

**ESTUDO DE RECAPEAMENTOS ASFÁLTICOS DE
PAVIMENTOS ATRAVÉS DE ENSAIOS ACELERADOS**

Diana Morussi Azambuja

Porto Alegre Agosto 2004

DIANA MORUSSI AZAMBUJA

**ESTUDO DE RECAPEAMENTOS ASFÁLTICOS DE
PAVIMENTOS ATRAVÉS DE ENSAIOS ACELERADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre

Agosto 2004

AZAMBUJA, Diana Morussi

Estudo de Recapeamentos Asfálticos de Pavimentos
Através de Ensaios Acelerados / Diana Morussi
Azambuja. – Local: PPGEC/UFRGS, 2004.

126 p.

Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul; Mestre em Engenharia; Orientador:
Jorge Augusto Pereira Ceratti.

1. Pavimentação, Recapeamentos Asfálticos I. Título

CCAA2

DIANA MORUSSI AZAMBUJA

**ESTUDO DE RECAPEAMENTOS ASFÁLTICOS DE
PAVIMENTOS ATRAVÉS DE ENSAIOS ACELERADOS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 06 de agosto de 2004

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
D. Sc. pela COPPE
Orientador

Prof. Américo Campos Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Fernando José Pugliero Gonçalves
UPF
D.Sc. pela UFRGS

Prof. Luciano Pivoto Specht
UNIJUÍ
D.Sc. pela UFRGS

Prof. Washington Peres Núñez
UFRGS
D.Sc. pela UFRGS

Dedico este trabalho aos meus amores: pai/tio Floriano
Azambuja e Odécio Adam pelo apoio e estímulo.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus pelo apoio espiritual, força, garra e determinação que me foi concebido para acabar este trabalho. Os contratempos fazem parte e sempre envolvem o crescimento, nos dando a oportunidade de descobrir que somos felizes porque os espinhos possuem rosas.

Agradeço, além de dedicar meu trabalho a eles, ao meu tio Floriano Azambuja e ao meu namorado, Odécio Adam pela compreensão em minha ausência. Estiveram sempre comigo, me apoiando nos momentos de angústia e rindo com minhas conquistas, por menores que fossem.

Aos meus familiares pela compreensão e por terem participado fortemente em minha educação, em especial: Tia Maria, Tio Juca e Tia Beth.

Aos meus pais e meu irmão pelas oportunidades de crescimento, mostrando-me o amor que sentem, mesmo na falta de convívio.

Ao Prof. Jorge Augusto Ceratti pela orientação, apoio e, principalmente, pela competência na condução desta pesquisa.

A uma pessoa muito especial, comigo desde a graduação, Ana Cecília Librelotto, que foi uma grande amiga, irmã e companheira. Não tenho palavras para agradecer a ela e sua família (Alceu, Rose, Adelmá e Raymundo) pelo acolhimento.

A duas pessoas que contribuíram na minha paz de espírito, que considero muito necessária para a concentração durante o trabalho: Maria Elizabete Campos e Marília Gotuzzo.

Ao Rafael Rubin Magro pela competência e seriedade no auxílio como bolsista, sem perder o entusiasmo. Seu envolvimento e comprometimento com o trabalho foram de extrema importância para o desenvolvimento da pesquisa, além da grande amizade.

Ao Professor Washington Peres Núñez pelo apoio, fundamental colaboração e, acima de tudo, o profissionalismo e paixão pelo trabalho.

Agradeço aos bolsistas e amigos: Klaus Thausen, Lélío Brito, Eduardo Borba e Daniel Victorino, pela colaboração e envolvimento neste trabalho.

Ao LAPAV por proporcionar o convívio com pessoas qualificadas e de extremos valores pessoais: Croaci, Vinícius, Seu Ivo, Dionísio e Ivan, que se empenharam ao máximo em suas funções para o desenvolvimento da parte experimental deste trabalho. Além dos já citados, a amizade com outras pessoas que, com seu carinho, contribuíram para tornar o ambiente de trabalho um local agradável: Danielle Clerman, Rodrigo Lovatto, Rodrigo Malysz, Lucimari Cruz, Viviane Wickboldt, Mirtes Peres e Diego Wesseling.

Além dos já citados, aos meus colegas de mestrado pelos fortes laços de amizade estabelecidos desde o início da Pós-Graduação: Leandro Sheffer, Alexandre Knop, Raymundo Ferreira Filho, Rodrigo Caberlon, Rodrigo Silveira, Diego Vendramin, Carolina Feverhowel, Eli Costa, Cláudio Dias e Rafael Azambuja.

A professora e amiga Dulce Pereira pelas aulas de inglês, auxílio nas dúvidas de traduções, ombro amigo, confiança e incentivo.

Ao incentivo recebido pelos amigos Fernanda Bevilaqua, Adriano Moura, Rachel Broch e Shirlei Bolgenhagem, que em muitos momentos foram minha família.

A CAPES pela bolsa de mestrado e universidades UFSM e UFRGS pela formação. Ao PPGEC pelo convívio e aprendizagem com pessoas capacitadas e competentes.

A BetunelKoch pelo apoio, em especial, a Engenheira Adriana Silva pelo acompanhamento, confiança e incentivo durante a pesquisa.

A UNIVIAS, em especial aos Engenheiros Paulo Ruwer e Rui Klein pelas informações e discussões que auxiliaram nas conclusões deste trabalho.

A banca avaliadora, Professores Fernando Pugliero Gonçalves e Luciano Pivoto Specht, os quais tive o prazer de conhecer durante a pesquisa, e auxiliaram com boa vontade, respondendo as minhas dúvidas.

A luz da vida feliz é: **SERENIDADE** para aceitar as coisas que não podem ser mudadas, **CORAGEM** para mudar as coisas que podem ser mudadas e **SABEDORIA** para distinguir umas das outras

Baseada na Oração da Serenidade

RESUMO

AZAMBUJA, D.M. **Estudo de Recapeamentos Asfálticos de Pavimentos Através de Ensaios Acelerados**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O objetivo deste estudo é avaliar o desempenho de recapeamentos asfálticos, aplicados sobre pavimentos severamente trincados, através do acompanhamento da degradação ocorrida em função do tráfego. Foram testados dois tipos de recapeamentos: uma camada de 5,6 cm de espessura, em concreto asfáltico convencional e um tratamento superficial duplo, modificado por polímero SBS. Os recapeamentos asfálticos foram aplicados sobre uma pista experimental já trafegada e realizou-se, artificialmente, um trincamento padronizado buscando reproduzir efeitos similares àqueles provocados pelo fenômeno de fadiga. Utilizou-se a técnica de ensaios acelerados de pavimentos através da utilização de um simulador linear de tráfego, com rodado duplo. A carga de semi-eixo de 50 kN adotada proporcionou a degradação do pavimento três meses de ensaio para cada recapeamento. O monitoramento do pavimento, em termos estruturais e funcionais, fez-se pelo levantamento periódico de deflexões, bacias deflectométricas, afundamentos de trilha de roda e o controle do surgimento de trincas na superfície. Para melhor quantificar e compreender os fenômenos de degradação estrutural, instrumentou-se a pista experimental com sensores (células de tensão total e *strain gages*) na interface entre pavimento trincado e recapeamentos, obtendo-se tensões e deformações nestes locais, considerados críticos no desempenho de pavimentos recapeados. Durante os períodos de ensaio, foram monitoradas as condições pluviométricas e temperaturas do ar e pavimento. A determinação dos módulos elásticos das camadas das estruturas testadas foi efetuada pela aproximação das bacias obtidas em campo com os dados gerados em uma simulação numérica, através do programa computacional FLAPS. Percebeu-se que, além do tráfego, o trincamento no recapeamento em tratamento superficial foi devido à condição estrutural inicial do pavimento existente, severidade do trincamento artificial incompatível com a espessura desse tipo de restauração e baixas temperaturas. Quanto ao recapeamento em concreto asfáltico, percebeu-se que o maior trincamento surgiu em áreas sem trincas artificiais subjacentes, partindo do fundo da camada asfáltica do pavimento existente, em função da pouca rigidez da camada granular.

Palavras-chave: recapeamentos asfálticos, reflexão de trincas e ensaios acelerados.

ABSTRACT

AZAMBUJA, D.M. Estudo de Recapeamentos Asfálticos de Pavimentos Através de Ensaios Acelerados. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Study of Asphalt Overlays based on Full-Scale Pavement Test

The objective of this study is to evaluate the performance of asphalt overlays, applied on severely cracked pavement, through the accompaniment of the degradation happened in function of the traffic. Two overlays types were tested: a layer of 5,6 cm of thickness in flexible asphalt concrete and polymer modified superficial treatment. The asphalt overlays were already applied on a trafficked section test where was made artificially standardized cracking for to reproduce similar effects fatigue. The technique of full-scale pavement testing was used through the use of a linear traffic simulator constituted of two wheels. The load of semi-axis of 50kN adopted provided the degradation of the pavement three months of tests for each recapeamento. The monitoring of the pavement, in structural and behavior terms, it was done by the periodic collect of deflections, basins, rutting and the control of the appearance of cracks in the surface. To quantify and to understand the phenomena of structural degradation, the section test was instrumented by sensors (total pressure cells and strain gages) between pavement cracking and overlay interface, being obtained stress and strain measurements in that place, considered critical in the acting of pavements with overlays. During the tests periods, rains and temperatures conditions data were collected. The pavement layers elasticity modulus backcalculations were made by approaching basins obtained in field to the data generated in a numeric simulation through FLAPS computational program. The cracking on the superficial treatment overlay was due to severity artificial cracking, lower temperatures and to the initial structural conditions of the existent pavement. About flexible asphalt concrete was noticed that the largest cracking appeared in areas without artificial crack, starting from the bottom of the asphalt layer on the existent pavement due low elasticity modulus of the crushed stone base.

Key-words: asphalt overlay, reflection crack, full-scale pavement testing.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	17
1.2 OBJETIVOS GERAIS	19
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 TRINCAS EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS.....	21
2.2 REFLEXÃO DE TRINCAS.....	28
2.3 ASFALTOS MODIFICADOS POR POLÍMEROS.....	32
2.4 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS DE ALTO DESEMPENHO.....	36
3 METODOLOGIA DA PESQUISA	39
3.1 ENSAIOS ACELERADOS	40
3.2 CARACTERÍSTICAS DA PISTA EXPERIMENTAL.....	44
3.3 ESTRUTURA DO PAVIMENTO EXISTENTE.....	44
3.4 PARÂMETROS DE RESPOSTA ESTRUTURAL.....	47
3.4.1 Medidas Deflectométricas	47
3.4.2 Tensões e Deformações.....	51
3.5 PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO.....	54
3.5.1 Deformações Permanentes	54
3.5.2 Trincamento	54
3.6 PARÂMETROS DE TEXTURA DE SUPERFÍCIE.....	55
3.6.1 Pêndulo Britânico.....	55
3.6.2 Mancha de Areia	56
3.7 PARÂMETROS AMBIENTAIS	57
4 EXECUÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS RECAPEAMENTOS	58
4.1 SERVIÇOS PRELIMINARES	58
4.2 EXECUÇÃO DO RECAPEAMENTO EM TRATAMENTO SUPERFICIAL.....	61
4.3 EXECUÇÃO DO RECAPEAMENTO EM CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL.....	66
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	72
5.1 DISTRIBUIÇÃO TRANSVERSAL DE CARGAS.....	72
5.2 RECAPEAMENTO EM TRATAMENTO SUPERFICIAL DUPLO	74
5.2.1 Histórico de Carregamento.....	74
5.2.2 Parâmetros Ambientais	75
5.2.3 Parâmetros de Resposta Estrutural.....	77
5.2.3.1 Medidas Deflectométricas e Bacias	77

	12
5.2.3.2 Tensões.....	83
5.2.3.3 Deformações Horizontais	84
5.2.4 Parâmetros de Comportamento.....	87
5.2.4.1 Deformações Permanentes	87
5.2.4.2 Trincamento.....	89
5.2.5 Parâmetros de Textura Superficial.....	92
5.2.5.1 Pêndulo Britânico	93
5.2.5.2 Mancha de Areia	95
5.3 RECAPEAMENTO EM CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL.....	96
5.3.1 Histórico de Carregamento.....	96
5.3.2 Parâmetros Ambientais	97
5.3.3 Parâmetros de Resposta Estrutural.....	99
5.3.3.1 Medidas Deflectométricas e Bacias	99
5.3.3.2 Tensões.....	104
5.3.3.3 Deformações Horizontais	105
5.3.4 Parâmetros de Comportamento.....	108
5.3.4.1 Deformações Permanentes	108
5.3.4.2 Trincamento.....	108
5.3.5 Parâmetros de Textura Superficial.....	110
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	112
6.1 TRATAMENTO SUPERFICIAL.....	113
6.2 CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL.....	114
6.3 SUGESTÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS	115
REFERÊNCIAS.....	117
ANEXO 1 – TENSÕES, DEFORMAÇÕES, DEFLEXÕES E ATR NO RECAPEAMENTO EM TSD.....	120
ANEXO 2 – TENSÕES, DEFORMAÇÕES, DEFLEXÕES E ATR NO RECAPEAMENTO EM CA CONVENCIONAL	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modos de fratura	26
Figura 2: Influência do trincamento na vida do pavimento	29
Figura 3: Simulador de Tráfego DAER/UFRGS	41
Figura 4: Curva de calibração do simulador - tratamento superficial	43
Figura 5: Curva de calibração do simulador – concreto asfáltico	43
Figura 6: Croqui da pista experimental	44
Figura 7: Viga eletrônica	48
Figura 8: Fatores de correção para o recapeamento em TSD pela AASHTO	49
Figura 9: Fatores de correção para o recapeamento em CA pela AASHTO	50
Figura 10: Fatores de correção das deflexões em função da temperatura obtidas em campo ..	50
Figura 11: Exemplo de leitura dos sensores - SAD32	51
Figura 12: Forma típica dos pulsos de tensão.....	53
Figura 13: Pulsos típicos dos pulsos de deformação	53
Figura 14: Transverso-perfilógrafo	54
Figura 15: Controle da evolução do trincamento	55
Figura 16: Pêndulo Britânico	56
Figura 17: Ensaio “Mancha de Areia”.....	57
Figura 18: Execução do remendo em concreto asfáltico	58
Figura 19: Padrão de trincamento e execução das trincas	59
Figura 20: Disposição dos sensores na pista experimental.....	61
Figura 21: Etapas de execução do recapeamento em tratamento superficial	64
Figura 22: Estrutura do pavimento recapeada em TSD.....	65
Figura 23: Curva granulométrica dos agregados do concreto asfáltico.....	67
Figura 24: Execução do recapeamento em concreto asfáltico	69
Figura 25: Estrutura do pavimento recapeada em CA.....	70
Figura 26: Impressão dos pneus com carga de eixo de 100kN.....	73
Figura 27: Distribuição transversal de cargas.....	73
Figura 28: Histórico do carregamento nas semanas de ensaio – recapeamento TSD	74
Figura 29: Precipitações pluviométricas – recapeamento TSD.....	75
Figura 30: Temperaturas diárias - recapeamento TSD	76
Figura 31: Frequência da temperatura – recapeamento TSD	76
Figura 32: Evolução das deflexões (carga de eixo = 100kN) - TSD.....	77
Figura 33: Deflexões características - recapeamento TSD.....	78

Figura 34: Comparativo de deflexões – recapeamento TSD.....	79
Figura 35: Bacias deflectométricas – recapeamento TSD.....	79
Figura 36: Camadas consideradas no Flaps - recapeamento TSD.....	81
Figura 37: Bacia deflectométrica pelo FLAPS - recapeamento TSD.....	82
Figura 38: Contribuição das camadas na deflexão - recapeamento TSD.....	83
Figura 39: Tensões horizontais medidas – recapeamento TSD.....	84
Figura 40: Deformações medidas - recapeamento TSD.....	86
Figura 41: Efeito da temperatura no valor das deformações horizontais.....	86
Figura 42: Posição da linha neutra – recapeamento TSD.....	87
Figura 43: Deformações permanentes em cada seção – TSD.....	88
Figura 44: Deformações permanentes – recapeamento TSD.....	88
Figura 45: Comparativo do trincamento – recapeamento em TSD.....	90
Figura 46: Evolução do trincamento – TSD.....	91
Figura 47: Velocidade do trincamento - recapeamento em TSD.....	92
Figura 48: Leituras com o Pêndulo Britânico – recapeamento em TSD.....	95
Figura 49: Histórico do carregamento nas semanas de ensaio – recapeamento CA.....	97
Figura 50: Precipitações pluviométricas no período de ensaios – recapeamento CA.....	98
Figura 51: Temperaturas diárias - recapeamento CA.....	98
Figura 52: Frequência da temperatura durante os ensaios – recapeamento CA.....	99
Figura 53: Evolução das deflexões máximas – recapeamento CA.....	100
Figura 54: Deflexões características – recapeamento CA.....	100
Figura 55: Comparativo de deflexões – recapeamento CA.....	101
Figura 56: Bacias deflectométricas – recapeamento CA.....	101
Figura 57: Comparativo entre bacias medidas e calculadas - recapeamento CA.....	102
Figura 58: Camadas consideradas no Flaps - recapeamento CA.....	103
Figura 59: Contribuição das camadas na deflexão – recapeamento CA.....	104
Figura 60: Tensões medidas - recapeamento CA.....	105
Figura 61: Deformações medidas - recapeamento CA.....	106
Figura 62: Posição da linha neutra – recapeamento CA.....	107
Figura 63: Deformações permanentes – recapeamento CA.....	108
Figura 64: Comparativo do trincamento – recapeamento CA.....	109
Figura 65: Evolução do trincamento – recapeamento CA.....	110
Figura 66: Leituras com o Pêndulo Britânico – recapeamento CA.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores que influenciam a vida de fadiga de misturas asfálticas	22
Tabela 2: Tempo de operação do simulador para simular 10^6 cargas de eixo padrão	42
Tabela 3: Propriedades do solo argiloso utilizado como reforço do subleito	45
Tabela 4: Propriedades da brita graduada utilizada como base	46
Tabela 5: Parâmetros Marshall da mistura asfáltica da Pista 1	46
Tabela 6: Carga e Inflação dos Pneus	48
Tabela 7: Granulometria de projeto do tratamento superficial.....	62
Tabela 8: Propriedades dos agregados	63
Tabela 9: Taxas de ligante e agregados das camadas do tratamento superficial.....	63
Tabela 10: Teores de ligante e agregado medidos em campo	64
Tabela 11: Ensaio de módulo de resiliência e resistência à tração	65
Tabela 12: Taxa de agregados da mistura asfáltica	66
Tabela 13: Composição granulométrica dos agregados da mistura asfáltica.....	67
Tabela 14: Projeto Marshall para o recapeamento em concreto asfáltico	68
Tabela 15: Granulometria dos agregados do recapeamento em CA verificados em campo	70
Tabela 16: Ensaio de módulo de resiliência e resistência à tração	71
Tabela 17: Raios de Curvatura – recapeamento TSD.....	80
Tabela 18: Dados de entrada no FLAPS - recapeamento TSD	81
Tabela 19: Classificação da textura superficial do pavimento	93
Tabela 20: Classes do revestimento quanto à resistência à derrapagem	94
Tabela 21: Classificação da textura em função da altura da mancha	96
Tabela 22: Resultados do ensaio "Mancha de Areia".....	96
Tabela 23: Raios de Curvatura – recapeamento CA.....	102
Tabela 24: Dados de entrada no FLAPS - recapeamento CA	103
Tabela 25: Deformações nas direções principais – recapeamento CA.....	107

SIGLAS

- AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials
- ANT: Área não trincada - Área da pista experimental sem trincamento no pavimento existente
- AT: Área trincada - Área da pista experimental com trincamento no pavimento existente
- ATR: Afundamento de trilha de roda
- BPN: Britch Pendulum Number
- CA: Concreto asfáltico
- CAP: Cimento asfáltico de petróleo
- CBR: Califórnia bearing ratio
- CNT: Confederação Nacional do Transporte
- DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul
- DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
- FLAPS: Finite Layer Analysis Pavement Structures
- LPAV: Laboratório de Pavimentação
- M_R : Módulo de Resiliência
- N: Número de ciclos de carga realizados pelo simulador de tráfego
- PSI: Present Serviceability Index
- RCI: Riding Comfort Index
- R_T : Resistência a tração
- SAM: Stress Absorbing Membrane
- SBS: Copolímero estireno butadieno estireno
- SHARP: Strategic Highway Research Program
- ST: Seção de estudo da pista, pertencente à área trincada artificialmente
- SNT: Seção de estudo da pista, pertencente à área não trincada artificialmente
- TSD: Tratamento superficial duplo

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O panorama da malha rodoviária nacional mostra claramente a necessidade de investimentos em manutenção e restauração das estradas. A pesquisa realizada em rodovias brasileiras, pela Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2003) revelou que 58,5% da extensão, encontra-se com pavimento em estado deficiente, ruim ou péssimo, representando 27.885 km, sendo que 8.077 km apresentam afundamentos, ondulações ou buracos. Essa pesquisa avaliou o estado geral de 82,8% das estradas brasileiras, constatando uma grande disparidade favorável às condições das rodovias do sul do país em relação às do nordeste brasileiro. Ainda assim, a condição dos pavimentos do Rio Grande do Sul apresenta um quadro de rodovias deficientes em termos de pavimentação, principalmente na metade oeste do estado.

A restauração das rodovias nacionais é uma necessidade urgente, a qual implica na escolha de atividades que representem melhorias efetivas, possibilitando segurança e conforto do usuário, além de um escoamento de produtos de maneira rápida e econômica.

A participação e contribuição de empresas privadas em pesquisas científicas tornaram-se uma alternativa interessante para o desenvolvimento tecnológico, na medida em que as empresas despertam o interesse do meio acadêmico para o estudo de materiais e técnicas novas ou consagradas no mercado. Dessa maneira, os resultados obtidos pelos trabalhos de pesquisa contam com a seriedade e comprometimento com a pesquisa das instituições de ensino e com o fomento das empresas, que disponibilizam seus materiais para investigação, retornando para a sociedade através da qualidade e redução de custos.

O que se pretende neste estudo é oferecer alternativas de medidas de restauração, que atuem também como prolongadores da vida útil dos pavimentos flexíveis, já que a melhoria das estradas possui um reflexo imediato na redução do número de acidentes, na diminuição das perdas de safra pelo tempo excessivo no transporte, na redução do consumo de combustíveis, custo de manutenção e aumento da vida útil dos veículos. (Leite *et al.*, 1995)

A malha rodoviária brasileira pavimentada caracteriza-se fundamentalmente por possuir pavimentos revestidos em concreto asfáltico, sendo o surgimento de trincas um dos principais problemas. Na maioria das vezes são oriundas da ação combinada de tráfego e clima, podendo ser as responsáveis pelo processo de aceleração da degradação estrutural dos pavimentos.

O surgimento, evolução e reflexão de trincas podem ser acompanhados e analisados através de trechos rodoviários sujeitos ao tráfego real, ou por mecanismos que simulam e aceleram a ação do tráfego.

A implantação de pavimentos experimentais, integrados a rodovias existentes, é um método tradicional para a obtenção resultados de degradação em verdadeira grandeza, porém apresentam custos elevados, demandam de tempo longo para a coleta de dados representativos e de difícil extrapolação (Núñez, 1997). Ainda há a possibilidade da taxa de crescimento das cargas do tráfego de pavimentos em serviço exceder o carregamento acumulado de pavimentos experimentais, não estabelecendo, assim, bases de previsões confiáveis (Metcalf, 1996). Em contrapartida, os ensaios realizados com simuladores de tráfego proporcionam o estudo da evolução das degradações, em espaço reduzido de tempo, com boas possibilidades de extrapolação de resultados, além de serem eficazes nos estudos do potencial de novos materiais utilizados na pavimentação.

As medidas, em termos de restauração de pavimentos, englobam uma série de alternativas e, dentre elas, estão os recapeamentos executados em concreto asfáltico. Este tipo de restauração é um dos mais difundidos no meio rodoviário, porém traz intrinsecamente o risco da reflexão das trincas do pavimento desgastado para o recapeamento, quando submetidos à ação do tráfego.

Para retardar o processo do trincamento em rodovias, podem-se adotar procedimentos como selamento das trincas antes da execução dos recapeamento, uso de geotêxteis impregnados de asfalto e, o que é abordado nesta dissertação, o emprego de membrana absorvedora de tensões (SAM – stress absorbing membrane), constituída por um recapeamento em tratamento superficial de alto desempenho.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

A presente pesquisa iniciou com o objetivo de comparar o desempenho de duas medidas de restauração de rodovias, através de uma técnica bastante difundida no meio rodoviário: a utilização de uma nova camada asfáltica sobre um revestimento existente, com a função de criar uma nova superfície de rolamento, aumentar a vida de serviço dos pavimentos, podendo contribuir estruturalmente. Os recapeamentos estudados foram: uma camada delgada em concreto asfáltico convencional e um tratamento superficial duplo, utilizando ligante modificado por polímero SBS. No entanto, o surgimento de variáveis não contabilizadas fez com que este estudo mudasse o enfoque comparativo, não perdendo sua relevância por tratar de importantes mecanismos de degradação de pavimentos.

Em função do acima exposto, o objetivo geral da pesquisa é avaliar separadamente o desempenho dos recapeamentos executados sobre pavimentos severamente trincados. A parte experimental desta pesquisa desenvolveu-se na Área de Teste de Pavimentos, localizado no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Utilizou-se uma pista experimental existente, para a aplicação dos recapeamentos, utilizando-se a técnica de ensaios acelerados para a aplicação das cargas de tráfego. O tráfego imposto sobre as estruturas de pavimento permitiu a conclusão sobre a eficácia quanto à reflexão de trincas, com potencial econômico nos custos de conservação de rodovias.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O principal objetivo da presente pesquisa é quantificar e analisar a reflexão de trincas em camadas asfálticas, aplicadas sobre revestimentos trincados, monitorando parâmetros relevantes nesse tipo de degradação. Especificamente, têm-se como objetivos:

- Avaliar as respostas estruturais do pavimento quando submetido à ação combinada de tráfego e condições meteorológicas, analisando as tensões e deformações na interface entre pavimento existente e recapeamentos, por meio de instrumentação;
- Quantificar a perda de capacidade estrutural das camadas do pavimento através de medidas de deflexão e modelagens em programas computacionais;

- Acompanhar a evolução de degradações que geram perdas funcionais nos pavimentos através do monitoramento de deformações permanentes, trincamento e redução da resistência à derrapagem.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além do capítulo de introdução, este trabalho está estruturado da seguinte forma:

Capítulo 2: Neste capítulo está apresentado o embasamento teórico pertinente à pesquisa. São descritos os mecanismos e a fenomenologia do trincamento de pavimentos e a reflexão de trincas em camadas asfálticas de recapeamento. Explica-se, adicionalmente, influência da inclusão de polímero no ligante asfáltico em relação ao desempenho dos revestimentos asfálticos e os tratamentos superficiais com ligantes modificados por polímero SBS.

Capítulo 3: Apresentam-se a metodologia utilizada para a obtenção das repostas do pavimento, descrição dos ensaios realizados e detalhes dos equipamentos, características da pista experimental e estrutura do pavimento existente antes da aplicação dos recapeamentos asfálticos.

Capítulo 4: Detalham-se os serviços preliminares aos recapeamentos, projetos e controles tecnológicos efetuados, instrumentação e os detalhes construtivos da execução.

Capítulo 5: Mostram-se as análises dos resultados obtidos nas duas faixas recapeadas e a evolução das degradações com o número de ciclos de carga aplicados pelo simulador de tráfego DAER/UFRGS. Fez-se também a simulação das condições do pavimento para a obtenção de respostas que facilitem a compreensão dos mecanismos de degradação.

Capítulo 6: Apresentam-se as conclusões da pesquisa quanto ao desempenho dos recapeamentos e sugestões para estudos posteriores.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo dos defeitos dos pavimentos em função do tráfego a que eles estão submetidos tem ocupado lugar importante no meio acadêmico, em vista de que podem ser a chave para a solução de diversos problemas, no que se refere a alternativas para restauração de rodovias. Neste sentido, o Laboratório de Pavimentação, juntamente com a Área de Testes de Pavimentos da UFRGS já concluíram um estudo de reforço asfáltico de pavimentos, envolvendo camada intermediária de geotêxtil, dois estudos em conclusão e um estudo em andamento, discutindo tipos de recapeamentos asfálticos.

Nota-se que o processo de degradação dos pavimentos tende a ser cada vez mais rápido em função do aumento do número de solicitações e das tensões atuantes nas estruturas dos pavimentos, juntamente com as evoluções tecnológicas no setor automobilístico que produzem veículos com maiores capacidades de carga.

Com o objetivo de melhor compreender os fenômenos envolvidos na degradação estrutural e funcional dos pavimentos asfálticos, fez-se um levantamento bibliográfico no qual, grande parte, no que tange o trincamento de camadas asfálticas, é baseada na Tese de Doutorado de Rodrigues (1991) que desenvolveu modelos de previsão do trincamento considerando fatores estruturais, climáticos e de tráfego para explicar a origem e propagação de trincas.

A respeito das alterações dos ligantes em função da adição de polímeros contou-se com o auxílio de um estudo, publicado pelo DNER (1998), intitulado: “Pesquisa de Asfaltos Modificados por Polímeros”. Nesta investigação, levantaram-se as propriedades físicas, químicas, reológicas e de comportamento mais relevantes, conferidas ao asfalto, pela adição de polímeros.

2.1 TRINCAS EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Entre as diversas formas de degradação dos pavimentos flexíveis, o surgimento de trincas é um dos maiores causadores de perda de serventia das rodovias. Na tentativa de se estabelecer um nível aceitável de serventia, várias técnicas de restauração podem ser empregadas, dentre

elas, a utilização de asfaltos modificados na confecção de camadas de reforço do pavimento, a qual é um dos temas do presente estudo.

O controle e monitoramento do surgimento de trincas nos pavimentos são de suma importância no inventário de suas condições de superfície, sendo estes dados relevantes em diagnósticos de problemas e projetos de restauração.

O surgimento de trincas na camada de revestimento gera descontinuidades na superfície, reduzindo a capacidade estrutural do pavimento pela entrada d'água nas camadas subjacentes, levando a degradação contínua se nenhuma medida de restauração for adotada.

As principais causas, citadas entre os autores, desse tipo de ruptura são a ação repetida das cargas do tráfego, caracterizando a fadiga dos revestimentos asfálticos; envelhecimento da camada asfáltica (oxidação do ligante) tornando o revestimento mais rígido, portanto, mais frágil, favorecendo o trincamento; baixas temperaturas, caracterizando uma ruptura frágil; altas variações térmicas diárias, fato comum no Rio Grande do Sul.

Segundo Gonçalves (2002) o trincamento verificado em revestimentos asfálticos pode ser devido a vários fatores. No capítulo de apresentação de seus resultados quanto ao trincamento das pistas experimentais, o autor apresentou uma tabela listando os principais fatores que afetam a vida de fadiga de misturas asfálticas os quais estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Fatores que influenciam a vida de fadiga de misturas asfálticas

Fatores de mistura	Fatores de carga	Fatores ambientais
- tipo de cimento asfáltico - teor de asfalto - temperatura na mistura - temperatura na compactação - método de compactação - tipo, forma, granulometria e textura do agregado - índice de vazios	- magnitude do carregamento - tipo de carregamento - frequência - histórico de tensões - forma do carregamento	- temperatura - umidade

A causa provável das trincas pode ser dada conforme a sua classificação, permitindo previsões confiáveis e uma base racional para a escolha e projetos de medidas de restauração. Porém, essa classificação, pode ser em função de diversos parâmetros como: tipo, extensão, intensidade e severidade das trincas.

Rodrigues (1991), define extensão do trincamento como a área da superfície coberta pelo trincamento, expressa em termos de área total da superfície; a intensidade, como comprimento total das trincas por unidade de área ou espaçamento médio entre elas; e a severidade, como o tamanho da abertura das mesmas. Uma das classificações citada pelo autor é:

- Trincamento em rede: representadas por poligonais interligadas;
- Trincamento linear: as trincas seguem padrões retangulares, formadas por trincas longitudinais e transversais;
- Trincamento irregular: trincas desconectadas, ou interconectadas com padrões irregulares.

A norma do DNER TR-01/78, classifica as discontinuidades na superfície do pavimento, em função exclusivamente da abertura das mesmas, como fendas, divididas em fissuras e trincas. Segundo a norma, as fendas são aberturas que podem ser vistas a olho nu, a 1,5m de distância e as trincas são aberturas maiores que as fendas, as quais são subdivididas em 3 classes:

- Classe 1: Com abertura menor que 1mm;
- Classe 2: Com abertura maior que 1mm;
- Classe 3: Com abertura maior que 1mm e desintegração ou erosão nas bordas.

As trincas ainda podem ser subdivididas em isoladas, longitudinais e transversais, e interligadas, formando a configuração denominada de “couro de jacaré”. Essas classificações entram no cálculo do PSI (Present Serviceability Index), que mede as condições de superfície do pavimento, através da Equação 1. (Pinto, 2002)

$$\text{PSI} = 5,03 - 1,91 \log(1 + SV) - 0,01 \sqrt{C + P} - 1,38 RD^2 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

SV = variância das inclinações do perfil longitudinal, medidas com o perfilômetro da AASHTO;

C = proporção de áreas com fendas de classe 2 e 3 (1/1000);

P = proporção de áreas remendadas (1/1000);

RD = profundidade média dos afundamentos de trilha de roda.

Esse índice varia de 1 a 5, sendo que valores de 4 a 5 representam um pavimento novo e, com um PSI = 1,5, o pavimento está em péssimas condições funcionais. O estado mínimo admissível de funcionalidade é representado por um valor de PSI = 2,5, sendo este o marco de intervenções imediatas de restauração para conduzir o pavimento às condições iniciais.

A correta análise das condições de superfície dos pavimentos auxilia na determinação do momento certo e técnicas adequadas nas medidas de restauração.

A ruptura de misturas asfálticas vem sendo considerada, por diversos autores, como uma manifestação da fadiga do pavimento, ou seja, deterioração sob carregamento repetido, sendo correlacionadas com as máximas tensões de tração na fibra inferior da camada asfáltica que acarretam deformações nessa região, gerando o trincamento. Porém, a máxima deformação de tração pode não ocorrer nessa região segundo a demonstração de Claessen *et alli*. (1977) *apud* Rodrigues (1991). O local da ocorrência de máxima deformação de tração de um sistema de camadas elásticas pode estar situado em qualquer ponto do revestimento asfáltico, se estiver em conformidade com a Equação 2, e depende da relação entre módulos da camada asfáltica e base, além da espessura da camada asfáltica, quando submetida a uma carga vertical distribuída. Se a espessura da camada asfáltica for maior que 0,2 m, a deformação máxima ocorrerá na metade superior, caso contrário, na metade inferior desta camada.

$$\left(\frac{E_2}{E_1} \right) \times h_1 > 0,133\text{m} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

E_1 = módulo elástico da camada asfáltica;

E_2 = módulo elástico da camada de base;

h_1 = espessura da camada asfáltica em metros.

A ruptura por fadiga se dá em três processos distintos:

- Início do fissuramento;
- Crescimento estável da trinca;
- Propagação instável da trinca.

Segundo Collop & Thon (2002), estudando a propagação de trincas em misturas asfálticas de alto módulo, os procedimentos usuais para avaliar a resistência a fadiga de um material betuminoso se referem ao início do trincamento, ou seja, o ponto no qual as microfissuras se unem para formar uma macrofissura. No entanto, o tempo de propagação do trincamento ocupa um tempo muito maior na vida de fadiga de um pavimento do que o processo de iniciação de uma trinca.

Rodrigues (1991) descreve que o comportamento da trinca pode ser representado por três movimentos cinemáticos independentes, baseado na mecânica da fratura, em função dos modos de deslocamentos relativos das superfícies da trinca. Os modos de trincamento estão representados na Figura 1 e são considerados necessários e suficientes para descrever os modos possíveis de comportamento da trinca.

- Modo I: Abertura – as superfícies são separadas na direção y , mas as deformações são simétricas em relação aos planos xz e xy ;
- Modo II: Cisalhamento – há um escorregamento de uma superfície sobre a outra na direção x , onde as deformações são simétricas em relação aos planos xy e anti-simétricas em relação ao plano xz ;
- Modo III: Rasgamento - há um escorregamento das superfícies da trinca na direção z , de modo que as deformações nos planos xy e xz são anti-simétricas.

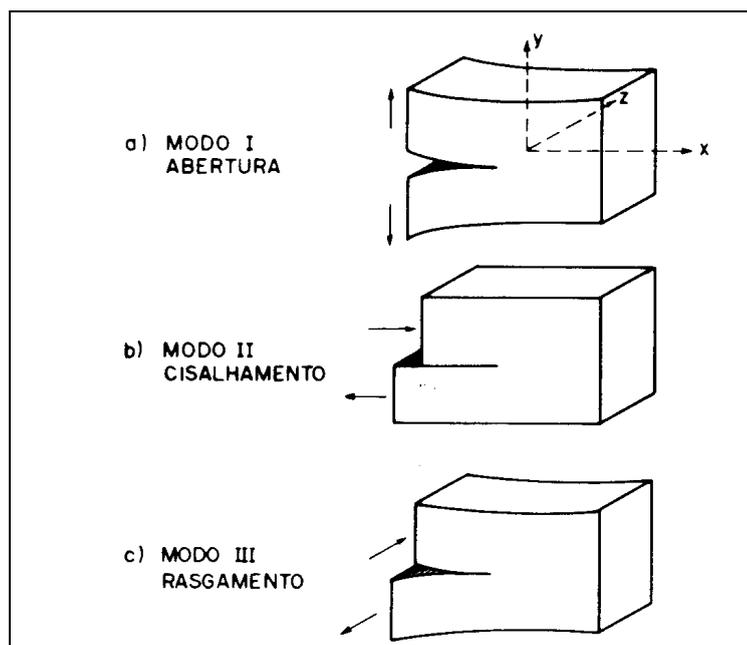


Figura 1: Modos de fratura

As tensões geradas nas extremidades das trincas são diferentes para cada movimento, ocorrendo tensões normais de tração no Modo I, causando a abertura da trinca. Já os modos II e III são gerados por tensões cisalhantes no plano do trincamento.

O entendimento dos modos de fratura, através da Teoria da Elasticidade, leva a equações que relacionam as tensões, nos planos da trinca, com os fatores de intensidades de tensões K_1 , K_2 e K_3 , para cada modo de fratura. Esses fatores governam as magnitudes das tensões nas extremidades das trincas e permitem a previsão da vida de fadiga do pavimento, considerando o trincamento e a redistribuição de tensões após a ocorrência deste fenômeno. Em geral, esses fatores estão relacionados com a resistência a tração do material asfáltico, comprimento da trinca no pavimento, rigidez relativa do pavimento e das condições geométricas e de fronteira.

A conhecida Lei de Paris descreve a taxa de crescimento de uma trinca, em função dos fatores de intensidade de tensão através da Equação 3, sendo “A” e “n” constantes dos materiais.

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n \quad \text{Equação 3}$$

A velocidade do crescimento de uma trinca e a sua trajetória dependem do balanço de energia em suas extremidades, compreendida por uma parcela de energia elástica armazenada, uma parcela de energia superficial para a formação da trinca, e uma parcela de energia de deformação, responsável por distorções irreversíveis. Uma trinca necessitará de pouca energia superficial para a sua formação se a energia elástica liberada a exceder, sendo sua propagação instantânea. Porém, a propagação é lenta ou cessada se houver uma grande deformação plástica na região da extremidade da trinca por ela se tornar arredondada nesses locais.

Em seu estudo, Rodrigues (1991) concluiu que o fator de intensidade de tensões (K) é um parâmetro mais confiável do que a resistência à tração na previsão da vida de fadiga das misturas asfálticas porque leva em consideração a progressão da trinca e, além disso, as constantes da Lei de Paris podem ser consideradas como constantes do material. Já os ensaios de fadiga baseados em relações simi-empíricas, que relacionam a vida de fadiga com tensões ou deformações, não proporcionam equações onde suas constantes possam ser consideradas exclusivamente do material, pois são afetadas pelo tipo de ensaio e condições de contorno.

Com o intuito de avaliar e quantificar a propagação do trincamento em materiais betuminosos, Collop & Thon (2002) desenvolveram um ensaio que consiste de uma câmera fotográfica digital, acoplada a um equipamento Compacto de Tração, comumente utilizado para ensaiar ligas metálicas, adaptado para misturas asfálticas. O resultado do trabalho mostrou que este equipamento é adequado para determinar a taxa de crescimento de trincas em função do Modo I de trincamento (abertura e fechamento da trinca), mostrado na Figura 2. Através de análises utilizando a Mecânica da Fratura Elástico-Linear, verificaram que a constante n da Lei de Paris caracteriza a sensibilidade do processo de crescimento da trinca quando materiais asfálticos são solicitados, ou seja, para altos valores de n , pequenas variações de tensão acarretam uma variação relativamente alta na taxa de propagação do fissuramento. Outra constatação interessante é o aumento da sensibilidade ao trincamento com a diminuição da temperatura, verificando valores de n entre 7 e 4 para a temperatura de 10°C, sendo neste caso, o tipo de fratura de natureza frágil. Quando as temperaturas são mais elevadas (30°C), a ruptura possui um comportamento mais dúctil e a propagação se dá mais lentamente.

2.2 REFLEXÃO DE TRINCAS

A reflexão de trincas é considerada, por vários pesquisadores, um dos maiores e mais onerosos problemas a serem resolvidos no momento da restauração de rodovias. Esse tipo de trincamento pode levar a deterioração prematura do pavimento devido à infiltração de umidade e impurezas em sua estrutura. Segundo Tighe *et al.* (2003), muitos países estão direcionando mais seus estudos para medidas de correção, manutenção e restauração de rodovias do que para novas construções, visando estratégias de melhor relação custo-benefício. Em grande parte, os trabalhos científicos de medidas de restauração tratam-se de estudos sobre recapeamentos asfálticos, incluindo o Programa de Pesquisas em Rodovias do Canadá (C-SHRP), com o objetivo geral de aumentar a vida de serviço e a serventia dos pavimentos, tendo como foco principal, o trincamento das camadas asfálticas de reforço.

Um dos assuntos abordados pelo estudo foi o efeito do trincamento na redução da vida de serviço do pavimento, relatando que existem poucos dados experimentais disponíveis que analisam separadamente o efeito do trincamento no desempenho do pavimento. Isto está relacionado ao fato de que o desempenho estrutural e o nível de serventia são afetados por vários fatores e não só por esse tipo de ruptura. Contudo, um estudo desenvolvido em pavimentos aeroportuários canadenses, mostrado no artigo, correlacionou o trincamento (em termos de espaçamento entre trincas) com o desempenho do pavimento, através do Índice de Conforto de Tráfego (RCI – *Riding Comfort Index*), conforme a Equação 4.

$$RCI = 5,4 + 0,02(\text{espaçamento entre trincas}) - \left(\frac{11,6}{(\text{espaçamento entre trincas})^2} \right) \quad \text{Equação 4}$$

Onde o espaçamento entre trincas é dado em metros e o índice RCI varia de 0 a 10. O valor de RCI igual a 10 indica um pavimento em perfeitas condições de tráfego, o valor zero representa um trecho intransitável e 5, o nível mínimo aceitável. Em termos gráficos, a Equação 4 é mostrada na Figura 2, evidenciando o aumento da vida de serviço de um pavimento em função do aumento do espaçamento entre trincas. Por exemplo, vida de um pavimento poderia passar de 15 para 20 anos se o espaçamento entre trincas passasse de 5 para 20 metros.

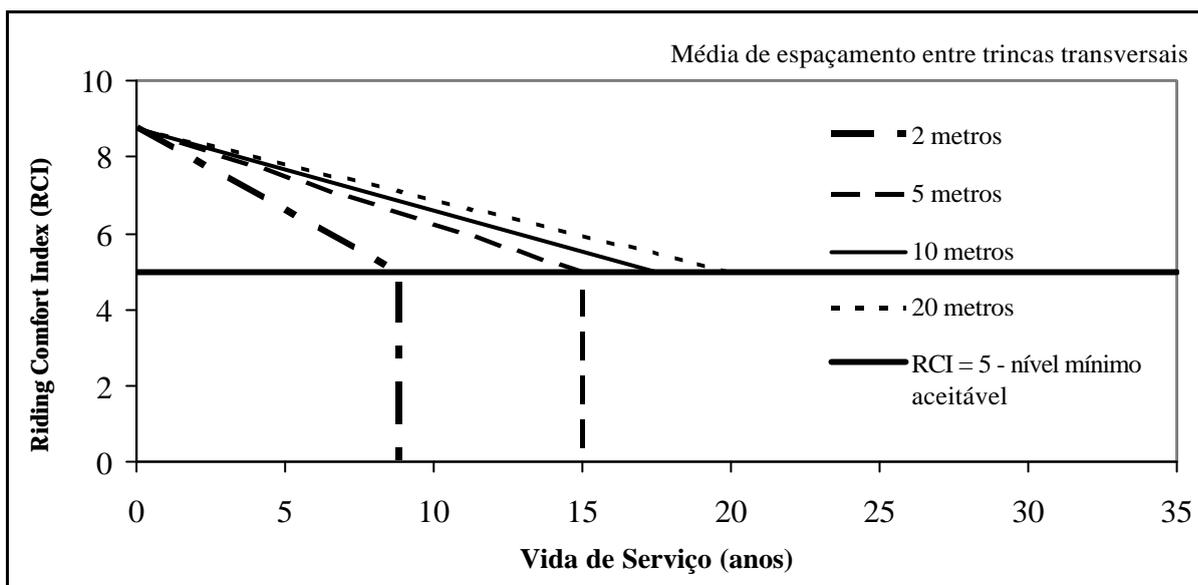


Figura 2: Influência do trincamento na vida do pavimento

A perda de impermeabilidade é uma das conseqüências negativas do surgimento de fissuras no pavimento, fazendo com que as águas pluviais penetrem em sua estrutura, podendo este fator ser tão importante no que se refere à durabilidade desse pavimento, principalmente em regiões de elevada pluviometria. (Maroni e Montez, 1995)

No rol das medidas recuperação das estradas, e a mais convencional no meio rodoviário, são as aplicações de uma nova camada de concreto asfáltico sobre o pavimento trincado. Contudo, o desempenho do pavimento recapeado pode ser fortemente comprometido pela deterioração do pavimento subjacente.

De acordo com Dempsey (2002), muitas vezes, medidas de restauração executadas por meio de recapeamentos simples podem apresentar vidas de serviço extremamente curtas, por não resistirem aos movimentos das camadas subjacentes, causando trincamento prematuro da camada de recapeamento, devido à propagação das trincas da camada do pavimento existente. A reflexão de trincas em recapeamentos de concreto asfáltico não somente permite que a água percole para dentro da estrutura do pavimento e danifique a sub-base, mas também contribui para a rápida deterioração do pavimento.

Segundo Monismith & Coetzee (1980) o processo de reflexão de trincas se dá em dois estágios: crescimento contínuo da trinca no interior do recapeamento como um efeito direto da concentração de tensões das trincas do pavimento existente e, como um efeito indireto da

trinca do pavimento existente, a ocorrência da deflexão máxima sobre a trinca (sob a carga de roda), fazendo este local o mais propício para o início do desenvolvimento da trinca.

Rodrigues (1991) considera o fenômeno de reflexão de trincas como um processo normal de trincamento por fadiga, no qual ocorre um crescimento na interligação das microfissuras da massa asfáltica, devido à repetição dos ciclos de carga em uma região enfraquecida.

Assim como Monismith & Coetzee (1980), Rodrigues (1991) também afirma que a região trincada, sobre a qual é executado um recapeamento, é considerada como um ponto de fragilidade da estrutura, além de ser o local de solitação máxima (onde é verificada a deflexão máxima sob uma carga de roda), sendo propícia para o surgimento de trincas. Essa deflexão máxima pode ser explicada pela perda de rigidez na área trincada, fazendo com que as tensões máximas de tração sob o reforço ocorram neste ponto.

As extremidades das trincas do revestimento antigo são pontos de concentração de tensões, favorecendo o surgimento de uma nova trinca na camada de reforço, principalmente se houver uma boa ligação entre esta nova camada e o pavimento existente.

No estudo da evolução tecnológica do uso de geotêxtil não-tecido na América do Sul, Maroni e Montez (1995) relatam que a dissipação de tensões nas extremidades das trincas faz com que as fissuras nas extremidades das mesmas tendam a movimentar-se, por efeitos térmicos ou de tráfego, devido à alta concentração de tensões nesses locais, os quais se transmitem para o recapeamento, induzindo o fenômeno de reflexão de trincas.

Segundo Monismith & Coetzee (1980), além das cargas do tráfego, as quais são combinações dos movimentos do tipo Modos I e II, e eventualmente o Modo III, quando a trinca não é normal ao sentido das cargas do tráfego, os efeitos térmicos também contribuem para a reflexão de trincas. Os deslocamentos nas superfícies da trinca, gerados por variações térmicas, normalmente são do Modo I, porque as tensões geradas são normais ao plano da trinca.

Em geral, os movimentos causadores da reflexão de trincas são os deslocamentos verticais diferenciais entre as paredes de uma trinca na passagem da carga de roda, ocorrendo deformações cisalhantes na camada de recapeamento, e os movimentos horizontais de abertura e fechamento da trinca devido aos ciclos térmicos, ou a expansão e retração do solo do subleito, sob variações de umidade.

De acordo com Kim *et al.* (2002), o mecanismo de reflexão de trincas é uma mistura dos Modos I e II de fratura. Ao ser aplicada uma carga de roda sobre um pavimento, tensões de tração são criadas no fundo da camada asfáltica (Modo I), gerando também uma tensão cisalhante na direção perpendicular à face inferior desta camada, quando a carga se movimenta através da trinca (Modo II). Este último movimento é acompanhado de retrações em função de baixas temperaturas.

Independentes dos agentes externos causadores do surgimento de trincas na camada de restauração (tráfego, clima e umidade), elas estão associadas à resistência insuficiente do concreto asfáltico ou à falta de ductilidade do material para suportar as tensões de tração e/ou cisalhamento. Nesses processos pode ocorrer que as tensões de tração ou de cisalhamento geradas superam as tensões admissíveis dos revestimentos asfálticos (Rodrigues, 1991).

Diversas observações em seções experimentais mostram que a interface entre o pavimento danificado e o recapeamento é o melhor local para se adotar uma medida a fim de reduzir ou eliminar o processo de reflexão de trincas. Isto porque a interface é o local onde ocorre a máxima energia distorcional, explicando, assim, o uso de camadas intermediárias. A energia de distorção fornece uma medida de deformação plástica, resultando em uma elevada concentração de tensões na extremidade da trinca (Rodrigues, 1991).

Para a escolha da intervenção a ser feita, é importante conhecer os mecanismos básicos de sistemas anti-reflexão de trincas: desligamento localizado ou absorção de tensões. Segundo o autor, o mecanismo de desligamento localizado é quando ocorre a desconexão entre o pavimento existente e a camada intermediária, somente nas extremidades da trinca, levando a um redirecionamento e ela passa a se propagar na direção horizontal. É recomendado o uso de uma camada de intermediária com função estrutural, a qual suportaria as deformações plásticas induzidas sem a ocorrência de ruptura. A redução na reflexão da trinca é explicada pelo fato de que a energia que seria gasta para a reflexão é dissipada para produzir o desligamento localizado entre as camadas, reduzindo o fornecimento de energia para originar uma trinca de reflexão.

O mecanismo de absorção de tensões atua como armazenador de níveis elevados de energia distorcional, induzidos pela ação do tráfego nas extremidades das trincas do pavimento existente. Para isso ocorrer, devem ser utilizados materiais que suportem elevadas deformações sob carga sem romper, como asfaltos modificados por polímeros ou borracha.

2.3 ASFALTOS MODIFICADOS POR POLÍMEROS

O termo polímero foi criado por Berzelius, em 1832, para designar compostos de pesos moleculares múltiplos, pois o termo isômero já era utilizado para designar compostos de mesmo peso molecular. Atualmente, são considerados polímeros as moléculas relativamente grandes, em cuja estrutura se encontram repetidas unidades químicas simples. Na Europa e Estados Unidos estuda-se utilização desses materiais, em pavimentação rodoviária, desde a década de 70 (DNER, 1998).

Para fins didáticos na área de pavimentação os polímeros podem ser divididos em quatro grupos distintos (DNER, 1998):

- Termorrígidos: são polímeros que endurecem quando aquecidos e não amolecem mais quando reaquecidos;
- Termoplásticos: são aqueles que, quando aquecidos amolecem, e quando resfriados, endurecem em um processo reversível;
- Elastômeros: suas propriedades térmicas são semelhantes à borracha, na qual há uma decomposição do polímero antes de amolecer;
- Elastômeros-termoplásticos: quando aquecidos têm comportamento termoplástico, mas a temperaturas mais baixas, apresentam propriedades elásticas.

Os polímeros Estireno Butadieno Estireno (SBS), do grupo dos elastômeros termoplásticos, são macromoléculas constituídas de uma seqüência de butadieno na qual, suas extremidades são compostas de seqüências de estirenos, formando moléculas de distribuição espacial bastante volumosa. A cadeia de estirenos é a parte do polímero que lhe confere alta resistência mecânica, já as seqüências butadiênicas são as responsáveis pela devada elasticidade do material, por isso são chamadas de “molas butadiênicas”. Em condições de carregamento, essas molas se esticam e, no descarregamento, elas se renovam, comprovando assim o comportamento elástico do polímero SBS.

Podem-se citar como objetivos da adição de polímeros nos asfaltos para melhorar as seguintes características:

- Aumento da temperatura de amolecimento e viscosidade;
- Redução da suscetibilidade térmica da mistura de concreto asfáltico;
- Maior durabilidade;
- Redução da variação do módulo de rigidez em função da temperatura;
- Obtenção de módulos elásticos que atendam as condições as quais são submetidas.

É sabido que o CAP apresenta propriedades plásticas quando submetido a um grande número de ciclos de carga, os quais podem gerar as deformações por fadiga. Quando adicionamos polímeros SBS, do tipo elastômero-termorrígido, molas da estrutura SBS são incorporadas no CAP, proporcionando uma melhor estabilidade na mistura, lhe conferindo propriedades diferentes do CAP puro, tais como resistência mecânica adequada e recuperação elástica da estrutura.

Um estudo realizado na Coreia, com vários tipos de aditivos para cimentos asfálticos, mostrou que a incorporação do polímero SBS pode aumentar as estimativas da vida de fadiga em 2,5 a 4 vezes, tendo um alto efeito no retardo da reflexão de trincas. Para este estudo foram elaborados modelos teóricos de previsão da vida de fadiga em relação à reflexão de trincas, que apresentam coeficientes de determinação de 0,93 para misturas asfálticas modificadas por SBS (Kim *et al.*, 2002).

Outra característica importante do CAP é sua alta sensibilidade às variações de temperatura, ou seja, quando submetido a baixas temperaturas, o CAP se torna rígido e quebradiço, sujeito a trincas e, em altas temperaturas, amolece e flui, dando origem a deformações plásticas, consideradas nocivas ao pavimento.

Com as variações térmicas, ocorre uma mudança no CAP, ou seja, ele pode passar de um sistema coeso (organizado) a temperaturas mais baixas, para um sistema de maior entropia (desorganizado), à medida que se elevam as temperaturas.

Nas temperaturas abaixo do Ponto de Ruptura Fraass, a parte oleosa intermicelar do CAP (maltenos) se torna sólida, tendo um comportamento elástico, com ruptura frágil. Acima da temperatura do Ponto de Amolecimento, temos um sistema com comportamento viscoso, o

qual a entropia é mais forte que a coesão e, a parte sólida do CAP (asfaltenos), fica totalmente livre no meio oleoso (maltenos).

De acordo com Leite (1999), há cerca de trinta anos verificou-se que a adição de polímeros nos ligantes asfálticos proporciona misturas de melhor qualidade, principalmente no que se refere à suscetibilidade térmica, ou seja, maior resistência à fratura a baixas temperaturas e ao escoamento a temperaturas elevadas.

O SBS proporciona à mistura um comportamento elástico a temperaturas bem mais baixas que o CAP convencional, evitando o trincamento nessas condições. Isso é evidenciado pela diminuição expressiva do Ponto de Ruptura Fraass (DNER, 1998).

Já, em locais onde as temperaturas são elevadas, o SBS forma uma malha que envolve o ligante fluido, na qual a consequência é um aumento no Ponto de Amolecimento do CAP.

O intervalo entre o Ponto de Ruptura Fraass e o Ponto de Amolecimento é caracterizado, na maioria das condições, por um comportamento puramente plástico, sendo assim, denominado de Intervalo de Plasticidade.

A adição do SBS no CAP proporciona uma maior dureza na mistura, aumentando seu Ponto de Amolecimento. Isso se dá porque o equilíbrio coloidal existente é alterado, sendo assim, os estirenos rígidos e volumosos concorrem com a parte sólida do CAP (asfaltenos) na absorção da parte oleosa do CAP (maltenos).

A pesquisa realizada pelo DNER (1998) sobre asfaltos modificados por polímeros, mostrou que o Ponto de Amolecimento do CAP-20 puro ficou em torno de 50°C e, com a adição de 4% de SBS, esse valor aumentou para uma faixa de 60 a 68°C. Aumentando o teor de polímero para 7%, o Ponto de Amolecimento ultrapassou os 80°C. O Ponto de Ruptura Fraass, no ensaio do CAP-20 puro, ficou em torno de -9°C, sendo que com a adição de 4% de SBS, a Ruptura Frágil se deu entre -12 e -15°C e, elevando esse teor para 7%, o Ponto Fraass reduziu para -22°C.

Como a suscetibilidade térmica de um material asfáltico é medida pelo intervalo compreendido entre o Ponto Fraass e o Ponto de Amolecimento, fica evidente essa melhoria, a qual vemos esse intervalo aumentado com a adição do SBS no CAP.

De todas as alterações ocorridas nos ligantes asfálticos, observadas através de resultados de ensaios físicos, a que indica mais claramente a presença do polímero SBS no asfalto é a forte recuperação elástica proporcionada à mistura, e que ajuda a dar uma aproximação do teor de polímero a ser adicionado na composição CAP + SBS.

A homogeneidade da mistura é um dos fatores importantes a ser considerada, pois a distribuição do SBS deve ser a mais uniforme possível para que todos os pontos do ligante respondam igualmente frente às solicitações.

Um teor insuficiente de SBS na mistura não proporciona um engajamento adequado da parte estirênica do polímero, fazendo com que o ganho de resistência não seja o desejado. Além disso, a quantidade de molas butadiênicas também é reduzida, não se alcançando o ganho elástico esperado. Normalmente, esses teores ficam na faixa de 4 a 6%.

A estabilidade também se faz importante, pois tem que se garantir que o ligante mantenha suas propriedades, e sua estrutura fique menos alterada possível, ao longo da vida de serviço do pavimento, resistindo tanto às intempéries quanto a ação do tráfego.

O sistema CAP-SBS, quando colocado em depósitos aquecidos por um longo período de tempo, tende a separar o CAP do polímero por diferença de densidade, onde o SBS tende a ficar no topo. Para evitar essa separação, os tonéis de armazenamento devem prover de um sistema de circulação do material para a homogeneização do material.

O controle dessa homogeneização é feito pelo Ensaio de Sedimentação, no qual é colocado 1 litro da mistura CAP-SBS em uma proveta e armazenado durante 5 dias, em estufa a 163°C. Depois, são coletadas amostras do topo e do fundo da proveta para a realização dos ensaios de caracterização.

A adição de polímeros aos ligantes asfálticos proporcionou, a partir da década de 80, a inclusão de novas alternativas de revestimento no mercado rodoviário, dentre elas: camadas delgadas de concreto asfáltico (espessuras entre 2 e 4cm) altamente duráveis e microrrevestimentos (1,5cm); SMA (Stone Matrix Asphalt), que são misturas com agregados de composição granulométrica descontínua; camada porosa de atrito; camadas impermeabilizantes e membranas anti-reflexão de trincas (Leite, 1999).

2.4 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS DE ALTO DESEMPENHO

A forma mais explorada do uso da emulsão asfáltica reside nos tratamentos superficiais, porém, após o rompimento da emulsão, ela pode apresentar propriedades não satisfatórias em relação à aderência entre ligante e agregado. Por ser um processo a frio, a película formada no entorno dos materiais pétreos é delgada e com pouca elasticidade, podendo originar trincas e desagregações no revestimento.

Segundo Ksaibati *et al.* (1996), embora a execução de um tratamento superficial seja relativamente simples, alguns problemas podem ocorrer causando a imperfeição da superfície. Os três problemas mais comuns na execução de um tratamento superficial são:

- Formação de faixas de concentração de ligante asfáltico, devido aos bicos da barra de aplicação estarem desajustados;
- Taxa de ligante asfáltico insuficiente, resultante de distribuidores impróprios de asfalto, má avaliação da superfície que receberá o tratamento superficial ou utilização de agregados altamente porosos que absorvam excessivamente o ligante;
- Perda excessiva de agregados. Isso pode ocorrer por diversos fatores, tais como: a taxa de agregado é aplicada em excesso; sua distribuição sobre o ligante é demorada; o agregado contém pó ou impurezas; a compactação não é realizada imediatamente depois de sua distribuição; taxa de ligante é insuficiente; o tráfego não é controlado logo após da aplicação.

Ksaibati *et al.* (1996) avaliaram os procedimentos utilizados nos Estados Unidos na execução do tratamento superficial, envolvendo uma grande parte dos Departamentos de Transportes, concluindo que a expectativa média do aumento da vida de serviço é de 6 anos, dependendo do envelhecimento e condições da estrutura do pavimento existente.

Muitos Departamentos Rodoviários dos Estados Unidos especificam em projetos de tratamentos superficiais o uso de ligantes modificados por polímeros para sanar os problemas com arrancamento de agregados. No Brasil, com a finalidade de melhorar o ligante asfáltico nesses aspectos, diversos aditivos vêm sendo empregados, sendo os materiais poliméricos os mais utilizados (DNER, 1998).

A utilização de tratamento superficial associada a emulsões asfálticas de alto desempenho (adição de polímero), em camadas de rolamento, tira proveito da alta elasticidade e adesividade do polímero, fazendo com que os agregados fiquem fortemente ligados ao ligante, evitando o arrancamento dos mesmos.

Tradicionalmente, os tratamentos superficiais estão associados a rodovias de baixo volume de tráfego devido a problemas como arrancamento dos agregados da superfície e, conseqüentemente, baixa vida útil do pavimento. São utilizados tanto como camadas de revestimento sobre bases granulares, como camadas de restauração de pavimentos, em espessuras inferiores a 2,5 mm, desde que o pavimento não esteja comprometido estruturalmente.

Com o advento da tecnologia, muitos avanços foram realizados em termos de tratamento superficial. A adição de polímeros nos ligantes proporcionou a execução de tratamentos superficiais que prolongam a vida útil desses pavimentos em até 7 anos, com alta relação custo-benefício, alta qualidade e alto coeficiente de atrito (ABEDA, 2001)

As principais funções do tratamento superficial são:

- Criar uma nova superfície de rolamento e desgaste;
- Selar pequenas trincas, com o intuito de evitar a reflexão das mesmas e, conseqüentemente, a entrada d'água na estrutura do pavimento;
- Aumentar a resistência à derrapagem entre o pneu e o pavimento, proporcionando segurança ao usuário;
- Reduzir os efeitos do intemperismo, protegendo a camada de CBUQ existente, evitando a oxidação do ligante utilizado no CBUQ;
- Melhorar a aparência superficial de rolamento;

Os benefícios estruturais não são diretos, mas o incremento estrutural se dá por efeitos marginais tais como: redução da taxa de deterioração em função da selagem das trincas e a prevenção de penetração de água na camada de base. Essas melhorias podem retardar e até evitar uma intervenção estrutural.

Além das funções já citadas, os tratamentos superficiais podem oferecer elevada capacidade de drenagem superficial, expressiva resistência à derrapagem, redução do "spray" e incremento da eficiência da sinalização.

As novas tecnologias na elaboração das emulsões asfálticas, como a adição de polímeros, aliadas ao aperfeiçoamento das técnicas construtivas elimina grande parte dos problemas referentes à utilização dos tratamentos superficiais, resgatando uma técnica eficaz na restauração de rodovias. Dessa maneira, os tratamentos superficiais de alto desempenho são uma alternativa de boa relação custo-benefício, alta resistência à derrapagem, grande durabilidade e que podem ser utilizadas na restauração de rodovias de alto e médio volume de tráfego (Liberatori, 2003).

Os principais tipos de tratamentos superficiais executados são:

- Espalhamento alternado de emulsão asfáltica e agregados (tratamento superficial por penetração e tratamento anti-pó);
- Aplicação desses componentes por misturas pré-dosadas (lama asfáltica e micro-revestimento asfáltico).

Para um bom desempenho do tratamento superficial por penetração, o ligante asfáltico deve ser preferencialmente a emulsão asfáltica catiônica ou ainda, modificada por polímeros. Deve ser aplicada a temperatura ambiente acima de 10°C e aquecida à temperatura entre 50° a 70°C, a fim de atender a faixa de viscosidade de aplicação, a qual pode ser aplicada em superfícies úmidas.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Os trabalhos experimentais desta pesquisa foram realizados na Área de Testes de Pavimentos DAER/UFRGS através de uma parceria estabelecida entre a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a empresa BetunelKoch e o Consorcio UniVias.

O estudo do desempenho de recapeamento asfálticos, quanto à reflexão de trincas, fez-se através da utilização da técnica de ensaios acelerados. A degradação do pavimento foi possibilitada pela atuação do trem de cargas do simulador de tráfego DAER-UFRGS, em escala real.

Iniciou-se a pesquisa com o objetivo geral de comparar o desempenho de dois tipos de recapeamentos asfálticos, principalmente no que se refere ao fenômeno de reflexão de trincas. Estudaram-se dois tipos de recapeamentos asfálticos: camada delgada em concreto asfáltico convencional (3 cm de espessura) e tratamento superficial duplo, modificado por polímero SBS, produzido pela empresa BetunelKoch, de nome comercial Macroplus - tratamento superficial de alto desempenho, que serão detalhados no Capítulo 4.

Para possibilitar a comparação, tentou-se estabelecer as mesmas condições iniciais de estrutura do pavimento nas duas faixas recapeadas. No entanto, não foi possível estabelecer um caráter comparativo nesta pesquisa por diversos fatores que envolveram, entre outros motivos, o fato de serem ensaiados em diferentes épocas do ano, ou seja, as condições de temperatura e pluviometria desiguais. Estruturalmente, as duas faixas não partiram das mesmas condições antes da execução dos recapeamentos asfáltico, verificadas pelos valores iniciais de deflexão.

O comportamento da estrutura do pavimento foi avaliado através de registros de parâmetros que proporcionem a quantificação dos danos causados pela ação do tráfego combinado às condições ambientais.

Neste capítulo serão apresentados detalhes do simulador de tráfego, os parâmetros analisados e os ensaios para a obtenção dos resultados de:

- Parâmetros de resposta estrutural;

- Parâmetros de comportamento;
- Parâmetros de textura superficial;
- Parâmetros ambientais.

3.1 ENSAIOS ACELERADOS

A técnica de ensaios acelerados foi utilizada pela primeira vez no início do século, em 1912, quando foi construída a Teddington Testing Machine, no National Physical Laboratory do Reino Unido. Relatado por Núñez (1997), este precursor dos simuladores de tráfego possuía oito braços radiais, com rodas em suas extremidades, que aplicavam cargas de até 13kN. O equipamento possibilitava a aplicação de 80.000 passadas em 24 horas, com trajetórias circulares.

Segundo o autor, pesquisadores de diversos países consideram os ensaios em verdadeira grandeza o elo de ligação entre os ensaios de laboratório e os ensaios realizados em rodovias reais. Enquanto os ensaios de laboratório se afastam das condições de carregamento e das características da estrutura e, os ensaios em rodovias, demandam um tempo longo para a obtenção de resultados, os ensaios acelerados reduzem o tempo de experimento, permitem a análise de diversos fenômenos relativos ao tráfego, além de possibilitar a extrapolação dos resultados.

Os ensaios acelerados são ferramentas eficazes na previsão de desempenho de pavimentos porém, deve-se ressaltar que a velocidade do carregamento dinâmico imposto por grande parte dos simuladores de tráfego é menor que as velocidades reais de tráfego.

Um estudo publicado no *Journal of Transportation Engineering*, sobre o efeito da distribuição de pressões de contato nos parâmetros de respostas do pavimento, verificou que a magnitude das deformações, no fundo da camada asfáltica e deformações no topo da camada de subleito, para pavimentos revestidos de 15 e 25cm de concreto asfáltico, são afetados com um decréscimo em mais de 25%, nos dois casos, quando a velocidade veicular aumenta de 5 para 110 km/h. O artigo relata também estudos feitos na década de 50, pela *Western Association of State Highway Officials*, constatando a redução no nível de deflexões do pavimento com o aumento da velocidade (Siddharthan *et al.*, 2002).

O simulador de tráfego DAER/UFRGS, mostrado na Figura 3, foi projetado pelo Grupo de Projeto Mecânico e Automação Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, inspirado no equipamento *Accelerated Loading Facility* de origem australiana, e construído entre 1992 e 1994, pelo DAER/RS. O equipamento, foi utilizado pela primeira vez em maio de 1996, no trabalho de doutorado de Núñez. Neste trabalho foram estudadas as viabilidades do uso de basaltos alterados, provenientes de jazidas do RS, como materiais de pavimentação em rodovias de baixo volume de tráfego. No período de seus experimentos foram aplicados mais de 237 mil ciclos de carga de eixo, com magnitudes entre 82 e 130kN, em 5 pistas experimentais.



Figura 3: Simulador de Tráfego DAER/UFRGS

As dimensões do simulador são de 15 metros de comprimento, 2,5 metros de largura e 4,3 metros de altura, aproximadamente, e apresenta as seguintes características:

- Curso de atuação da carga do pavimento: 8 metros;
- Curso de aceleração e desaceleração: 3 metros;
- Carga sobre o pavimento: regulável de 0 a 65 kN;

- Princípio de aplicação de carga: hidráulico;
- Aplicação de carga: linear, único sentido, não tracionada;
- Sistema de rodado: simples ou duplo, articulado, regulável;
- Velocidade de deslocamento: 6 km/h;
- Princípio de acionamento geral: elétrico.

Através deste equipamento, podem ser realizados ciclos de carga em um espaçamento de tempo compreendido entre 16 e 18 segundos, possibilitando a aplicação de 225 ou 200 ciclos de carga por hora de aplicação.

O deslocamento longitudinal do trem de cargas é acompanhado de um deslocamento transversal, de tal forma que se forme uma trilha de roda com largura pré-estabelecida. Para este trabalho escolheu-se um trilha de 70 cm. A cada passada do simulador, ocorre um deslocamento de 0,65 cm no sentido transversal.

Com a utilização de simuladores de tráfego é possível acelerar os danos causados em uma rodovia, submetida a um volume médio de tráfego durante toda sua vida de serviço, em alguns meses de operação. De acordo com o *US Corps of Engineers*, o tempo que o simulador leva para aplicar o equivalente a 10^6 ciclos de carga de eixo padrão, variando-se a carga de eixo, está mostrado na Tabela 2 (Núñez 1997).

Tabela 2: Tempo de operação do simulador para simular 10^6 cargas de eixo padrão

Tempo para aplicação de 10^6 ciclos	Carga de eixo aplicada pelo simulador (kN)		
	82	100	130
Em horas	4.444	1.259	253
Em dias	400	113	23

Para o início do tráfego nas faixas de recapeamento, executou-se a calibração da carga imposta pelo sistema hidráulico do simulador. Para a obtenção da curva de calibração realizaram-se baterias de leituras em dois ciclos de carregamento e descarregamento, registrando-se as respostas no manômetro do simulador e em uma célula de pressão instalada

sob o eixo do rodado. As curvas mostradas nas Figuras 4 e 5 foram obtidas pelas médias dos valores durante os carregamentos e descarregamentos, desconsiderando os efeitos de histerese, com pressão de inflação dos pneus de 0,62 MPa (90 psi), a qual foi utilizada durante a aplicação de cargas dinâmicas nas faixas recapeadas.

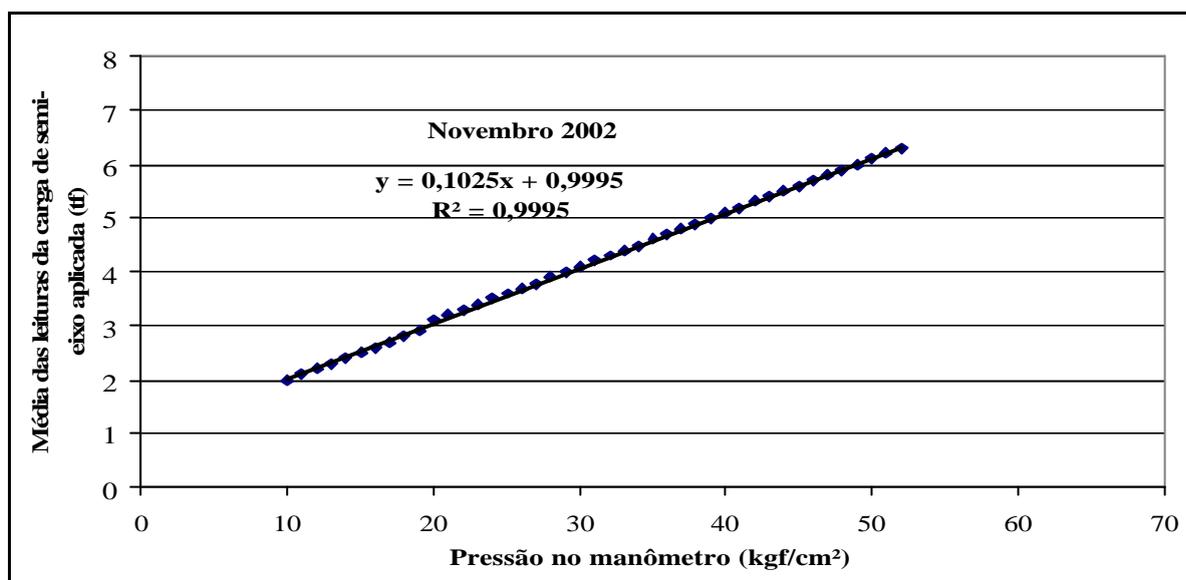


Figura 4: Curva de calibração do simulador - tratamento superficial

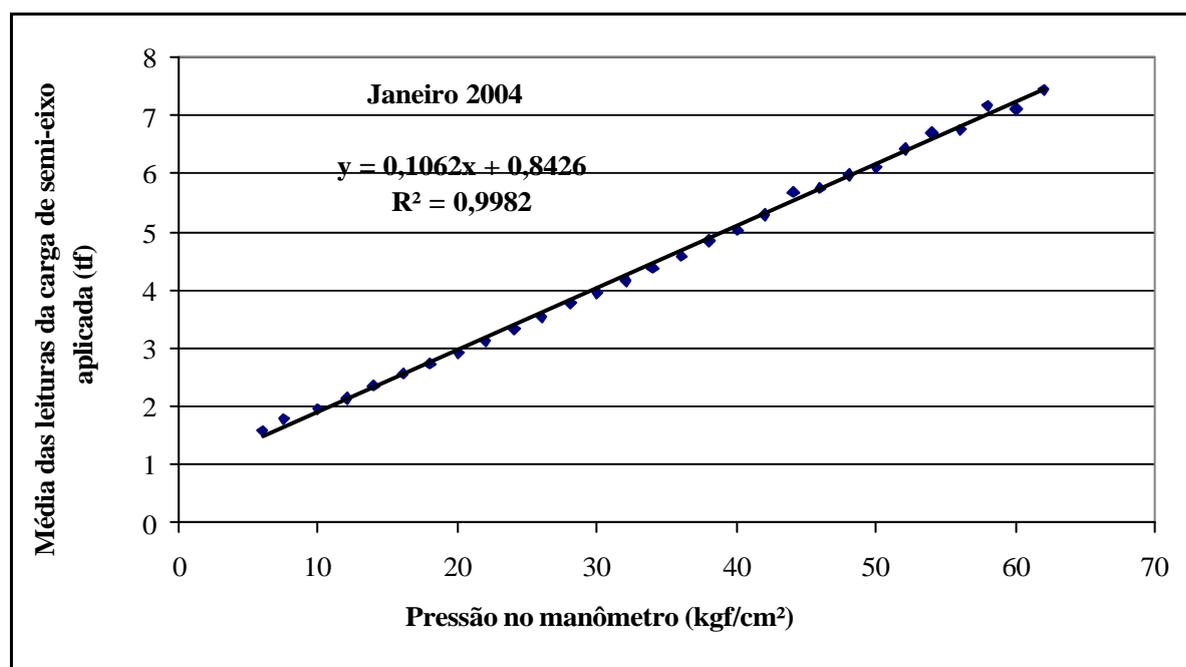


Figura 5: Curva de calibração do simulador – concreto asfáltico

3.2 CARACTERÍSTICAS DA PISTA EXPERIMENTAL

As dimensões da pista experimental são de 16,2 m de comprimento por 3,20 m de largura, dividida em duas faixas longitudinais, onde foram aplicados os dois recapamentos. Para cada faixa foram determinadas sete áreas retangulares de estudo de 1,20m x 0,80m, sendo que em 4 áreas foram executadas trincas, buscando reproduzir efeitos similares àqueles provocados pelo fenômeno de fadiga, conforme mostra a Figura 6. Em geral, os ensaios foram realizados em 6 seções transversais, coincidindo com o eixo das áreas trincadas e não trincadas.

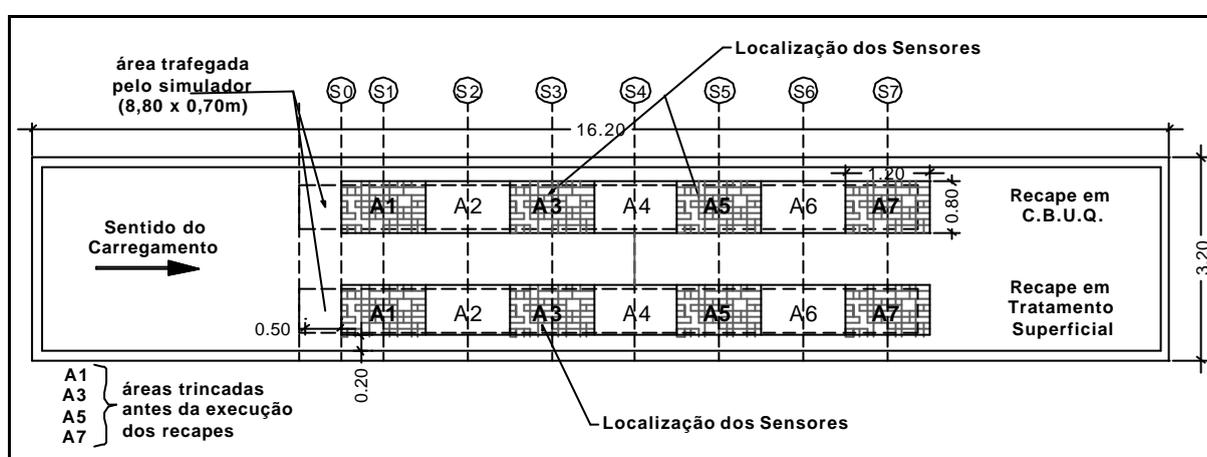


Figura 6: Croqui da pista experimental

3.3 ESTRUTURA DO PAVIMENTO EXISTENTE

A pista experimental utilizada para representar um pavimento degradado foi executada em setembro de 2000, no trabalho de doutorado de Gonçalves (2002), denominada “Pista 1”.

Durante sua execução, foi incluído um sistema de drenagem constituído de valas com 1,0m de largura por 1,5m de profundidade, em brita graduada, encapsuladas por manta geotêxtil, para evitar a influência significativa de umidade nas camadas de base e reforço do subleito.

A estrutura do pavimento é composta por base granular de brita graduada com 30cm de espessura, compatível com a classificação Faixa B e Classe A do DAER-RS, compactada em duas camadas de 15cm. O reforço do subleito é constituído de solo argiloso de 60cm. As

principais características do reforço e base foram determinadas pelo Gonçalves (2002) e estão apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Propriedades do solo argiloso utilizado como reforço do subleito

Propriedade	Valor
Fração argilosa	24%
Limite de liquidez	42%
Limite de plasticidade	26%
Índice de plasticidade	16%
Densidade real dos grãos	2,85
Teor ótimo de umidade	22,7%
Peso específico aparente seco máximo	16,3kN/m ³
Classificação MCT	LG'
Classificação USC	CL
Classificação HRB	A-7-6
Índice de Suporte Califórnia máximo	15%
Índice de Suporte Califórnia mínimo	10%
Expansão	0,19%
K (na umidade ótima) modelo $M_R = K\sigma_d^n$	2700
n (na umidade ótima) modelo $M_R = K\sigma_d^n$	-0,56
Módulo de resiliência (retroanálise FWD)	230MPa

Tabela 4: Propriedades da brita graduada utilizada como base

Propriedade	Valor
Teor ótimo de umidade	8,7%
Densidade aparente	2,362
% que passa na peneira n° 200	4,3%
Equivalente de areia	> 50%
Índice de lamelaridade	< 40%
Absorção	1,20%
Diâmetro máximo	3/4”

O revestimento do pavimento existente é em concreto asfáltico modificado por polímero SBS, no teor de 3%. As percentagens da composição dos agregados são de 25% de brita 3/4”, 70% de brita 3/8” e 5% de areia média, enquadrada na faixa granulométrica “tipo B” da especificação 16/91 do DAER. A massa asfáltica possui teor de ligante de 5% e o índice de vazios de 5,3%. O projeto da mistura está resumido na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros Marshall da mistura asfáltica da Pista 1

Parâmetro	Unidade	Projeto	Especificação 16/91 DAER
Massa específica aparente	Kg/m ³	0,0024	Mínimo de 97%
Estabilidade 60°C	kgf	1.205	Mínimo de 800
Índice de vazios	%	5,3	3 – 5
Fluência 60°C	1/100”	9,1	8 – 16
Relação betume vazios	%	67,3	75 - 82
Vazios agregado mineral	%	16,0	> 15

A espessura do revestimento a ser recapeado foi projetada para ter 4,0 cm de espessura, no entanto, após a execução, apresentou espessura média de 5,6cm, verificada pela medição de corpos de prova extraídos para a realização de ensaios de determinação de densidade aparente.

As condições finais da área trafegada na pesquisa de Gonçalves (2002) estão resumidas abaixo:

- Número de ciclos aplicados pelo simulador com carga de eixo equivalente de 82kN: 2×10^5 ;
- Nível final de deflexões com carga de eixo equivalente de 82kN: 62×10^{-2} mm;
- Média das deformações permanentes finais: 7,7mm;
- Densidade final do trincamento: $5,5 \text{m}^2$.

3.4 PARÂMETROS DE RESPOSTA ESTRUTURAL

O acompanhamento das respostas estruturais do pavimento realizou-se através de medições semanais de deflexão em cinco seções transversais do pavimento, além do monitoramento da pista através da instalação de células de tensão total e extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*).

3.4.1 Medidas Deflectométricas

A resposta estrutural do pavimento foi monitorada através de medições deflectométricas, realizadas com a viga Benkelman e viga eletrônica sendo possível o acompanhamento das deflexões do pavimento com a evolução do número de passadas do trem de cargas do simulador, além do acompanhamento em cada seção.

Utilizou-se uma viga eletrônica para o levantamento das bacias deflectométricas, mostrada na Figura 7. Este equipamento só pôde ser utilizado nos ensaios da pista em concreto asfáltico convencional. No período de ensaios na faixa em tratamento superficial, o equipamento

estava em manutenção, possibilitando a medição somente no período final de ensaios nesta faixa.



Figura 7: Viga eletrônica

Os resultados das medidas deflectométricas foram obtidos através da média de 3 leituras em cada seção, para os 3 níveis de carregamento aplicados. Para cada medida de deflexão, mediase a temperatura do revestimento na interface entre o concreto asfáltico e superficial. A Tabela 6 expõe as condições de carregamento para as leituras deflectométricas.

Tabela 6: Carga e Inflação dos Pneus

Carga de eixo aplicada (kN)	Carga por pneu (kN)	Inflação dos pneus (MPa)
82	20,5	0,55 (80 psi)
100	25,0	0,62 (90 psi)
120	30,0	0,69 (100 psi)

Fez-se a correção das medidas de deflexão por meio de um gráfico apresentado no Guia da AASHTO (1993), o qual fornece coeficientes que transformam a deflexão medida para deflexões a temperatura de 20°C. O estudo da AASHTO envolveu uma série de espessuras de

revestimentos asfálticos, com dados de deflexão obtidos na faixa de temperatura da superfície do pavimento entre 0°C e 50°C. A equação para o cálculo da deflexão corrigida foi obtida através de regressão linear dos pontos do gráfico da AASHTO, para cada espessura de camada asfáltica estudada, como mostram as Figuras 8 e 9. Além disso, fez-se um levantamento deflectométrico para tentar uma relação específica para os casos de recapeamentos estudados, como mostra a Figura 10, relacionando os fatores de correção obtidos (D0/D25°C) com a temperatura.

Nessa tentativa, fixou-se um número de passadas do simulador para verificar a influência exclusiva da temperatura no valor da deflexão. Os levantamentos foram feitos na faixa de temperatura de 23 e 37°C, em 3 seções do pavimento recapeado em concreto asfáltico (S3, S4 e S5). Nessa coleta de dados, verificou-se que a média das deflexões, a temperatura de 25°C, foi de 60×10^{-2} mm. Não se conseguiu uma relação consistente devido à dispersão dos dados, corrigindo-se então as deflexões somente pelo gráfico da AASHTO.

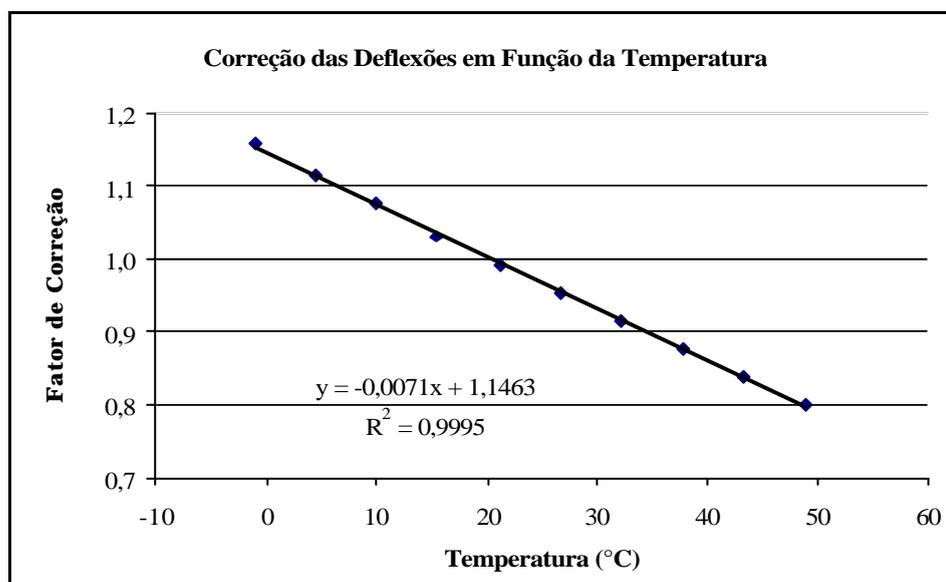


Figura 8: Fatores de correção para o recapeamento em TSD pela AASHTO

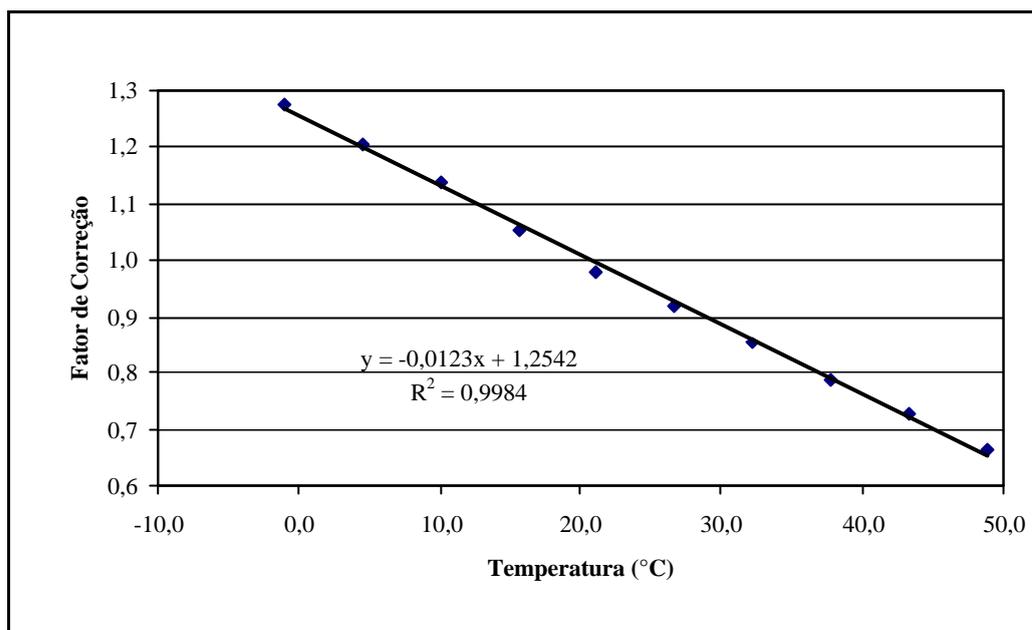


Figura 9: Fatores de correção para o recapeamento em CA pela AASHTO

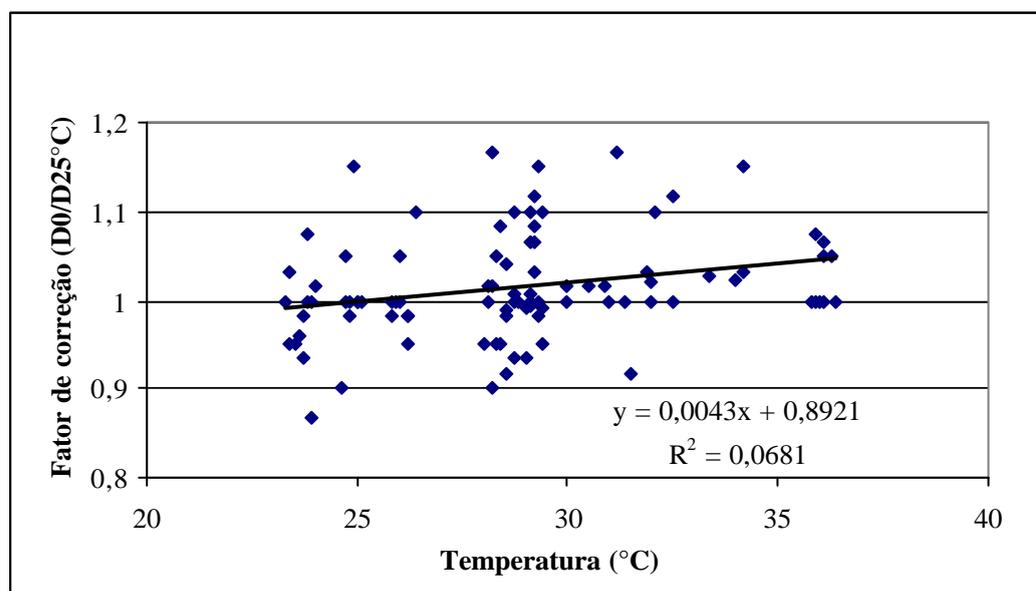


Figura 10: Fatores de correção das deflexões em função da temperatura obtidas em campo

3.4.2 Tensões e Deformações

O registro dos sinais emitidos pelos sensores é feito por um sistema de aquisição de dados, onde estes sinais são digitalizados por um circuito analógico digital. Posteriormente, esses sinais são lidos por um microcomputador e processados por um programa denominado SAD32. Os dados fornecidos pelo programa são gráficos que relacionam o tempo em segundos, com a leitura realizada pelo sensor dada em milivolt. A Figura 11 exemplifica uma leitura realizada no SAD32 mostrando os pulsos de tensão e deformação separados em canais. Os canais 0, 1 e 2 são os registros dos pulsos de deformação e os canais 3 e 4 os pulsos de tensão.

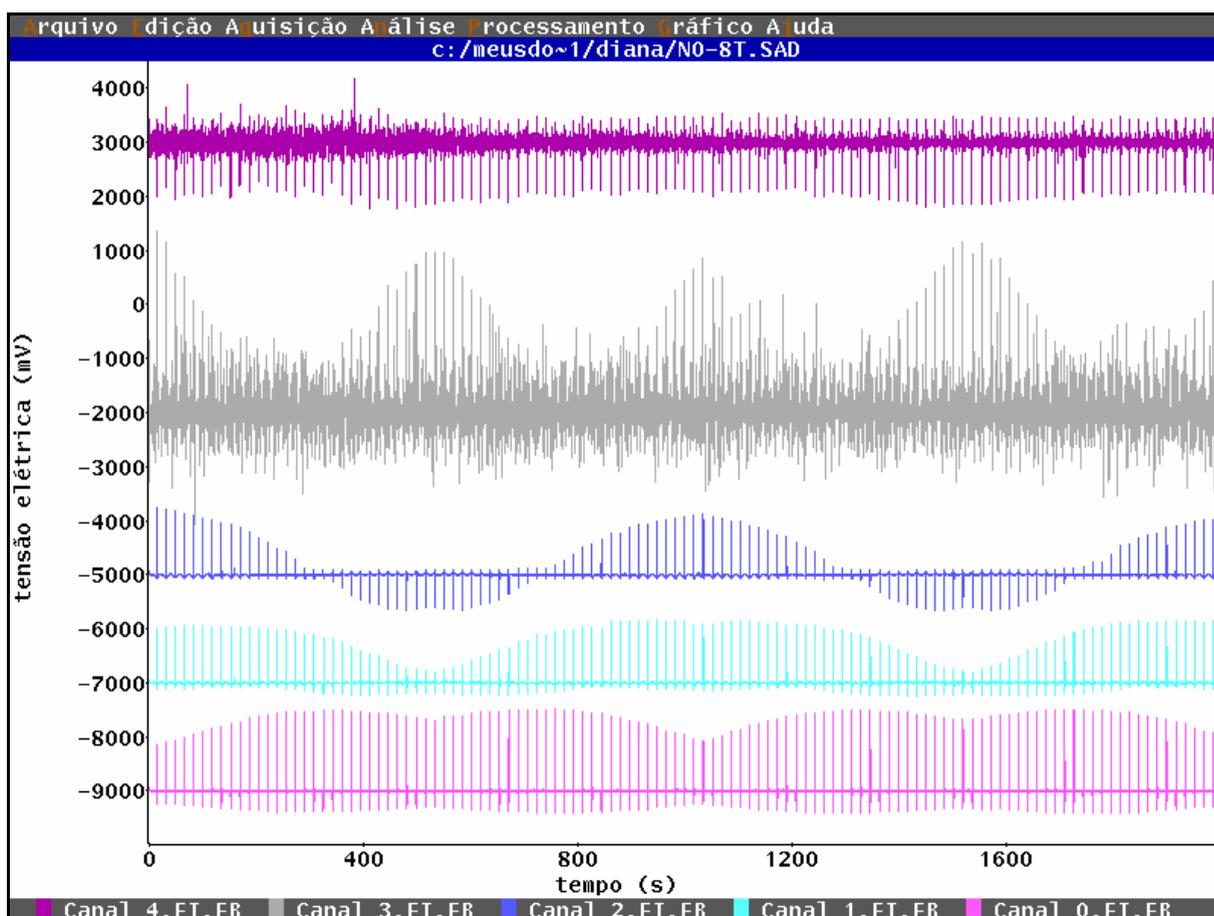


Figura 11: Exemplo de leitura dos sensores - SAD32

O tempo estabelecido para cada leitura dos instrumentos fez-se de tal forma que o rodado do simulador varresse toda a largura da pista. Uma cobertura completa da trilha de roda faz-se

em 33 passadas, aproximadamente 560 segundos. Para a faixa em tratamento superficial, estabeleceu-se 800 segundos para as leituras no sistema de aquisição de dados (SAD). Já no recapeamento em concreto asfáltico convencional estabeleceu-se 2.000 segundos para verificar a repetição dos pulsos formados durante as leituras.

Para não haver a interferência de sinais de alta frequência, oriundos de motores, rádios, telefones celulares, entre outros, os dados, depois de lidos, são tratados com o filtro digital *Butterworth*. Este evita que estas interferências se somem aos sinais emitidos pelos sensores, fornecendo dados incorretos. Um outro filtro - *Ideal* - é utilizado para trazer os sinais para o sistema de referência, já que a leitura dos pulsos é dada em função da diferença de tensão elétrica que o carregamento impõe ao sensor.

De acordo com Gonçalves (2002), os filtros têm a função de retirar as parcelas dos sinais dependentes de efeitos externos ao carregamento imposto pelo simulador.

Para a determinação das tensões atuantes no pavimento durante a passagem dos ciclos de carga, foram instaladas duas células de tensão total em cada recapeamento: uma para ler as tensões horizontais e outra, para ler as tensões verticais.

As células de tensão total instaladas são do tipo diafragma, com um diafragma externo que transmite as tensões do pavimento através de compartimentos preenchidos com fluido, os quais, através de vasos comunicantes, comprimem *strain gages* internos, (Gonçalves, 2002).

As células de tensão total possuem as seguintes características:

- Capacidade de carga: 1,0MPa;
- Diâmetro: 30mm;
- Espessura: 9mm;
- Voltagem de excitação máxima: 6Volts;
- Diâmetro sensível: 27mm.

A forma típica dos pulsos de tensão registrada na passada da carga de roda está mostrada na Figura 12.

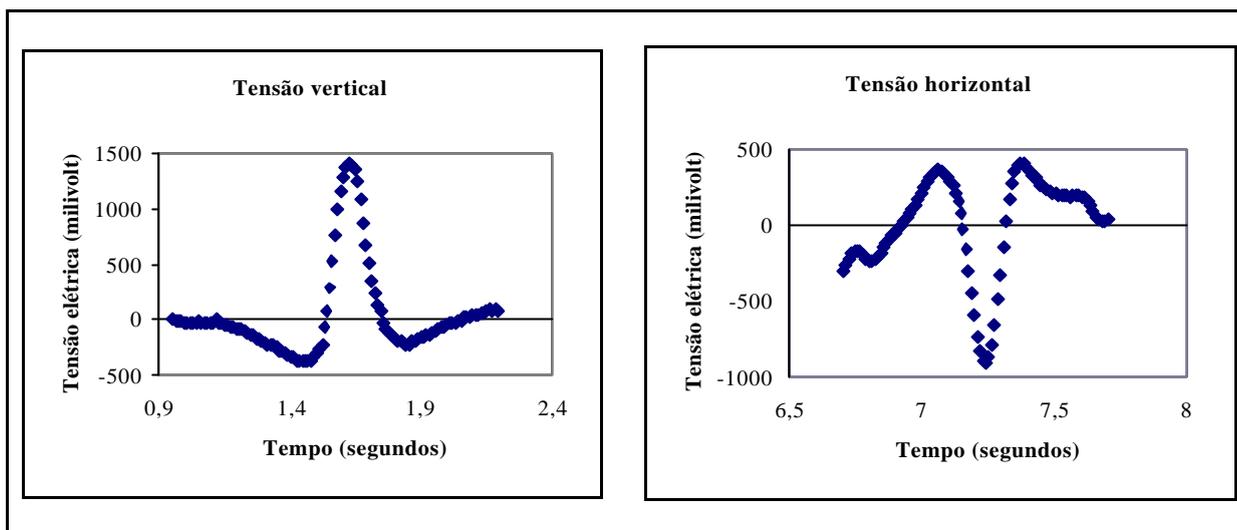


Figura 12: Forma típica dos pulsos de tensão

Os *strain gages* utilizados consistem basicamente de um elemento resistivo, montado sobre uma base de papel ou plástico, cuja propriedade fundamental é a variação de sua resistência com a deformação. Os pulsos típicos de deformação são mostrados na Figura 13.

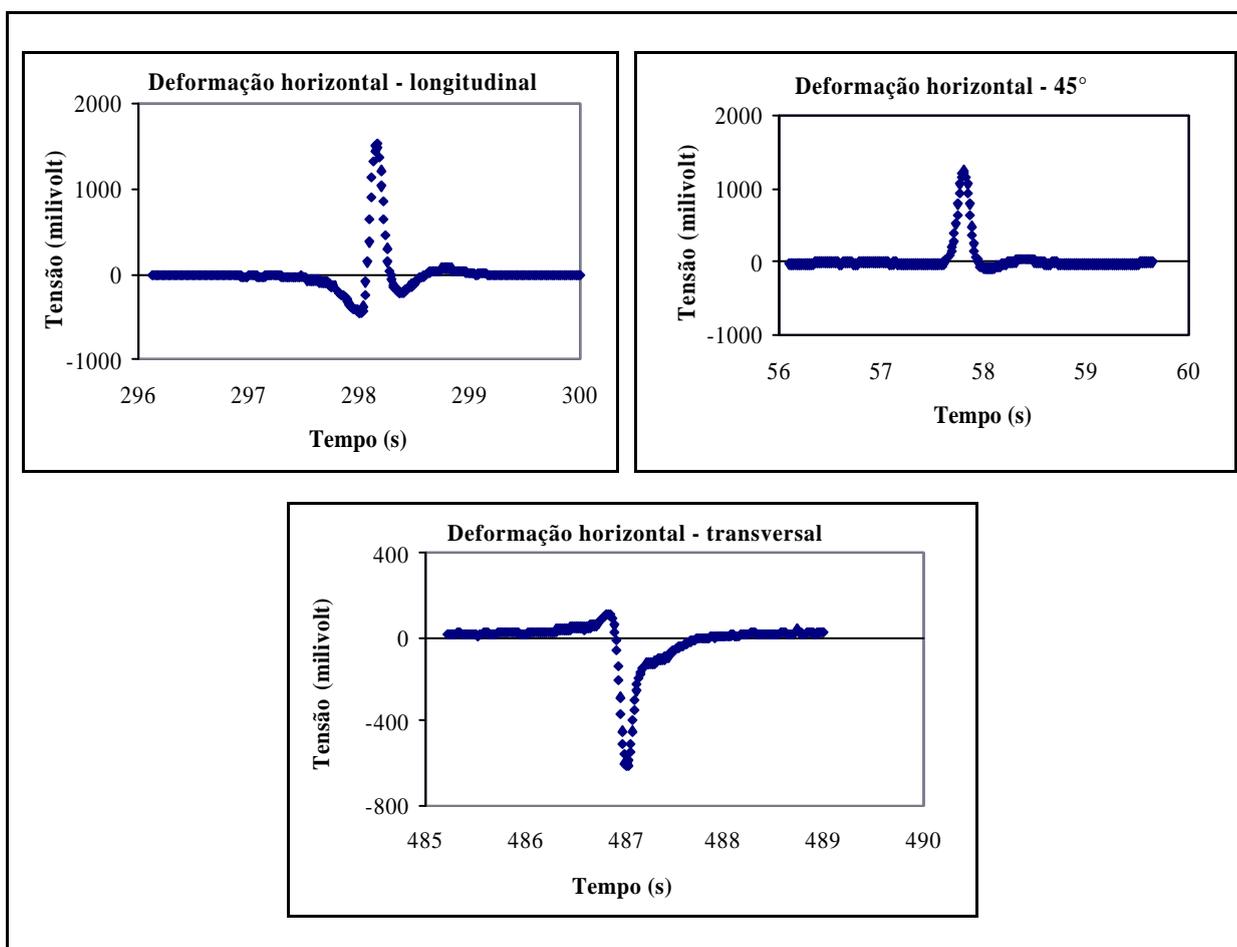


Figura 13: Pulsos típicos dos pulsos de deformação

3.5 PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO

3.5.1 Deformações Permanentes

Acompanhou-se a evolução das deformações permanentes com um transverso-perfilógrafo que fornece medidas dos afundamentos de trilha de roda pela reprodução dos perfis transversais da pista em um papel milimetrado. Na direção horizontal, as medidas são desenhadas em escala 1:20 e, na direção vertical, em verdadeira grandeza. O equipamento está mostrado na Figura 14.



Figura 14: Transverso-perfilógrafo

3.5.2 Trincamento

Analisou-se o trincamento pela inspeção visual realizada semanalmente e, para facilitar a visualização do surgimento e evolução do trincamento, as trincas foram pintadas com tinta

spray, sendo que cada cor representa um número de ciclos de carga aplicados pelo simulador, como mostra a Figura 15.

A cada inspeção, as trincas foram desenhadas em papel milimetrado, com o auxílio de uma grade metálica de 1,0 x 1,0m, subdividida em quadrados de 10cm de lado, colocada sobre o revestimento trincado, facilitando a transposição dos levantamentos para o papel.

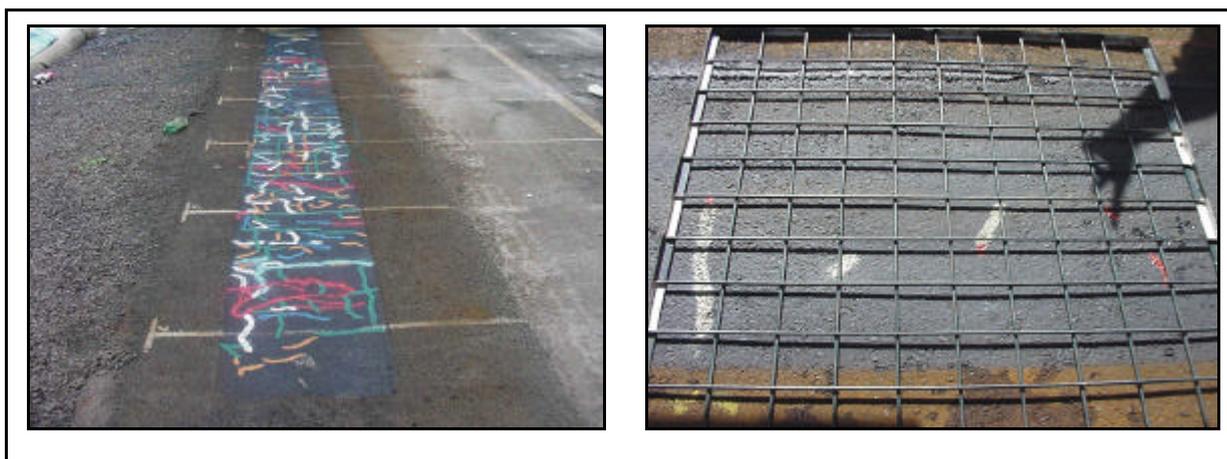


Figura 15: Controle da evolução do trincamento

3.6 PARÂMETROS DE TEXTURA DE SUPERFÍCIE

As medidas de textura da superfície dos revestimentos foram obtidas pela realização de 2 ensaios:

- Pêndulo Britânico;
- Mancha de Areia;

3.6.1 Pêndulo Britânico

O Pêndulo Britânico, mostrado na Figura 16, é constituído de uma estrutura metálica, na qual uma haste acoplada realiza um movimento pendular. Na ponta desta haste está fixada uma sapata de borracha que, ao ser liberado o movimento, ela toca o pavimento. Através da diferença de altura entre o início e o final do movimento, tem-se uma medida indireta de microtextura superficial, podendo-se avaliar a perda de resistência á derrapagem em função

do tráfego. Este ensaio é normatizado pela ASTM E303-93 e os resultados são dados em BPN (Britch Number Pendulum).



Figura 16: Pêndulo Britânico

3.6.2 Mancha de Areia

Este ensaio, normatizado pela ASTM E 965 – 96, consiste do espalhamento de micro-esferas de vidro na superfície do pavimento, semelhante a uma areia fina, com volume, peso e densidade conhecidos, como mostra a Figura 17. Este espalhamento é realizado com um bastão padronizado, até o preenchimento total das rugosidades do revestimento, em formato circular, donde mede-se o diâmetro. Com essa medida e, conhecendo-se o volume de material, obtém-se a altura da mancha, proporcionando uma medida de macrotextura da superfície.



Figura 17: Ensaio “Mancha de Areia”

3.7 PARÂMETROS AMBIENTAIS

Realizou-se o monitoramento das precipitações pluviométricas, das temperaturas máximas médias e mínimas do ar e das temperaturas do pavimento durante o período de ensaios. As leituras das precipitações e temperaturas do ar foram realizadas na estação meteorológica instalada na Área de Pesquisa e Teste de Pavimentos da UFRGS e as temperaturas do pavimento foram monitoradas através de um sensor de temperatura e um termômetro digital.

O sensor de temperatura, instalado na interface do revestimento existente e o recapeamento, é um sensor de precisão, cujo modelo é LM35, fabricado pela National Semiconductors. Sua saída é proporcional à temperatura, em graus Celsius, não necessitando de qualquer tipo de ajuste ou calibração para se obter sensibilidade de $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$. O limite de operação está entre -50°C e $+ 150^{\circ}\text{C}$. As dimensões do corpo são de $0,48 \times 0,48 \times 0,38\text{mm}$ e, devido a essas pequenas dimensões, o sensor de temperatura foi encapsulado por um cabo de cobre de 1 polegada de diâmetro e comprimento de 4 centímetros. O cobre foi escolhido devido a sua boa condutividade térmica, o que não altera o resultado das leituras. O sinal é registrado em um multímetro adaptado ao sistema de aquisição de dados que registra as temperaturas em $^{\circ}\text{C}$.

4 EXECUÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS RECAPEAMENTOS

O estudo de reflexão de trincas em recapeamentos asfálticos foi efetuado através aplicação de novas camadas asfálticas sobre uma pista existente e já trafegada pelo simulador em pesquisas anteriores. Neste capítulo serão apresentados detalhes da preparação da pista para o estudo, os projetos dos recapeamentos ensaiados e os detalhes de execução das camadas asfálticas.

4.1 SERVIÇOS PRELIMINARES

Na faixa recapeada em tratamento superficial, já haviam sido realizados ensaios com o simulador de tráfego. Foram aplicadas 2×10^5 ciclos de carga de eixo equivalente de 82kN. Como o objetivo inicial da pesquisa era comparar o desempenho dos dois recapeamentos, fez-se, nesta faixa, um recorte da camada de concreto asfáltico existente e substituição por uma nova camada de concreto asfáltico, já que o grau de trincamento apresentava-se bastante elevado. O recorte executado, com dimensões de 10 x 0,8 m, foi coincidente com a faixa ensaiada anteriormente por Gonçalves. Neste trabalho de restauração, a camada superficial da base, em brita graduada, foi removida junto com o revestimento, necessitando assim de regularização e compactação. Este serviço está mostrado na Figura 18. A faixa recapeada com CBUQ não havia recebido carregamento dinâmico, portanto não foram necessários serviços de reparo.



Figura 18: Execução do remendo em concreto asfáltico

Para simular um trincamento causado por fadiga do pavimento, foram executadas trincas com serra circular, nas duas faixas da pista, antes da aplicação de cada recapeamento. A profundidade dessas trincas foi de 5 cm ou mais, com o intuito de alcançar a camada granular subjacente. Todas as áreas trincadas tiveram o mesmo padrão, possuindo módulos quadrados de 10cm de lado, conforme a Figura 19. Posteriormente preencheram-se as trincas com argila para evitar que fossem seladas pelo primeiro banho de emulsão asfáltica do tratamento superficial ou pela pintura de ligação realizada na faixa do recapeamento em concreto asfáltico, favorecendo, assim, o estudo da reflexão de trincamento.

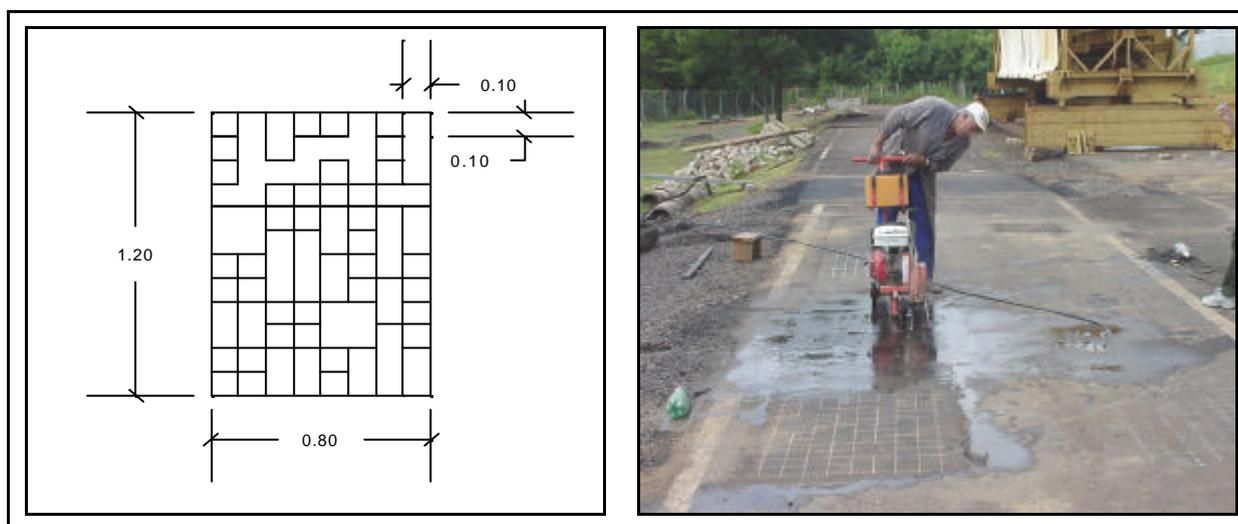


Figura 19: Padrão de trincamento e execução das trincas

A próxima etapa foi a instalação dos sensores, na interface entre pavimento trincado e recapeamentos. Os instrumentos utilizados neste estudo foram:

- Sensor de temperatura;
- Células de tensão total;
- Extensômetros resistência elétrica (*strain gages*).

Na faixa do pavimento que recebeu recapeamento em tratamento superficial instalou-se um conjunto de sensores na área 3 de estudo, utilizando as fendas do trincamento artificial para a fixação dos mesmos. Sob este recapeamento, colocaram-se dois *strain gages*, nas posições longitudinal e transversal ao sentido de deslocamento do simulador de tráfego, duas células de tensão total para a verificação das tensões nas direções horizontal e vertical e um sensor de temperatura ao lado dos *strain gages*.

Para o monitoramento do recapeamento em concreto asfáltico convencional foi instalado um conjunto a mais de *strain gages*, acompanhado de mais um sensor de temperatura na área 5 de estudo, nos sentidos longitudinal, transversal e à 45° em relação à direção do tráfego.

A instalação dos sensores foi feita de maneira cuidadosa, para que não houvesse danificação dos mesmos, principalmente no momento da compactação das camadas dos recapeamentos. Para tanto, foram feitos sulcos no pavimento existente, de maneira que somente a face sensível a medições ficasse exposta.

Foram executados “berços” em cada sulco, com ligante asfáltico, com o objetivo de proteger os sensores de possíveis danos e evitar o deslocamento dos mesmos com a passagem de equipamentos pesados. A instalação dos sensores está mostrada na Figura 20.

Mesmo tomando-se as precauções necessárias para a sobrevivência dos instrumentos, no recapeamento em tratamento superficial não foram obtidas respostas da célula de tensão total para leituras de tensões verticais, nem do sensor de temperatura. Já no recapeamento em concreto asfáltico, a falha foi verificada no *strain gage* posicionado transversalmente à direção do deslocamento do rodado após 30.000 ciclos de carga.

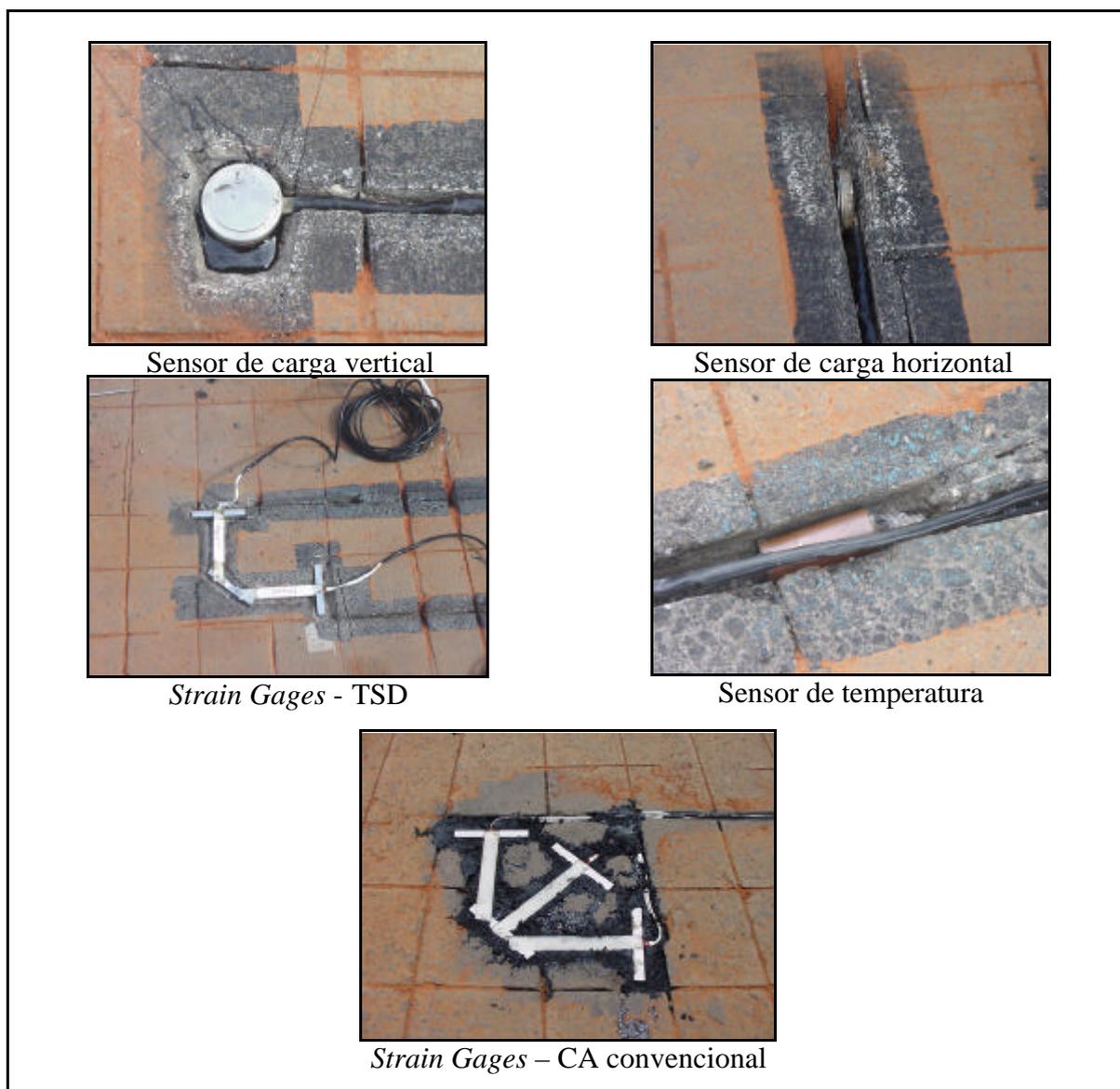


Figura 20: Disposição dos sensores na pista experimental

4.2 EXECUÇÃO DO RECAPEAMENTO EM TRATAMENTO SUPERFICIAL

O primeiro recapeamento testado foi o tratamento superficial duplo, com capa selante, utilizando emulsão asfáltica modificada por polímero SBS, de nome comercial MacroPlus, produzida pela BetunelKock Ind. Com. Ltda. A execução foi em abril de 2003 e a técnica construtiva utilizada foi a penetração invertida onde aplica-se primeiramente a emulsão

asfáltica e posteriormente a camada de agregado. Para formar-se a mistura asfáltica, faz-se a compressão dos agregados com rolos compressores sobre a emulsão de maneira que haja o recobrimento dos agregados pela ascensão do ligante.

Os agregados utilizados foram brita ¾”, pedrisco e areia, provenientes da Pedreira Vila Rica, localizada na cidade de Montenegro - RS. A distribuição granulométrica de projeto enquadra-se nas Faixas “A” do DNER para a primeira camada de agregados e “B” do DNER para a segunda camada de agregados, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7: Granulometria de projeto do tratamento superficial

Peneiras	Agregados (% passantes, em peso)			DNER ES - 392/99	
	Brita	Pedrisco	Areia	Faixa “A”	Faixa “B”
1”	-	-	-	100	-
¾”	100,0	-	-	90 - 100	-
½”	29,6	-	-	20 - 55	100
3/8”	8,3	100,0	-	0 - 15	85 - 100
5/16”	1,1	100,0	-	-	-
¼”	-	88,2	100,0	-	-
Nº 4	0,4	27,4	95,1	0 - 5	10 - 30
Nº 10	0,3	0,6	43,5	-	0 - 10
Nº 200	0,2	0,3	0,3	0 - 2	0 - 2

A realização do projeto e a determinação das propriedades dos materiais do recapeamento foram efetuadas pela empresa BetunelKoch. A Tabela 8 mostra as propriedades verificadas nos agregados minerais durante a fase de projeto.

Tabela 8: Propriedades dos agradados

Ensaio	Encontrado	Especificado
Adesividade à emulsão (DNER-ME 079/94)	Satisfatória	Satisfatória
Desgaste Los Angeles (DNER ME 035/98)	12%	< 40%
Durabilidade em sulfato de sódio (DNER 089/94)	0,4%	< 12%
Índice de Forma - Crivo (DNER ME 086/94)	-	> 0,5
Índice de Forma - Paquímetro (NBR 7809/93)	8%	*

* A BetunelKoch considera apto o agregado que apresenta menos de 25% dos grãos com relação “c” (comprimento)/ “e” (espessura) maior do que 3.

O ligante utilizado foi RR-2C Flex (emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida), modificado por polímero (3% de SBS), preparado com 80% da emulsão e 20% de água.

A Tabela 9 mostra as dosagens de ligantes e agregados de projeto para cada camada do tratamento superficial.

Tabela 9: Taxas de ligante e agregados das camadas do tratamento superficial

Camadas do tratamento	Emulsão	Agregados	
	kg/m²	litros/m²	kg/m²
1º Banho sobre o pavimento	0,8 - 0,9	-	-
1ª Camada de agregado brita 1	-	11,0 - 12,1	19,00 - 21,0
2º Banho sobre a brita 1	1,1 - 1,2	-	-
2ª Camada de agregados pedrisco	-	5,4 - 6,6	9,0 - 11,0
3º Banho diluído sobre pedrisco	0,8 - 0,9	-	-
3ª Camada de areia industrial	-	4,1 - 5,8	2,5 - 3,5

As taxas de ligante e agregado das camadas do tratamento e capa selante foram verificadas em campo, pela Empresa BetunelKoch, e foram obtidos os resultados mostrados na Tabela 10.

Tabela 10: Teores de ligante e agregado medidos em campo

Ligante	Litros/m ²	Agregado	Kg/m ²
1º Banho	0,82	1ª Camada	18,9
2º Banho	1,12	2ª Camada	8,9
Capa Selante	0,77	Capa Selante	3,0

A cada aplicação de agregados na pista, fez-se a compressão do material asfáltico, primeiramente com rolo pneumático, com carga de 18 toneladas e pressão de inflação dos pneus de 90 libras. Posteriormente, a compressão foi executada com rolo liso, de 10 toneladas, sem vibração. Os detalhes de execução estão mostrados na Figura 21.



Figura 21: Etapas de execução do recapeamento em tratamento superficial

Após a execução do TSD foram extraídos corpos de prova cilíndricos, através de sonda rotativa, para a verificação das espessuras do pavimento antigo e recapeamento, além de ensaios de módulo de resiliência. As espessuras médias da camada de concreto asfáltico e do tratamento superficial ficaram em média de 4,7cm e 1,8cm, respectivamente, e a estrutura do pavimento ensaiada está mostrada na Figura 22. Como ambos os revestimentos eram muito delgados para a realização do ensaio de módulo de resiliência, a aplicação diametral de cargas foi realizada sem a separação da camada de tratamento superficial do concreto asfáltico. A Tabela 11 mostra os resultados do ensaio de módulo de resiliência e resistência à tração, a 25°C de temperatura, obtidos com três corpos de prova.

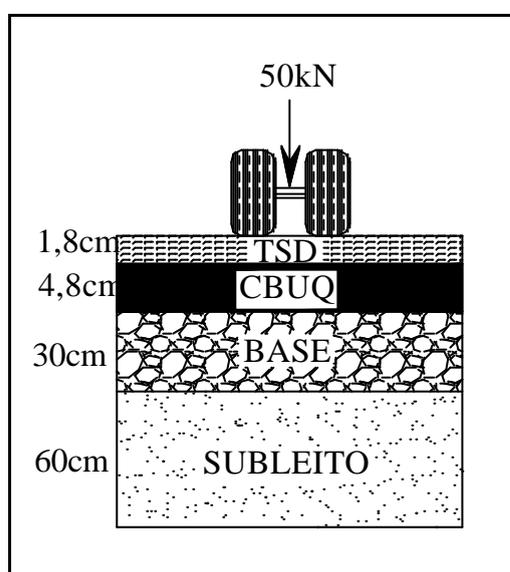


Figura 22: Estrutura do pavimento recapeado em TSD

Tabela 11: Ensaio de módulo de resiliência e resistência à tração

N° do CP	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	MR - Módulo de resiliência (MPa)	RT - Resistência à tração (MPa)	RT/MR - (10^{-4})
1	10,35	6,54	4.128	0,54	1,3
2	10,36	6,59	4.643	0,58	1,2
3	10,38	6,59	4.031	0,50	1,2
Média	10,36	6,57	4.267	0,54	1,2

4.3 EXECUÇÃO DO RECAPEAMENTO EM CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL

A camada em concreto asfáltico convencional foi aplicada em janeiro de 2004. Os serviços preliminares a execução deste recapeamento, tanto no que se refere à configuração do trincamento artificial, quanto à colocação dos sensores, assemelham-se aos do recapeamento em TSD.

O projeto da massa asfáltica foi elaborado pelo Sistema de Controle Tecnológico do Consórcio Univias, utilizando CAP 50/60 como ligante e agregados provenientes da CONPASUL Construção e Serviços Ltda, com as percentagens de agregados conforme a Tabela 12. A Tabela 13 e Figura 23 mostram a composição e a curva granulométrica dos agregados.

Tabela 12: Taxa de agregados da mistura asfáltica

Agregado	Quantidade
Brita ¾"	18%
Brita 3/8"	20%
Pó de Pedra	62%

Tabela 13: Composição granulométrica dos agregados do CA

Peneira #	Projeto % Passante	Faixa de Trabalho % Passante	Faixa A- DAER % Passante
1/2"	100,0	100,0 – 100,0	100,0 – 100,0
3/8"	98,9	92,9 – 100,0	80,0 – 100,0
Nº 4	64,2	58,2 – 70,2	55,0 – 75,0
Nº 8	41,2	37,2 – 45,2	35,0 – 50,0
Nº 30	22,1	18,1 – 26,1	18,0 – 29,0
Nº 50	17,2	13,2 – 21,2	13,0 – 23,0
Nº 100	13,6	10,6 – 16,6	8,0 – 16,0
Nº 200	6,5	4,5 – 8,5	4,0 – 10,0
Convenção			

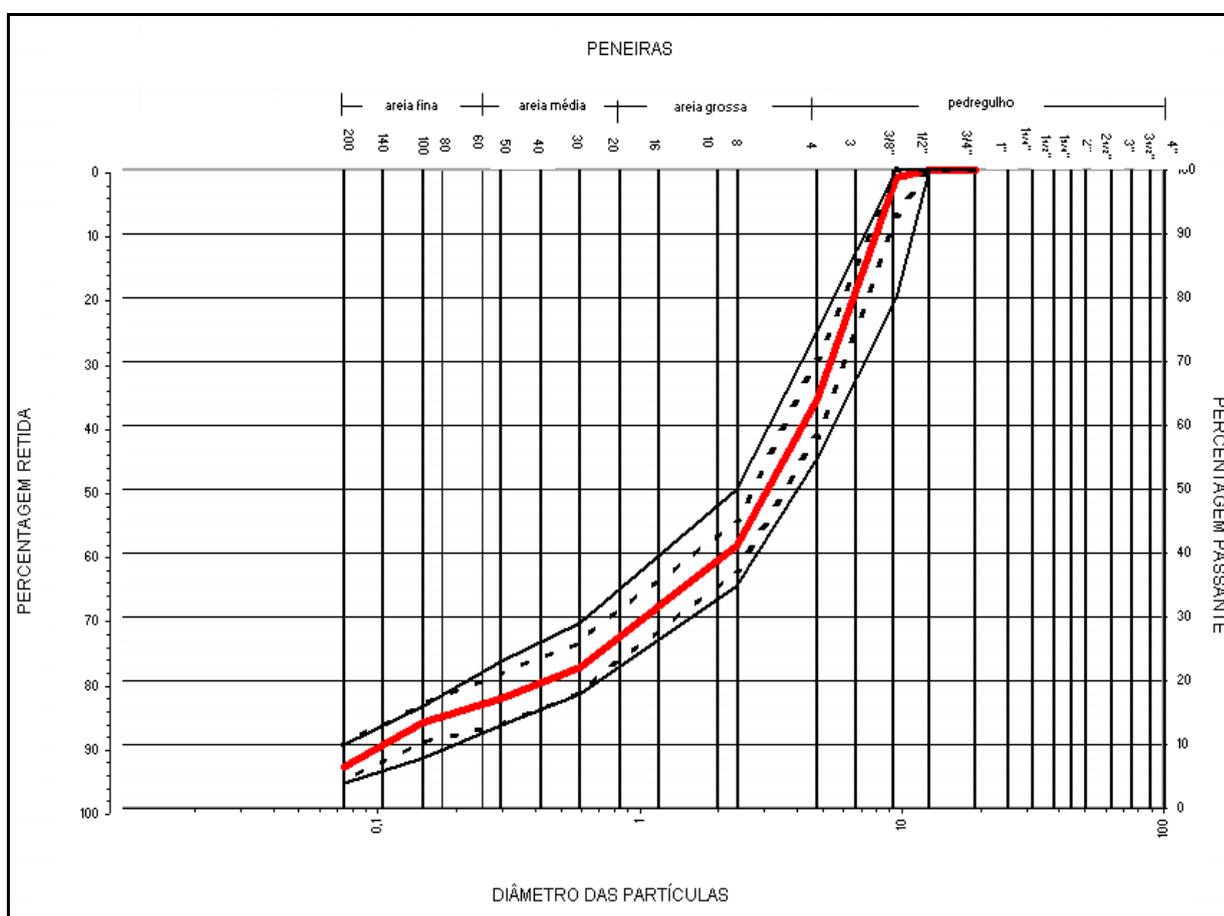


Figura 23: Curva granulométrica dos agregados do concreto asfáltico

As características da mistura pelo Método Marshall estão resumidas na Tabela 14.

Tabela 14: Projeto Marshall para o recapeamento em CA

Característica	Valores obtidos
Teor ótimo de betume	5,75%
Densidade aparente	2.456Kg/m ³
Volume de vazios	4%
Relação betume/vazios	79%
Estabilidade	1.170 kgf
Fluência	13,40 x 0,01”

Após a limpeza da pista, realizou-se a pintura de ligação, com espargidor manual, utilizando emulsão asfáltica RR-2C. O espalhamento da massa asfáltica foi feito com vibro-acabadora e a compactação com rolo pneumático de 12 toneladas e, posteriormente, com rolo liso vibratório de 3 toneladas, como mostra as Figura 24.



Figura 24: Execução do recapeamento em concreto asfáltico

Durante a execução do recapeamento mediram-se as temperaturas da massa asfáltica. A temperatura da mistura no caminhão ficou próxima a 145°C e, depois do espalhamento com a vibro-acabadora, em torno de 135°C .

Coletou-se uma amostra do material para a realização de ensaios de verificação. A mistura asfáltica apresentou teor de ligante de 6,30% em relação ao peso da mistura. A composição granulométrica dos agregados da mistura obtida está mostrada na Tabela 15.

Foram extraídos corpos de prova do recapeamento em concreto asfáltico para a verificação das espessuras e ensaios de laboratório. A espessura média do recapeamento em concreto asfáltico medida foi de 5,2 cm, como mostra a Figura 25, o que possibilitou o ensaio de módulo de resiliência do recapeamento separadamente. A Tabela 16 mostra os resultados obtidos no ensaio de resiliência por compressão diametral à temperatura de 25°C .

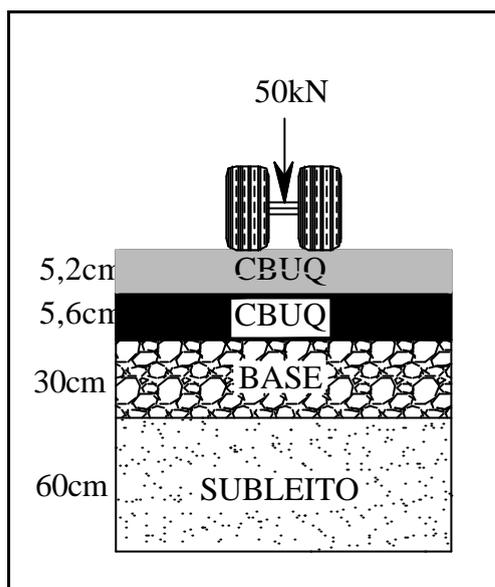


Figura 25: Estrutura do pavimento recapeada em CA

Tabela 15: Granulometria dos agregados do recapeamento em CA verificados em campo

Peneira	% Passante	Faixa A - DAER
¾"	100,0%	100,0 – 100,0
½"	100,0%	100,0 – 100,0
3/8"	96,8%	80,0 – 100,0
Nº 4	72,7%	55,0 – 75,0
Nº 8	50,2%	35,0 – 50,0
Nº 30	24,9%	18,0 – 29,0
Nº 50	19,1%	13,0 – 23,0
Nº 100	13,7%	8,0 – 16,0
Nº 200	9,0%	4,0 – 10,0

Tabela 16: Ensaio de módulo de resiliência e resistência à tração

N° do CP	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	MR - Módulo de resiliência (MPa)	RT - Resistência à tração (MPa)	eR= RT/MR
1	10,35	5,39	3.652	1,00	2,7
2	10,40	4,94	4.216	0.88	2,1
3	10,38	5,29	5.216	0.95	1,8
Média	10,38	5,21	4.361	0,94	2,2

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Durante o período de operação do simulador de tráfego, foram monitoradas a evolução da degradação do pavimento com a atuação do trem de cargas do simulador, parâmetros de textura e parâmetros ambientais.

Como referido no capítulo 3, neste trabalho não foi possível a comparação entre o desempenho dos recapeamentos testados. Os trabalhos de investigação da degradação das estruturas foram realizados em condições meteorológicas diferentes que tiveram forte influência no trincamento e nas deflexões. A reperfilagem executada na faixa recapeada em TSD influenciou os resultados de deformação permanente. Contudo, o fato que excluiu definitivamente a possibilidade de uma análise comparativa, foi a espessura dos recapeamentos medidos em corpos de prova extraídos. As espessuras finais foram de 1,8cm e 5,2cm para o recapeamento em tratamento superficial e concreto asfáltico, respectivamente. Nesse contexto, este capítulo apresentará separadamente os resultados da evolução das degradações com o número de ciclos aplicados pelo trem de cargas do simulador.

5.1 DISTRIBUIÇÃO TRANSVERSAL DE CARGAS

O deslocamento longitudinal do rodado do simulador é acompanhado por um deslocamento gradativo, no sentido transversal, para evitar a atuação da carga dinâmica num mesmo eixo longitudinal e a formação de uma trilha de roda canalizada, aproximando-se, assim, às condições reais de tráfego de rodovias. Ao final de cada ciclo, o rodado desloca-se aproximadamente 6,5mm no sentido transversal e estabeleceu-se a formação de uma trilha de roda de 70cm para o estudo dos dois recapeamentos.

Para a determinação dos pontos de maior frequência da passagem do rodado, dividiu-se a largura da trilha de roda formada pela largura do rodado em contato com a superfície do pavimento, quando aplicada uma carga estática de 100kN. Esta largura de contato foi obtida através da impressão dos pneus em um papel milimetrado, como mostra a Figura 26. A

distribuição transversal de cargas, mostrada na Figura 27, relaciona pontos na trilha de roda, segundo um eixo transversal de atuação, com a porcentagem de solicitações nesses pontos.



Figura 26: Impressão dos pneus com carga de eixo de 100kN

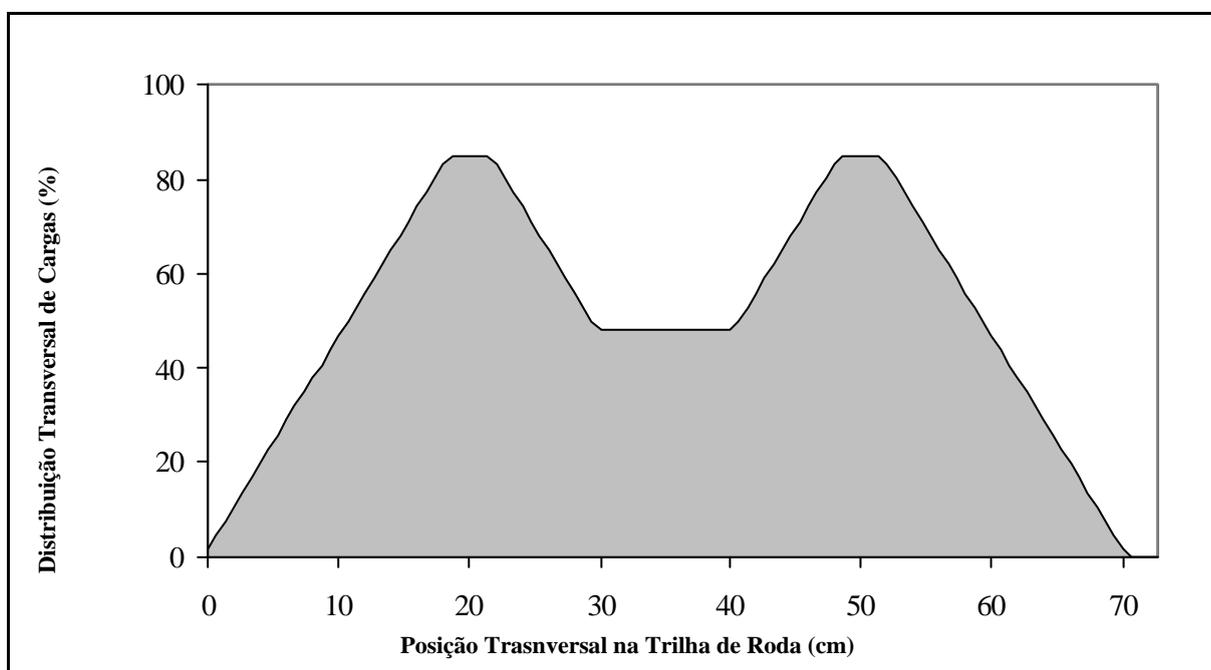


Figura 27: Distribuição transversal de cargas

5.2 RECAPEAMENTO EM TRATAMENTO SUPERFICIAL DUPLO

5.2.1 Histórico de Carregamento

Na primeira etapa da fase experimental, na qual se ensaiou o recapeamento em tratamento superficial, o trem de cargas atuou no pavimento de abril a julho, totalizando aproximadamente 120.000 ciclos, com carga equivalente de eixo de 100kN e inflação de pneus de 0,62MPa. A evolução do carregamento dinâmico aplicado ao pavimento está mostrada na Figura 28.

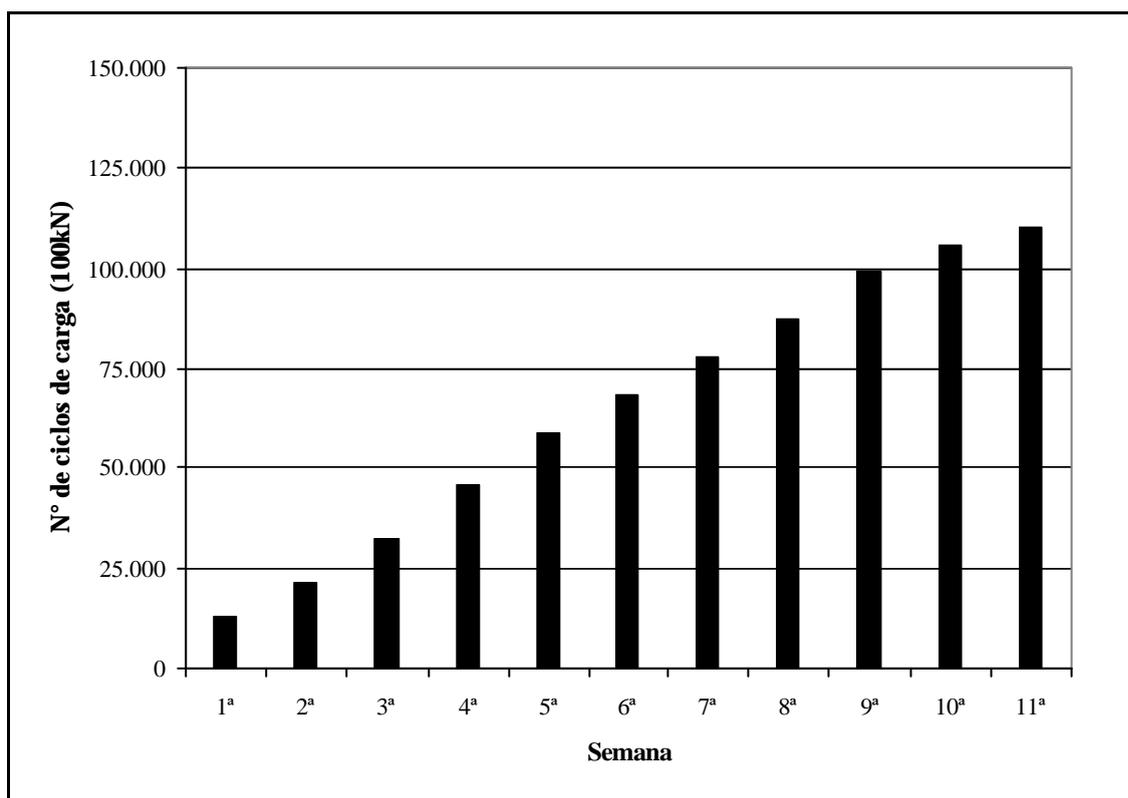


Figura 28: Histórico do carregamento nas semanas de ensaio – recapeamento TSD

5.2.2 Parâmetros Ambientais

Em geral, o recapeamento em tratamento foi submetido a cargas dinâmicas em períodos de precipitações intensas, totalizando 200 mm. Na Figura 29, estão apresentadas as precipitações ocorridas durante a atuação do simulador de tráfego.

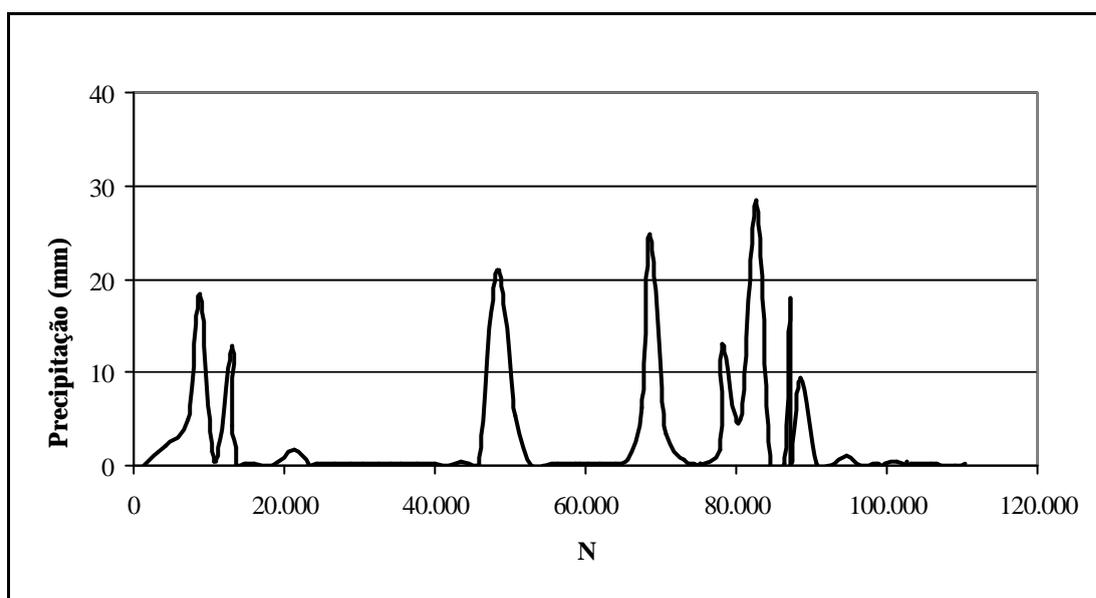


Figura 29: Precipitações pluviométricas – recapeamento TSD

As temperaturas diárias, fornecidas pela estação meteorológica, estão mostradas na Figura 30. Como as baixas temperaturas, verificadas durante os ensaios no recapeamento em TSD, são um dos fatores que contribuíram para o crescimento das degradações, principalmente o trincamento dos recapeamentos asfálticos, fez-se a verificação da frequência de faixas de temperatura durante a atuação das cargas dinâmicas, através de dados de temperatura fornecidos pela estação a cada 15 minutos. Na Figura 31 percebe-se que os ensaios se realizaram predominantemente na faixa de 10° a 20°C, sendo que 12% deste período a temperatura ficou abaixo dos 10°C.

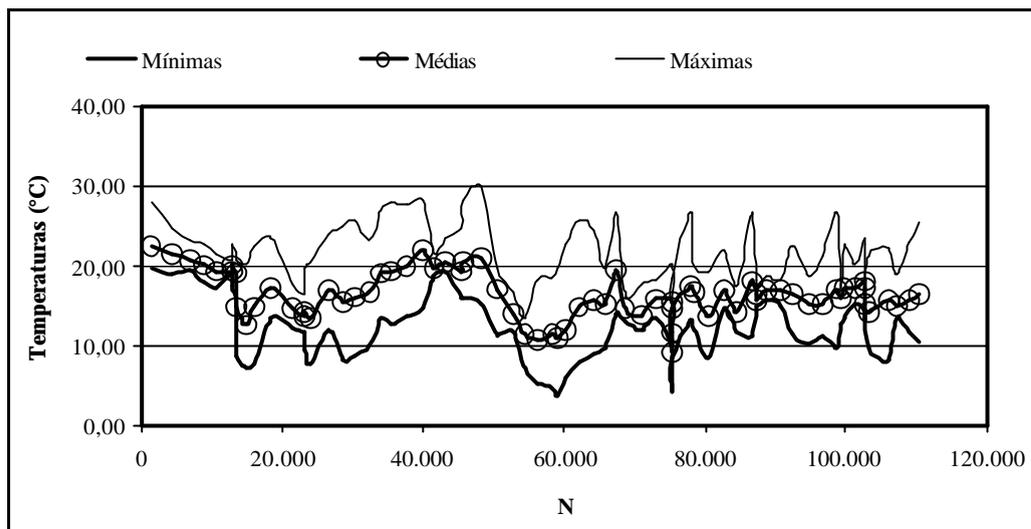


Figura 30: Temperaturas diárias - recapeamento TSD

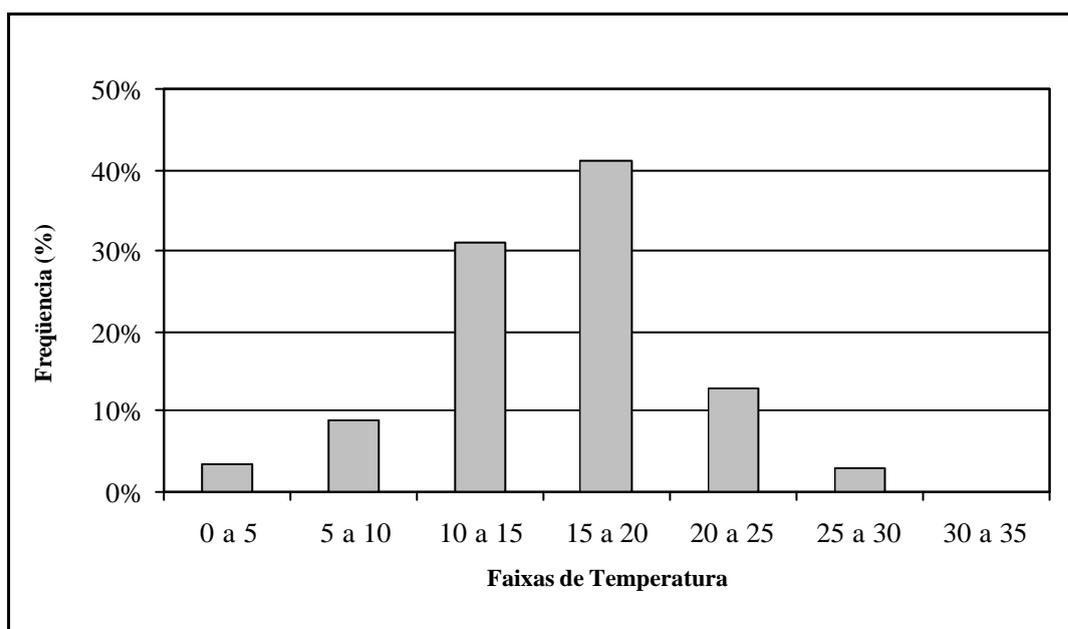


Figura 31: Freqüência da temperatura – recapeamento TSD

5.2.3 Parâmetros de Resposta Estrutural

5.2.3.1 Medidas Deflectométricas e Bacias

A medida da deflexão é uma maneira bastante utilizada para a avaliação estrutural de um pavimento, fornecendo um indicativo da elasticidade da estrutura. A atuação de uma carga dinâmica impõe um estado tensões, gerando deformações de caráter transitório, em todas as camadas do pavimento. Para quantificar a condição estrutural do pavimento existente, realizou-se um levantamento das deflexões antes da aplicação do recapeamento em TSD. A deflexão característica para esta faixa foi de 88×10^{-2} mm, em que a média apresentada foi de 75×10^{-2} mm e o desvio padrão, 13×10^{-2} mm.

Após a aplicação do tratamento superficial, os dados de deflexões máximas foram levantados semanalmente e correlacionados com o número N de solicitações, para três níveis de carregamento. Na Figura 32, mostram-se as deflexões máximas obtidas com a viga Benkelman para o nível de carga equivalente de eixo de 100kN em cada seção de ensaio.

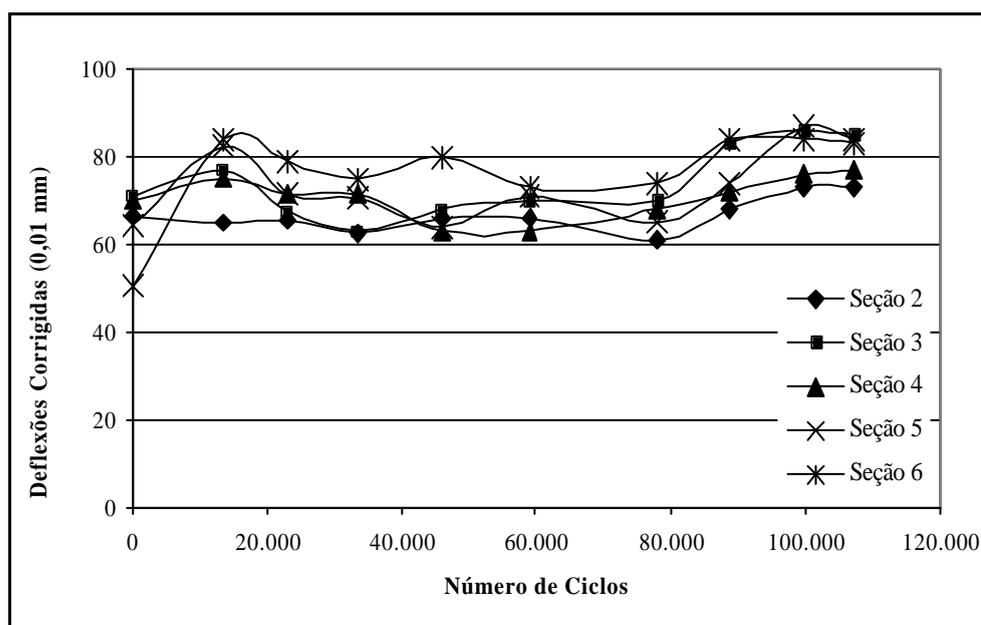


Figura 32: Evolução das deflexões (carga de eixo = 100kN) - TSD

Com esses valores fez-se também o cálculo da evolução das deflexões características do pavimento, somando-se a média das leituras realizadas em todas as seções com o desvio padrão, para as cargas de eixo de 82, 100 e 120kN, como mostra a Figura 33.

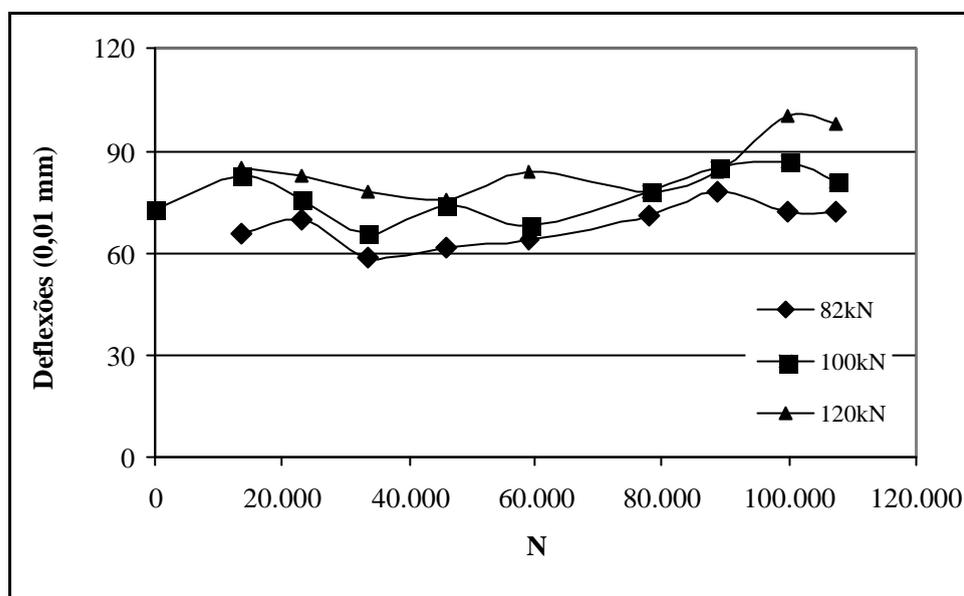


Figura 33: Deflexões características - recapeamento TSD

Analisando-se as medidas máximas de deflexão, verificou-se um decréscimo inicial nos primeiros 30.000 ciclos de carga, explicado pelo aumento de rigidez da camada asfáltica devido à compactação em função do tráfego e acomodação da camada granular que foi superficialmente retirada e recompactada na reperfilagem. Posteriormente percebeu-se um aumento médio de 12% após $N = 80.000$, em relação à média das deflexões até este ponto. Admitindo-se o fato de que as condições mais desfavoráveis para as camadas de base granular e subleito, são os períodos mais úmidos, verifica-se que após 70.000 ciclos, ocorreram as maiores chuvas do período de tráfego nesta estrutura. Tem-se também um nível de trincamento avançado, o que possibilita a entrada das águas pluviais a essas camadas.

Investigou-se também a influência do trincamento nos níveis das deformações transientes, comparando-se as médias das deflexões em seções onde o revestimento foi trincado previamente (ST) e em seções onde o trincamento não foi realizado (SNT). Esta comparação está mostrada na Figura 34.

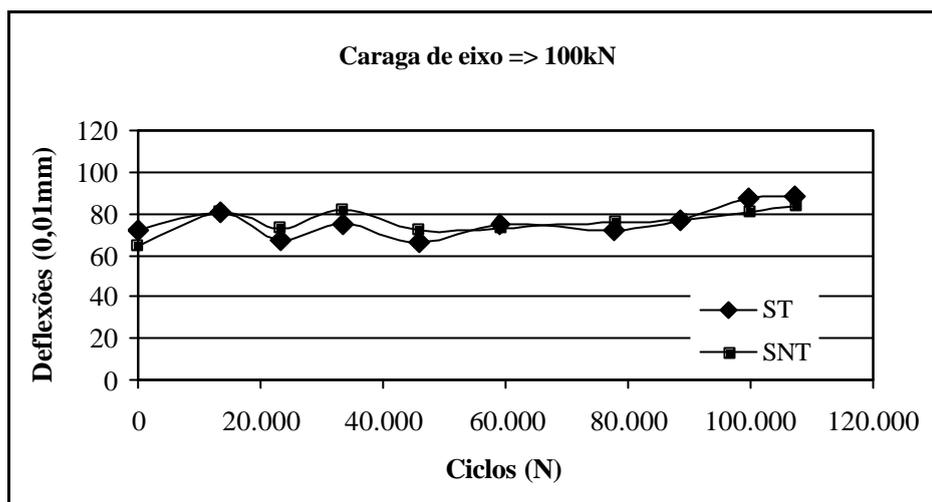


Figura 34: Comparativo de deflexões – recapeamento TSD

Percebeu-se que o nível de deflexão não apresentou diferenças significativas em relação ao trincamento artificial realizado. Este fato, levou a um estudo quanto à contribuição das camadas da estrutura do pavimento na magnitude deflexão máxima que será mostrado neste capítulo.

Fez-se o levantamento das bacias deflectométricas com a viga eletrônica e os resultados estão expostos na Figura 35 para $N = 88.000$ e $N = 110.000$ ciclos. A partir das bacias, fez-se o cálculo dos raios de curvatura pela Equação 5, sugerida pela Norma do DNER- ME 024/94. Os valores obtidos para os raios de curvatura, nos três níveis de carga, estão mostrados na Tabela 17.

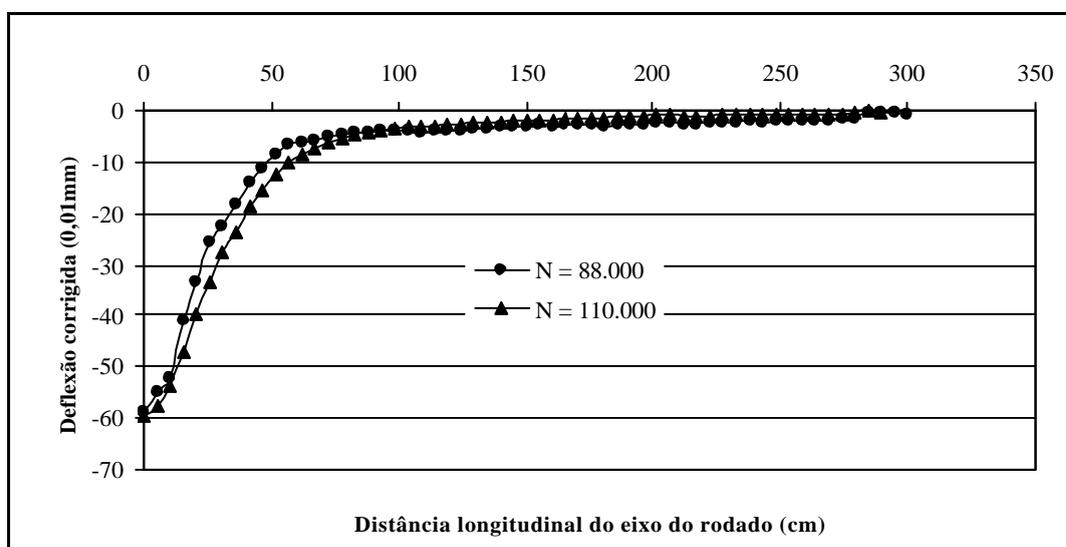


Figura 35: Bacias deflectométricas – recapeamento TSD

$$R = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

R = Raio de curvatura da deformada, em metros;

D₀ = Deflexão máxima em um determinado ponto, em centésimos de mm;

D₂₅ = Deflexão a 25 cm do ponto considerado, em centésimos de mm.

Tabela 17: Raios de Curvatura – recapeamento TSD

N	Raios de Curvatura para diferentes níveis de carga de eixo (m)		
	82 kN	100 kN	120 kN
88.000	171	139	100
110.000	128	120	83

Mesmo considerando-se difícil indicar um valor crítico para o raio de curvatura, Pinto (2002) sugere que um raio de curvatura inferior a 100m, para carga de eixo padrão, é um indício de comprometimento estrutural, ou seja, os módulos elásticos das camadas superiores do pavimento estão menores do que o desejável.

O levantamento das bacias deflectométricas possibilitou a retroanálise para a verificação dos módulos elásticos das camadas. Utilizou-se o programa computacional FLAPS (*Finite Layer Analysis Pavement Structure*), desenvolvido por Rodrigues (1998) *apud* Gonçalves (2002), baseado no método das camadas finitas. A grande vantagem desse programa é a possibilidade de considerar a não linearidade do comportamento elástico das camadas através da inclusão de modelos que expressam a variação do módulo de resiliência em função da tensão confinante. Este programa permite a realização de modelagens com várias combinações de cargas de roda e calcula o estado de tensões médio de cada camada por meio de iterações.

A determinação dos módulos de elasticidade foi efetuada pela reprodução das bacias deflectométricas no programa FLAPS com os valores de deslocamentos nas distâncias longitudinais 0, 30, 60 e 120cm do eixo do rodado do simulador de tráfego.

Os dados de entrada no programa para o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos na faixa recapeada em TSD estão resumidos na Figura 36 e na Tabela 18.

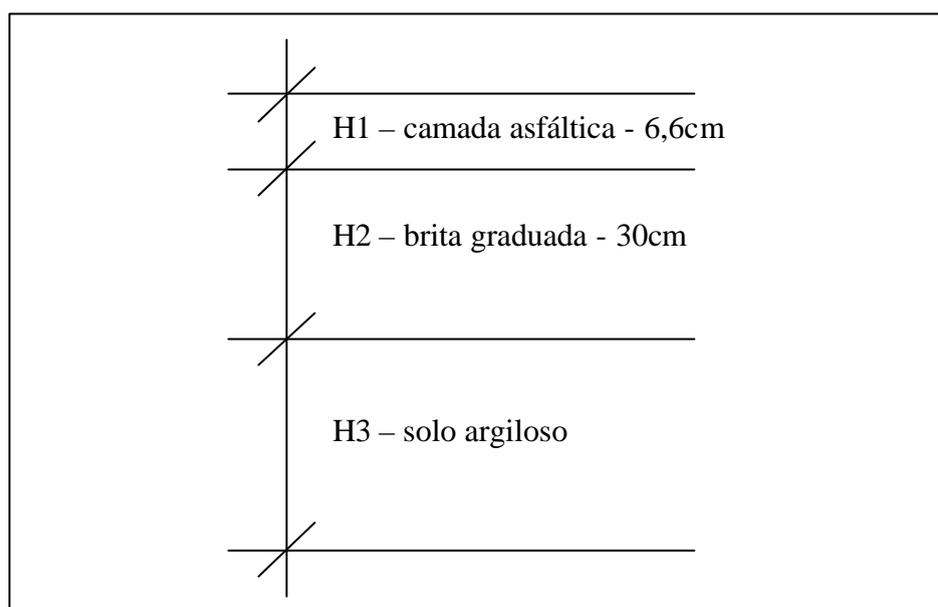


Figura 36: Camadas consideradas no Flaps - recapeamento TSD

Tabela 18: Dados de entrada no FLAPS - recapeamento TSD

Dados de entrada	Valor
Número de camadas do pavimento	3
Número de cargas de roda	2
Carga por roda	25 kN
Pressão de inflação dos pneus	0,62 MPa
Distância entre rodas	30 cm
Parâmetros K e n do modelo do subleito	234 MPa e -0,21

O modelo adotado para representar o comportamento resiliente do solo do subleito foi $M_R = K\sigma_d^n$, onde σ_d é a tensão desvio. Os parâmetros K e n, foram obtidos através de ensaios triaxiais sob cargas repetidas em um estudo publicado por Núñez, *et al.* (2002). Os valores de módulo elástico que melhor se adequaram à análise das bacias pertencem ao ramo úmido da curva de compactação do solo.

Testou-se um conjunto de combinações de módulos elásticos das camadas do pavimento e a melhor aproximação está mostrada na Figura 37. Assim, os valores obtidos na retroanálise são:

- $E_1 = 4.000$ MPa (camada asfáltica)
- $E_2 = 90$ MPa (camada granular)

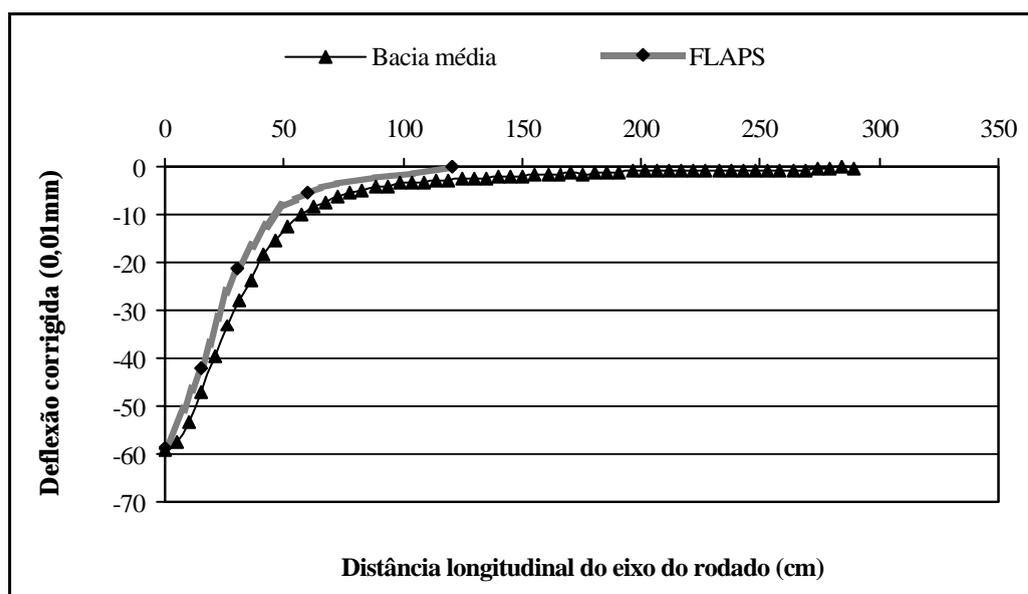


Figura 37: Bacia deflectométrica pelo FLAPS - recapeamento TSD

A contribuição de cada camada do pavimento na magnitude da deflexão máxima foi verificada por esta simulação no programa FLAPS, explicando os valores muito próximos verificados em seções trincadas previamente e não trincadas. Notou-se que a camada asfáltica pouco influencia esses valores e que a camada granular é a mais comprometida estruturalmente, como mostra a Figura 38.

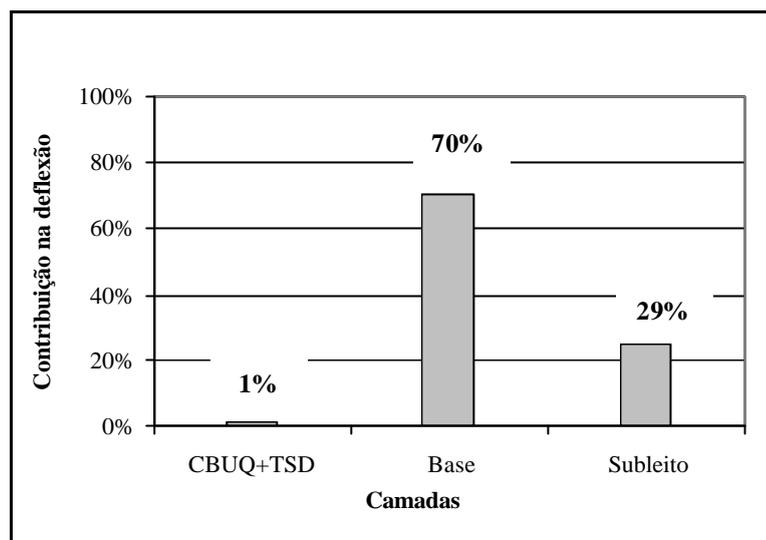


Figura 38: Contribuição das camadas na deflexão - recapeamento TSD

5.2.3.2 Tensões

As tensões, geradas na interface do pavimento existente com o tratamento superficial, foram monitoradas por células de pressão total. Foi verificado no início do experimento que a célula de carga para verificar tensões verticais não apresentou sinal, devido à sua danificação no momento da execução do tratamento superficial.

O cálculo das tensões geradas pelas cargas do tráfego foi efetuado através da Equação 6, fornecida por Gonçalves (2002), que relaciona a tensão com a leitura máxima obtida durante a obtenção de cada dado, ou seja, no momento em que o rodado do simulador está passando exatamente sobre o sensor:

$$\sigma = \left(\frac{L_0 \times 1000 \times k}{g \times A_1 \times 10} \right)$$

Equação 6

Onde:

σ = tensão medida (MPa);

L_0 = leitura (milivolt);

K = sensibilidade – $0,03435 \mu\text{V/V}$;

g = ganho de amplificação – 4860;

A_1 = voltagem de excitação – 6 V.

A Figura 39 apresenta os resultados das tensões horizontais obtidas com a evolução dos ciclos de carga dinâmica do simulador de tráfego.

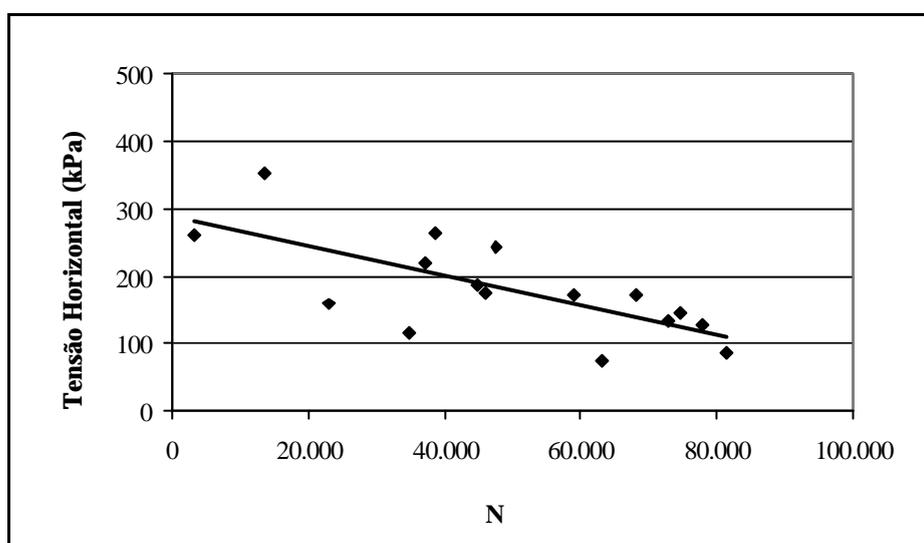


Figura 39: Tensões horizontais medidas – recapeamento TSD

Notou-se uma redução no nível de tensões provavelmente associada à superficialidade em que se encontravam estes instrumentos (1,8 cm de profundidade). A camada de recapeamento, ao final do período de solicitações dinâmicas, encontrava-se com um nível de degradação bastante elevado, fazendo com que as tensões fossem absorvidas pelas camadas inferiores do pavimento, podendo ser esta a possível explicação para a diminuição do nível de tensões medidas.

5.2.3.3 Deformações Horizontais

As deformações na face inferior do tratamento superficial foram medidas por dois *strain gages* nas direções longitudinal e transversal em relação ao deslocamento do trem de cargas

do simulador de tráfego. Fez-se a conversão de leituras dadas em diferença de tensão elétrica para microstrain (10^{-6} m/m) através da Equação 7.

$$\epsilon = \frac{4}{GF} \left(\frac{\Delta V / A_0}{V_{exc}} \right) 1000$$

Equação 7

Onde:

ϵ = deformação (μ strain)

ΔV = leitura do *strain gage* (mV)

A_0 = ganho de amplificação (adimensional)

GF (*Gage Factor*) = 2 (fornecido pelo fabricante)

V_{exc} . (voltagem de excitação) = 6V

Na Figura 40, mostra-se a variação das deformações horizontais nas duas direções. O *strain gage* na direção transversal apresentou dados dispersos. Esses instrumentos são frágeis e uma hipótese para este fato é o deslocamento do instrumento durante a passada do trem de cargas sobre o instrumento, traduzidas em leituras não confiáveis. Quanto às deformações horizontais no sentido longitudinal notou-se uma redução com o número de ciclos de carga. A hipótese para este fato é que as temperaturas do pavimento foram diminuindo em função das leituras terem sido realizadas entre o outono e inverno.

A Figura 41 mostra a influência da temperatura do pavimento nos valores das deformações horizontais no sentido longitudinal em relação ao carregamento dinâmico. Sabendo-se que os materiais asfálticos são termo sensíveis, percebe-se que os valores das deformações medidas pelos sensores reduzem com a diminuição da temperatura do pavimento, ou seja, há um aumento na rigidez à temperaturas mais baixas.

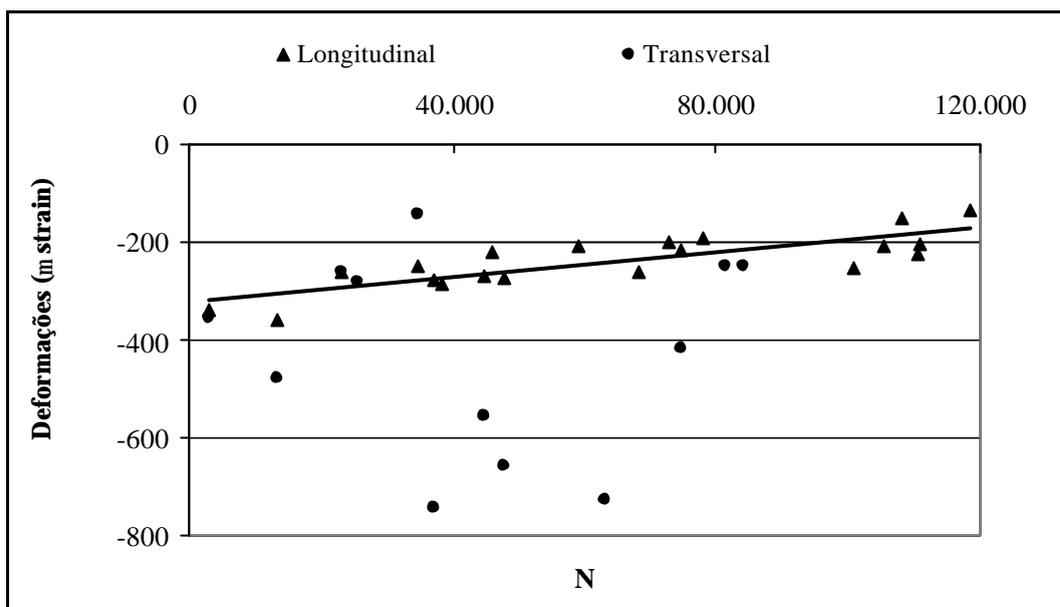


Figura 40: Deformações medidas - recapeamento TSD

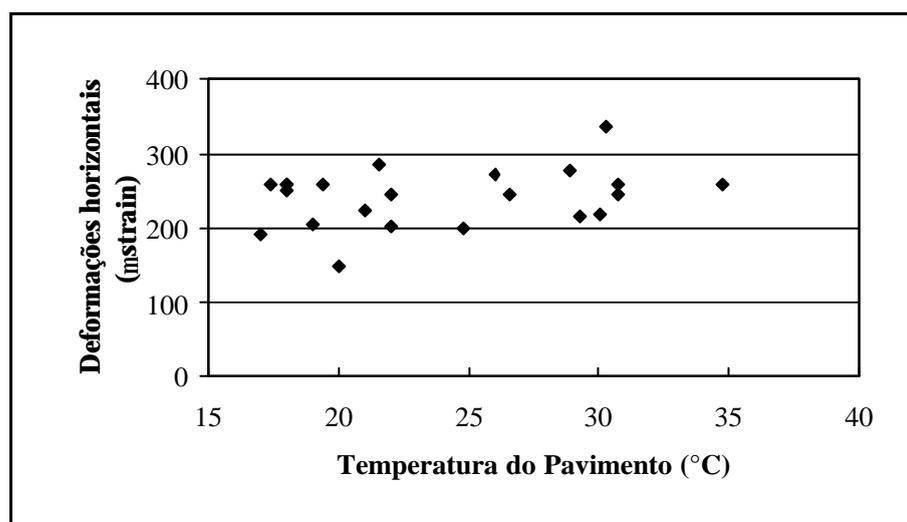


Figura 41: Efeito da temperatura no valor das deformações horizontais

Através da simulação da estrutura do pavimento, conforme a Figura 39, realizada no FLAPS, foi possível a determinação da posição da linha neutra, onde o sinal positivo das deformações significa que o material está trabalhando à compressão.

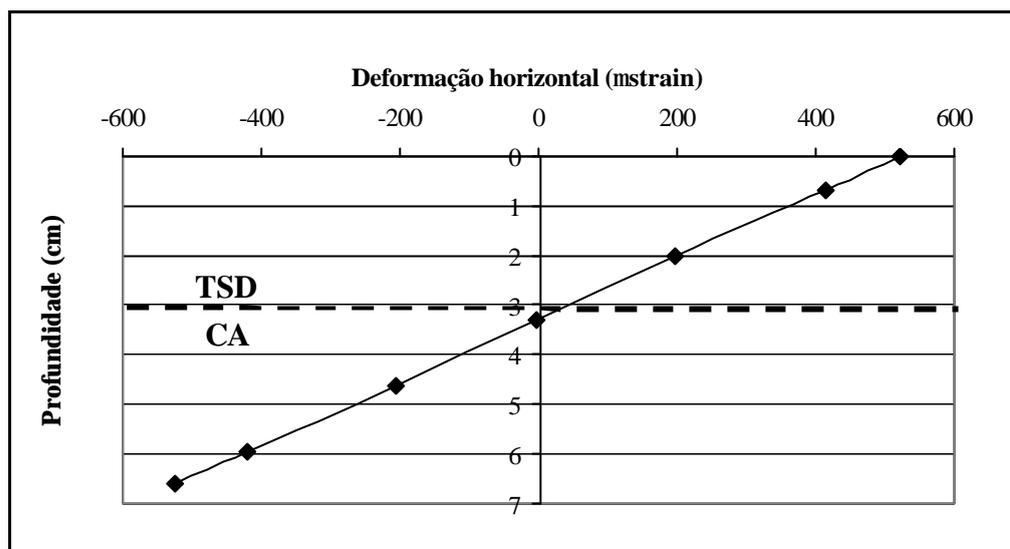


Figura 42: Posição da linha neutra – recapeamento TSD

5.2.4 Parâmetros de Comportamento

5.2.4.1 Deformações Permanentes

Os afundamentos de trilha de roda, percebidos na superfície do revestimento, são decorrentes das deformações plásticas e das consolidações que ocorrem na estrutura de todas as camadas do pavimento e subleito. No caso da estrutura recapeada em tratamento superficial, a fase de consolidação da camada de subleito já tinha se estabelecido durante o carregamento dinâmico efetuado no estudo de Gonçalves (2002).

A Figura 43 fornece os dados da evolução das deformações permanentes em cada seção, em função do número N de solicitações de carga do simulador, e a Figura 44, as deformações permanentes máximas e médias.

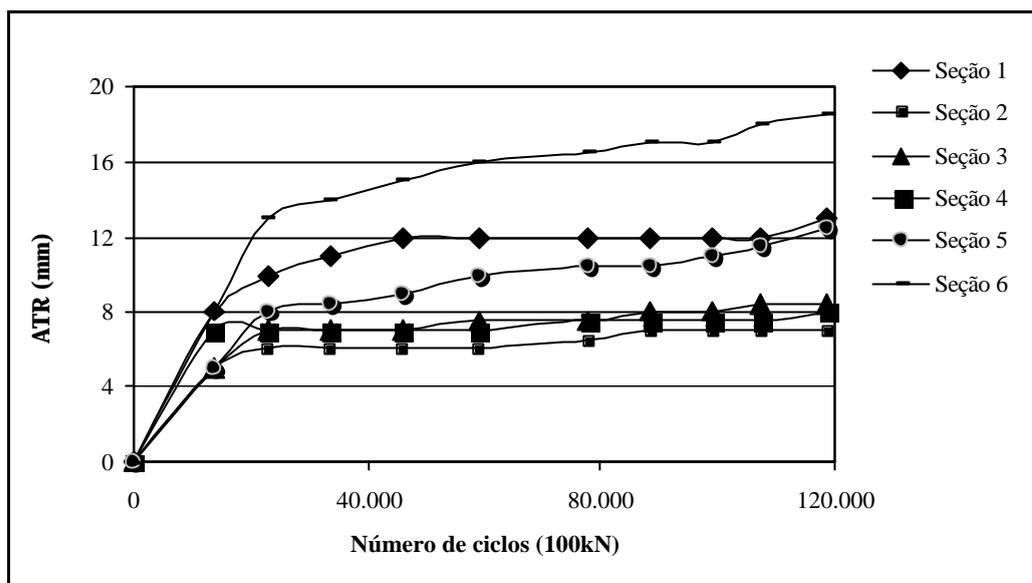


Figura 43: Deformações permanentes em cada seção – TSD

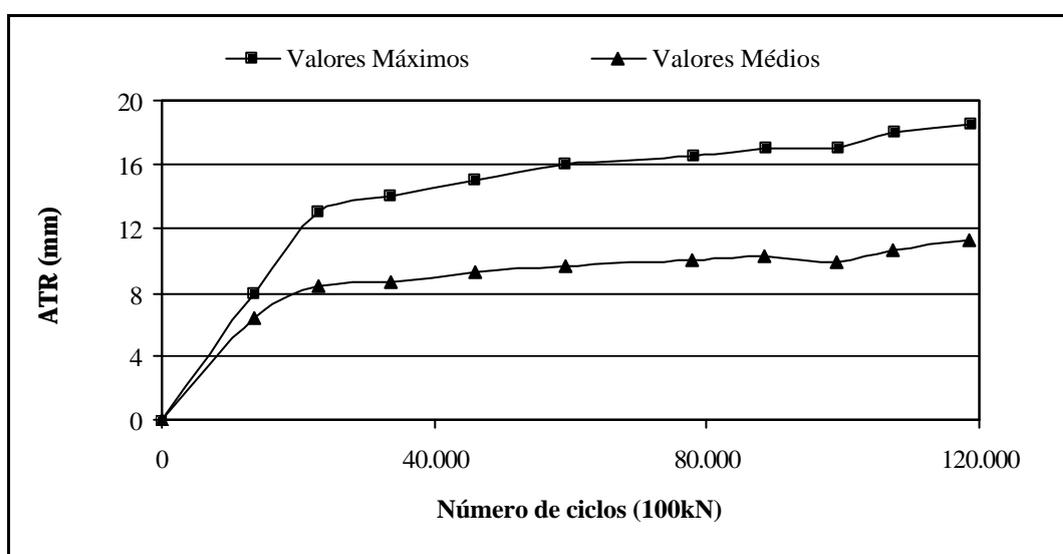


Figura 44: Deformações permanentes – recalqueamento TSD

Na análise das deformações permanentes, percebe-se um crescimento muito elevado nos primeiros 25 mil ciclos de carga, representando 75,2% do afundamento médio total. Em face desta verificação, constata-se que a reperfilagem, executada antes da execução do recalqueamento em TSD, teve uma importante contribuição na magnitude dos afundamentos de trilha de roda, apresentados em apenas 19% do número de ciclos totais aplicados a essa

estrutura. A partir daí, as deformações permanentes passaram a evoluir quase linearmente a uma velocidade de crescimento de $0,053 \text{ mm}/10^3 \text{ ciclos}$.

As seções que apresentaram afundamentos de trilha de roda mais elevados foram Seção 1 e Seção 6, as mais próximas do recortes transversais executados na reperfilagem. A dificuldade de compactação da massa asfáltica, devido à pequena largura da faixa recortada (80cm), gerou a avançada consolidação inicial da mistura asfáltica. Durante a execução da restauração do antigo revestimento, houve também a remoção da parte superficial da camada granular que necessitou de nova compactação. Esses detalhes construtivos, aliados às condições meteorológicas de precipitações intensas e à baixa capacidade estrutural da camada granular, são as causas da elevada flecha verificada na superfície do pavimento. Durante as duas primeiras semanas de tráfego ($N = 25.000$), o somatório das precipitações pluviométricas foi aproximadamente 50mm.

5.2.4.2 Trincamento

A tentativa de se encontrar as causas prováveis do surgimento de trincas pode ser feita pelas inspeções realizadas em campo, através da visualização das fissuras e pela tentativa de uma análise, onde se possam incluir fatores como estrutura do pavimento, tráfego, clima e condições de superfície. Desta maneira, tentou-se correlações entre as trincas surgidas no pavimento com outros parâmetros medidos neste trabalho.

A avaliação do trincamento foi feita através do Método da Gravidade, que consiste em uma medida de comprimento das trincas por área trafegada. Na medição do comprimento das trincas, considerou-se toda a abertura verificada na camada de recapeamento, independentemente de sua severidade, por considerar subjetivo este tipo de avaliação, sem equipamentos específicos. No entanto, alguns comentários são inevitáveis e pertinentes para explicar algumas trincas de maior abertura.

Os resultados mostrados na Figura 45 comparam a evolução desse tipo de degradação nas áreas onde foram realizadas trincas no pavimento existente e nas áreas sem trincamento prévio.

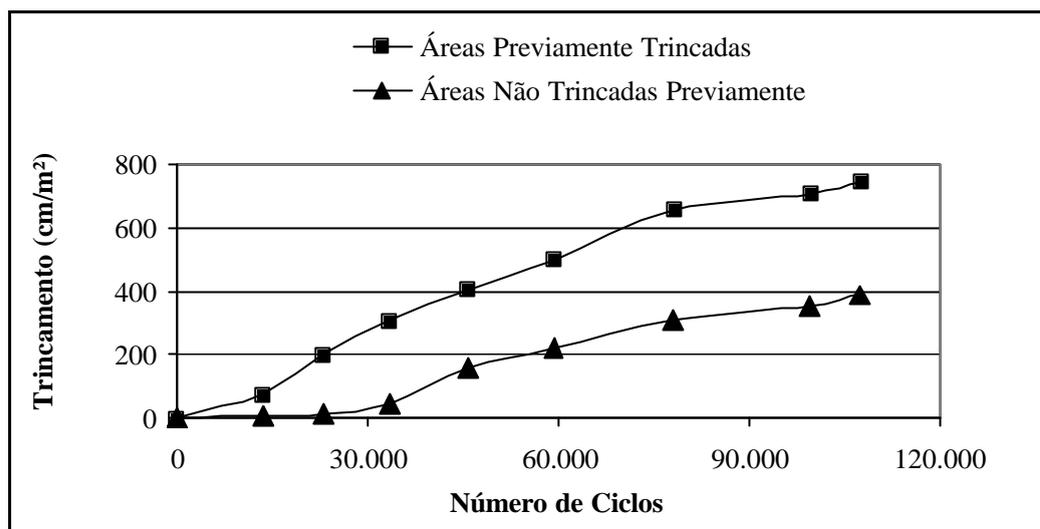


Figura 45: Comparativo do trincamento – recapeamento em TSD

A espessura de um recapeamento asfáltico é inversamente proporcional com a velocidade da propagação de uma trinca até a superfície. A severidade do trincamento realizado no antigo revestimento e a pouca espessura do recapeamento, aliadas ao tráfego e baixas temperaturas, foram os fatores predominantes no surgimento das trincas em poucos ciclos de carga dinâmica. Aos 10.000 ciclos foi verificada a primeira trinca, no sulco executado para a passagem dos cabos dos sensores, na área A3 de estudo e foi a que apresentou maior abertura.

Uma melhor visualização da evolução trincamento com o número de ciclos de carga pode ser proporcionada pela Figura 46, onde se verifica que a maioria das trincas é transversal à direção do tráfego. Normalmente, essa disposição configura o trincamento oriundo de variações térmicas diárias elevadas, fato característico do outono no Rio Grande do Sul. Verificou-se que no mês de abril de 2003, as máximas variações térmicas diárias chegaram a 15°C.

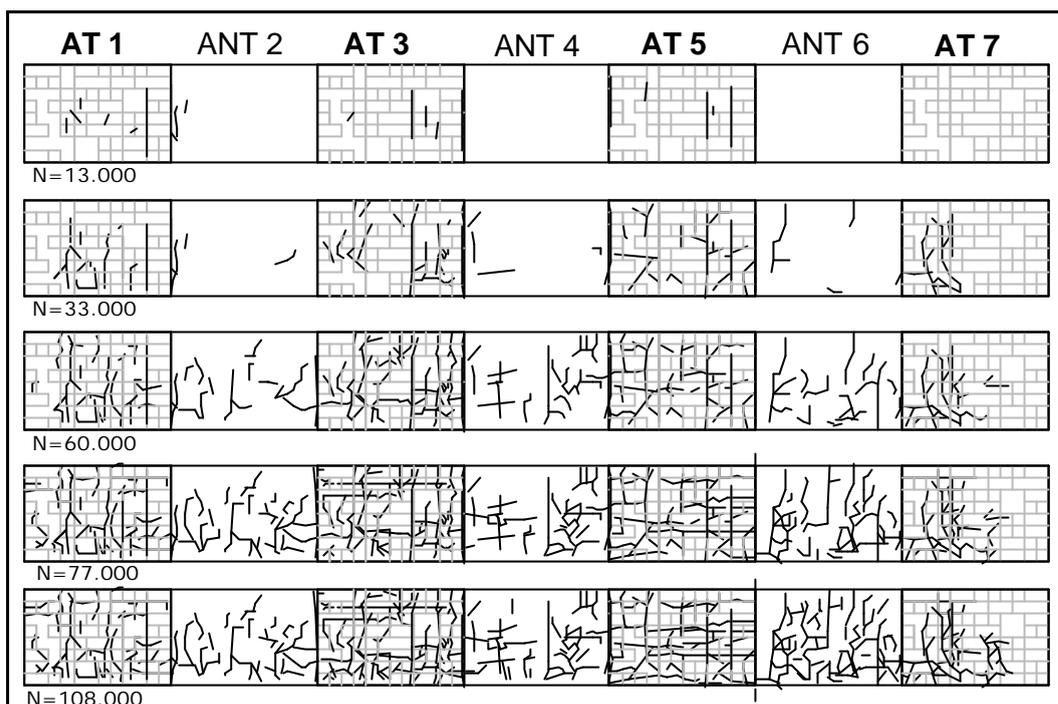


Figura 46: Evolução do trincamento – TSD

A propagação do trincamento cresceu quase linearmente, tanto em áreas trincadas previamente com em áreas não trincadas, sendo a velocidade média, no primeiro caso, de 46 cm/m^2 , e no segundo, ficando na metade deste valor, 23 cm/m^2 . A partir da Figura 47, observa-se que a velocidade do trincamento, para as duas condições, tende a se aproximar após os 40.000 ciclos de carga e a condição final do pavimento, apresenta-se bastante semelhante, em termos de trincamento. Do momento do início do trincamento em áreas não trincadas, conclui-se que as fissuras iniciaram no revestimento antigo por fadiga e propagaram-se para o recapeamento, o qual teve início após 30.000 ciclos de carga.

Aos 77.000 ciclos, verificou-se o surgimento de uma trinca longitudinal ao tráfego, fora da trilha de roda, referente ao local da execução da reperfilagem. Conclui-se que a demora para o aparecimento desta fissura esteja associada à recuperação elástica do ligante, proporcionada pela adição de SBS. A magnitude da deformação permanente, apresentada pela estrutura, foi elevada e, com a reperfilagem, gerou-se uma superfície de fragilidade, acreditando-se que a reflexão do corte executado por esta restauração, deveria aparecer na superfície, com um número de ciclos menor.

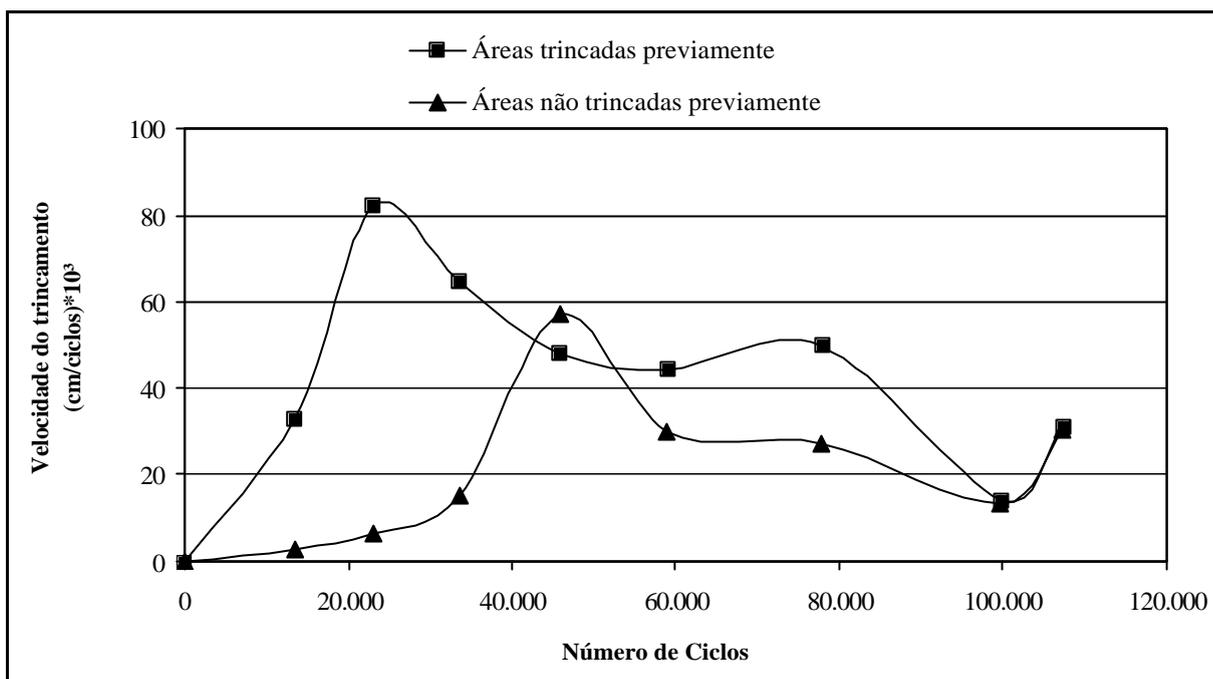


Figura 47: Velocidade do trincamento - recapeamento em TSD

Na inspeção, realizada um mês após a aplicação de cargas dinâmicas, verificou-se que muitas trincas não estavam visíveis, podendo este fato ser relacionado à recuperação elástica proporcionada pela adição de SBS no ligante asfáltico e a posição da linha neutra estar abaixo do recapeamento, o que indica que ele está trabalhando em compressão.

5.2.5 Parâmetros de Textura Superficial

Adicionalmente, fez-se neste trabalho, a avaliação da perda de textura superficial do pavimento com a evolução do tráfego. A textura da superfície do pavimento pode ser classificada pelo comprimento e amplitude das ondulações observadas no revestimento, conforme mostra a Tabela 19 (Momm, 1998).

Tabela 19: Classificação da textura superficial do pavimento

DOMÍNIO DA TEXTURA		INTERVALO DE DIMENSÕES	
		Horizontal (Comprimento da ondulação)	Vertical (amplitude da ondulação)
Macrotextura		0 - 0,5 mm	0 - 0,2 mm
Microtextura		0,5 – 50 mm	0,2 - 10 mm
Megatextura		5 – 50 cm	1 - 50 cm
Irregularidades	Curtas	0,5 - 5 m	1- 20 mm
	Médias	5 - 15 m	0,5 - 5 cm
	Longas	15 - 50 m	1 - 20 cm

5.2.5.1 Pêndulo Britânico

À medida que a pista é solicitada pelo tráfego, sua superfície vai tornando-se polida, perdendo resistência à derrapagem. Os valores limites, conforme a Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv), para a classificação da textura do pavimento, são apresentadas na Tabela 20. Segundo a ABPv, valores de resistência à derrapagem maiores que 55 são considerados seguros para o tráfego.

Tabela 20: Classes do revestimento quanto à resistência à derrapagem

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA	
CLASSES DE RESISTÊNCIA A DERRAPAGEM – MÉTODO PÊNDULO BRITÂNICO	
Classes	Valor da Resistência à Derrapagem (VRD)
Perigosa	<25
Muito Lisa	25 – 31
Lisa	32 – 29
Insuficientemente Rugosa	40 – 46
Medianamente Rugosa	47 – 54
Rugosa	55 – 75
Muito Rugosa	>75

Segundo Momm (1997), este equipamento permite a medição indireta da microtextura do pavimento, baseado na hipótese de que a o atrito, gerado a baixas velocidades de tráfego, é produzido por esse parâmetro. Porém, constata-se, pela utilização deste equipamento, que a macrotextura da superfície também interfere nos resultados, não se podendo considerar os resultados como sendo exclusivamente dados pela microtextura. Neste domínio, estão circunscritas: a superfície dos granulares que compõe a mistura (arestas vivas, aspereza superficial e rocha de origem) e a participação das partículas finas na criação da aspereza da superfície e é ela a responsável pela ruptura do filme d'água, evitando a hidroplanagem dos veículos.

Os ensaios foram realizados em cinco seções do pavimento e procurou-se fazer a leitura nos mesmos locais, a 35 cm do bordo da trilha de roda. Mostra-se, na Figura 48, o declínio da resistência à derrapagem com o número de ciclos aplicados pelo trem de cargas, porém aos 60.000 ciclos, a superfície do pavimento apresentou leituras classificadas como muito rugosas de acordo com a Tabela 20, devido a granulometria aberta dos agregados do recapeamento em TSD. Na última leitura, os dados apresentaram valores elevados devido a necessidades de calibração no equipamento. Essas leituras foram inconsistentes e não representam a condição final e textura da superfície do pavimento.

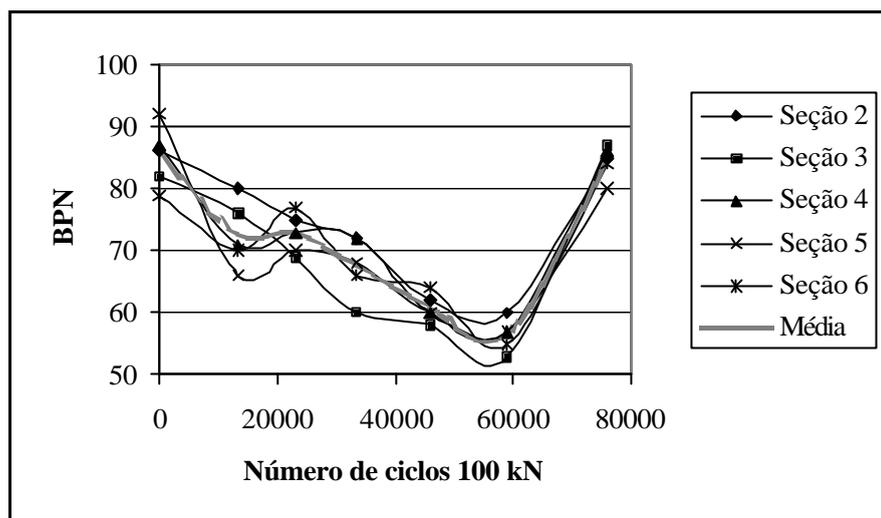


Figura 48: Leituras com o Pêndulo Britânico – recapeamento em TSD

5.2.5.2 Mancha de Areia

O ensaio Mancha de Areia destina-se a determinação da macrotextura superficial do pavimento. Este parâmetro influi diretamente na aderência pneu-pavimento, porém, valores elevados de textura superficial, aumentam o ruído gerado pelo tráfego. A macrotextura depende da granulometria dos agregados da mistura e da comunicação entre a superfície e os poros interiores – drenabilidade.

Com os resultados, pôde-se avaliar a macrotextura da superfície e classificá-los, conforme a Tabela 21, fornecido pela norma ASTM E 965 – 96. Segundo a ABPv (1999), são considerados seguros os valores de altura da mancha de areia entre 0,6 e 1,2 mm.

Na Tabela 22, estão apresentados os resultados do ensaio Mancha de Areia, obtidos no tratamento superficial. Por este ensaio, verifica-se que a macrotextura superficial não se alterou significativamente com a evolução do número de ciclos de carga, permanecendo com valores muito acima de limites de segurança, ou seja, não apresentando risco quanto à aderência pneu pavimento.

Tabela 21: Classificação da textura em função da altura da mancha

Textura	Faixas de Altura Mancha (mm)	
Muito Grossa	4,97	1,20
Grossa	1,18	0,80
Média	0,79	0,40
Fina	0,39	0,22
Muito Fina	0,22	0,15

Tabela 22: Resultados do ensaio "Mancha de Areia"

Número de ciclos de carga de eixo (100 kN)	Altura da mancha (mm)
0	2,37
77.973	2,23
99.657	2,25

5.3 RECAPEAMENTO EM CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL

5.3.1 Histórico de Carregamento

A atuação do simulador de tráfego, na faixa da pista recapeada em concreto asfáltico convencional, foi de fevereiro a maio de 2004, totalizando aproximadamente 150.000 ciclos, com carga de eixo de 100kN. A Figura 49 mostra o número semanal acumulado de ciclos de carga aplicados durante o período de ensaios.

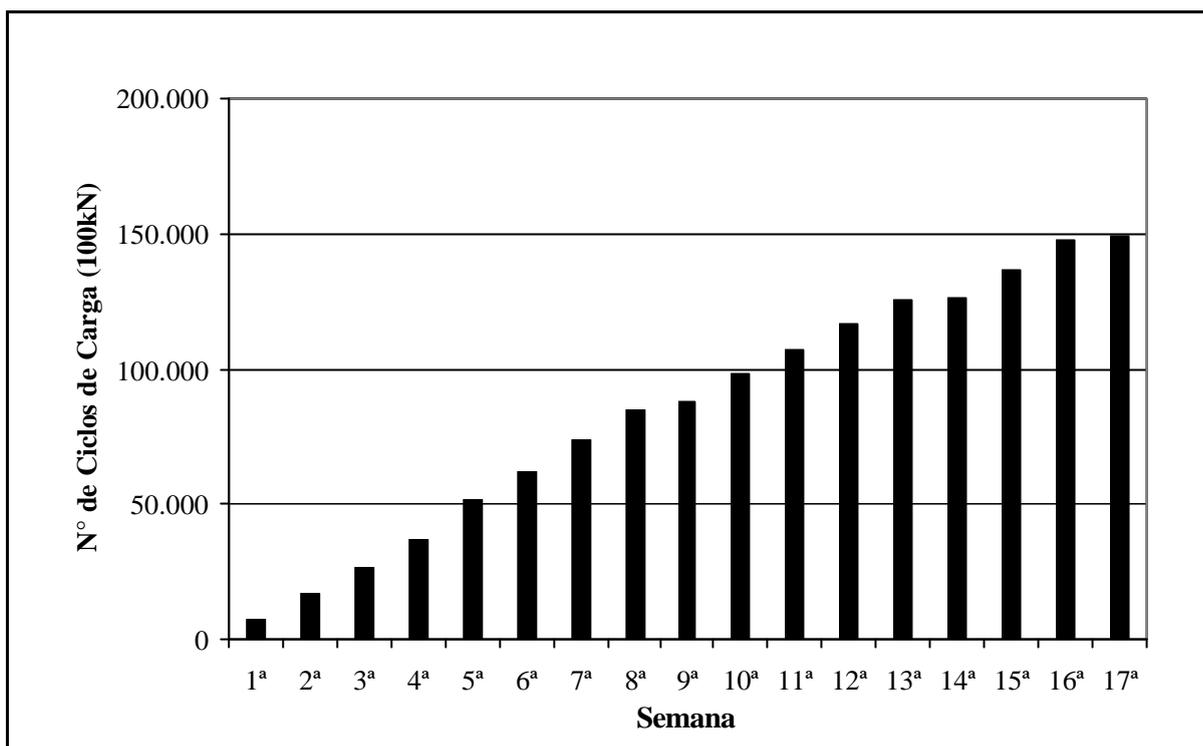


Figura 49: Histórico do carregamento nas semanas de ensaio – recapeamento CA

5.3.2 Parâmetros Ambientais

Em geral, o pavimento recapeado em concreto asfáltico convencional foi trafegado em um período de poucas chuvas até os 100.000 ciclos de carga. Após este período, as precipitações totais foram de 190 mm, representando 75% das precipitações registradas durante todo o período de ensaios. A Figura 50 mostra o nível de precipitações durante o carregamento dinâmico.

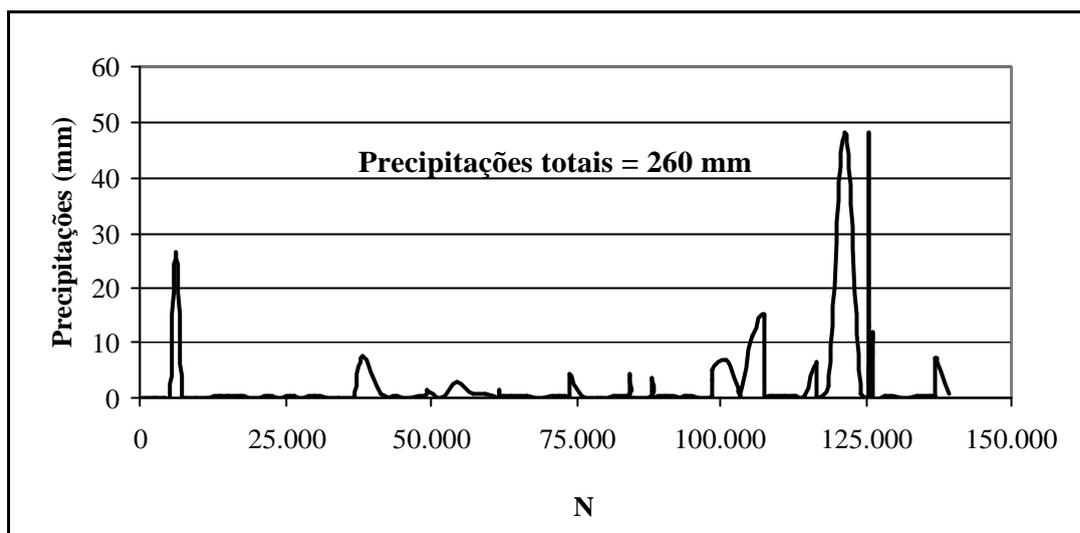


Figura 50: Precipitações pluviométricas no período de ensaios – recapeamento CA

As faixas de temperaturas diárias, durante os ensaios, estão mostradas na Figura 51. Na Figura 52, verifica-se a frequência de temperaturas, através dos dados fornecidos pela estação meteorológica a cada 15 minutos, onde se nota que a faixa de temperatura predominante foi de 15° a 25°C, sendo que 21% dos dados coletados durante os ensaios ficaram acima de 25°C.

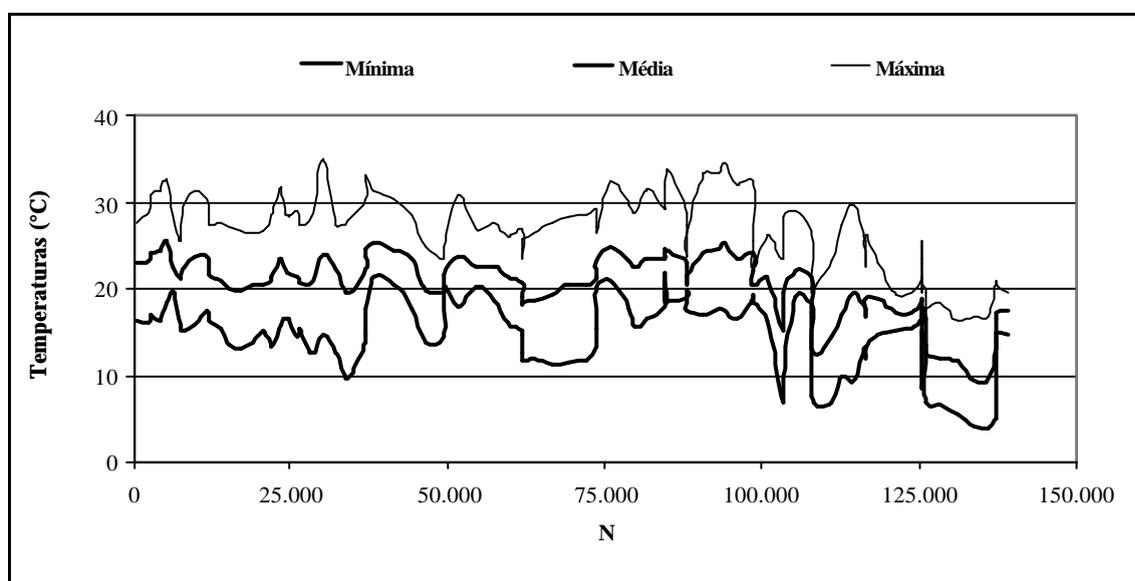


Figura 51: Temperaturas diárias - recapeamento CA

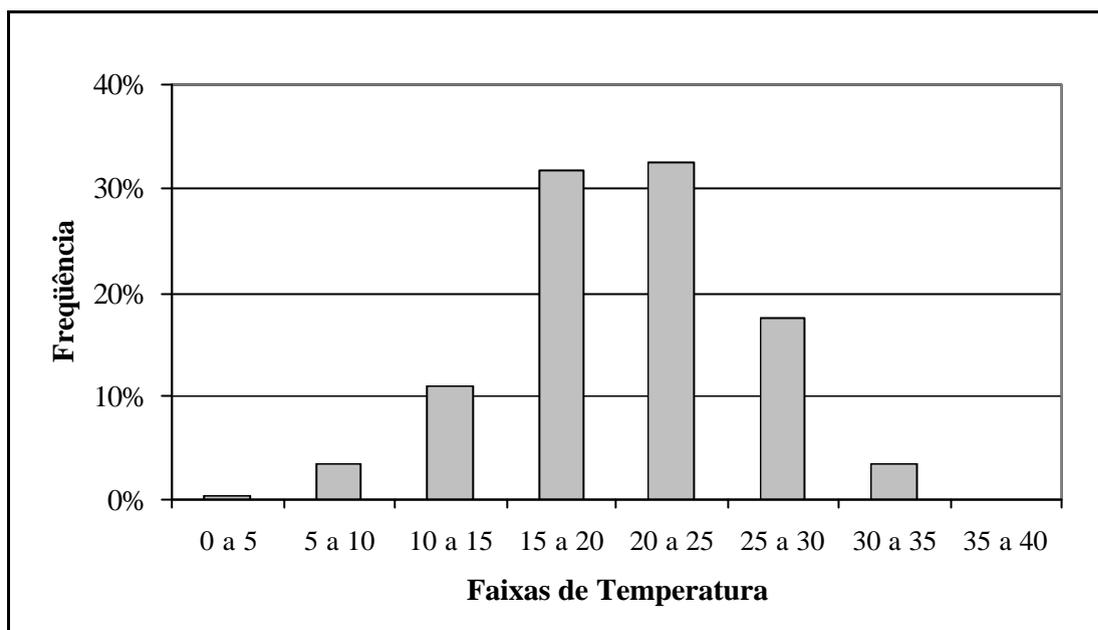


Figura 52: Frequência da temperatura durante os ensaios –
recapeamento CA

5.3.3 Parâmetros de Resposta Estrutural

5.3.3.1 Medidas Deflectométricas e Bacias

Para a verificação da condição estrutural do pavimento, antes da aplicação do reforço em concreto asfáltico, fez-se um levantamento das deflexões máximas com a viga Benkelman. As medidas levaram a uma deflexão característica de 77×10^{-2} mm. A média dos valores foi de 69×10^{-2} mm e o desvio padrão igual a 8×10^{-2} mm.

As deflexões máximas, medidas com a viga Benkelman, após o recapeamento são mostradas na Figura 53 e as deflexões características para os três níveis ensaiados de carregamento, na Figura 54. Nota-se que o nível dessas deformações não foi afetado pelo carregamento dinâmico, ficando na faixa de 60×10^{-2} mm para carga de eixo equivalente de 100kN.

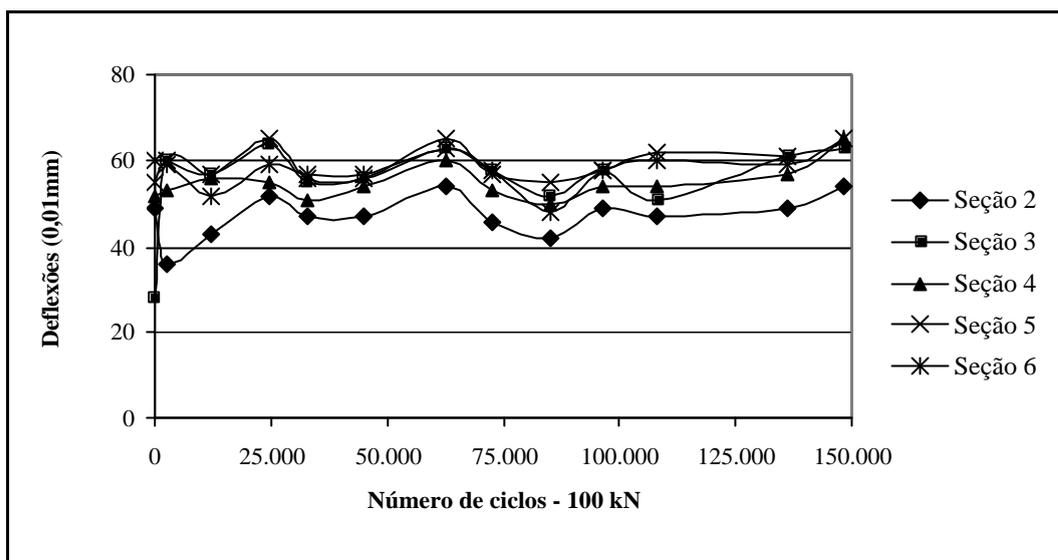


Figura 53: Evolução das deflexões máximas – recapeamento CA

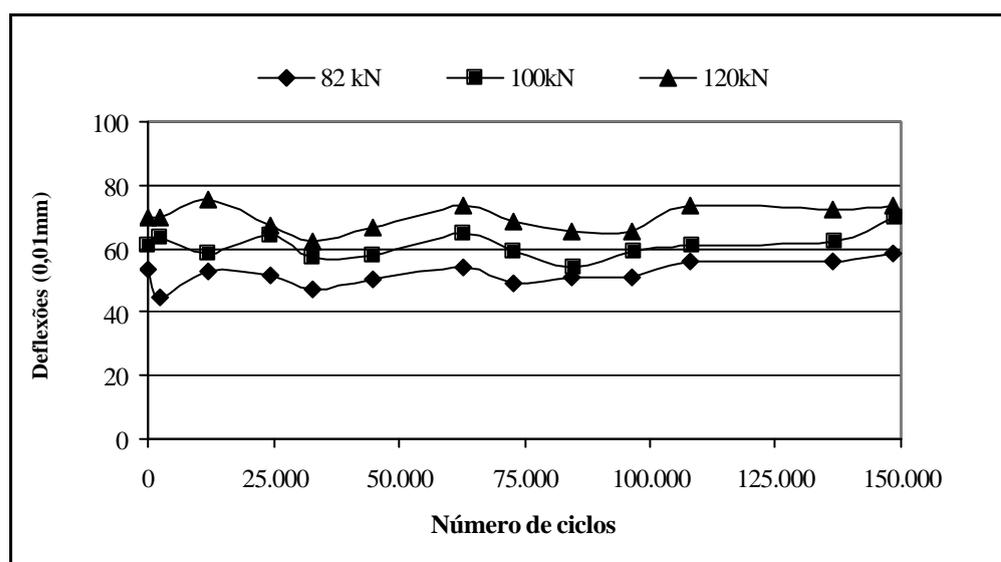


Figura 54: Deflexões características – recapeamento CA

Investigou-se a influência do trincamento, realizado no pavimento existente, através da verificação de valores de deflexão máxima em seções onde o revestimento foi trincado previamente (ST) e em seções onde o trincamento não foi realizado (SNT), como mostra a Figura 55.

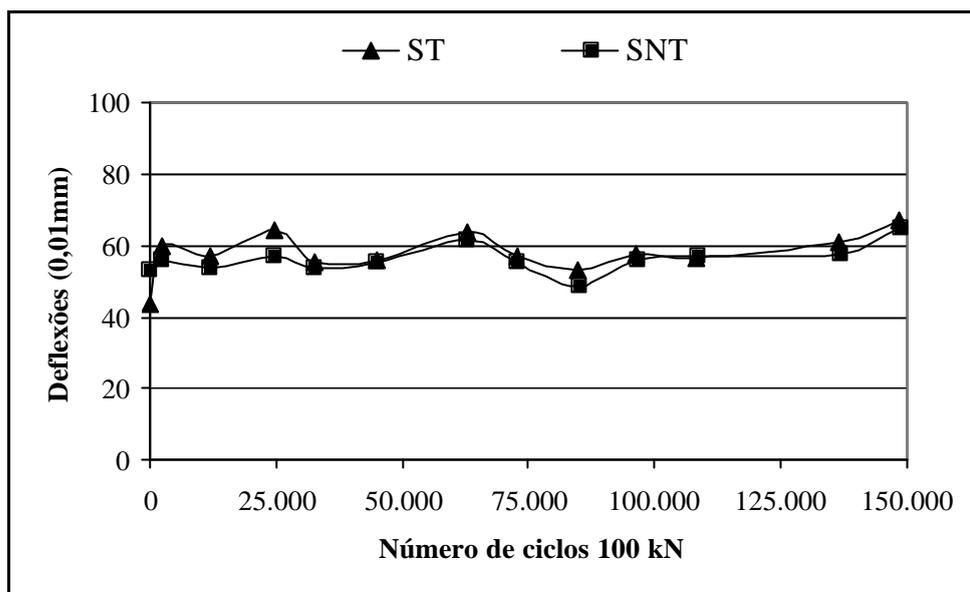


Figura 55: Comparativo de deflexões – recapeamento CA

Percebeu-se que o nível de deflexão não apresentou diferenças significativas em relação ao trincamento artificial realizado.

O levantamento das bacias deflectométricas está mostrado na Figura 56. Não percebeu-se diferença significativa quanto ao trincamento prévio, nem no que se refere as deflexões máxima, nem nas deformadas, portanto os raios apresentados na Tabela 23 são referentes às médias dos levantamentos realizados nas seções.

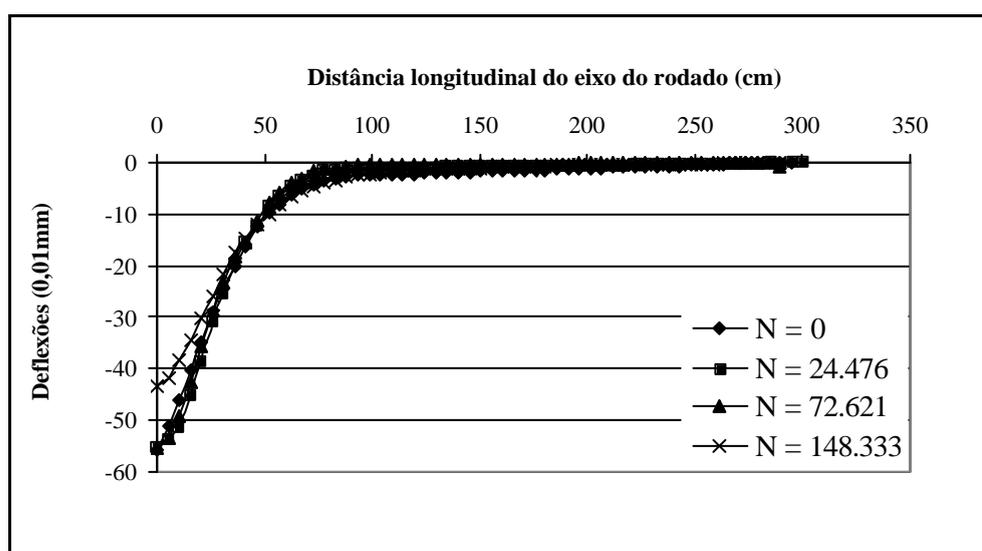


Figura 56: Bacias deflectométricas – recapeamento CA

Tabela 23: Raios de Curvatura – recapeamento CA

N	Raios de Curvatura para diferentes níveis de carga de eixo (m)		
	82 kN	100 kN	120 kN
0	152	115	77
24.476	124	129	falha na leitura
72.621	126	122	101
148.333	168	180	155

A retroanálise dos módulos de resiliência fez-se pela comparação das bacias modeladas no FLAPS, com a média das bacias ensaiadas com carga de eixo de 100 kN, como mostra a Figura 57, excluindo os valores obtidos com de N = 148.000, devido à inconsistência dos dados apresentados. Verifica-se também a pouca influência do trincamento prévio na deformada.

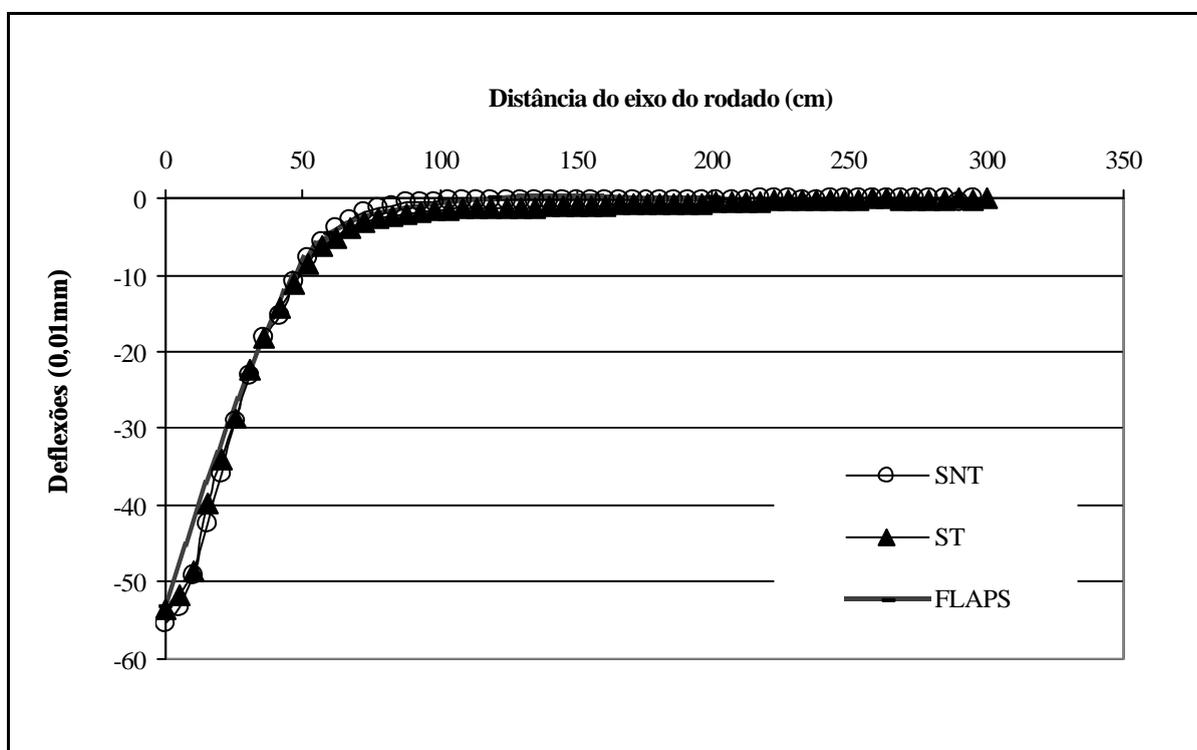


Figura 57: Comparativo entre bacias medidas e calculadas - recapeamento CA

Na Figura 58 e Tabela 24 resumem-se os parâmetros de entrada para a obtenção da bacia deflectométrica pelo programa FLAPS.

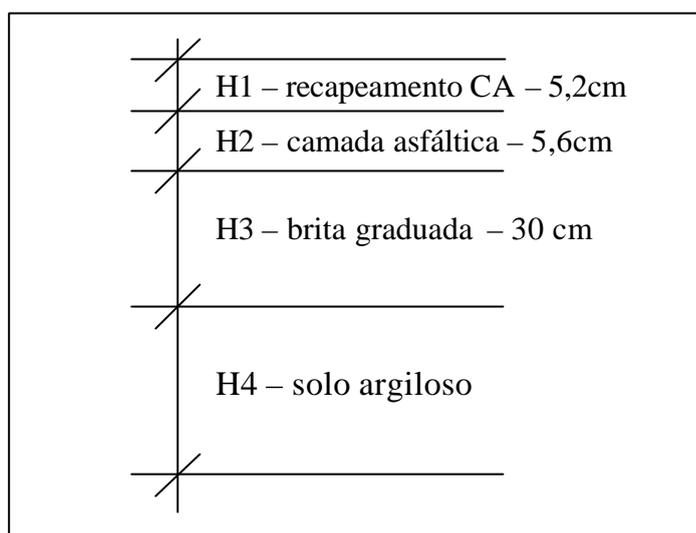


Figura 58: Camadas consideradas no Flaps - recapeamento CA

Tabela 24: Dados de entrada no FLAPS - recapeamento CA

Dados de entrada	Valor
Número de camadas do pavimento	4
Número de cargas de roda	2
Carga por roda	25 kN
Pressão de inflação dos pneus	0,62 MPa
Distância entre rodas	30 cm
Parâmetros K e n do modelo do subleito	270 MPa e -0,56

Os parâmetros K e n, utilizados para representar o comportamento do solo, neste caso, são os valores obtidos nos ensaios triaxiais na umidade ótima da curva de compactação, fornecidos por Núñez, *et al.* (2002), pela melhor aproximação dos valores das deflexões medidas e seguindo o modelo $M_R = K\sigma_d^n$. Os módulos obtidos pela retroanálise são:

- $E_1 = 2.500$ MPa (camada de recapeamento em CA) ;

- $E_2 = 2.000 \text{ MPa}$ (camada asfáltica existente);
- $E_3 = 60 \text{ MPa}$ (base granular).

Calculou-se a contribuição das camadas do pavimento nos valores das deflexões máximas, obtidas através dessa simulação, como mostra a Figura 59, explicando também a pouca diferença de leituras em seções pertencentes às áreas trincadas e não trincadas e confirmando o comprometimento estrutural apresentado pela camada granular.

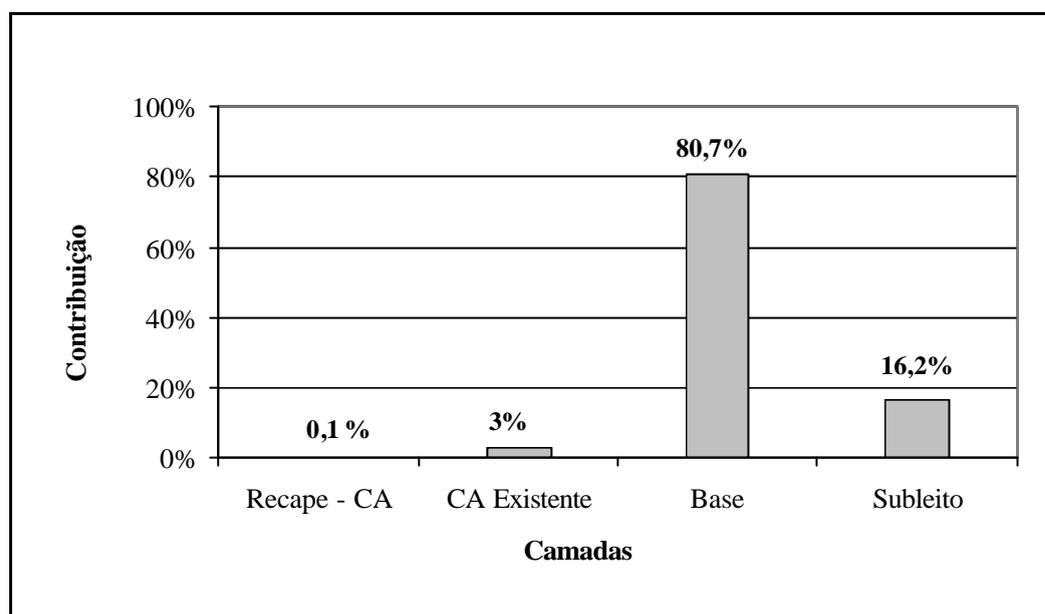


Figura 59: Contribuição das camadas na deflexão – recapeamento CA

5.3.3.2 Tensões

No recapeamento em concreto asfáltico, foram possíveis as leituras nas duas direções. A maior espessura do recapeamento favoreceu a integridade dos sensores durante a execução e os ensaios com o simulador de tráfego. A Figura 60 mostra um discreto crescimento no nível das tensões, sendo que a tensão vertical apresentou indícios de aumentos significativos após 120.000 ciclos, aproximadamente, podendo estar associado à ruptura do pavimento em função do trincamento.

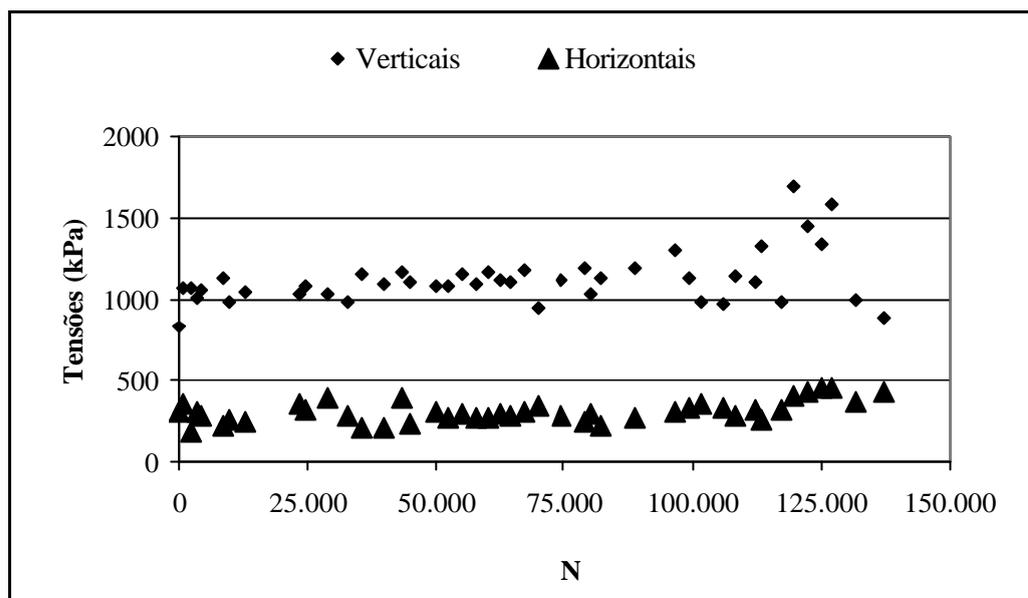


Figura 60: Tensões medidas - recapeamento CA

5.3.3.3 Deformações Horizontais

A Figura 61 refere-se às evoluções das deformações, nas três direções medidas, com o tráfego aplicado. Poucas leituras foram obtidas na direção transversal devido à falha deste sensor. Na direção longitudinal, as magnitudes das deformações medidas não apresentaram alterações significativas.

Com os valores de deformações horizontais nas 3 direções foi possível o cálculo das deformações nas direções principais através das Equações 8 e 9, fornecidas por Gonçalves (2002), até $N = 24.000$. Através da Equação 10 é possível determinar o ângulo formado entre o eixo das deformações principal e o eixo X. Os valores das deformações principais estão mostrados na Tabela 25. Verifica-se que os valores foram muito próximos aos medidos diretamente pelos sensores de deformação em função do ângulo θ ser muito baixo.

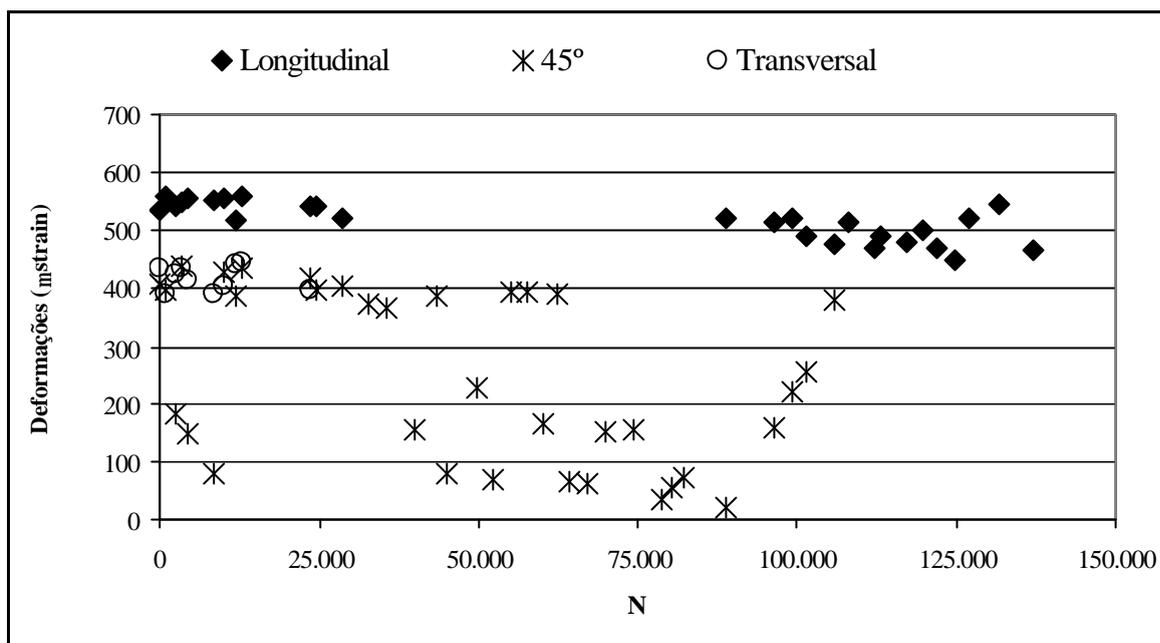


Figura 61: Deformações medidas - recapeamento CA

$$\mathbf{e}_1 = (\mathbf{e}_x + \mathbf{e}_y) \times \frac{1}{2} + \sqrt{(\mathbf{e}_x - \mathbf{e}_y)^2 + \mathbf{g}_{xy}^2} \times \frac{1}{2} \quad \text{Equação 8}$$

$$\mathbf{e}_2 = (\mathbf{e}_x + \mathbf{e}_y) \times \frac{1}{2} - \sqrt{(\mathbf{e}_x - \mathbf{e}_y)^2 + \mathbf{g}_{xy}^2} \times \frac{1}{2} \quad \text{Equação 9}$$

$$\text{tg}2\mathbf{q} = \frac{\mathbf{g}_{xy}}{(\mathbf{e}_x - \mathbf{e}_y)} \quad \text{Equação 10}$$

Onde: ε_1 e ε_2 = deformações horizontais nas direções principais;

ε_x = deformação horizontal na direção X (longitudinal ao tráfego);

ε_y = deformação horizontal na direção Y (transversal ao tráfego);

θ = ângulo entre a direção principal e o eixo X;

$$\gamma_{xy} = 2 \varepsilon_{xy}$$

Tabela 25: Deformações nas direções principais – recapeamento CA

N	e ₁ (mstrain)	e ₂ (mstrain)	q (graus)
0	534	436	0,7
868	559	392	0,6
2.472	542	426	0,6
3.446	550	437	0,7
4.403	555	416	0,6
8.465	551	390	0,4
9.934	557	405	0,7
11.904	520	441	0,7
12.824	561	447	0,7
23.492	544	397	0,7

Através do programa FLAPS, calculou-se a posição da linha neutra, como mostra a Figura 62.

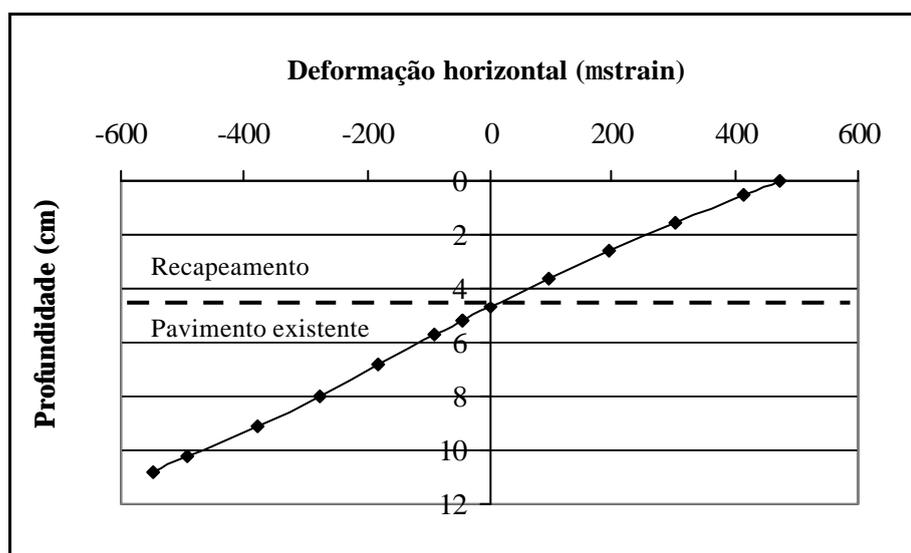


Figura 62: Posição da linha neutra – recapeamento CA

5.3.4 Parâmetros de Comportamento

5.3.4.1 Deformações Permanentes

Das deformações permanentes, conforme mostra a Figura 63, verifica-se uma fase de consolidação inicial do recapeamento nos 10 mil primeiros ciclos de carga, onde o máximo afundamento de trilha de roda verificado nas seções foi de 5mm, não se percebendo diferenças marcantes entre as seções analisadas, (desvio padrão médio = 0,98mm). O crescimento das deformações permanentes apresentou um comportamento linear após o período de consolidação, com uma velocidade de crescimento de 0,024 mm/(10³ ciclos).

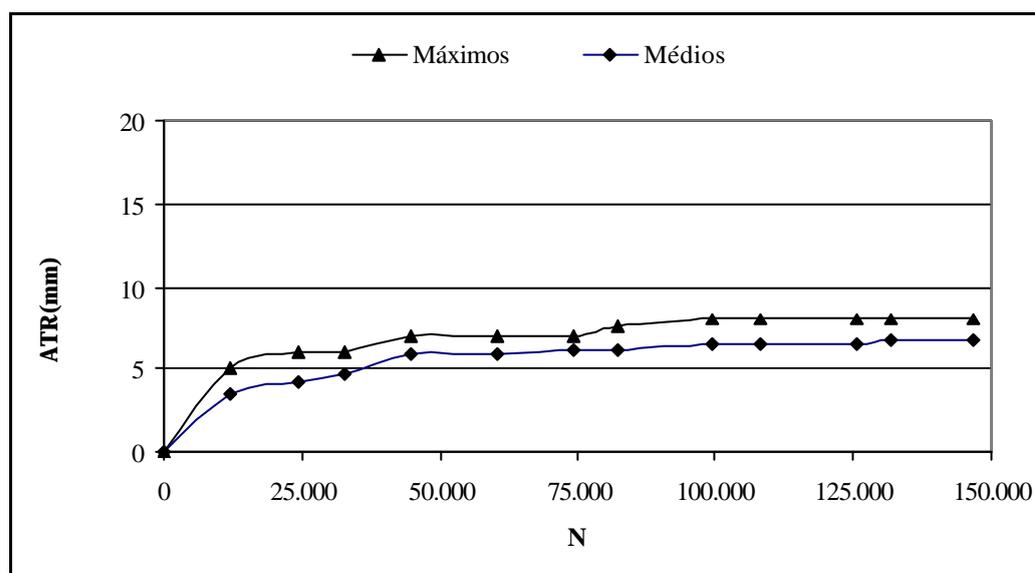


Figura 63: Deformações permanentes – recapeamento CA

5.3.4.2 Trincamento

A Figura 64 mostra a evolução do trincamento com o número de solicitações do trem de cargas. O surgimento das primeiras trincas foi aos 95 mil ciclos de carga. Pode-se admitir que o trincamento foi causado por fadiga de toda a camada asfáltica, em função do nível de

trincamento se apresentar maior em áreas não trincadas previamente. A provável origem da trinca é o fundo da camada asfáltica antiga devido à espessura da camada asfáltica ser inferior a 20cm (Rodrigues, 1991).

O processo de aceleração do trincamento, aos 120 mil ciclos de carga, foi no período pelo qual houve uma queda de temperatura, acompanhado pelas maiores precipitações pluviométricas verificadas no período de ensaio. A análise dos resultados sugere que, a condição estrutural da camada de revestimento, começou a apresentar sinais de comprometimento a partir deste ponto, e que o trincamento tenderá a se propagar, com aceleração mais próxima à apresentada entre 125.000 a 150.000, se mais ciclos de carregamento dinâmico fossem aplicados.

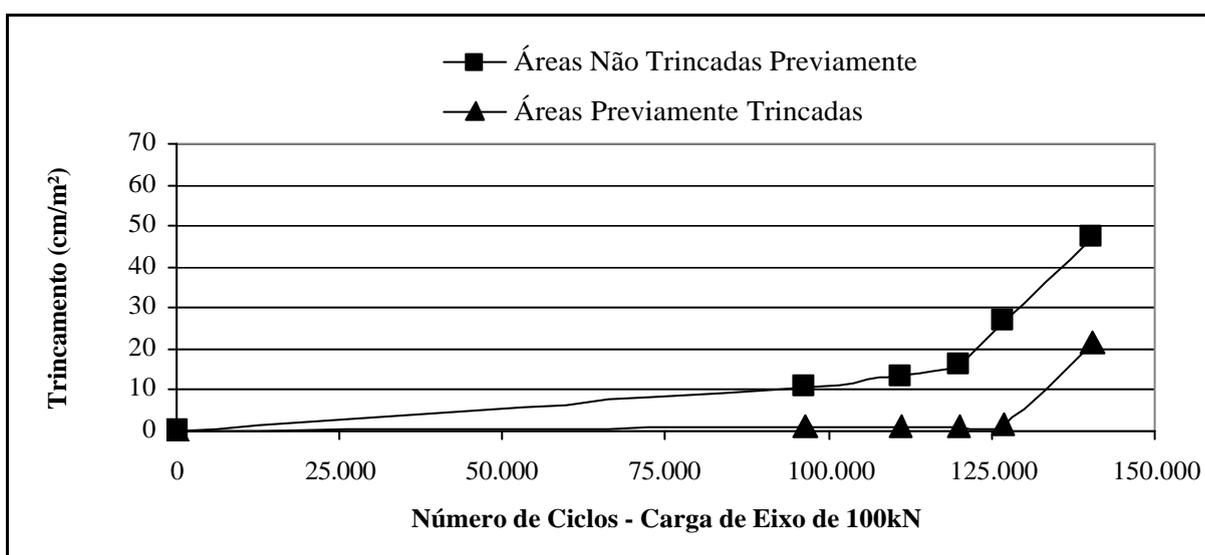


Figura 64: Comparativo do trincamento – recapeamento CA

Uma melhor visualização da evolução do trincamento com o número de ciclos de carga pode ser proporcionada pela Figura 65. A primeira fissura apareceu na área 2 de estudo e sua abertura evoluiu com o número de ciclos de carga. A direção do trincamento foi transversal ao tráfego que, segundo Rodrigues (1991) essas trincas estão associadas a variações térmicas diárias em que há os consecutivos movimentos de contração e expansão do material asfáltico e que ultrapassam os valores de deformação horizontal admissíveis, além do comprometimento estrutural da camada de base granular.

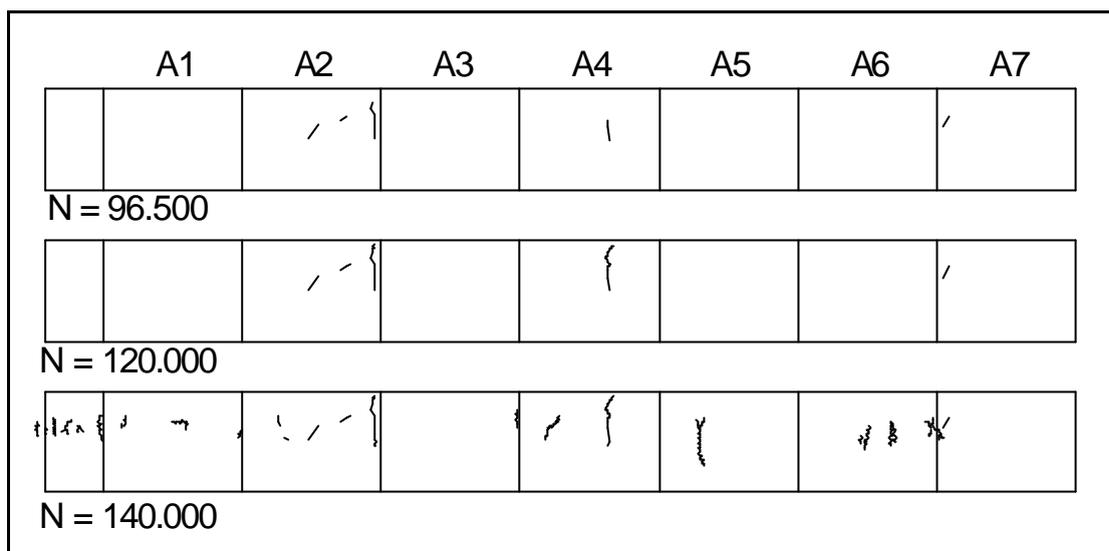


Figura 65: Evolução do trincamento – recapeamento CA

O crescimento, verificado após os 125.000 ciclos de carga, está associado a uma ação combinada de tráfego e condições meteorológicas. No mês de maio (N entre 115.000 a 150.000) a média da variação de temperatura foi de 8,9°C, sendo a máxima variação igual a 15,8°C (de 8,6 para 24,4°C). A inspeção visual, realizada após o término dos ensaios com o simulador, mostrou que a maior parte das trincas estavam visíveis, mesmo admitindo-se o fato da camada asfáltica estar trabalhando em compressão.

5.3.5 Parâmetros de Textura Superficial

A textura superficial do recape em concreto asfáltico foi avaliada somente com o Pêndulo Britânico devido à indisponibilidade de esferas de vidro para a realização do ensaio Mancha de Areia. Os resultados estão apresentados na Figura 66, onde se percebe uma perda de microtextura superficial nos primeiros 20.000 ciclos de carga, mantendo-se constante até a finalização dos ensaios. Conforme a Tabela 20, apresentada pela ABPV, pode-se classificar a textura do revestimento asfáltico como medianamente rugosa, sem apresentar riscos quanto à derrapagem.

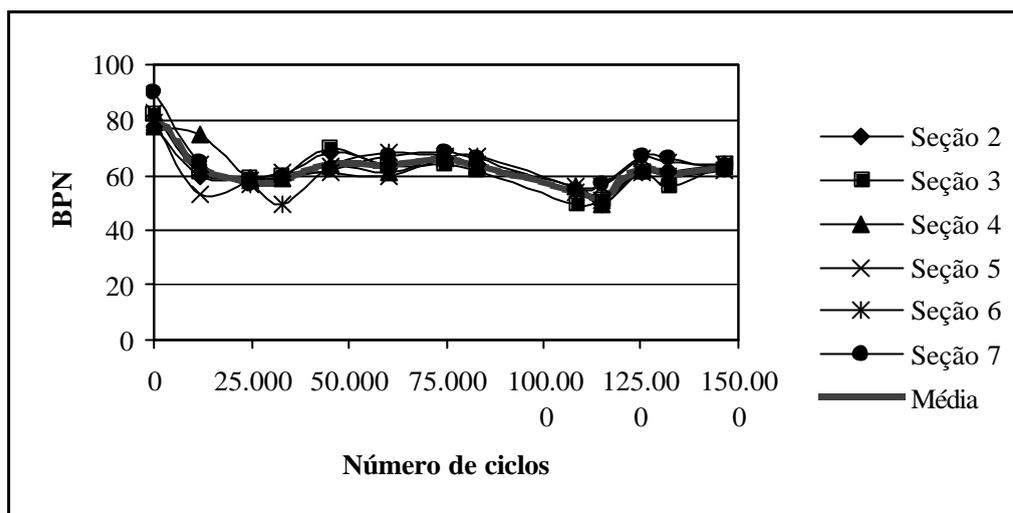


Figura 66: Leituras com o Pêndulo Britânico – recapeamento CA

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

As principais conclusões referentes aos ensaios realizados e quanto ao desempenho apresentado pelos recapeamentos asfálticos são:

A técnica de ensaios acelerados, através da utilização do simulador de tráfego DAER/UFRGS, mostrou-se adequada para a obtenção das respostas estruturais e funcionais dos pavimentos recapeados, em curto espaço de tempo. Os níveis de degradação, obtidos em 3 meses de ensaio em cada recapeamento, foram suficientes para a avaliação das condições dos pavimentos estudados, podendo-se prolongar os ensaios no recapeamento em concreto asfáltico convencional. Ainda assim, conseguiram-se dados importantes que não seriam possíveis em uma análise realizada em rodovias reais, no mesmo período.

A comparação entre o desempenho dos recapeamentos estudados foi inviabilizada pelos seguintes motivos:

- O projeto inicial da pesquisa previa a comparação de um tratamento superficial duplo com 2,5 cm de espessura, com uma camada de reforço asfáltico de 3 cm. As espessuras, medidas em corpos de prova extraídos, foram de 1,8 e 5,2 cm, respectivamente, sendo esta a principal causa para não compará-los.
- As condições estruturais iniciais foram diferentes. Verificou-se que as deflexões características das faixas, antes da aplicação dos recapeamentos, foram de 88×10^{-2} mm para a faixa que recebeu o tratamento superficial, e de 77×10^{-2} mm para a faixa recapeada em concreto asfáltico convencional. Explica-se esta diferença pelo fato da faixa que recebeu o tratamento superficial já ter sido trafegada durante a pesquisa de Gonçalves (2002).
- No primeiro momento, acreditou-se que a reperfilagem executada na faixa recapeada em tratamento superficial faria com que as condições estruturais e funcionais se igualariam, porém isto não ocorreu devido à dificuldade de compactação tanto da camada granular como da camada de concreto asfáltico, utilizada para o remendo.
- As condições meteorológicas dos períodos de ensaio foram desiguais.

6.1 TRATAMENTO SUPERFICIAL

As deflexões máximas, medidas com a viga Benkelman, começaram a evoluir depois dos 80.000 ciclos de carga. Considerando-se a influência da umidade no valor das deformações transientes, pode-se associar este aumento ao período de intensas precipitações, ocorridas entre 70.000 e 90.000 ciclos, aliado ao alto nível de trincamento, que favoreceu a entrada das águas pluviais nas camadas de base granular e subleito.

Constatou-se que as camadas asfálticas não contribuem significativamente nos valores de deflexões máximas, nem na forma das deformadas das bacias, justificando o fato dos valores de deflexões serem muito próximos em medidas realizadas nas áreas trincadas e não trincadas previamente.

As respostas estruturais, fornecidas pela simulação realizada no programa FLAPS, indicaram que a camada mais comprometida é base granular. A retroanálise mostrou que esta camada apresentou baixo módulo de resiliência, explicando a contribuição de 70% nos valores das deflexões máximas.

Os registros verificados pelos sensores mostraram uma queda nas tensões e deformações. A degradação ocorrida com o tráfego gerou um enfraquecimento, fazendo com que as tensões sejam transferidas para as camadas inferiores. Quanto à redução dos valores das deformações horizontais com o número de ciclos de carga, acredita-se que foi pela diminuição da temperatura do pavimento em função do período em que foram realizados os ensaios. Um prejuízo contabilizado pela superficialidade que os sensores foram instalados é a falta de dados, pela danificação dos instrumentos na etapa de execução do tratamento superficial.

Os afundamentos de trilha de roda apresentaram valores considerados altos na fase de consolidação. A reperfilagem executada contribuiu neste sentido porque criou uma superfície de ruptura por cisalhamento, fazendo com que houvesse um recalque de toda a camada asfáltica. No momento do recorte da camada em concreto asfáltica antiga, removeu-se parte da camada granular, recolocando-a posteriormente. A dificuldade de compactação, tanto da camada granular, como da mistura asfáltica, contribuiu para a rápida evolução das deformações permanentes no início do tráfego, aliado a baixa capacidade estrutural da camada granular. Percebeu-se também que a média dos valores foi bastante influenciada pelas seções S2 e S6, onde se verificaram os maiores valores e que são as seções mais próximas aos cortes transversais gerados pela reperfilagem.

Em relação ao trincamento, conclui-se que a causa preponderante foi a severidade do trincamento artificial executado na pista, antes do recapeamento, o qual foi incompatível com a pouca espessura do tratamento superficial. Além disso, outros importantes fatores contribuíram para a aceleração do trincamento. Pode-se citar que as temperaturas durante os ensaios com o simulador de tráfego foram baixas, além das variações diárias, e elevadas precipitações pluviométricas. As condições das camadas de infra-estrutura do pavimento já haviam sido solicitadas com carregamento dinâmico nesta faixa, contribuindo para a evolução deste tipo de degradação.

O fenômeno de reflexão de trincas foi percebido até os primeiros 30.000 ciclos de carga aproximadamente. Após os 40.000 ciclos, as velocidades de trincamento começaram a se aproximar, deduzindo-se o trincamento foi causado pela fadiga do revestimento.

Na inspeção visual, realizada após um mês do término dos ensaios nesta faixa, verificou-se que muitas trincas não estavam perceptíveis, podendo-se associar este fato a dois motivos: recuperação elástica proporcionada pela adição de SBS no ligante e a posição da linha neutra, a qual mostra que o recapeamento estava trabalhando em compressão.

A utilização de ligantes modificados por SBS em tratamentos superficiais é uma alternativa eficaz para medidas de manutenção de rodovias porque atua como selante de pequenas trincas e reduz a desagregação. Deve-se ressaltar que o trincamento artificial realizado antes da aplicação do recapeamento possui abertura superior 2mm e que foram preenchidas com argila o que impediu a penetração da emulsão. O recapeamento em TSD mostrou-se bastante eficaz em termos de textura superficial além de não se verificar arrancamento de agregados no período de atuação do trem de cargas do simulador de tráfego.

6.2 CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL

A condição estrutural do pavimento recapeado em concreto asfáltico, em termos de deflexão, não apresentou variações significativas com o tráfego imposto, ficando próximas a 60×10^{-2} mm para carga equivalente de eixo de 100kN. Como constatado no recapeamento em TSD, a camada granular apresentou maior comprometimento estrutural, contribuindo em 80% nos valores das deflexões máximas. Essa constância nos resultados foi verificada também nas

bacias obtidas com a viga eletrônica. Nesta faixa, não foram realizadas medidas de restauração e nem solicitações dinâmicas anteriores.

A retroanálise dos módulos elásticos, efetuada pela comparação das bacias calculadas com o programa FLAPS, mostrou que os valores nas camadas asfálticas foram baixos.

Os níveis de tensões e deformações, medidas pelos sensores, aumentaram discretamente até os 110.000 ciclos de carga, aproximadamente, revelando um aumento mais relevante nas tensões após este nível de solicitação, mostrando indícios de ruptura do recapeamento asfáltico.

Quanto aos instrumentos instalados sob o recapeamento em concreto asfáltico, verificou-se que a espessura de 5,2cm favoreceu a integridade dos sensores. Do total de 6 sensores instalados, apenas 1 não apresentou resposta no início da coleta dos dados, devido a maior espessura da camada asfáltica. As deformações permanentes permaneceram estáveis após a fase de consolidação, com crescimento linear de 0,024 mm a cada 1.000 ciclos de carga, não representando uma condição funcional afetada até o término dos ensaios.

O trincamento está associado à fadiga de toda a camada asfáltica, sendo que as trincas iniciaram do fundo desta camada. Além do tráfego atuante, verifica-se que a aceleração do trincamento ocorreu devido às diminuições da temperatura ocorridas após os 125.000 ciclos de carga.

Quanto a textura superficial, nenhum dos recapeamentos apresentou níveis considerados inseguros ao tráfego.

6.3 SUGESTÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS

- Realizar um estudo com enfoque comparativo entre os recapeamentos estudados nesta pesquisa, controlando as espessuras de execução e em condições meteorológicas semelhantes.
- Variar o padrão e a severidade do trincamento, utilizando o recapeamento em tratamento superficial, para averiguar até que nível de trincamento este recapeamento é uma solução adequada.
- Utilizar as pistas ensaiadas com materiais que atuem como selantes de trincas.

- Realizar um estudo de previsão de desempenho, envolvendo a comparação dos recapeamentos estudados, com o comportamento desses materiais em rodovias.
- Levantar a influência da temperatura e precipitações nos níveis de deformações e deflexões medidas e compará-los com o utilizado para as correções neste trabalho.
- Dar continuidade aos estudos no recapeamento em concreto asfáltico convencional até a degradação total desta faixa.
- Utilizar o tratamento superficial como camada intermediária, aplicada sob uma camada de recapeamento delgada, em concreto asfáltico convencional.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS. ABEDA: Manual Básico de Emulsões Asfálticas. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT/MB-1776/NBR-7809. Agregado Graúdo: Determinação do Índice de Forma pelo Método do Paquímetro. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO. ABPv: Informativo Técnico sobre Avaliação da Resistência à Derrapagem Através de Aparelhagem Portátil. Boletim Técnico nº 18. Rio de Janeiro, 1999.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO: Guide for Design of Pavement Structures., Washington, D. C., 1993.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 965-96: Standard Method for Measuring Frictional Properties Using the British Pendulum Tester. In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, Volume 04.03, 5p, 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 303-93: Standard Method for Measuring Surface Macro Texture Depth Using a Volumetric Technique. In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, Volume 04.03, 5p, 2001.
- COLLOP; A. C.; THON, N. H.; SEWELL, A. J. Laboratory Measurement of Crack Propagation in High Stiffness Asphalt Mixtures. In: Proceedings of the 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Lisbon, Portugal, v.1, p.529-537, 2002.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa Rodoviária 2003: Avaliação das Rodovias. Disponível em: <http://www.cnt.org.br> (consultado em junho de 2004)
- DEMPSEY, B.J. Development and Performance of Interlayer Stress Absorbing Composite (ISAC) in AC Overlay. 81nd Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2002.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME-079/94. Agregado – Adesividade a Ligante Betuminoso, Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME-089/94. Agregado – Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio ou de Magnésio, Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME-035/98. Agregado – Determinação da Abrasão “Los Angeles”, Rio de Janeiro, 1998.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER: Pesquisa de Asfaltos Modificados por Polímeros, Rio de Janeiro. T. I e II, 1998.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-TR-01/78. Terminologia - Defeito nos Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos, Rio de Janeiro, 1978.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER- ME 024/94. Pavimento – Determinação das Deflexões pela Viga Benkelman, Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER- ES 392/99. Pavimentação – Tratamento Superficial Duplo com Asfalto Polímero, Rio de Janeiro, 1999.

ELSEIF, M. M.; AL-QADI, I. L., A Simplified Overlay Design Model against Reflective Cracking Utilizing Service Life Prediction. 82nd Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2003. 1 CD-ROM

GONÇALVES, F. P. Estudo Experimental do Desempenho de Pavimentos Flexíveis a Partir de Instrumentação e Ensaios Acelerados. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

KSAIBATI, K.; COLE, M.; FARRAR, M. Evaluation of Surface Treatment Practices in United States. In: Transportation Research Record, n° 1545. Washington, DC. p.26-34. 1996.

KIM, K.W.; LEE, S.J.; DOH, Y.S.; RHEE, S.H.; PARK, T.S. Estimation of Relative Performance of Overlaid Asphalt Concretes against Reflection Cracking due to Shear and Bending Fracture Mode. In: Proceedings of the 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Lisbon, Portugal, v.1, p.539- 547, 2002.

LEITE, L. F. G. Estudo de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímero. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LEITE, L. F. M.; CONSTANTINO, R. S.; DUNLOP, M. S.; FIGUEIREDO, M. A. G. Asfalto Modificado por Polímero - Ligante Resistente à Formação de Trincas e Deformação Permanente. 29^a Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá, v.2, p. 180-206, 1995.

LIBERATORI, L. A.; COSTANTINO R. S.; SOUZA, M. D.; FABRI Jr, A. Restauração de Rodovias de Médio e Alto Volume de Tráfego com a Técnica do Tratamento Superficial Utilizando Emulsão Asfáltica de alto Desempenho. Anais do 8^o Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Gramado, RS, 2003. 1 CD-ROM

MARONI, L. G.; MONTEZ, F. T O Geotextil Não Tecido como Elemento Retardador da Propagação de Trincas em Recapeamentos Asfálticos: Evolução Tecnológica Sul-Americana. 29^a Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá, v.1, p. 194-214, 1995.

METCALF, J. B. Application of Full-Scale Accelerated Pavement Testing. In: National Cooperative Highway Research Program, NCHRP: Synthesis of Highway Practice, n° 235. Washington D.C., 1996.

MOMM, L. Estudo dos Efeitos da Granulometria sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e seu Comportamento Mecânico, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

MONISMITH, C. L. & COETZEE, N. F. Reflection Crack: Analyses, Laboratory Studies and Design Considerations. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist. AAPT, Volume 49, p. 268 – 313, 1980.

NÚÑEZ, W. P. Análise Experimental de Pavimentos Rodoviários Delgados com Basaltos Alterados. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A.; OLIVEIRA, J. A. Elastic Analysis of Thin Pavements and Subgrade Soil Based on Field and Laboratory Tests. In: 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Airfields, Lisbon, Portugal, v.1, p.685- 696, 2002.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis. Rio de Janeiro, 2002.

RODRIGUES, R. M. Estudo do Trincamento dos Pavimentos. Tese de Doutorado COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

VIERA, C. S.; Desempenho de um Pavimento Flexível Solicitado por Simulador de Tráfego. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SIDDHARTHAN, R.V.; KRISHNAMENON, N.; EL-MOUSLY, M.; SEBAALY, P. E. Investigation of Tire Contact Stress Distributions on Pavement Response. In: Journal of Transportation Engineering, Volume 128, p.136-144, March/April 2002.

TIGHE, S.; HASS, R.; PONNIAH, J. Life Cycle Cost Analysis of Mitigating Pavement Rehabilitation Reflection Cracking. 82nd Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2003. 1 CD-ROM

**ANEXO 1 – TENSÕES, DEFORMAÇÕES, DEFLEXÕES E ATR NO
RECAPEAMENTO EM TSD**

LEITURAS MÁXIMAS FORNECIDAS PELOS SENSORES (MILIVOLT)

N	TEMP. °C	STRAIN GAGES		CÉLULA DE CARGA HORIZONTAL
		TRANSVERSAL	LONGITUDINAL	
3.183	30,3	-855,3	-818,9	262,1
13.506	21,0	-1164,0	-867,2	353,8
23.067	17,4	-632,1	-628,1	159,3
25.475		-683,3	-598,3	115,8
34.600	34,8	-350,2	-671,3	219,4
37.198	30,8	-1801,9	-693,2	264,2
38.391	30,8	0,0	-650,5	188,7
44.803		-1350,5	-533,2	177,1
45.785	22,0	-3106,8	-663,1	243,1
47.665	28,9	-1600,0	-650,3	173,3
59.185		-5,9	-502,7	72,5
63.195	33,8	-1766,3	-456,0	173,9
68.336	26,6	-3372,9	-626,8	132,3
72.800	18,0	-5,9	-488,2	145,6
74.686	19,4	-1015,0	-524,8	127,0
78.024	21,5	-5,9	-467,0	84,6
81.415	22,4	-599,4	-449,2	1064,9
84.045	26,1	-599,0	-6907,9	0,2
100.800	30,1	-2052,2	-610,6	315,6
105.500	26,0	-2664,0	-500,1	661,1
108.180	18,0	-0,6	-361,6	331,6
110.433	24,8	-5098,5	-542,3	0,2
110.970	29,3	-3217,3	-493,4	

AFUNDAMENTOS DE TRILHA DE RODA (mm)

N	Seção 1	Seção 2	Seção 3	Seção 4	Seção 5	Seção 6
0	0	0	0	0	0	0
13.560	8	5	5	7	5	8
23.067	10	6	7	7	8	13
33.443	11	6	7	7	8,5	14
45.785	12	6	7	7	9	15
59.067	12	6	7,5	7	10	16
77.973	12	6,5	7,5	7,5	10,5	16,5
88.626	12	7	8	7,5	10,5	17
99.201	12	7	8	7,5	11	17
107.206	12	7	8,5	7,5	11,5	18
118.559	13	7	8,5	8	12,5	18,5

DEFLEXÕES MÁXIMAS MEDIDAS COM A VIGA BENKELMAN - SEM CORREÇÕES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Carga => 82kN						Médias	
N	S2	S3	S4	S5	S6	Deflexão (0,01mm)	Temp. (°C)
13.506	55	57	63	66	63	65	20,6
23.067	51	65	61	63	70	67	17,6
33.443	70	71	75	70	82	76	39,2
45.785	62	63	61	59	65	62	22,5
59.067	58	60	63	65	70	68	26,3
77.973	57	72	65	69	69	69	22,9
88.626	59	77	65	71	72	72	17,9
99.657	63	74	70	75	68	72	23,9
107.276	63	79	70	75	71	73	25,7

Carga => 100kN						Médias	
N	S3	S5	S2	S4	S6	Deflexão (0,01mm)	Temp. (°C)
0	66	78	76	84	85	85	29,8
13.506	66	76	76	84	85	85	21,7
23.067	64	66	70	70	77	74	17,4
33.443	70	71	80	79	84	82	35,9
45.785	67	69	64	65	81	73	22,7
59.067	71	75	68	76	78	77	30,5
77.973	65	75	73	70	80	75	30,5
88.626	67	82	71	73	83	78	18,1
99.657	74	87	77	88	85	87	21,8
107.276	77	89	81	88	87	88	27

Carga => 120kN						Médias	
N	S3	S5	S2	S4	S6	Deflexão (0,01mm)	Temp (°C)
13.506	73	73	72	75	87	81	20,6
23.067	68	76	70	73	84	79	17,2
33.443	79	76	76	78	91	85	39,3
45.785	81	71	72	72	78	75	23,4
59.067	77	78	78	78	84	81	21,3
77.973	71	78	72	76	82	79	26,7
88.626	72	87	71	77	82	80	18,2
99.657	83	102	95	102	98	100	23,1
107.276	83	104	95	100	95	98	24,4

**ANEXO 2 – TENSÕES, DEFORMAÇÕES, DEFLEXÕES E ATR NO
RECAPEAMENTO EM CA CONVENCIONAL**

LEITURAS MÁXIMAS FORNECIDAS PELOS SENSORES (MILIVOLT)

N	TEMP. °C	STRAIN GAGES			CÉLULAS DE CARGA	
		TRANSVERSAL	45°	LONGITUDINAL	VERTICAL	HORIZONTAL
0	37,5	1237	1161	1513	3349	-1218
868	30	1111	1125	1584	4337	-1414
2.472	30,4	1208	520	1535	4329	-762
3.446	29,9	1240	1246	1558	4095	-1252
4.403	24,8	1180	420	1574	4306	-1121
8.465	33,6	1105	224	1562	4572	-887
9.934	28	1150	1220	1579	3991	-1022
11.904	33,6	1252	1095	1472		
12.824	29,7	1268	1235	1588	4238	-983
23.492	29,6	1127	1188	1540	4204	-1452
24.476	33,4		1127	1539	4390	-1281
28.703	27,1		1150	1480	4180	-1580
32.625	29,2		1056		4006	-1143
35.410	27		1039		4691	-838
39.864	33,5		436		4448	-861
43.278	32		1102		4741	-1593
44.915	32,4		226		4478	-927
49.802	27,3		638		4372	-1223
52.246	29,6		194		4402	-1080
54.975	29,7		1121		4672	-1199
57.685	29		1122	1476	4444	-1099
60.071	31		468	1462	4709	-1106
62.391	28,4		1112	1474	4557	-1200
64.217	31,8		183	1388	4487	-1156
66.893	30		174	1357	4804	-1220
69.773	26		430	1457	3843	-1369
74.376	31,7		435	1331	4538	-1127
78.926	33,2		102	1388	4846	-1006
80.350	30		158	1366	4202	-1196
82.382	33,7		204	1423	4602	-899
88.979	33		57	1328	4815	-1063
96.616	45,9		451	1276	5257	-1254
99.352			624	1475	4598	-1314
101.685			723	1548	4002	-1407
105.981			1077	1322	3968	-1325
108.183			1150		4610	-1111
112.147	24,9		197		4490	-1303
113.241	28,2		113		5359	-1056
117.198	23		125		3970	-1298
119.771	25,1		90		4796	-1143
122.150	22,7		223		4121	-1212
124.927	18,8		657		3796	-1288
126.892	28,8		110		4496	-1264
131.881			51		4021	-1460
137.262			183		3606	-1706

EVOLUÇÃO DAS DEFORMAÇÕES PERMANENTES (mm)

N	Seção 2	Seção 3	Seção 4	Seção 5	Seção 6	Seção 7
0	0	0	0	0	0	0
11.866	3	5	4	3	3	3
24.476	4	6	5	3	3	4
32.625	5	6	5	4	4	4
44.696	4,5	6	5	6,5	7	6
60.188	4,5	6	5	6,5	7	6,5
74.496	5	6	5	7	7	6,5
82.497	5	6	5	7	7,5	6,5
99.351	5	6	5	7,5	8	7
108.183	5	6	5	7,5	8	7
125.500	5	6	5	7,5	8	7
131.881	5	6,5	6	7,5	8	7
146.629	5	6,5	6	7,5	8	7

DEFLEXÕES MÁXIMAS MEDIDAS COM A VIGA BENKELMAN - SEM CORREÇÕES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Carga => 82kN						MÉDIAS	
N	S2	S3	S4	S5	S6	Deflexão (0,01mm)	Temp °C
0	50	59	51	56	59	55	28,2
2.399	53	59	55	56	57	56	30,1
11.866	52	58	58	58	58	57	29,7
24.476	53	55	51	58	57	55	29,6
32.625	44	52	51	54	63	53	30,9
44.696	47	57	56	58	61	56	34,5
62.575	49	55	55	59	55	55	26,8
72.621	45	60	52	53	54	53	33,7
84.733	40	53	50	56	60	52	31,5
96.549	48	53	47	54	56	52	27,1
108.183	45	52	52	58	58	53	23,9
136.404	41	53	51	56	55	51	22,1
148.333	45	56	50	58	55	53	19,4

Carga => 100kN						MÉDIAS	
N	S2	S3	S4	S5	S6	Deflexão (0,01mm)	Temp °C
0	54	64	58	66	61	61	28,4
2.399	42	71	63	72	70	64	28,9
11.866	52	69	68	70	63	64	34,9
24.476	56	69	60	70	63	64	26,4
32.625	52	61	57	62	64	59	28,9
44.696	55	66	65	66	68	64	33,5
62.575	58	68	64	70	68	66	26,6
72.621	54	68	62	67	68	64	32,7
84.733	49	60	58	63	56	57	31,3
96.549	51	60	56	60	60	57	23,5
108.183	51	55	59	67	65	59	26,9
136.404	44	55	51	55	53	52	11,9
148.333	49	57	59	65	59	58	12,2

Carga => 120kN						MÉDIAS	
N	S2	S3	S4	S5	S6	Deflexão (0,01mm)	Temp °C
0	62	75	68	75	75	71	27,9
2.399	69	78	73	78	71	74	29,0
11.866	65	79	77	80	81	76	33,8
24.476	64	74	73	81	77	74	33,7
32.625	59	71	63	76	72	68	33,9
44.696	59	74	73	77	75	72	33,7
62.575	61	70	75	78	76	72	25,9
72.621	66	74	76	79	75	74	31,1
84.733	57	69	69	73	72	68	30,7
96.549	57	73	70	74	76	70	32,8
108.183	62	72	69	77	82	72	26,6
136.404	58	72	68	74	78	70	25,4
148.333	59	71	67	79	74	70	24,7