2,35%	3,33%	-0,83%	-8,13%	-7,33%
(Erro) ²	1,70E-04	1,77E-03	5,54E-04	1,11E-03	6,94E-05	6,60E-03	5,38E-03
						RMSE	4,73%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 2ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	9.848	7
Camada 2	MB	4.407	8
Camada 3	Base	85	20
Camada 4	Subleito	271	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
$d_{mi} (10^{-2}mm)$	26,00	21,00	18,00	13,00	9,00	5,00	4,00
BAKFAA							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	26,16	21,06	17,50	12,93	9,45	5,31	3,47
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	-0,16	-0,06	0,50	0,07	-0,45	-0,31	0,53
Erro (%)	-0,61%	-0,29%	2,78%	0,55%	-5,04%	-6,18%	13,23%
$(Erro)^2$	3,69E-05	8,44E-06	7,72E-04	2,98E-05	2,54E-03	3,82E-03	1,75E-02
						RMSE	5,94%
ELSYM5							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	27	21,7	18,1	13,4	9,77	5,49	3,59
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	-1,00	-0,70	-0,10	-0,40	-0,77	-0,49	0,41
Erro (%)	-3,85%	-3,33%	-0,56%	-3,08%	-8,56%	-9,80%	10,25%
$(Erro)^2$	1,48E-03	1,11E-03	3,09E-05	9,47E-04	7,32E-03	9,60E-03	1,05E-02
						RMSE	6,65%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 3ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	13.887	7
Camada 2	MB	5.387	8
Camada 3	Base	370	20
Camada 4	Subleito	170	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
$d_{mi} (10^{-2}mm)$	24,00	20,00	18,00	15,00	12,00	8,00	6,00
BAKFAA							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	23,96	20,35	17,85	14,61	11,98	8,29	6,06
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	0,04	-0,35	0,15	0,39	0,02	-0,29	-0,05
Erro (%)	0,16%	-1,74%	0,82%	2,62%	0,16%	-3,66%	-0,92%
$(Erro)^2$	2,51E-06	3,01E-04	6,67E-05	6,86E-04	2,51E-06	1,34E-03	8,40E-05
						RMSE	1,88%
ELSYM5							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	24,4	20,7	18,2	14,9	12,2	8,45	6,17
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	-0,40	-0,70	-0,20	0,10	-0,20	-0,45	-0,17
Erro (%)	-1,67%	-3,50%	-1,11%	0,67%	-1,67%	-5,62%	-2,83%
$(Erro)^2$	2,78E-04	1,23E-03	1,23E-04	4,44E-05	2,78E-04	3,16E-03	8,03E-04
						RMSE	2,91%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 4ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	12.023	7
Camada 2	MB	1.965	13
Camada 3	Base	310	47
Camada 4	Subleito	260	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	20,00	15,00	13,00	10,00	8,00	5,00	4,00
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	19,83	15,44	12,81	9,90	7,84	5,27	3,86
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,17	-0,44	0,19	0,10	0,16	-0,27	0,14
Erro (%)	0,83%	-2,96%	1,43%	0,98%	2,05%	-5,36%	3,50%
(Erro) ²	6,97E-05	8,76E-04	2,05E-04	9,60E-05	4,20E-04	2,87E-03	1,22E-03
						RMSE	2,87%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	20,2	15,7	13,1	10,1	7,99	5,37	3,93
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	-0,20	-0,70	-0,10	-0,10	0,01	-0,37	0,07
Erro (%)	-1,00%	-4,67%	-0,77%	-1,00%	0,12%	-7,40%	1,75%
(Erro) ²	1,00E-04	2,18E-03	5,92E-05	1,00E-04	1,56E-06	5,48E-03	3,06E-04
						RMSE	3,43%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 5ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	12.625	7
Camada 2	MB	1.099	13
Camada 3	Base	438	47
Camada 4	Subleito	257	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	20,00	15,00	12,00	9,00	7,00	5,00	4,00
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	20,07	14,92	11,95	9,01	7,17	5,04	3,85
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	-0,07	0,08	0,05	-0,01	-0,17	-0,04	0,15
Erro (%)	-0,36%	0,55%	0,42%	-0,10%	-2,40%	-0,84%	3,85%
(Erro) ²	1,26E-05	2,99E-05	1,74E-05	1,00E-06	5,76E-04	7,06E-05	1,48E-03
						RMSE	1,77%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	20,4	15,2	12,2	9,18	7,3	5,13	3,91
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	-0,40	-0,20	-0,20	-0,18	-0,30	-0,13	0,09
Erro (%)	-2,00%	-1,33%	-1,67%	-2,00%	-4,29%	-2,60%	2,25%
(Erro) ²	4,00E-04	1,78E-04	2,78E-04	4,00E-04	1,84E-03	6,76E-04	5,06E-04
						RMSE	2,47%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 6ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	15.574	7
Camada 2	MB	4.384	13
Camada 3	Base	98	47
Camada 4	Subleito	184	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
$d_{mi} (10^{-2}mm)$	24,00	21,00	19,00	16,00	13,00	9,00	6,00
BAKFAA							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	24,17	20,99	18,79	15,75	13,08	8,94	6,22
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	-0,17	0,01	0,22	0,25	-0,08	0,06	-0,22
Erro (%)	-0,69%	0,03%	1,13%	1,55%	-0,63%	0,69%	-3,58%
(Erro) ²	4,78E-05	1,11E-07	1,28E-04	2,40E-04	3,98E-05	4,75E-05	1,28E-03
						RMSE	1,60%
ELSYM5							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	24,6	21,5	19,2	16,1	13,4	9,12	6,34
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	-0,60	-0,50	-0,20	-0,10	-0,40	-0,12	-0,34
Erro (%)	-2,50%	-2,38%	-1,05%	-0,63%	-3,08%	-1,33%	-5,67%
(Erro) ²	6,25E-04	5,67E-04	1,11E-04	3,91E-05	9,47E-04	1,78E-04	3,21E-03
						RMSE	2,85%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 8ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	16.446	7
Camada 2	MB	3.785	10
Camada 3	Base	470	30
Camada 4	Subleito	250	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	17,00	14,00	12,00	10,00	8,00	5,00	4,00
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	17,13	13,99	12,00	9,64	7,86	5,48	4,07
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	-0,13	0,01	0,00	0,36	0,14	-0,48	-0,07
Erro (%)	-0,75%	0,06%	-0,02%	3,62%	1,80%	-9,62%	-1,73%
(Erro) ²	5,67E-05	3,27E-07	2,78E-08	1,31E-03	3,24E-04	9,25E-03	2,98E-04
						RMSE	4,01%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	17,4	14,3	12,2	9,82	8,01	5,58	4,15
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	-0,40	-0,30	-0,20	0,18	-0,01	-0,58	-0,15
Erro (%)	-2,35%	-2,14%	-1,67%	1,80%	-0,12%	-11,60%	-3,75%
(Erro) ²	5,54E-04	4,59E-04	2,78E-04	3,24E-04	1,56E-06	1,35E-02	1,41E-03
						RMSE	4,85%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 7ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	10.574	7
Camada 2	MB	2.857	10
Camada 3	Base	105	30
Camada 4	Subleito	283	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	26,00	21,00	18,00	13,00	9,00	5,00	4,00
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	26,24	20,99	17,43	12,95	9,53	5,34	3,42
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	-0,24	0,01	0,57	0,05	-0,53	-0,34	0,58
Erro (%)	-0,93%	0,04%	3,18%	0,42%	-5,84%	-6,82%	14,60%
(Erro) ²	8,74E-05	1,84E-07	1,01E-03	1,73E-05	3,42E-03	4,65E-03	2,13E-02
						RMSE	6,60%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	26,8	21,4	17,8	13,2	9,71	5,44	3,48
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	-0,80	-0,40	0,20	-0,20	-0,71	-0,44	0,52
Erro (%)	-3,08%	-1,90%	1,11%	-1,54%	-7,89%	-8,80%	13,00%
(Erro) ²	9,47E-04	3,63E-04	1,23E-04	2,37E-04	6,22E-03	7,74E-03	1,69E-02
						RMSE	6,82%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 9ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	9.646	7
Camada 2	MB	3.504	10
Camada 3	Base	195	30
Camada 4	Subleito	218	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
$d_{mi} (10^{-2}mm)$	24,00	19,00	17,00	13,00	10,00	6,00	5,00
BAKFAA							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	23,92	19,45	16,53	12,89	10,09	6,48	4,55
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	0,08	-0,45	0,47	0,11	-0,09	-0,48	0,45
Erro (%)	0,32%	-2,36%	2,78%	0,85%	-0,90%	-7,95%	8,94%
$(Erro)^2$	1,00E-05	5,58E-04	7,74E-04	7,16E-05	8,10E-05	6,32E-03	7,99E-03
						RMSE	4,75%
ELSYM5							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	24,4	19,8	16,9	13,1	10,3	6,6	4,64
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	-0,40	-0,80	0,10	-0,10	-0,30	-0,60	0,36
Erro (%)	-1,67%	-4,21%	0,59%	-0,77%	-3,00%	-10,00%	7,20%
$(Erro)^2$	2,78E-04	1,77E-03	3,46E-05	5,92E-05	9,00E-04	1,00E-02	5,18E-03
						RMSE	5,10%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 10ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	11.212	7
Camada 2	MB	3.188	12
Camada 3	Base	109	18
Camada 4	Subleito	283	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	21,00	17,00	15,00	11,00	8,00	5,00	4,00
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	21,17	17,06	14,39	11,07	8,50	5,19	3,50
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	-0,17	-0,06	0,61	-0,07	-0,50	-0,19	0,50
Erro (%)	-0,82%	-0,35%	4,07%	-0,61%	-6,19%	-3,82%	12,48%
(Erro) ²	6,79E-05	1,25E-05	1,66E-03	3,71E-05	3,83E-03	1,46E-03	1,56E-02
						RMSE	5,69%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	21,6	17,4	14,7	11,3	8,66	5,29	3,57
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	-0,60	-0,40	0,30	-0,30	-0,66	-0,29	0,43
Erro (%)	-2,86%	-2,35%	2,00%	-2,73%	-8,25%	-5,80%	10,75%
(Erro) ²	8,16E-04	5,54E-04	4,00E-04	7,44E-04	6,81E-03	3,36E-03	1,16E-02
						RMSE	5,88%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 11ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	8.838	7
Camada 2	MB	2.012	12
Camada 3	Base	70	18
Camada 4	Subleito	290	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	27,00	20,00	17,00	13,00	9,00	5,00	3,00
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	26,63	20,77	16,98	12,42	9,05	5,05	3,26
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,37	-0,77	0,02	0,58	-0,05	-0,05	-0,26
Erro (%)	1,39%	-3,84%	0,11%	4,46%	-0,52%	-0,92%	-8,63%
(Erro) ²	1,92E-04	1,47E-03	1,12E-06	1,99E-03	2,73E-05	8,46E-05	7,45E-03
						RMSE	4,00%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	27,2	21,2	17,3	12,7	9,22	5,14	3,32
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	-0,20	-1,20	-0,30	0,30	-0,22	-0,14	-0,32
Erro (%)	-0,74%	-6,00%	-1,76%	2,31%	-2,44%	-2,80%	-10,67%
(Erro) ²	5,49E-05	3,60E-03	3,11E-04	5,33E-04	5,98E-04	7,84E-04	1,14E-02
						RMSE	4,97%

Comparativo das Bacias de Deflexão

APÊNDICE D - RETROANÁLISE DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS NO TRECHO EM IMPLANTAÇÃO 2 ANOS APÓS O EXPERIMENTO

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 1ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	10.332	6
Camada 2	Binder	118	7
Camada 3	BGS	214	20
Camada 4	Rachão	119	20
Camada 5	Subleito	171	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
$d_{mi} (10^{-2}mm)$	51,50	36,90	26,50	16,60	11,70	7,50	5,50
BAKFAA							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	51,74	36,31	26,60	17,07	11,87	7,22	5,24
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	-0,24	0,59	-0,10	-0,47	-0,17	0,28	0,26
Erro (%)	-0,46%	1,60%	-0,36%	-2,81%	-1,46%	3,77%	4,67%
$(Erro)^2$	2,12E-05	2,55E-04	1,31E-05	7,91E-04	2,14E-04	1,42E-03	2,18E-03
						RMSE	2,65%
ELSYM5							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	51,8	36,3	26,6	17,1	11,9	7,23	5,25
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	-0,30	0,60	-0,10	-0,50	-0,20	0,27	0,25
Erro (%)	-0,58%	1,63%	-0,38%	-3,01%	-1,71%	3,60%	4,55%
$(Erro)^2$	3,39E-05	2,64E-04	1,42E-05	9,07E-04	2,92E-04	1,30E-03	2,07E-03
						RMSE	2,64%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 2ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	10.112	6
Camada 2	Binder	1.257	7
Camada 3	BGS	120	20
Camada 4	Rachão	64	20
Camada 5	Subleito	178	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	47,50	37,30	30,00	20,00	14,00	7,30	4,90
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	47,89	36,86	29,26	20,32	14,15	7,52	4,89
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	-0,39	0,44	0,74	-0,32	-0,15	-0,22	0,01
Erro (%)	-0,82%	1,19%	2,45%	-1,59%	-1,05%	-3,05%	0,12%
(Erro) ²	6,67E-05	1,42E-04	6,02E-04	2,53E-04	1,10E-04	9,33E-04	1,50E-06
						RMSE	1,74%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	47,9	36,8	29,3	20,3	14,1	7,52	4,89
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	-0,40	0,50	0,70	-0,30	-0,10	-0,22	0,01
Erro (%)	-0,84%	1,34%	2,33%	-1,50%	-0,71%	-3,01%	0,20%
(Erro) ²	7,09E-05	1,80E-04	5,44E-04	2,25E-04	5,10E-05	9,08E-04	4,16E-06
						RMSE	1,68%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 3ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	10.075	6
Camada 2	Binder	1.227	7
Camada 3	BGS	149	20
Camada 4	Rachão	58	20
Camada 5	Subleito	178	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
$d_{mi} (10^{-2}mm)$	46,10	36,40	29,30	20,10	13,80	7,20	4,90
BAKFAA							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	46,55	35,86	28,58	20,07	14,17	7,69	4,98
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	-0,45	0,54	0,72	0,03	-0,37	-0,48	-0,08
Erro (%)	-0,98%	1,49%	2,45%	0,14%	-2,70%	-6,74%	-1,57%
$(Erro)^2$	9,70E-05	2,23E-04	6,01E-04	2,08E-06	7,31E-04	4,54E-03	2,47E-04
RMSE						3,03%	
ELSYM5							
$d_{ci} (10^{-2}mm)$	46,6	35,8	28,6	20,1	14,2	7,68	4,98
$d_{mi} - d_{ci} (10^{-2}mm)$	-0,50	0,60	0,70	0,00	-0,40	-0,48	-0,08
Erro (%)	-1,08%	1,65%	2,39%	0,00%	-2,90%	-6,67%	-1,63%
$(Erro)^2$	1,18E-04	2,72E-04	5,71E-04	0,00E+00	8,40E-04	4,44E-03	2,67E-04
RMSE						3,05%	

Comparativo das Bacias de Deflexão

APÊNDICE E - RETROANÁLISE DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS NO TRECHO EM IMPLANTAÇÃO 3 ANOS APÓS O EXPERIMENTO

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 1ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	11.760	6
Camada 2	Binder	714	7
Camada 3	BGS	215	20
Camada 4	Rachão	57	20
Camada 5	Subleito	120	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d _{mi} (10 ⁻² mm)	53,00	40,00	35,00	25,00	19,00	12,00	8,00
BAKFAA							
d _{ci} (10 ⁻² mm)	52,63	41,29	33,76	25,20	19,20	11,87	8,06
d _{mi} - d _{ci} (10 ⁻² mm)	0,37	-1,29	1,24	-0,20	-0,20	0,13	-0,05
Erro (%)	0,71%	-3,22%	3,55%	-0,79%	-1,04%	1,09%	-0,69%
(Erro) ²	4,98E-05	1,03E-03	1,26E-03	6,27E-05	1,08E-04	1,19E-04	4,73E-05
						RMSE	1,96%
ELSYM5							
d _{ci} (10 ⁻² mm)	53,7	42,1	34,4	25,6	19,4	12	8,32
d _{mi} - d _{ci} (10 ⁻² mm)	-0,70	-2,10	0,60	-0,60	-0,40	0,00	-0,32
Erro (%)	-1,32%	-5,25%	1,71%	-2,40%	-2,11%	0,00%	-4,00%
(Erro) ²	1,74E-04	2,76E-03	2,94E-04	5,76E-04	4,43E-04	0,00E+00	1,60E-03
						RMSE	2,89%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 2ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	13.048	6
Camada 2	Binder	2.139	7
Camada 3	BGS	186	20
Camada 4	Rachão	121	20
Camada 5	Subleito	140	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	47,00	39,00	34,00	25,00	19,00	11,00	8,00
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	47,24	39,10	33,08	25,20	19,08	11,40	7,64
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	-0,24	-0,10	0,92	-0,20	-0,08	-0,40	0,36
Erro (%)	-0,52%	-0,27%	2,71%	-0,81%	-0,44%	-3,66%	4,53%
(Erro) ²	2,70E-05	7,11E-06	7,37E-04	6,53E-05	1,91E-05	1,34E-03	2,05E-03
						RMSE	2,46%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	48,3	39,9	33,8	25,7	19,5	11,7	7,81
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	-1,30	-0,90	0,20	-0,70	-0,50	-0,70	0,19
Erro (%)	-2,77%	-2,31%	0,59%	-2,80%	-2,63%	-6,36%	2,38%
(Erro) ²	7,65E-04	5,33E-04	3,46E-05	7,84E-04	6,93E-04	4,05E-03	5,64E-04
						RMSE	3,26%

Comparativo das Bacias de Deflexão

Retroanálise da Bacia de Deformações

Levantamento - ASTEC - 3ª Bacia			
Estrutura	Material	MR (MPa)	Esp. (cm)
Camada 1	CAUQ c/tela de aço	11.955	6
Camada 2	Binder	4.189	7
Camada 3	BGS	49	20
Camada 4	Rachão	261	20
Camada 5	Subleito	109	-

Geofone	1	2	3	4	5	6	7
Afastamento (cm)	0	20	30	45	60	90	120
d_{mi} (10^{-2} mm)	47,00	38,00	34,00	27,00	21,00	13,00	9,00
BAKFAA							
d_{ci} (10^{-2} mm)	46,39	39,23	33,84	26,58	20,76	13,14	9,15
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	0,61	-1,23	0,16	0,42	0,24	-0,14	-0,15
Erro (%)	1,31%	-3,23%	0,46%	1,56%	1,17%	-1,08%	-1,66%
(Erro) ²	1,71E-04	1,05E-03	2,16E-05	2,43E-04	1,36E-04	1,16E-04	2,74E-04
						RMSE	1,69%
ELSYM5							
d_{ci} (10^{-2} mm)	47,4	40	34,5	27,1	21,2	13,4	9,32
$d_{mi} - d_{ci}$ (10^{-2} mm)	-0,40	-2,00	-0,50	-0,10	-0,20	-0,40	-0,32
Erro (%)	-0,85%	-5,26%	-1,47%	-0,37%	-0,95%	-3,08%	-3,56%
(Erro) ²	7,24E-05	2,77E-03	2,16E-04	1,37E-05	9,07E-05	9,47E-04	1,26E-03
						RMSE	2,77%

Comparativo das Bacias de Deflexão

APÊNDICE F - COMPOSIÇÃO DE PREÇO UNITÁRIO

EDITAL XXX / XXXX - XX									
ANEXO IX - COMPOSIÇÃO DE PREÇO UNITÁRIO									
								Data : 1/11/2016	
CÓDIGO		SERVIÇO: TELA SOLDADA PARA PAVIMENTAÇÃO					UNIDADE		M2 <i>telex</i>
CÓDIGO	EQUIPAMENTOS	UND	FATOR DE UTILIZAÇÃO		CUSTO		CUSTO		
			PRODUTIVO	IMPRODUTIVO	PRODUTIVO	IMPRODUTIVO	HORÁRIO		
(A) CUSTO HORÁRIO DE EQUIPAMENTOS - TOTAL (R\$)								0,00	
CÓDIGO	MÃO-DE-OBRA	UND	QUANTIDADE	SALÁRIO BASE	CUSTO				
	encarregado de turma	hs	0,0068	45,89			0,31		
	armador	hs	0,0679	16,00			1,09		
	servente	hs	0,0679	12,65			0,86		
CUSTO HORÁRIO DE MÃO-DE-OBRA (R\$)								2,26	
ENCARGOS SOCIAIS % 98,84%								2,23	
(B) CUSTO HORÁRIO DE MÃO-DE-OBRA - TOTAL (R\$)								4,49	
CUSTO HORÁRIO TOTAL (R\$)								4,49	
PRODUÇÃO DA EQUIPE (C)		1,00	kg	m	(D) CUSTO UNITÁRIO DE EXECUÇÃO (A) + (B) / C (R\$)		4,49		
CÓDIGO	MATERIAL	UND	CONSUMO	CUSTO UNITÁRIO	CUSTO TOTAL				
	TELA SOLDADA Q138	m2	1,0500	7,78			8,17		
	BARRA DE AÇO CA - 60 - DIAMETRO 5MM.	kg	0,6290	1,97			1,24		
	ARAME RECOZIDO N°18	kg	0,0680	5,10			0,35		
(E) CUSTO DE MATERIAIS - TOTAL (R\$)								9,75	
CUSTO UNITÁRIO - TOTAL (D) + (E) (R\$)								14,24	
BDI % 41,79%								5,95	
PREÇO UNITÁRIO TOTAL (R\$)								20,20	
CÁLCULO DE PRODUTIVIDADE				FATOR DE UTILIZAÇÃO					
CÓDIGO	EQUIPAMENTO	PRODUTIVIDADE	QUANT.(UN.)	PRODUTIVO		IMPRODUTIVO			
				%	UN.	%	UN.		
CÓDIGO	MÃO DE OBRA	PRODUTIVIDADE	QUANT.(UN.)						
		340	1						
DATA _____									
ENGº RESPONSÁVEL _____									

APÊNDICE G - FLUXO DE CAIXA

PAVIMENTO NOVO SEM USO DA TELA

Ano	Custo da Implantação	Custo de Restauração	Custo de Manutenção Rotineira	Fluxo	Taxa	VP	VP acumulado
0	1.364.684,30	-	-	1.364.684,30	1,00	1.364.684,30	1.364.684,30
1	-	-	-	-	1,06	-	1.364.684,30
2	-	-	-	-	1,12	-	1.364.684,30
3	-	-	108.464,48	108.464,48	1,19	91.068,86	1.455.753,16
4	-	-	108.464,48	108.464,48	1,26	85.914,02	1.541.667,19
5	-	-	108.464,48	108.464,48	1,34	81.050,97	1.622.718,15
6	-	-	108.464,48	108.464,48	1,42	76.463,17	1.699.181,33
7	-	670.329,10	-	670.329,10	1,50	445.807,14	2.144.988,46
8	-	-	-	-	1,59	-	2.144.988,46
9	-	-	-	-	1,69	-	2.144.988,46
10	-	-	108.464,48	108.464,48	1,79	60.566,00	2.205.554,46
11	-	-	108.464,48	108.464,48	1,90	57.137,73	2.262.692,19
12	-	-	108.464,48	108.464,48	2,01	53.903,52	2.316.595,71
13	-	-	108.464,48	108.464,48	2,13	50.852,38	2.367.448,09
14	-	670.329,10	-	670.329,10	2,26	296.487,21	2.663.935,30
15	-	-	-	-	2,40	-	2.663.935,30
16	-	-	-	-	2,54	-	2.663.935,30
17	-	-	108.464,48	108.464,48	2,69	40.279,85	2.704.215,15
18	-	-	108.464,48	108.464,48	2,85	37.999,86	2.742.215,00
19	-	-	108.464,48	108.464,48	3,03	35.848,92	2.778.063,92
20	-	670.329,10	-	670.329,10	3,21	209.011,78	2.987.075,70
Implantação de Pavimento Sem Tela de Aço					VP total do investimento		2.987.075,70
					VP do custo total de manutenção		1.193.109,23
					Custo por ano de serviço		149.353,79

PAVIMENTO NOVO COM USO DA TELA

Ano	Custo da Implantação	Custo de Restauração	Custo de Manutenção Rotineira	Fluxo	Taxa	VP	VP acumulado
0	1.506.084,30	-	-	1.506.084,30	1,00	1.506.084,30	1.506.084,30
1	-	-	-	-	1,06	-	1.506.084,30
2	-	-	-	-	1,12	-	1.506.084,30
3	-	-	-	-	1,19	-	1.506.084,30
4	-	-	108.464,48	108.464,48	1,26	85.914,02	1.591.998,32
5	-	-	108.464,48	108.464,48	1,34	81.050,97	1.673.049,29
6	-	-	108.464,48	108.464,48	1,42	76.463,17	1.749.512,46
7	-	361.509,40	-	361.509,40	1,50	240.424,40	1.989.936,86
8	-	-	-	-	1,59	-	1.989.936,86
9	-	-	-	-	1,69	-	1.989.936,86
10	-	-	-	-	1,79	-	1.989.936,86
11	-	-	108.464,48	108.464,48	1,90	57.137,73	2.047.074,59
12	-	-	108.464,48	108.464,48	2,01	53.903,52	2.100.978,12
13	-	-	108.464,48	108.464,48	2,13	50.852,38	2.151.830,49
14	-	361.509,40	-	361.509,40	2,26	159.895,96	2.311.726,45
15	-	-	-	-	2,40	-	2.311.726,45
16	-	-	-	-	2,54	-	2.311.726,45
17	-	-	-	-	2,69	-	2.311.726,45
18	-	-	108.464,48	108.464,48	2,85	37.999,86	2.349.726,31
19	-	-	108.464,48	108.464,48	3,03	35.848,92	2.385.575,23
20	-	-	-	-	3,21	-	2.385.575,23
Implantação de Pavimento Com Tela de Aço					VP total do investimento		2.385.575,23
					VP do custo total de manutenção		867.715,80
					Custo por ano de serviço		119.278,76

RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTO SEM USO DA TELA

Ano	Custo da Implantação	Custo de Restauração	Custo de Manutenção Rotineira	Fluxo	Taxa	VP	VP acumulado
0	596.183,00	-	-	596.183,00	1,00	596.183,00	596.183,00
1	-	-	-	-	1,06	-	596.183,00
2	-	-	108.464,48	108.464,48	1,12	96.533,00	692.716,00
3	-	-	108.464,48	108.464,48	1,19	91.068,86	783.784,86
4	-	-	108.464,48	108.464,48	1,26	85.914,02	869.698,88
5	-	425.181,40	-	425.181,40	1,34	317.720,28	1.187.419,16
6	-	-	-	-	1,42	-	1.187.419,16
7	-	-	108.464,48	108.464,48	1,50	72.135,07	1.259.554,23
8	-	-	108.464,48	108.464,48	1,59	68.051,95	1.327.606,18
9	-	-	108.464,48	108.464,48	1,69	64.199,96	1.391.806,14
10	-	425.181,40	-	425.181,40	1,79	237.419,07	1.629.225,21
11	-	-	-	-	1,90	-	1.629.225,21
12	-	-	108.464,48	108.464,48	2,01	53.903,52	1.683.128,74
13	-	-	108.464,48	108.464,48	2,13	50.852,38	1.733.981,11
14	-	-	108.464,48	108.464,48	2,26	47.973,94	1.781.955,06
15	-	425.181,40	-	425.181,40	2,40	177.413,34	1.959.368,40
16	-	-	-	-	2,54	-	1.959.368,40
17	-	-	108.464,48	108.464,48	2,69	40.279,85	1.999.648,24
18	-	-	108.464,48	108.464,48	2,85	37.999,86	2.037.648,10
19	-	-	108.464,48	108.464,48	3,03	35.848,92	2.073.497,02
20	-	425.181,40	-	425.181,40	3,21	132.573,57	2.206.070,59
Restauração de Pavimento Sem Tela de Aço					VP total do investimento		2.206.070,59
					VP do custo total de manutenção		1.301.573,70
					Custo por ano de serviço		110.303,53

RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTO COM USO DA TELA

Ano	Custo da Implantação	Custo de Restauração	Custo de Manutenção Rotineira	Fluxo	Taxa	VP	VP acumulado
0	645.653,40	-	-	645.653,40	1,00	645.653,40	645.653,40
1	-	-	-	-	1,06	-	645.653,40
2	-	-	108.464,48	108.464,48	1,12	96.533,00	742.186,40
3	-	-	108.464,48	108.464,48	1,19	91.068,86	833.255,26
4	-	-	108.464,48	108.464,48	1,26	85.914,02	919.169,28
5	-	294.518,00	-	294.518,00	1,34	220.080,98	1.139.250,27
6	-	-	-	-	1,42	-	1.139.250,27
7	-	-	108.464,48	108.464,48	1,50	72.135,07	1.211.385,34
8	-	-	108.464,48	108.464,48	1,59	68.051,95	1.279.437,29
9	-	-	108.464,48	108.464,48	1,69	64.199,96	1.343.637,25
10	-	294.518,00	-	294.518,00	1,79	164.457,31	1.508.094,56
11	-	-	-	-	1,90	-	1.508.094,56
12	-	-	108.464,48	108.464,48	2,01	53.903,52	1.561.998,08
13	-	-	108.464,48	108.464,48	2,13	50.852,38	1.612.850,46
14	-	-	108.464,48	108.464,48	2,26	47.973,94	1.660.824,40
15	-	294.518,00	-	294.518,00	2,40	122.892,07	1.783.716,47
16	-	-	-	-	2,54	-	1.783.716,47
17	-	-	108.464,48	108.464,48	2,69	40.279,85	1.823.996,32
18	-	-	108.464,48	108.464,48	2,85	37.999,86	1.861.996,18
19	-	-	108.464,48	108.464,48	3,03	35.848,92	1.897.845,10
20	-	294.518,00	-	294.518,00	3,21	91.832,10	1.989.677,20
Restauração de Pavimento Com Tela de Aço					VP total do investimento		1.989.677,20
					VP do custo total de manutenção		1.301.573,70
					Custo por ano de serviço		99.483,86

ANEXO A - LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO

LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO COM EQUIPAMENTO FWD - PISTA SIMPLES - FASE PROJETO DER										
Rodovia: SP-354		Raio de Aplicação: 15,0 cm								
Trecho: ATIBAIA - CAMPO LIMPO PAULISTA										
Data: 29/11/2008 e 08/12/2008		Sentido: Decrescente								
Faixa: 1		Pista: Simples								
km	Força	Deflexões (x 10 ⁻² mm)							-	Observação
	(kgf)	D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀	D _{F1-D_{F4}}	
60,68	4651	59,0	33,1	23,8	13,8	8,9	6,8	5,6	45,2	CONTROLE
60,76	4826	62,1	34,4	23,7	11,8	4,7	2,4	2,2	50,3	CONTROLE
60,84	4567	75,5	44,6	29,7	17,6	11,4	7,7	5,7	57,9	TELA
60,92	3952	86,2	50,0	34,0	22,1	14,7	10,1	7,2	64,1	TELA
61,00	4049	68,9	40,5	29,2	18,4	11,1	8,0	6,0	50,5	TELA
61,08	4633	79,6	47,9	34,0	17,0	11,0	7,9	5,9	62,6	TELA
61,16	3930	79,9	48,2	29,8	14,0	8,4	5,8	4,4	65,9	TELA

Figura A-0.1 - Levantamento deflectométrico no eixo da faixa de rolamento em restauração na época de projeto do DER/SP.

		LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO COM EQUIPAMENTO FWD
Rodovia:		SP-354										Data mar/15	
		Trecho:		km 59,88 ao km 61,24											
		Subtrecho:		-											
		Operador:		Jesus											
		Faixa:		Direita											
km	Força (kgf)	Deflexões (x 10 ⁻² mm)							Temp. Pav. (°C)	Temp. Ar (°C)	Coordenadas		Observação		
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀			Latitude	Longitude			
60,68	4173	64,9	42,3	32,1	21,2	15,4	10,1	7,4	43,0	33,7	-23,1792	-46,7768	CONTROLE		
60,72	4244	45,9	35,8	29,0	20,6	14,5	7,9	5,3	42,1	33,8	-23,1789	-46,7767	CONTROLE		
60,76	4192	58,7	48,0	38,9	27,6	18,5	10,1	6,2	42,0	34,0	-23,1786	-46,7765	CONTROLE		
60,80	4223	22,6	16,6	13,1	9,3	6,8	4,1	3,0	42,7	34,1	-23,1783	-46,7763	TELA		
60,84	4249	24,2	18,0	14,3	10,0	7,2	4,5	3,4	43,3	34,2	-23,1780	-46,7761	TELA		
60,88	4183	22,3	16,4	13,7	9,9	6,8	3,6	2,4	41,1	34,3	-23,1777	-46,7759	TELA		
60,92	4226	19,1	15,0	12,7	9,8	7,5	4,7	3,4	35,7	34,5	-23,1774	-46,7757	TELA		
60,96	4216	17,5	12,4	9,8	7,4	6,1	4,3	3,5	38,1	34,6	-23,1771	-46,7755	TELA		
61,00	4214	22,4	16,3	13,0	9,4	6,7	4,0	2,9	42,9	34,7	-23,1768	-46,7753	TELA		
61,04	4246	17,3	13,4	11,0	7,8	5,7	3,7	2,8	41,5	34,7	-23,1765	-46,7751	TELA		
61,08	4183	22,6	16,0	13,2	9,8	7,4	5,0	3,7	44,1	34,8	-23,1762	-46,7748	TELA		
61,12	4214	19,7	14,5	11,9	8,9	6,9	4,7	3,6	43,0	34,9	-23,1759	-46,7746	TELA		
61,16	4179	26,1	17,2	12,9	8,8	6,4	3,9	3,1	43,5	34,9	-23,1756	-46,7744	TELA		
61,20	4200	24,8	17,0	13,5	9,6	7,0	3,9	2,5	43,0	35,0	-23,1753	-46,7742	TELA		

Figura A-0.2 - Levantamento deflectométrico no eixo da faixa de rolamento em restauração após 2 anos de execução do experimento.

LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO COM EQUIPAMENTO FWD
Rodovia:		SP-354									
		Trecho:		Terceira Faixa km 68,16 ao km 68,72									
		Subtrecho:		-									
		Operador:		Jesus									
		Faixa:		Direita									
km	Força (kgf)	Deflexões (x 10 ⁻² mm)							Temp. Pav. (°C)	Temp. Ar (°C)	Coordenadas		Observação
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀			Latitude	Longitude	
68,20	4172	71,0	47,9	32,8	18,2	10,8	6,1	4,9	49,0	35,7	-23,1295	-46,7372	CONTROLE
68,24	4168	70,9	48,7	35,2	19,3	12,2	6,6	5,1	47,9	35,8	-23,1292	-46,7370	CONTROLE
68,28	4135	76,3	56,3	41,6	24,5	16,0	9,5	7,0	49,1	35,7	-23,1289	-46,7369	CONTROLE
68,32	4197	51,5	36,9	26,5	16,6	11,7	7,5	5,5	49,3	35,6	-23,1286	-46,7368	TELA
68,36	4228	47,5	37,3	30,0	20,0	14,0	7,3	4,9	47,3	35,6	-23,1282	-46,7367	TELA
68,40	4221	46,1	36,4	29,3	20,1	13,8	7,2	4,9	46,1	35,4	-23,1282	-46,7367	TELA

Figura A-0.3 - Levantamento deflectométrico no eixo da faixa de rolamento em restauração após 3 anos de execução do experimento.

LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO COM EQUIPAMENTO FWD
Rodovia:		SP-354									
		Trecho:		km 60,68 ao km 61,20									
		Subtrecho:		-									
		Operador:		Fernando									
		Faixa:		LD									
km	Força (kgf)	Deflexões (x 10 ⁻² mm)							Temp. Pav. (°C)	Temp. Ar (°C)	Coordenadas		Observação
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀			Latitude	Longitude	
60,68	4305	77,0	64,0	54,0	38,0	25,0	14,0	9,0	18,8	13,6	-23,1792	-46,7770	CONTROLE
60,72	4363	56,0	43,0	37,0	28,0	22,0	13,0	9,0	18,8	13,8	-23,1790	-46,7768	CONTROLE
60,76	4346	69,0	49,0	41,0	26,0	18,0	12,0	8,0	18,5	14,3	-23,1786	-46,7766	CONTROLE
60,80	4493	23,0	19,0	17,0	15,0	12,0	8,0	6,0	16,4	13,7	-23,1783	-46,7764	TELA
60,84	4525	26,0	21,0	18,0	13,0	9,0	5,0	4,0	16,3	13,8	-23,1780	-46,7762	TELA
60,88	4511	24,0	20,0	18,0	15,0	12,0	8,0	6,0	17,7	12,5	-23,1776	-46,7758	TELA
60,92	4498	20,0	15,0	13,0	10,0	8,0	5,0	4,0	18,9	13,5	-23,1773	-46,7756	TELA
60,96	4472	20,0	15,0	12,0	9,0	7,0	5,0	4,0	16,8	13,5	-23,1769	-46,7753	TELA
61,00	4480	24,0	21,0	19,0	16,0	13,0	9,0	6,0	18,8	13,7	-23,1766	-46,7751	TELA
61,04	4496	17,0	14,0	12,0	10,0	8,0	5,0	4,0	16,2	13,3	-23,1771	-46,7755	TELA
61,08	4525	26,0	21,0	18,0	13,0	9,0	5,0	4,0	16,3	13,8	-23,1762	-46,7749	TELA
61,12	4471	24,0	19,0	17,0	13,0	10,0	6,0	5,0	16,8	13,6	-23,1760	-46,7747	TELA
61,16	4476	21,0	17,0	15,0	11,0	8,0	5,0	4,0	17,7	13,8	-23,1756	-46,7745	TELA
61,20	4453	27,0	20,0	17,0	13,0	9,0	5,0	3,0	18,4	13,8	-23,1753	-46,7743	TELA
DADOS CORRIGIDOS PELA TEMPERATURA													
60,68	4305	81,1	67,4	56,9	40,0	26,3	14,7	9,5	18,8	13,6	-23,1792	-46,7770	CONTROLE
60,72	4363	59,0	45,3	39,0	29,5	23,2	13,7	9,5	18,8	13,8	-23,1790	-46,7768	CONTROLE
60,76	4346	72,9	51,7	43,3	27,5	19,0	12,7	8,4	18,5	14,3	-23,1786	-46,7766	CONTROLE
60,80	4493	24,7	20,4	18,3	16,1	12,9	8,6	6,4	16,4	13,7	-23,1783	-46,7764	TELA
60,84	4525	28,0	22,6	19,4	14,0	9,7	5,4	4,3	16,3	13,8	-23,1780	-46,7762	TELA
60,88	4511	25,5	21,3	19,1	15,9	12,8	8,5	6,4	17,7	12,5	-23,1776	-46,7758	TELA
60,92	4498	21,0	15,8	13,7	10,5	8,4	5,3	4,2	18,9	13,5	-23,1773	-46,7756	TELA
60,96	4472	21,4	16,1	12,9	9,6	7,5	5,4	4,3	16,8	13,5	-23,1769	-46,7753	TELA
61,00	4480	25,3	22,1	20,0	16,9	13,7	9,5	6,3	18,8	13,7	-23,1766	-46,7751	TELA
61,04	4496	18,3	15,1	12,9	10,8	8,6	5,4	4,3	16,2	13,3	-23,1771	-46,7755	TELA
61,08	4525	28,0	22,6	19,4	14,0	9,7	5,4	4,3	16,3	13,8	-23,1762	-46,7749	TELA
61,12	4471	25,7	20,3	18,2	13,9	10,7	6,4	5,4	16,8	13,6	-23,1760	-46,7747	TELA
61,16	4476	22,3	18,1	15,9	11,7	8,5	5,3	4,3	17,7	13,8	-23,1756	-46,7745	TELA
61,20	4453	28,5	21,1	18,0	13,7	9,5	5,3	3,2	18,4	13,8	-23,1753	-46,7743	TELA

Figura A-0.4 - Levantamento deflectométrico na implantação da faixa adicional após 2 anos de execução do experimento.

LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO COM EQUIPAMENTO FWD
Rodovia: SP-354												
		Trecho: km 68,16 ao km 68,36											Data jul/16	
		Subtrecho: -												
		Operador: Fernando												
		Faixa: LD - Faixa Adicional												
km	Força (kgf)	Deflexões (x 10 ⁻² mm)							Temp. Pav. (°C)	Temp. Ar (°C)	Coordenadas		Observação	
		D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀			Latitude	Longitude		
68,16	4305	78,0	55,0	38,0	22,0	15,0	9,0	7,0	17,5	12,5	-23,1323	-46,7384	CONTROLE	
68,20	4312	89,0	60,0	47,0	28,0	21,0	12,0	8,0	16,0	11,5	-23,1319	-46,7383	CONTROLE	
68,24	4360	80,0	59,0	46,0	31,0	23,0	14,0	9,0	16,5	11,5	-23,1316	-46,7381	CONTROLE	
68,28	4432	53,0	40,0	35,0	25,0	19,0	12,0	8,0	16,2	12,7	-23,1313	-46,7380	TELA	
68,32	4467	47,0	39,0	34,0	25,0	19,0	11,0	8,0	16,3	12,3	-23,1309	-46,7379	TELA	
68,36	4460	47,0	38,0	34,0	27,0	21,0	13,0	9,0	17,1	11,5	-23,1306	-46,7377	TELA	
DADOS CORRIGIDOS PELA TEMPERATURA														
68,16	4305	85,0	60,0	41,4	24,0	16,4	9,8	7,6	17,5	12,5	-23,1323	-46,7384	CONTROLE	
68,20	4312	98,7	66,5	52,1	31,1	23,3	13,3	8,9	16,0	11,5	-23,1319	-46,7383	CONTROLE	
68,24	4360	88,2	65,1	50,7	34,2	25,4	15,4	9,9	16,5	11,5	-23,1316	-46,7381	CONTROLE	
68,28	4432	58,6	44,3	38,7	27,7	21,0	13,3	8,9	16,2	12,7	-23,1313	-46,7380	TELA	
68,32	4467	51,9	43,1	37,6	27,6	21,0	12,2	8,8	16,3	12,3	-23,1309	-46,7379	TELA	
68,36	4460	51,5	41,6	37,2	29,6	23,0	14,2	9,9	17,1	11,5	-23,1306	-46,7377	TELA	

Figura A-0.5 - Levantamento deflectométrico na implantação da faixa adicional após 3 anos de execução do experimento.