

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM INFRA-ESTRUTURA E GERÊNCIA VIÁRIA**

**ESTUDO DO EFEITO DE INTERVENÇÕES SOBRE O COMPORTAMENTO DE
PAVIMENTOS DE UM GRUPO DE RODOVIAS DO ESTADO DO PARANÁ**

Mauricio Luiz de Oliveira Franco

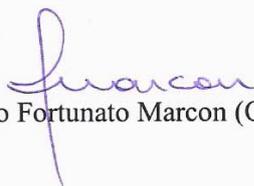
**Dissertação apresentada ao Curso de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Santa Catarina, como
parte dos requisitos para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil**

Florianópolis

2004

**ESTUDO DO EFEITO DE INTERVENÇÕES SOBRE O COMPORTAMENTO DE
PAVIMENTOS DE UM GRUPO DE RODOVIAS DO ESTADO DO PARANÁ**

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, especialidade ENGENHARIA CIVIL, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Antônio Fortunato Marcon (Orientador - UFSC)

Profª Henriette Lebre La Rovere (Coordenadora do Curso)

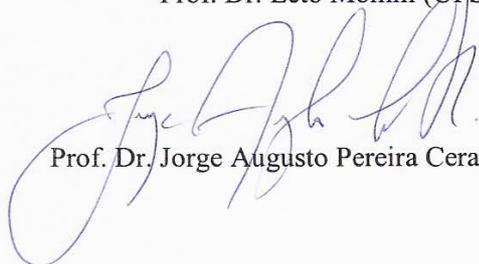
Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Glicério Trichês (UFSC)



Prof. Dr. Leto Momm (UFSC)



Prof. Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)

Em 08 de dezembro de 2004

FRANCO, Mauricio Luiz de Oliveira

ESTUDO DO EFEITO DE INTERVENÇÕES SOBRE O COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS DE UM GRUPO DE RODOVIAS DO ESTADO DO PARANÁ, Florianópolis, SC, 2004, 184 p.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Antônio Fortunato Marcon

Defesa: dezembro/2004

1. Eficiência de Restaurações de Pavimentos
2. Módulos de Resiliência
3. Programas de Retroanálise

À minha esposa Sandra e meu filho Bruno, que ao longo destes três anos
tiveram a calma, a compreensão, o companheirismo e sobretudo
pelo incentivo para que eu pudesse chegar até o final.

Aos meus pais, que sempre acreditaram e ensinaram-me
o quanto estudar é importante.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Antônio Fortunato Marcon, que além de orientador, professor, passou a ser um grande amigo, pela dedicação e apoio, foi fundamental para conclusão deste estudo.

À Universidade Federal de Santa Catarina pela acolhida e ofertar este curso.

Ao Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná, pela liberação para participar deste curso.

Ao Grupo Greca Asfaltos, principalmente na pessoa do colega de curso e amigo Mestre Armando Morilha Júnior, pelos ensaios de laboratório realizados.

As concessionárias de rodovias do Estado do Paraná, que forneceram dados importantes para o desenvolvimento deste estudo e principalmente às Concessionárias Caminhos do Paraná e Viapar, pela disponibilização de equipe para coleta de amostras em campo e ajuda em ensaios laboratoriais.

Ao LAPAV, Laboratório de Pavimentação da UFRGS, na pessoa do técnico Ivan e principalmente ao Professor Jorge A. P. Ceratti, pela concretização de ensaios de laboratório, orientações e participação na Comissão Examinadora.

Aos Professores da UFSC, principalmente aos Professores Glicério Trichês e Leto Momm, pela dedicação em aula e orientações fornecidas.

A todos colegas, principalmente aos que passaram a ser grandes amigos, Paulo, Michele, Marilan e Fábio, pelo apoio e incentivo.

A minha querida amiga Juliana Cavalcanti (in memoriam) pelo incentivo,
apoio na obtenção de dados e principalmente ânimo,
em nossos difíceis deslocamentos a Florianópolis.

SUMÁRIO

Lista de Quadros	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
Lista de Abreviaturas e Siglas	xii
Resumo	xv
Abstract	xv
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo do Trabalho	1
1.2 Procedimentos do Estudo	2
1.3 A Importância do Tema	3
1.4 Delimitação da Pesquisa	4
1.5 Organização do Trabalho	4
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Avaliação do Tráfego	6
2.1.1 Tráfego Médio Diário Anual (TMDA)	6
2.1.2 Classificação da Frota Circulante	7
2.1.3 Carregamento da Frota Circulante	7
2.1.4 Fator de Equivalência	7
2.1.5 Número Equivalente “N”	9
2.2 Projetos de Restauração de Pavimentos	9
2.2.1 Dimensionamento pelo Método DNER-PRO 011/79 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis	10
2.2.2 Dimensionamento pelo Método DNER-PRO 269/94 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis	11

2.2.3	Dimensionamento pelo Método DNER PRO 010/79 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis	12
2.2.4	Dimensionamento pelo Método DNER-PRO 159/85 - Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos	13
2.2.5	Comparações entre os Métodos	15
2.3	Módulo de Resiliência, Tensões e Deformações nas Camadas do Pavimento	16
2.3.1	Módulos de Resiliência em Laboratório	19
2.3.1.1	Ensaio de Compressão Diametral	19
2.3.1.2	Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas	20
2.3.2	Módulo de Resiliência por Retroanálise	21
2.3.2.1	Métodos Simplificados de Retroanálise	22
2.3.2.2	Programas de Cálculo de Tensões, Deformações e Deslocamentos em Estruturas de Pavimentos	22
2.3.2.3	Métodos Iterativos de Retroanálise	23
2.3.3	Programa ELSYM5 – Elastic Layered System	24
2.3.4	Programa EVERSERIES – Pavement Analyses Programs	25
2.3.4.1	Programa EVERCALC – Pavement Backcalculation	26
2.3.4.2	Programa EVERSTRESS – Layered Elastic Analysis	26
2.3.4.3	Programa EVERPAVE – Pavement Overlay Design	27
2.4	Ensaio de Campo e Laboratório	27
2.4.1	Ensaio “in situ”	27
2.4.2	Ensaio em Laboratório	28
2.5	Avaliação Estrutural de Pavimentos	28
2.5.1	Ensaio Destrutivo	29
2.5.2	Ensaio Não Destrutivo	29
2.5.3	Tipos de Aparelhos de Medição de Deflexões	30
2.6	Avaliação Funcional de Pavimentos	34
2.6.1	Medidores de Perfil	34

2.6.2	Medidores Tipo Resposta	37
2.7	Avaliações Subjetivas de Pavimentos	39
2.8	Avaliações Objetivas de Pavimentos	40
2.8.1	DNIT 006/2003 – PRO – Avaliação Objetiva de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos	41
2.8.2	DNIT 007/2003 PRO – Levantamento para Avaliação da Condição se Superfície de Subtrecho Homogêneo de Rodovias de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos para Gerência de Pavimentos e Estudos e Projetos	41
2.9	Fadiga em Misturas Asfálticas	42
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA		46
3.1	Etapas do Desenvolvimento do Estudo	46
3.2	Tráfego	48
3.3	Restauração de Pavimentos	51
3.4	Conversão de Deflexões Obtidas com o Falling Weight Deflectometer com as Obtidas com Viga Benkelman	52
3.5	Correção das Deflexões obtidas com o Falling Weight Deflectometer pela Temperatura do Pavimento	52
3.6	Programas de Retroanálise	54
3.6.1	Programa ELSYM5 – Elastic Layered System	54
3.6.2	Programa EVERCALC – Pavement Backcalculation	56
3.7	Programa EVERSTRESS – Layered Elastic Analysis	57
3.8	Vida de Fadiga	58
3.9	Resposta do Pavimento Após a Restauração	59
3.9.1	Deflexões Apresentadas Após a Restauração	59
3.9.2	Irregularidades Longitudinais Apresentadas Após a Restauração	61
3.10	Análise dos Trechos 02 Norte e 03 Sul	62
3.10.1	Coleta de Amostras e Ensaios de Laboratório e Campo	63

3.10.2	Análise Mecânica – Retroanálise	64
CAPÍTULO 4 DADOS UTILIZADOS NO ESTUDO		67
4.1	Dados dos Projetos de Restauração de Pavimentos	67
4.2	Outros Ensaio Anteriores à Restauração	68
4.3	Dados Posteriores à Restauração	68
4.4	Estrutura dos Pavimentos	69
4.5	Localização dos trechos Estudados	69
CAPÍTULO 5 ANÁLISE DOS DADOS		88
5.1	Análise dos trechos estudados	88
5.1.1	Trecho 01 Norte – Rodovia BR/376, trecho Paranavaí – Nova Esperança	88
5.1.2	Trecho 02 Norte – Rodovia BR/376, trecho Mandaguari – Jandaia do Sul	94
5.1.3	Trecho 03 Norte – PR/323, trecho Warta – Porto Charles Nauffall, km 20,740 ao 26,175 e km 31,000 ao 39,175	98
5.1.4	Trecho 04 Norte, Rodovia PR/323, trecho Warta – Porto Charles Nauffall, km 26,175 ao 31,000	106
5.1.5	Trecho 01 Sul – Rodovia BR/277, trecho São Luiz do Purunã – Palmeira	109
5.1.6	Trecho 02 Sul – Rodovia BR/277, trecho Relógio – Guarapuava	114
5.1.7	Trecho 03 Sul – Rodovia BR/373, trecho Ponta Grossa – Relógio	119
5.1.8	Trecho 04 Sul – Rodovia BR/277, trecho Guarapuava – Três Pinheiros	125
5.2	Análise de Módulos por Retroanálise e Vida de Fadiga Considerando-se as Camadas de Revestimento Asfáltico como Única com Módulo Equivalente	132
5.3	Análise Laboratório e Campo	135
5.3.1	Módulos de Resiliência e Vida Remanescente	137
5.3.2	Comparativo Módulos de Resiliência de Laboratório e Retroanálise	139
5.3.3	Ensaio em Laboratório das Amostras Extraídas de Concreto Asfáltico Usinado à Quente	143

5.3.3.1	Ensaio de Granulometria das Misturas de Concreto Asfáltico Usinado à Quente	144
5.3.3.2	Ensaio do Cimento Asfáltico de Petróleo Extraído do Concreto Asfáltico Usinado à Quente	144
5.4	Correlações Módulos de Resiliência do Subleito com o Índice Suporte Califórnia e Fração de Finos Passando na Peneira nº 200	148
5.5	Considerações aos Projetos de Restaurações	150
5.5.1	Dimensionamento do Reforço	151
5.5.2	Considerações sobre o Tráfego	157
5.5.3	Considerações Sobre a Necessidade das Intervenções de Restauração	158
5.6	Módulos de Resiliência, Tensões e Deformações no Pavimento Através de Programas Computacionais	161
5.7	Programas Computacionais ELSYM5 e EVERCALC	162
5.8	Análise da Eficiência das Intervenções Realizadas em Relação a Deflectometria e Irregularidade Longitudinal	162
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES		166
6.1	Conclusões	166
6.1.1	Módulos de Resiliência	166
6.1.2	Vida de Fadiga	167
6.1.3	Irregularidade Longitudinal	167
6.1.4	Deflexões	168
6.1.5	Atendimento ao Esperado em uma Análise Geral	168
6.1.6	Considerações do Revestimento Asfáltico como Camada Única com Módulo Equivalente	168
6.1.7	Conclusões Gerais	169
6.2	Recomendações	171
6.2.1	Módulos de Resiliência	171
6.2.2	Projetos de Restauração	171
6.2.3	Revestimentos Asfálticos	171

CAPÍTULO 7	BIBLIOGRAFIA	172
7.1	Bibliografía Utilizada	172
7.2	Bibliografía Consultada	181

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1	Trecho 01 Norte	70
Quadro 4.2	Trecho 02 Norte	71
Quadro 4.3	Trecho 03 Norte	72
Quadro 4.4	Trecho 04 Norte	73
Quadro 4.5	Trecho 01 Sul	74
Quadro 4.6	Trecho 02 Sul	75
Quadro 4.7	Trecho 03 Sul	76
Quadro 4.8	Trecho 04 Sul	77

LISTA DE FIGURAS

2.1	Evolução das Deflexões Recuperáveis	13
2.2	Tensões Aplicadas no Pavimento	17
3.1	Metodologia Aplicada no Desenvolvimento do Estudo	49
3.2	Ajuste das Deflexões pela Temperatura para Bases Cimentadas	53
3.3	Ajuste das Deflexões pela Temperatura para Bases Granulares	54
3.4	Aplicação de Cargas – Programa ELSYM5	56
3.5	Aplicação de Cargas – Programa EVERCALC	57
4.1	Estruturas de Camadas - Trecho 01 Norte	78
4.2	Estruturas de Camadas - Trecho 02 Norte	79
4.3	Estruturas de Camadas - Trecho 03 Norte	80
4.4	Estruturas de Camadas - Trecho 04 Norte	81
4.5	Estruturas de Camadas - Trecho 01 Sul	82
4.6	Estruturas de Camadas - Trecho 02 Sul	03
4.7	Estruturas de Camadas - Trecho 03 Sul	84
4.8	Estruturas de Camadas - Trecho 04 Sul	85
4.9	Trechos da Região Norte	86
4.10	Trechos da Região Sul	87
5.1	Irregularidade Longitudinal – Trecho 01 Norte	92
5.2	Comparativo de Deflexões – Trecho 01 Norte	93
5.3	Irregularidade Longitudinal – Trecho 02 Norte	97
5.4	Comparativo de Deflexões – Trecho 02 Norte	99
5.5	Irregularidade Longitudinal – Trecho 03 Norte	103
5.6	Comparativo de Deflexões – Trecho 03 Norte	105
5.7	Irregularidade Longitudinal – Trecho 04 Norte	108
5.8	Comparativo de Deflexões – Trecho 04 Norte	110
5.9	Irregularidade Longitudinal – Trecho 01 Sul	113
5.10	Comparativo de Deflexões – Trecho 01 Sul	115
5.11	Irregularidade Longitudinal – Trecho 02 Sul	119
5.12	Comparativo de Deflexões – Trecho 02 Sul	120
5.13	Irregularidade Longitudinal – Trecho 03 Sul	124
5.14	Comparativo de Deflexões – Trecho 03 Sul	126

5.15	Irregularidade Longitudinal – Trecho 04 Sul	130
5.16	Comparativo de Deflexões – Trecho 04 Sul	131
5.17	Comparativo de Módulos de Resiliência	143
5.18	Granulometria do Concreto Asfáltico Usinado à Quente	145
5.19	Comparativo ISC, Finos e Módulo de Resiliência por Retroanálise	149
5.20	Comparativo ISC, Finos e Módulo de Resiliência em Laboratório	140
5.21	Comparativo de Tráfego	159

LISTA DE TABELAS

2.1	Módulos de Resiliência – Médias e Limites	25
2.2	Valores do IGG	41
3.1	Enquadramento dos Veículos em Função do Número de Eixos	50
3.2	Fatores de Veículos – DNER/DNIT	50
3.3	Taxas de Crescimento – DER/PR – 2002	51
3.4	Valores de z	60
5.1	Módulos de Resiliência – Trecho 01 Norte	89
5.2	Vida de Fadiga – Trecho 01 Norte	91
5.3	Comparativo de Irregularidades – Trecho 01 Norte	91
5.4	Comparativo de Deflexões – Trecho 01 Norte	92
5.5	Módulos de Resiliência – Trecho 02 Norte	95
5.6	Vida de Fadiga – Trecho 02 Norte	96
5.7	Comparativo de Irregularidades – Trecho 02 Norte	97
5.8	Comparativo de Deflexões – Trecho 02 Norte	98
5.9	Módulos de Resiliência – Trecho 03 Norte	101
5.10	Vida de Fadiga – Trecho 03 Norte	102
5.11	Comparativo de Irregularidades – Trecho 03 Norte	103
5.12	Comparativo de Deflexões – Trecho 03 Norte	104
5.13	Módulos de Resiliência – Trecho 04 Norte	106
5.14	Vida de Fadiga – Trecho 04 Norte	108
5.15	Comparativo de Irregularidades – Trecho 04 Norte	108
5.16	Comparativo de Deflexões – Trecho 04 Norte	109
5.17	Módulos de Resiliência – Trecho 01 Sul	112
5.18	Vida de Fadiga – Trecho 01 Sul	113
5.19	Comparativo de Irregularidades – Trecho 01 Sul	113
5.20	Comparativo de Deflexões – Trecho 01 Sul	114
5.21	Módulos de Resiliência – Trecho 02 Sul	117
5.22	Vida de Fadiga – Trecho 02 Sul	118
5.23	Comparativo de Irregularidades – Trecho 02 Sul	118
5.24	Comparativo de Deflexões – Trecho 02 Sul	119
5.25	Módulos de Resiliência – Trecho 03 Sul	122

5.26	Vida de Fadiga – Trecho 03 Sul	123
5.27	Comparativo de Irregularidades – Trecho 03 Sul	124
5.28	Comparativo de Deflexões – Trecho 03 Sul	125
5.29	Módulos de Resiliência – Trecho 04 Sul	128
5.30	Vida de Fadiga – Trecho 04 Sul	129
5.31	Comparativo de Irregularidades – Trecho 04 Sul	129
5.32	Comparativo de Deflexões – Trecho 04 Sul	130
5.33	Módulos de Resiliência e Vida de Fadiga - Camadas com Módulo Equivalente	132
5.34	Módulos de Resiliência das Camadas de Revestimento Asfáltico	136
5.35	Módulos de Resiliência da Camada do Subleito – BR/376	136
5.36	Módulos de Resiliência da Camada do Subleito – BR/373	137
5.37	Módulos de Resiliência – Laboratório e Retroanálise	140
5.38	Comparativo de Vida Remanescente	141
5.39	Comparativo de Módulos Laboratório e Retroanálise	142
5.40	Teores de Ligante de Asfalto	145
5.41	Ensaio Característicos do Cimento Asfáltico de Petróleo	147
5.42	Ensaio de envelhecimento em um CAP-20	147
5.43	Comparativo ISC, Módulo de Resiliência e % passando na #200 – Dados de Projetos de Restauração e Retroanálise	149
5.44	Comparativo ISC, Módulo de Resiliência e % passando na #200 – Dados de Ensaio de Laboratório	150
5.45	Tabela 5.42 - a, b e c – Espessura de Reforços Calculados	153
5.46	Número N Calculados e de Projeto	157
5.47	Comparativo Deflexões de Projeto e Deflexões Admissíveis	160
5.48	Eficiência das Intervenções de Reforço do Pavimento	163

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	– American Association of State Highway Officials
AASHTO	– American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	– American Society for Testing and Materials
BPR	– Bureau of Public Roads
CALTRANS	– California Department of Transportation
CAP	– Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	– Concreto Asfáltico Usinado à Quente
CPA	– Camada Porosa de Atrito ou Asfalto Drenante
CV	– Coeficiente de Variação
DER/PR	– Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná
DER/SP	– Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNER	– Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	– Departamento Nacional de Infra-Estrutura Terrestre
ELSYM5	– Programa Elastic Layered System
EVERCALC	– Programa Pavement Backcalculation
EVERPAVE	– Programa Pavement Overlay Design
EVERSERIES	– Programas Computacionais do WSDOT
EVERSEARS	– Programas Computacionais do WSDOT
EVERSTRESS	– Programa Layered Elastic Analysis
EVERSTRS	– Programa Layered Elastic Analysis
FWD	– Falling Weight Deflectometer
GMR	– General Motors Research
ICPF	– Índice de Condição dos Pavimentos Flexíveis
IES	– Índice do Estado de Superfície
IGG	– Índice de Gravidade Global
IGGE	– Índice de Gravidade Global Expedito
IP	– Índice de Plasticidade
IPR	– Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IRI	– International Roughness Index

ISA	– Índice de Serventia Atual
ISC	– Índice de Suporte Califórnia (CBR)
LCPC	– Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LL	– Limite de Liquidez
LP	– Limite de Plasticidade
LVC	– Levantamento Visual Contínuo
LVDT	– Linear Variable Differential Transducers
NDT	– Não Destrutivos
Número N	– Número de Repetições do Eixo Padrão de 8,2 Toneladas
PAEP	– Pesquisa de Avaliação Estrutural de Pavimentos
PCA	– Portland Cement Association
QI	– Quociente de Irregularidade
RMSE	– Root Mean Square Error
RMS	– Root Mean Square Error
RTAC	– Road and Transportation Association of Canada
RTFOT	– Rooling Thin Film Oven Test
SN	– Structural Number – Número Estrutural
TMDA	– Tráfego Médio Diário Anual
TRRL	– Transport and Road Research Laboratory – Inglaterra
UFRGS	– Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC	– Universidade Federal de Santa Catarina
USACE	– United State Army Corps of Engineers
USP	– Universidade de São Paulo
VSA	– Valor de Serventia Atual
WASHO	– American Association of State Highway Officials
WESLEA	– Watersways Experiment Station – USACE
WSDOT	– Washington State Department of Transportation

RESUMO

O objetivo deste estudo foi verificar a eficiência de serviços de restauração de pavimento, englobando a análise dos projetos e a execução dos serviços, através de uma análise comparativa do comportamento estrutural e funcional antes e depois dos serviços concluídos. Foram levantados dados de projeto, de controle do comportamento funcional e estrutural, anteriores e posteriores aos projetos, realizados ensaios em laboratório, simulações de comportamento e estimativa de vida de fadiga com programas computacionais. Todos os resultados obtidos foram analisados, juntamente com a análise visual obtida através de inspeção em campo. O produto final, após a análise estrutural e funcional de todos os segmentos, com suas perspectivas de vida remanescente, atendimento ao previsto nos projetos de restaurações, definição dos problemas ocorridos, suas causas e necessidade de intervenções corretivas, foi a conclusão da eficiência ou não das intervenções realizadas. O presente estudo poderá servir de balizador para o início de novos estudos semelhantes, até mesmo em projetos de reabilitação, como ferramenta para a definição de serviços, principalmente para as camadas inferiores dos pavimentos, diminuindo a necessidade de ensaios destrutivos.

ABSTRACT

The objective of this study was to verify the efficiency of pavement rehabilitation services, including analysis of design and services perform, using comparative analysis of the structural and functional behaviour, before and after finished services. Were researched design elements, about functional and structural behaviour control, before and after perform designs, realization of laboratory analysis, behaviour simulation and fatigue life's estimative with computational programs. All results obtained were studied, with visual analysis gained in local visit. The final product, after the functional and structural analysis of all studied segments, with remaining life expectative, reaching the goals of the projects of restauration, the definition of the occurring problems, its causes and needs of corrective interventions, was the conclusion of the efficiency or not of the services performed. The present study might come to be the reference to start new studies, even in rehabilitation designs, to define the services, mainly to underground layers, reducing the necessity of destructives tests.

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

O maior problema, que os atuais governantes estão enfrentando na área dos transportes, é a necessidade emergencial de restaurações dos pavimentos existentes, devido à falta de recursos e à negligência ocorrida no passado, em relação a inexistência de programas de longos prazos de reabilitações, tanto nas esferas municipais, estaduais e federal.

Nas áreas de projetos e execução, existem diversos métodos de dimensionamento e seleção de intervenções, e vários métodos de controle de qualidade, entretanto nenhum deles apresenta recomendações para utilização, em função do grau de deterioração do pavimento e materiais constituintes das camadas do pavimento.

As alternativas de materiais e processos construtivos também são várias, algumas tradicionais, cujos estudos vem evoluindo a décadas, outras recentes, inovadoras, que necessitam de estudos mais aprofundados e comprovações de suas eficiências.

Em relação à conservação, tanto a rotineira quanto a preventiva, de maneira geral, não foi dada a devida atenção, propiciando assim uma progressão mais acelerada do processo de degradação de toda a estrutura do pavimento.

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

✓ Geral

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar o efeito das intervenções de restauração de pavimentos em um grupo de rodovias do Estado do Paraná, com relação às mudanças das características funcionais e estruturais, e compará-las às previstas em projeto.

✓ Específicos

- a) caracterizar as condições funcionais e estruturais dos pavimentos antes e após as intervenções;
- b) comparar as condições funcionais e estruturais dos pavimentos após as intervenções com aquelas previstas em projeto;
- c) estimar as vidas de fadiga dos revestimentos com base nas condições medidas após as restaurações e compará-las com a vida útil previstas em projeto;
- d) executar ensaios de módulo de resiliência em laboratório e compará-los com módulos de resiliência obtidos por retroanálise;
- e) executar ensaios em laboratório de materiais coletados, do revestimento asfáltico e do subleito, em relação às composições, capacidade de suporte e se estão enquadrados às normas vigentes.

1.2 PROCEDIMENTOS DO ESTUDO

Os procedimentos para realizar o presente estudo são descritos a seguir:

- a) definição dos segmentos rodoviários a serem estudados – dentre as rodovias restauradas no sistema de rodovias concessionadas do Estado do Paraná, foram selecionados 08 (oito) trechos, 04 (quatro) na região norte e 04 (quatro) na região sul;
- b) levantamento dos dados e resultados dos projetos de dimensionamento – foram obtidos os projetos de restauração dos trechos em estudo, com todos elementos utilizados nos cálculos de dimensionamento. Levantamento das estruturas dos pavimentos dos trechos escolhidos – através de dados de sondagem, irregularidade, deflectometria e levantamento visual;
- c) verificação dos dimensionamentos das espessuras de reforço – com os elementos disponíveis nos projetos, efetuou-se o dimensionamento da camada de reforço necessária, para restabelecer a capacidade estrutural do pavimento, pelos métodos DNER PRO 011/79, DNER PRO 159/85 e DNER PRO 269/94;
- d) levantamentos de dados característicos dos pavimentos após restaurados – verificação do comportamento funcional e estrutural, após os serviços de restauração, com base em dados de irregularidade longitudinal e bacias de deformação obtidas com o FWD;

e) cálculo da vida restante – com a utilização de programas computacionais e modelos de fadiga, estimou-se a vida restante do pavimento, para todos os segmentos homogêneos e comparou-se com a vida útil prevista em projeto;

f) ensaios em campo e laboratório – foram realizadas sondagens, para verificação da densidade e umidade “in loco”, colhidas amostras para ensaios de granulometria, extração de betume e análise de material asfáltico das camadas de revestimento, ensaios da caracterização do subleito e módulo de resiliência dos materiais do subleito e revestimentos asfálticos;

g) análise dos dados e conclusões – avaliação dos dados obtidos em conjunto, apresentando as conclusões, sugestões de melhoria e causas de problemas detectados.

1.3 A IMPORTÂNCIA DO TEMA

Os recursos financeiros empregados em serviços de restauração de pavimentos devem ser aplicados de forma criteriosa. Em hipótese alguma pode haver qualquer tipo de desperdício, como a execução de serviços de intervenção de restaurações inadequados, estrutural e funcionalmente. A razão está na falta de recursos e a grande necessidade atual de intervenções, em nível federal, estadual e municipal.

No entanto, tem-se constatado freqüentemente degradação precoce dos pavimentos reabilitados e, também dos novos, levando a vidas úteis menores, do que as previstas, trazendo prejuízo ao estado e aos usuários.

Os métodos de dimensionamento utilizados são os normalizados pelo Departamento Nacional de Infra-Estrutura Terrestre – DNIT, elaborados entre 1979 e 1994. É utilizado também o Critério Mecânico, cujas espessuras de reforço são calculadas em função dos esforços e deformações aplicados ao pavimento.

A grande preocupação dos projetistas está no fato, de que nossas estradas só recebem intervenções de maior monta, quando tem suas vidas úteis esgotadas, ou seja, já deveriam ter sido restauradas, algumas até a muito tempo, com suas estruturas enfraquecidas com a entrada de água através de fissuras e panelas, que aliada ao tráfego, aceleram o processo degenerativo.

Quando da execução dos projetos são realizados os levantamentos deflectométricos, de irregularidade longitudinal, defeitos de superfície e sondagens. Em função destes dados são calculadas as espessuras de reforço e definidas as características das intervenções.

Pouco tem sido feito para verificação da eficácia das intervenções determinadas pelos métodos, avaliando como exemplo, se a espessura do reforço foi suficiente para atender ao tráfego previsto.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Os segmentos a serem estudados fazem parte do Sistema de Rodovias Concessionadas do Estado do Paraná, onde foram selecionados trechos restaurados nos anos 2000 e 2001, abrangendo duas regiões distintas do estado, norte e sul, com variações de tipos de subleito, jazidas de solos, jazidas de agregado pétreo, além de variações nos tipos de estrutura dos pavimentos existentes e soluções de restaurações.

Os dados foram coletados junto às próprias concessionárias, em projetos de restaurações e ensaios de controle de qualidade e também através de levantamentos por nós realizados para esta pesquisa.

A metodologia adotada foi a normalizada pelo Departamento Nacional de Infra-Estrutura Terrestre (DNIT) e estudos de tensões e deformações no pavimento através de programas computacionais, constantes na bibliografia rodoviária, partindo-se de dados deflectométricos obtidos através de levantamentos com o Falling Weight Deflectometer (FWD) e corrigidos em função da temperatura do pavimento.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi organizado de maneira seqüencial em função da obtenção de dados gerados pelo desenvolvimento dos projetos, pela execução de obras e pelos ensaios de qualidade posteriores.

Capítulo 1 Introdução - apresenta os objetivos, as delimitações, a justificativa e a importância do tema da pesquisa.

Capítulo 2 Revisão Bibliográfica - discorre sobre o cálculo do tráfego equivalente; métodos para o dimensionamento de reforço de pavimentos; módulos, tensões e deformações nas camadas do pavimento; ensaios de campo e laboratório; análise funcional e estrutural de pavimentos; e fadiga em misturas asfálticas.

Capítulo 3 Metodologia - discorre sobre técnicas de ensaios e procedimentos de análise dos dados obtidos.

Capítulo 4 Dados Disponíveis – caracterização dos trechos estudados.

Capítulo 5 Análise dos Dados – neste capítulo são apresentados os dados e as respectivas análises.

Capítulo 6 Conclusões e Recomendações – resume as conclusões dos estudos efetuados e apresenta recomendações para futuros estudos.

Capítulo 7 Bibliografia – apresenta as fontes bibliográficas utilizadas como embasamento teórico para o desenvolvimento da pesquisa.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AVALIAÇÃO DO TRÁFEGO

Para o estudo de um pavimento é fundamental o conhecimento do tráfego, que o mesmo já foi submetido, o tráfego atual e a estimativa do tráfego futuro.

O mais importante fator a ser avaliado em projeto estrutural de pavimentos de rodovias e aeroportos são os efeitos dos tipos de veículos, volume de tráfego e o modo de operação dos veículos (YODER e WITCZAK, 1975).

O tráfego é um elemento fundamental de projeto, devendo ser considerado o volume de tráfego e o carregamento, considerando a carga por eixos equivalentes, o número de repetições, área de contato dos pneus e velocidade dos veículos (HUANG, 1993).

2.1.1 Tráfego Médio Diário Anual (TMDA)

O tráfego médio diário anual é o tráfego que se verifica em média por dia de uma determinada via, considerando o período de um ano para sua apuração.

O tráfego passado é obtido através de séries históricas de contagens realizadas no decorrer do tempo e em projetos realizados no passado (PETERLINI, 2000).

O tráfego presente é estimado através de contagem volumétrica classificatória atual no campo, normalmente em períodos de sete dias, vinte e quatro horas por dia, levando-se em conta a possibilidade de variações sazonais, como exemplo o período de escoamento de safra agrícola. O tráfego futuro é obtido através da projeção do tráfego presente, com a utilização de taxas de crescimento de tráfego, estas associadas a dados sócio-econômicos regionais e possíveis alterações no sistema de transporte (BALBO, 1997-a).

Sugere-se a determinação do tráfego suportado desde a última intervenção, baseado nos dados obtidos na contagem efetuada no passado (PETERLINI, 2000).

2.1.2 Classificação da Frota Circulante

Consiste em quantificar o tráfego por tipo de veículos. Neste estudo serão utilizados os procedimentos estabelecidos pelo DNIT.

2.1.3 Carregamento da Frota Circulante

O método correto para definir como a frota circulante está transmitindo esforços ao pavimento é através de pesagens classificatórias e por eixo, que podem ser efetuadas através de balanças móveis no próprio trecho estudado. Entretanto, é difícil, no momento, a disponibilidade destes, pela inexistência de pesagens, uma vez que para isso se faz necessário uma estrutura adequada, pois mesmo sendo balanças móveis, para sua utilização é necessária a construção de plataformas, que são em pequeno número.

Infelizmente, a pesquisa de tráfego em nosso país é precária. Não existe monitoramento através de contagens classificatórias periódicas para poder-se analisar os fatores das cargas atuantes em nossos pavimentos. Existem postos de contagens permanentes, mas que só medem volumes totais de tráfego. Seria interessante, que periodicamente fossem realizadas contagens classificatórias, para atualização dos fatores de cargas dos veículos (PETERLINI, 2000).

2.1.4 Fator de Equivalência

A vida útil do pavimento é reduzida pelo efeito destrutivo ocasionado pelo carregamento do tráfego, que causa deflexões nas camadas do pavimento, alterando o estado de tensões e deformações.

A conversão do tráfego misto em um equivalente de operações de um eixo considerado padrão é efetuada aplicando-se os fatores de equivalência de carga. Estes fatores permitem converter uma aplicação de um eixo solicitado por uma determinada carga em um número equivalente de aplicações do eixo padrão simples de rodas duplas com 8,2 toneladas de carga.

Os fatores de equivalência de cargas de rodas são a relação entre o dano causado no pavimento por um determinado eixo selecionado em relação ao dano causado por um eixo padrão movendo-se sobre o mesmo pavimento (YODER e WITCZAK, 1975).

Os dois modelos mais usados no Brasil são da AASHTO – American Association of Highways and Transportation Officials e USACE – United States Army Corps of Engineers.

Na pista experimental da AASHTO, as várias seções do pavimento foram submetidas ao carregamento de veículos com diferentes tipos de eixos e cargas. Foram avaliados os efeitos do carregamento na perda de serventia para diversas estruturas de pavimento.

AASHTO – baseia-se na perda de serventia, medida em PSI e varia com o tipo de pavimento, flexível ou rígido, índice de serventia terminal e resistência do pavimento (número estrutural – SN) (PINTO e PREUSSLER, 2002). Liddle (1962) publicou os resultados para eixos simples e eixos duplos. Mais tarde, determinou-se as relações para eixos simples e eixos triplos em tandem (ARANOVICH, 1991).

USACE – avalia o efeito dos carregamentos na deformação permanente (trilhas de roda) (PREUSSLER e PINTO, 2002). Publicado em 1962, são utilizadas pelo DNIT (antigo DNER), nos seus métodos de dimensionamento de pavimentos novos e de reforço de pavimentos, exceto o PRO 159/85 (ARANOVICH, 1991).

Os valores de equivalência de carga de eixos da AASHTO é cerca de quatro vezes menor que o baseado nos fatores de cargas de eixo do USACE (PINTO e PREUSSLER, 2002).

2.1.5 Número equivalente “N”

É o número de repetições equivalentes de um eixo padrão de 8,2 toneladas (18.000 lb ou 80 KN), durante o período de vida útil do projeto.

Com os dados do tráfego médio diário anual (TMDA), classificação e carregamento da frota circulante e suas projeções para a vida útil futura, pode-se calcular o número N.

A projeção do volume de tráfego durante um dado período de tempo deverá de alguma forma exprimir os índices de crescimento anual de movimentação de cargas, dos veículos comerciais; tais índices se correlacionam com outros índices de crescimento sócio-econômicos das regiões servidas pela via (BALBO, 1997-a).

Os fatores de veículos para automóveis e caminhões leves são desprezíveis, pois seus carregamentos de nada afetam o dimensionamento, porque seus valores de equivalência são baixos.

Os estudos na pista experimental da AASHTO mostram que o número N deve ser corrigido em função da umidade dos materiais do pavimento, através de fatores de correção que variam de 0,2 a 5,0. No Brasil, estudos do IPR/DNIT, mostram que não se faz necessária à correção com fator climático (PINTO e PREUSSLER, 2002).

2.2 PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS

A base principal de dados deste trabalho baseia-se nos projetos de restauração de pavimentos e suas respostas, funcional e estrutural, em relação à vida útil proposta nos mesmos.

Os objetivos específicos a serem atingidos quando se projeta a restauração de um pavimento são os seguintes (RODRIGUES, 2001):

→ Trazer a condição funcional (conforto ao rolamento e segurança) a níveis compatíveis com a de um pavimento novo;

→ Garantir uma vida de serviço mínima para o pavimento restaurado, de modo que a nova intervenção desse mesmo porte seja requerida apenas após determinado período;

→ Utilizar técnicas disponíveis e aplicáveis, que atendam aos requisitos operacionais e às restrições orçamentárias;

→ Controlar os mecanismos pelo qual a deterioração das estruturas de pavimento vem se processando ao longo do tempo.

O DNIT adota os métodos DNER-PRO 010/79 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis; DNER-PRO 011/79 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis; DNER-PRO 159/85 – Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos; e DNER-PRO 269/94 – Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis – TECNAPAV, que apresentam diferentes graus de complexidade de aplicação, alguns mais simples e outros mais complexos, que requerem o emprego de sofisticados instrumentos de cálculo eletrônico (GONTIJO et al, 2003).

2.2.1 Dimensionamento pelo Método DNER-PRO 011/79 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis (DNER, 1979-b)

Este procedimento foi divulgado pelo engenheiro Bolivar Lobo Carneiro, baseado no método de dimensionamento de reforço para pavimentos flexíveis do engenheiro argentino Celestino Ruiz. É um procedimento empírico de análise defletométrica, baseado na avaliação objetiva da superfície do pavimento e levantamento das deflexões e raio de curvatura com a viga Benkelman (DNER, 94-i). Para cada segmento homogêneo do trecho a ser restaurado, são determinadas estatisticamente a deflexão de projeto e as deflexões admissíveis através do número N. A avaliação estrutural do pavimento e o cálculo do reforço são executados pelos critérios defletométricos e da resistência. O cálculo da espessura do reforço em concreto asfáltico é efetuado em função da deflexão de projeto e da deflexão admissível.

O dimensionamento de reforço com concreto asfáltico é calculado pelo critério defletométrico ou da deformabilidade. Na opinião de alguns engenheiros, o DNER-PRO 011/79 tende a subdimensionar quando a espessura dos reforços são menores de 7,0 (sete) centímetros e superdimensionar quando maiores que 10,0 (dez) centímetros (SANTANA, 1989).

O critério de deflexão admissível foi extraído do Asphalt Institute – USA (PINTO e PREUSSLER, 2002).

A limitações principais do método DNER-PRO 011/79 residem no fato de não ser possível experimentalmente, correlacionar a deformação reversível no topo da camada de revestimento, com a deformação específica na face inferior da mesma camada, atribuir grande importância ao raio de curvatura e apresenta como maior deficiência o cálculo da deflexão admissível não ser apenas em função do número N e da natureza do revestimento e base, mas também da espessura e natureza das demais camadas constituintes do pavimento (SANTANA, 1989).

O DNER-PRO 011/79 utiliza apenas o deslocamento vertical máximo recuperável como o único parâmetro caracterizador da condição do pavimento existente (SUZUKI et al 2001-a; PAIVA et al 2003).

Os métodos DNER-PRO 010/79 e DNER-PRO 011/79 fornecem espessuras razoáveis para pavimentos em estados mau ou péssimo, porém espessuras muito pequenas para pavimentos em estado regular (ARANOVICH, 1991).

2.2.2 Dimensionamento pelo Método DNER-PRO 269/94 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis (DNER, 1994-h)

Intitulado Método da Resiliência foi elaborado pelos engenheiros Salomão Pinto e Ernesto Preussler (1982). É um procedimento mecanístico-empírico, baseado nos modelos de fadiga de misturas asfálticas, no comportamento resiliente de solos finos e materiais granulares e no cálculo de tensões e deformações considerando a teoria da elasticidade não linear. É realizada uma avaliação objetiva da superfície do pavimento, DNIT 006 e 007/2003 PRO(DNIT, 2003-c; DNIT, 2003-d), levantamento das deflexões recuperáveis, coleta de amostras e ensaios de caracterização, granulometria com sedimentação e ISC. O dimensionamento é baseado na deflectometria, constituição do subleito e do pavimento existente.

O DNER-PRO 269/94 como critério de dimensionamento incorporou a consideração explícita de propriedades resilientes de solos e materiais que constituem as estruturas de pavimentos flexíveis e, também, a fadiga de misturas betuminosas (SUZUKI et al, 2001-a ; PAIVA et al, 2003).

O método PRO 269 fornece espessuras razoáveis para pavimentos em estados mau ou péssimo, porém espessuras muito pequenas para pavimentos em estado regular (ARANOVICH, 1991).

2.2.3 Dimensionamento pelo Método DNER PRO 010/79 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis (DNER, 1979-a)

É um procedimento empírico de análise defletométrica, onde inicialmente são realizadas uma avaliação objetiva da superfície do pavimento (DNIT 006/2003 – PRO) e um levantamento das deflexões e raio de curvatura com a viga Benkelman. Utiliza o deslocamento máximo recuperável, a espessura do revestimento existente e índices de fissuração como parâmetros caracterizadores da condição do pavimento existente, (SUZUKI et al, 2001-a ; PAIVA et al, 2003). As deflexões de projeto são calculadas estatisticamente e as deflexões admissíveis através do número N. As espessuras do reforço são obtidas através das variáveis citadas.

Dimensionamento baseado no critério de deformação em relação à deflexão recuperável e o desempenho dos pavimentos flexíveis. A limitação principal do DNER-PRO 010/79 reside no fato de não ser possível experimentalmente, correlacionar a deformação reversível no topo da camada de revestimento, com a deformação específica na face inferior da mesma camada (SANTANA, 1989).

O Método, desenvolvido e divulgado pelo Engenheiro Armando Martins Pereira, consiste em uma adaptação do método na época adotado pela California Division of Highways, publicado em 1.967, (SANTANA, 1989), com inovações e soluções nomográficas.

O DNER-PRO 010/79 é uma norma, que tem embasamento experimental bastante significativo, muito embora admitam-se as dificuldades decorrentes da adaptação de métodos empíricos oriundos de países de clima temperado (PINTO e PREUSSLER, 2002).

O método é baseado na evolução das deflexões recuperáveis quando o pavimento é submetido às ações de carregamento e intemperismo, como pode ser visto na figura 2.1, obedece a três etapas de distintas:

→ Fase de consolidação: devido à compactação pelo tráfego, com diminuição da deflexão.

→ Fase elástica: deflexões praticamente constantes, pode-se considerar como a vida útil do pavimento.

→ Fase de fadiga: aumento acelerado da deflexão, aparecimento dos defeitos pela perda da capacidade estrutural.

Os métodos DNER-PRO 010/79 e DNER-PRO 011/79 fornecem resultados confiáveis para pavimentos em estado mau e péssimo e resultados exagerados para pavimentos em estado bom e regular (ARANOVICH, 1991).

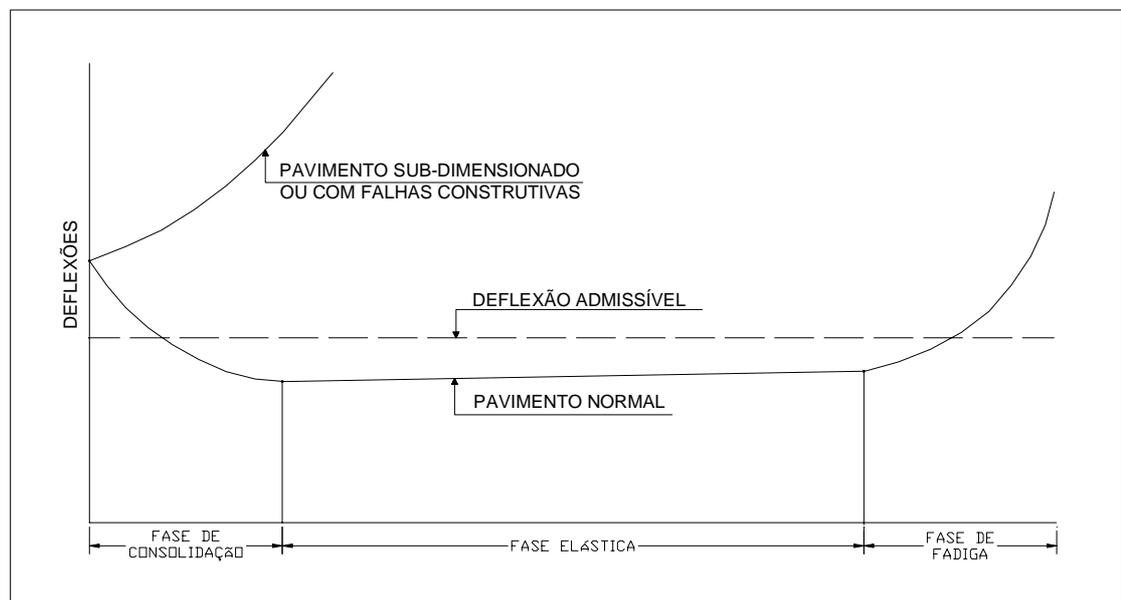


FIGURA 2.1.- Evolução das deflexões recuperáveis

2.2.4 Dimensionamento pelo Método DNER-PRO 159/85 - Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos (DNER, 1985)

É um procedimento empírico de análise da deficiência estrutural e funcional. É realizada uma avaliação objetiva da superfície do pavimento, DNIT 007/2003 – PRO(DNIT, 2003-d), medição da irregularidade, espessuras das camadas constituintes e determinação do módulo de resiliência do revestimento asfáltico. Baseado no pressuposto, que após a entrega ao tráfego o pavimento inicia um processo de degradação, com a perda de sua capacidade estrutural e funcional. O dimensionamento do reforço é realizado em função de equações de desempenho do pavimento, em relação à irregularidade, trincamento e desgaste.

O DNER-PRO 159/85, é tecnicamente bem embasado e apresenta boas perspectivas pela sua simplicidade e facilidade de execução (SANTANA, 1989).

Este método considera critérios de gerência de pavimentos, analisando suas várias alternativas de reforço para um pavimento, mediante o estudo do desempenho estrutural e funcional (SUZUKI et al, 2001-a).

Os modelos de desempenho do DNER PRO 159/85, foram testados através de uma longa experiência no seu emprego e demonstram que podem estimar com razoável confiabilidade a evolução do trincamento e da irregularidade tanto de um pavimento existente como de um pavimento restaurado com CAUQ, proporcionando de uma maneira clara e objetiva o cálculo da vida restante dos pavimentos flexíveis sob as mais diversas condições de restrições que lhe foram impostas (FABRÍCIO et al, 2001).

Para substituir os exaustivos cálculos necessários à análise desejada, foi desenvolvido um programa computacional que, utilizando modelos estabelecidos, permite simular o desempenho do reforço ao longo do tempo. O programa foi denominado PAEP – Pesquisa de Avaliação Estrutural de Pavimentos (PINTO e PREUSSLER, 2002).

O DNER-PRO 159/85 fornece resultados confiáveis apenas nos casos de pavimentos em estado regular, com deflexões características inferiores a 1,0mm e raio de curvatura elevado. Para pavimentos em estado mau ou péssimo, o método apresenta espessuras de recapeamento insuficientes, quando comparado a outros métodos e a sensibilidade dos engenheiros (ARANOVICH, 1991).

O DNER-PRO 159/85 foi desenvolvido com base nos estudos e dados da tese de doutorado do Engenheiro César Queiroz.

2.2.5 Comparações entre os Métodos

Uma comparação entre os dimensionamentos pelos os métodos DNER-PRO 011/79, DNER-PRO 010/79 e DNER-PRO 159/85 diz que os resultados tem sido decepcionantes, mostrando nos ensaios realizados resultados muito diferentes (PEREIRA SOBRINHO E CAVALCANTE, 1999).

Conclui-se dessa análise e de outras, que os consultores tem aceito, que não existe um método universalmente aceito de restauração de pavimentos; cada método deve ser utilizado apropriadamente, cruzando-se com conhecimentos empíricos do projetista e tomando a decisão caso a caso; é imprescindível que o projetista experimentado participe de visitas ao campo (ARANOVICH, 1991).

Os métodos conduzem a soluções de restauração extremamente discrepantes (GONTIJO et al, 2003).

No Brasil, a manutenção dos pavimentos é relegada a segundo plano e os métodos usuais para projeto de restauração (normalizados pelo DNER) são falhos e omissos no que se diz respeito ao diagnóstico e seleção das medidas mais adequadas (GONÇALVES, 1997).

A norma DNER-PRO 011/79 é de aplicação simples. Contudo, os resultados obtidos indicam sistematicamente espessuras de reforços inferiores àquelas que são obtidas pela aplicação da DNER-PRO 010/79 (PINTO e PREUSSLER, 2002).

Segundo SANTANA (1989), o DNER-PRO 010/79 é experimentalmente mais bem embasado que o DNER-PRO 011/79, também mais avançado porque reconhece que a deflexão admissível depende da camada de revestimento, além do parâmetro do tráfego.

Em aplicações comparativas dos métodos do DNER as maiores espessuras de reforço foram obtidas pelo PRO 10, seguidas do PRO 11, PRO 269 e por último pelo PRO 159 (PAIVA et al, 2003).

2.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA, TENSÕES E DEFORMAÇÕES NAS CAMADAS DO PAVIMENTO

Coube a Joseph Boussinesq (1885) a realização dos primeiros estudos de cálculos de tensões e deformações nos pavimentos, (TRICHÊS, 2002-b ; PINTO E PREUSSLER, 2002; MEDINA 1997), o qual desenvolveu a solução para uma carga concentrada vertical, em meio semi-infinito, elástico, homogêneo e isotrópico, determinando suas tensões e deformações, de grande utilização nos estudos de fundações e pavimentos (MEDINA, 1997; YODER e WITCZAK, 1975; ULLIDTZ, 1987; HUANG 1993).

O prof. Donald M. Burmister (1943 e 1945) desenvolveu solução para o cálculo de tensões e deformações em sistemas de duas e três camadas, para materiais elásticos, isotrópicos e homogêneos, em meio semi-finito e levando-se em conta a lei de Hooke (YODER e WITCZAK, 1975; ULLIDTZ, 1987; HAAS et al, 1994; HUANG 1993).

Francis Hveem (1951) realizou o primeiro estudo sistemático da deformabilidade dos pavimentos, com o estabelecimento dos valores máximos admissíveis de deflexões para a vida de fadiga (PINTO E PREUSSLER, 2002; MEDINA, 1997).

Com a observação dos defeitos do pavimento, Hveem (1955), baseado na repetição do carregamento, concluiu que a maioria dos defeitos tinha origem na fadiga do revestimento, devido a repetição de pequenas deformações plásticas, assim para estas deformações adotou o termo resiliência, citado por PINTO e PREUSSLER (2002).

Considera-se, conforme mostrado na Figura 2.2, que uma fração de uma camada do pavimento recebe o esforço proveniente do tráfego, que gera a tensão σ_1 , tendo em vista que a camada do pavimento está confinada, é gerada uma tensão radial σ_3 . Considera-se também que a camada possui uma altura h e um diâmetro ϕ , e com o carregamento, são gerados deslocamentos e medidos como Δh e $\Delta \phi$.

Assim, quantificam-se os deslocamentos específicos por:

$$\varepsilon_h = \Delta h / h \quad \text{e} \quad \varepsilon_\phi = \Delta\phi / \phi \quad (1)$$

Sendo que o coeficiente do Poisson (ν), que segundo (YODER e WITCZAK, 1975; ULLIDTZ, 1987; MEDINA 1997) é a razão da deformação específica radial e a deformação axial recuperável, gerado em uma das camadas do pavimento, é:

$$\nu = \varepsilon_\phi / \varepsilon_h \quad (2)$$

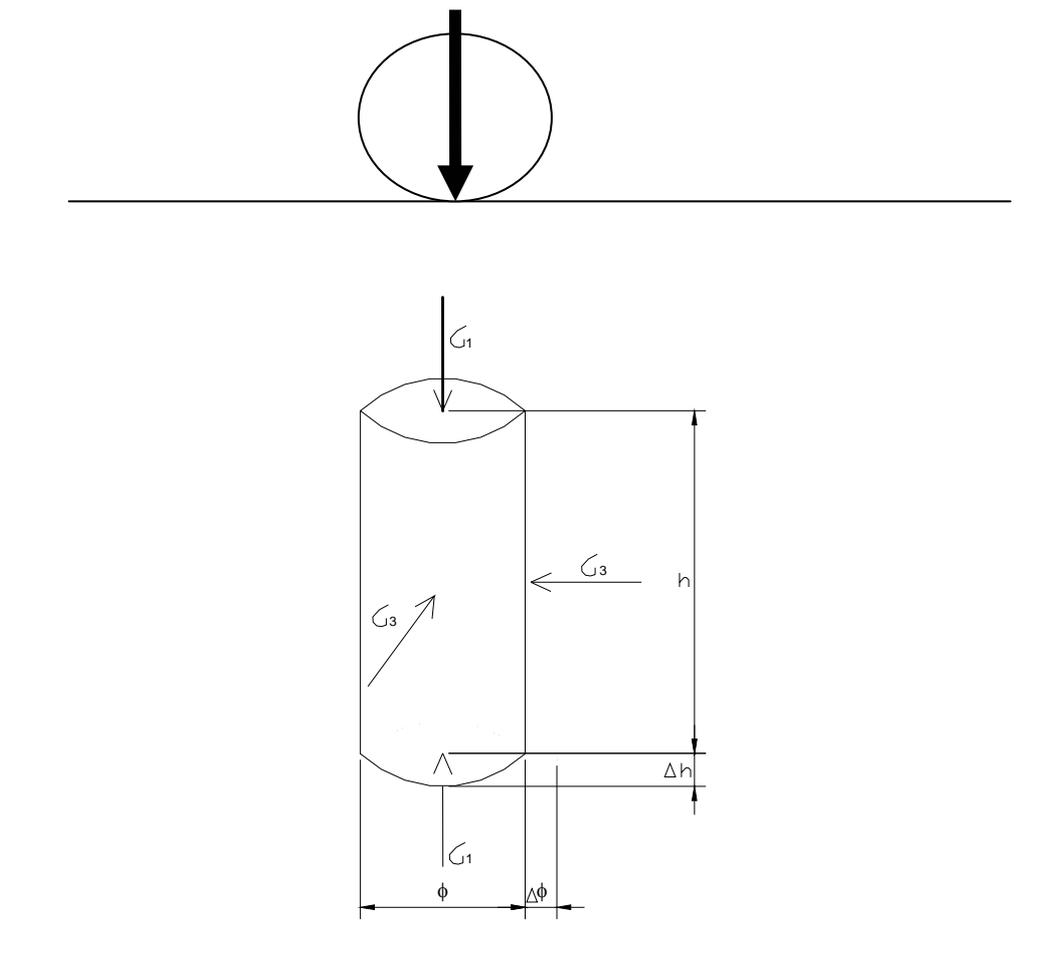


FIGURA 2.2.- Tensões aplicadas no pavimento

O coeficiente de POISSON tem relativamente pequeno efeito nas tensões e deflexões (HUANG, 1993).

Os valores dos coeficientes de Poisson, comumente utilizados são (MEDINA, 1997; TRICHÊS, 2002-b):

- Concreto Betuminoso Usinado a Quente: 0,25.
- Bases Granulares: 0,35.
- Bases Cimentadas: 0,18
- Bases Aditivadas com Cal: 0,20
- Solos: 0,45.

Assim define-se módulo de resiliência (M_r) de um material, como a relação entre a tensão vertical aplicada repetidamente (σ_d) e a deformação axial elástica recuperável correspondente a esta solicitação (ϵ_r) para um dado número de aplicação de carga, ou seja, o corpo sofre uma deformação $\Delta\phi$, mas após cessar a carga o mesmo tende a retornar ao seu estado inicial, sendo esta medida de retorno à deformação elástica recuperável, a parcela que não retorna é denominada deformação permanente (MEDINA, 1997; YODER E WITCZAK, 1975; PINTO e PREUSSLER, 2002).

Assim:

$$M_r = \sigma_d / \epsilon_r \quad (3)$$

Da figura 2.2 :

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (4)$$

O módulo de resiliência pode ser determinado de duas maneiras, por retroanálise ou por ensaios de laboratório.

Sabe-se que os procedimentos de retroanálise disponíveis envolvem diversas variáveis e os vários métodos analíticos empregados levam a resultados, que variam dentro de uma faixa bastante ampla e, portanto não se pode assegurar que os módulos obtidos por retroanálise são

acurados. Devem ser desenvolvidas pesquisas que visem a comparação entre os módulos obtidos a partir da retroanálise de ensaios não destrutivos (NDT) e os módulos de resiliência de laboratório dos materiais que compõem as camadas (WITZACK, 1989).

2.3.1 Módulos de Resiliência em Laboratório

Existem dois tipos de ensaios para a determinação dos Módulos de resiliência: o de Ensaio de Compressão Diametral, utilizado para ensaiar materiais betuminosos e o Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas, para ensaios de solos.

2.3.1.1 Ensaio de Compressão Diametral

Conhecido no exterior como “Ensaio Brasileiro”, foi desenvolvido pelo prof. Fernando Luiz Lobo B. Carneiro, para a determinação da resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de concreto de cimento Portland, e atribui-se a Schmidt, da CHEVRON – Califórnia, a aplicação deste ensaio para misturas betuminosas (MEDINA, 1997), o qual em um teste para a determinação do módulo de resiliência para misturas betuminosas, sendo recomendado pelo Guia da AASHTO (1993-a), onde geralmente leva-se 10 (dez) minutos para testar uma amostra. O ensaio consiste na aplicação de carga repetidamente no plano diametral de uma amostra cilíndrica, normalmente de 10 (dez) centímetros de diâmetro por 6,3 centímetros de altura. A deformação horizontal é medida com LVDTs (Linear Variable Differential Transducers) (HUANG, 1993; MEDINA, 1997; ULLIDTZ, 1987; YODER e WITCZACK, 1975).

O módulo de resiliência, como exemplo, é calculado pela equação (WSDOT, 1995):

$$E_{CA} = \{ P (\mu + 0,27) \} / \{ t + \Delta h \} \quad (5)$$

E_{CA} : módulo de resiliência do concreto asfáltico, em MPa;

μ : coeficiente de Poisson;

Δh : deformação horizontal recuperável, em mm;

P: carga repetida, em N;

T: espessura da amostra, em mm;

O ensaio é realizado dentro de ambiente fechado a uma temperatura de 25°C.

2.3.1.2 Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas

Introduzido nos estudos de pavimentação pelo prof. H. Bolton Seed, na década de 50, na Universidade da Califórnia, Berkeley (MEDINA, 1997), o qual consiste na determinação do módulo de resiliência de solos, também recomendado pelo Guia da AASHTO (1993-a).

O ensaio é para amostras compactadas em laboratório, cilíndricas, com 10cm (dez centímetros) de diâmetro e 20 cm (vinte centímetros) de altura, sendo revestida por uma fina membrana de borracha, no sentido a evitar que a mesma decomponha-se facilmente, quando da aplicação da carga repetida (HUANG, 1993; MEDINA, 1997; ULLIDTZ, 1987; YODER e WITCZCK, 1975).

O ensaio é realizado dentro de uma câmara, o qual recebe a tensão repetida σ_1 e através do fluido presente na câmara aplica a tensão confinante σ_3 .

Como exemplo, o módulo de resiliência é calculado pela equação (WSDOT, 1995):

$$M_r = \sigma_d / \epsilon_r \quad (6)$$

Sendo:

M_r : módulo de resiliência, em MPa;

σ_d : tensão desvio, que é a diferença entre a tensão vertical e a tensão de confinamento, em MPa;

ϵ_r : deformação axial recuperável = $\Delta h/h$;

P: carga repetida aplicada, em N;

A: área da seção da amostra, em cm²;

h: altura base de medida, em cm;

Δh : mudança no comprimento da amostra devido a aplicação da carga, em cm.

2.3.2 Módulo de Resiliência por Retroanálise

Consiste no estabelecimento dos módulos de resiliência dos materiais das camadas das estruturas dos pavimentos através de programas computacionais, os quais geram módulos elásticos, mas como os valores são aproximados dos módulos de resiliência, estes são adotados sem correções. Os dados de entrada são os levantamentos deflectométricos, com a determinação das bacias de deformação completas, espessuras constituintes das camadas do pavimento e sua natureza.

Estes programas são baseados na mecânica dos pavimentos, cujo objetivo inicial foi projetar pavimentos, considerando os estados de tensões e deformações atuantes, sendo o projeto definido baseando-se nas tensões e deformações admissíveis e resistentes, para determinado período de projeto e condição de serventia (PINTO e PREUSSLER, 2002).

Para a realização da retroanálise existem três processos distintos, Métodos Simplificados de Retroanálise, Programa de Cálculo de Tensões, Deformações e Deslocamentos em Estruturas do Pavimento e Métodos Iterativos de Retroanálise (FERNANDES, 2000; ALBERNAZ, 1997; ROCHA FILHO, 1996; MEDINA, 1997; TRICHÊS, 2002-b).

Os módulos de resiliência obtidos por retroanálise podem ser descritos como sendo os módulos elásticos de resposta ao carregamento em sistemas estruturados, pois a deformação total da estrutura é composta basicamente pelas deformações particulares de cada material constituinte da estrutura, relacionada com as características de rigidez dos mesmos (PITTA, 1998).

Dentre os pontos mais importantes dos programas de retroanálise, podem ser citados a busca por valores modulares iniciais para o processo iterativo, critério do erro admissível, cálculo dos valores modulares para novas iterações, e a imposição ou não de valores limites para cada material (PITTA, 1998).

2.3.2.1 Métodos Simplificados de Retroanálise

Através da utilização direta de equações, tabelas, gráficos e outros procedimentos simplificados, estimam-se os módulos do sistema pavimento/subleito, a partir da Teoria da Elasticidade aplicada para os meios homogêneos, isotrópicos e linearmente elásticos. O procedimento usual é a transformação da estrutura real de multicamadas em estruturas mais simples, equivalentes, normalmente de duas ou três camadas, inclusive com o subleito, perdendo assim acurácia, tendo sua utilização principalmente em estudos preliminares e gerência de pavimentos em nível de rede.

FERNANDES (2000) e ALBERNAZ (1997) citam como exemplo de métodos simplificados de retroanálise o Método da AASHTO (AASHTO, 1993-a), Método Fabrício et al (1994), Método Noureldin (1993) e Método Albernaz (1997).

2.3.2.2 Programas de Cálculo de Tensões, Deformações e Deslocamentos em Estruturas de Pavimentos

Os atuais métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizam os módulos de resiliência e os coeficientes de Poisson como principais parâmetros de dimensionamento das espessuras das camadas (ALBERNAZ, 1997). Os programas são baseados na resolução de sistemas de equações oriundas da Teoria da Elasticidade.

Os programas são alimentados com dados de carregamento, como a carga aplicada, tensão de contato, quantidade e posição das cargas, as espessuras das camadas, os módulos e os coeficientes de Poisson das camadas e os pontos a serem analisados.

Assim, a retroanálise, com a utilização destes programas, é realizada por tentativas. Através de sondagens e dados históricos obtem-se as espessuras e as camadas constituintes da estrutura. Os coeficientes de Poisson são determinados ou adotados de fontes bibliográficas. Arbitrando-se os valores dos módulos das camadas, são gerados os valores de uma bacia de deformação, que deve assemelhar-se com a obtida em campo. Quando a bacia enquadrar-se dentro de um limite de

tolerância pré-definido, os módulos arbitrados passam a serem considerados como os módulos das camadas obtidos por retroanálise.

Como exemplo podemos citar os programas ELSYM5, FEPAVE, Dama, Kenlayer, Illi-pave, Ecoroute e outros (FERNANDES, 2000; MEDINA, 2002; ALBERNAZ, 1997; TRICHÊS, 2002-b; HAAS et al, 1994; HUANG, 1993).

2.3.2.3 Métodos Iterativos de Retroanálise

Os métodos iterativos tem por função determinar os módulos de todas as camadas do pavimento, os quais são utilizados para o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos atuantes em qualquer ponto do pavimento, sendo baseados na teoria das multicamadas elásticas e o método dos elementos finitos, de formulação matemática complexa, fornecem boa acurácia. São métodos de processamento lento, e como exemplo pode-se citar o FEPAVE2 da COPPE/RJ.

Os métodos iterativos podem ser classificados em três grupos (ALBERNAZ, 1997; FERNANDES, 2000):

a) Métodos que calculam os parâmetros elásticos de estruturas teóricas, cujas bacias de deformação são comparadas com a bacia medida no campo, iterativamente, até que a semelhança entre as duas seja aceitável.

Como exemplo pode-se citar o Elmod, Retroana, EVERCALC e outros.

b) Métodos que comparam as bacias de campo com bacias teóricas, previamente medidas, com módulos determinados em laboratório e armazenados em banco de dados. Como exemplo pode-se citar os programas Modulus, Comdef, Dbconpas e outros.

c) Métodos cujos cálculos de deflexões teóricas, em pontos previamente determinados da bacia de deformação, são obtidos através de equações de regressão estatística, cujos dados de regressão podem ser obtidos de qualquer programa de análise mecânica. Como exemplo pode-se citar os programas Loadrate e Pastrev.

2.3.3 Programa ELSYM5 – Elastic Layered System

O Programa Computacional ELSYM5 (Elastic Layered System), aplicativo desenvolvido pela Universidade da Califórnia em Berkeley, inicialmente para computadores de grande porte, a versão para microcomputadores foi desenvolvida por KOOPERMANN et al (1985) e foi patrocinada pelo Federal Highway Administration (FHWA) (COUTINHO NETO et al, 2003). É um procedimento baseado na teoria da elasticidade linear de meios estratificados, com a solução de Burmister ampliada para cinco camadas, (MEDINA, 1997), permite o carregamento de até 10 (dez) cargas, obtendo-se tensões e deformações em vários pontos e também a bacia de deformação.

Dados necessários para alimentação do programa:

- a) Carregamento ocasionado pelo tráfego, número e localização das cargas.
- b) Coeficientes de Poisson das camadas constituintes do pavimento.
- c) Espessuras das camadas constituintes do pavimento.
- d) Pontos em que serão analisadas as tensões, as deformações e as deslocamentos.

O programa ELSYM5, conforme já mencionado, gera tensões, deformações e deslocamentos, em vários pontos do pavimento, quando da aplicação de cargas similares às oriundas do tráfego.

A retroanálise, com a utilização deste programa computacional, consiste em arbitrar valores para módulos de resiliência de um determinado pavimento, até que os resultados da bacia de deformação gerada enquadrem-se dentro de um intervalo de aceitação em relação à bacia de deformação levantada em campo, determinando assim os módulos das camadas do pavimento, os limites e médias dos módulos de resiliência podem ser vistos na Tabela 2.1, formulada nos estudos de CARDOSO (1995).

Cabe lembrar que as variações dos módulos ocorrem devido ao trincamento, para valores menores, e envelhecimento do ligante, para valores maiores, sem levar em conta a variação da temperatura, a qual altera os valores dos módulos sem levar em conta trincamento e ligante.

Tabela 2.1 – Módulos de Resiliência – Médias e Limites (CARDOSO, 1995)

CAMADAS	MÉDIA (kgf/cm ²)	MÍNIMO (kgf/cm ²)	MÁXIMO (kgf/cm ²)
REVESTIMENTOS	29.000	11.300	58.200
BASES (*)	2.700	1.000	7.300
SUB-BASES	1.500	700	3.000
REFORÇOS SUBLEITO	1.200	300	3.000
SUBLEITO	1.500	800	2.700

(*) Exceto bases cimentadas

2.3.4 Programa EVERSERIES Pavement Analyses Programs

O Everseries é um grupo de programas desenvolvidos pelo Washington State Department of Transportation (WSDOT), a partir de programa do WESLEA – Watersways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers (WSDOT, 1995).

O Everseries apresenta três programas independentes:

a) Programa EVERSTRESS – Layered Elastic Analysis - que determina as tensões, deformações e deslocamentos em um sistema de camadas elásticas semi-infinitas abaixo da superfície de cargas circulares. O programa analisa estruturas contendo no máximo 5 (cinco) camadas, 20 (vinte) cargas e 50 (cinquenta) pontos de avaliação;

b) Programa EVERPAVE – Pavement Overlay Design - é o programa de dimensionamento de pavimentos, baseado nos defeitos provenientes da fadiga por trincamento e trilhamento de rodas, fornecendo as espessuras necessárias para suportar os danos causados pelo tráfego;

c) Programa EVERCALC – Pavement Backcalculation - é o programa que estima os módulos resilientes das camadas do pavimento.

O programa EVERSTRESS apresenta uma similaridade muito grande com o programa ELSYM5.

2.3.4.1 Programa EVERCALC – Pavement Backcalculation

Os fundamentos básicos são:

- as camadas do pavimento são infinitas na direção horizontal.
- as camadas possuem espessuras uniformes.
- as última camada é semi infinita na direção vertical.
- as camadas são homogêneas, isotrópicas, de materiais linearmente elásticos, caracterizadas pelo módulo elástico e pelo coeficiente de Poisson.

Para a determinação dos módulos de resiliência são necessários os seguintes elementos:

- espessuras e natureza das camadas constituintes do pavimento.
- bacias de deformação medidas sobre os pavimentos.
- temperaturas do pavimento.
- coeficientes de Poisson das camadas do pavimento.
- carga aplicada no pavimento para determinação das bacias de deformação e o raio de aplicação.
- módulos sementes, ou sejam os módulos que o programa deverá começar a primeira iteração.
- valores máximos e mínimos limites para o cálculo dos módulos.
- número máximo de iterações permitidas.
- tolerância de erro aceitável para ao cálculo do módulo.

De posse dos dados citados acima, o programa, através de processo iterativo, calcula os módulos, atendendo a todas as restrições impostas, ou até chegar ao limite máximo de iterações permitidas no processo, cabendo lembrar, que nem sempre é possível chegar a resultados dentro dos limites requeridos.

2.3.4.2 Programa EVERSTRESS – Layered Elastic Analysis

O EVERSTRESS analisa estruturas contendo no máximo 5 (cinco) camadas, 20 (vinte) cargas e 50 (cinquenta) pontos de avaliação, diferindo do ELSYM5, que analisa apenas 10 cargas.

O programa calcula tensões, deformações e deslocamentos em 50 diferentes pontos, tendo de ser alimentado com a espessura das camadas, o coeficiente de Poisson, os módulos elásticos e os pontos que se quer analisar.

2.3.4.3 Programa EVERPAVE – Pavement Overlay Design

É um programa de dimensionamento de reforço de pavimentos, baseado nos defeitos provenientes da fadiga por trincamento e trilhamento de rodas.

O dimensionamento é realizado a partir do tráfego previsto para o pavimento, com o qual o programa é alimentado, juntamente com a estrutura do pavimento que se deseja executar, informações de todas camadas, respectivas espessuras, materiais constituintes e o coeficiente de Poisson das mesmas. O programa define a estrutura necessária para atender ao tráfego previsto.

2.4 ENSAIOS DE CAMPO E LABORATÓRIO

Os ensaios executados em laboratório e em campo têm por finalidade, a obtenção de dados para comparação com os estudos teóricos, e verificação da qualidade dos materiais empregados e o estado que os mesmos encontram-se.

2.4.1 Ensaios “in situ”

Os ensaios mais comumente utilizados, “in situ”, são em relação ao subleito:

→ DNER-ME 092/94 – Determinação da massa específica aparente “in situ”, com emprego do frasco de areia (DNER, 1994-l), para posterior determinação do grau de compactação;

→ Umidade – baseia-se no mesmo critério de cálculo do DNER-ME 213/94 – Solo – Determinação do teor de umidade (DNER, 1994-q), necessário para o ensaio do módulo de resiliência em laboratório.

2.4.2 Ensaios em Laboratório

Os ensaios mais comuns, em relação ao subleito e misturas betuminosas são:

- DNER-ME 051/94 - Solos - Análise Granulométrica (DNER, 1994-j);
- DNER-ME 122/94 – Solos – Determinação do limite de liquidez (DNER, 1994-n);
- DNER-ME 082/94 – Solos – Determinação do limite de plasticidade (DNER, 1994-o);
- DNER-ME 162/94 – Solos – Ensaio de Compactação utilizando amostras não trabalhadas (DNER, 1994-k);
- DNER-ME 049/94 – Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas (DNER, 1994-m);
- DNER-ME 131/94 – Solos – Determinação do Módulo de Resiliência (DNER, 1994-p);
- DNER-ME 053/94 - Misturas Betuminosas - Percentagem de Betume (DNER, 1994-f);
- DNER-ME 003/94 - Material Betuminoso - Determinação da Penetração (DNER, 1994-c);
- DNER-ME 004/94 – Material Betuminoso – Determinação da Viscosidade (DNER, 1994-d);
- DNER-ME 133/94 – Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência (DNER, 1994-e);
- NBR 6560/2000 – Materiais Betuminosos – Determinação do Ponto de Amolecimento - Método Anel e Bola.

2.5 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS

Existem dois processos para a avaliação estrutural de pavimentos, através de ensaios destrutivos e de ensaios não destrutivos.

HAAS et al (1994) faz uma comparação entre ensaios destrutivos e de ensaios não destrutivos da seguinte forma:

“Para pavimentos, avaliação destrutiva é usualmente uma sondagem para amostragem e algumas vezes são realizados testes de materiais no local. A avaliação não destrutiva de avaliação envolve medidas de superfície, de deflexões ou raio de curvatura, combinadas com pequenos furos para

obter espessuras e amostras das camadas do pavimento para testes de laboratório, não havendo nenhuma maior destruição do pavimento”.

2.5.1 Ensaios Destrutivos

Os ensaios destrutivos caracterizam-se pela retirada de amostras para ensaios em laboratório, identificação dos materiais, espessuras das camadas, condições em que se encontram, tendo como deficiência a inutilização do local para novos testes (HAAS et al 1994).

Os ensaios destrutivos apresentam como principais inconvenientes na reprodução do estado de tensões e condições ambientais, para análise das camadas estruturais do pavimento em serviço, o fato de não conseguir simular exatamente as condições de campo (estado de tensões, índice de vazios, etc), conseqüentemente não refletindo em sua plenitude o desempenho do material no campo.

2.5.2 Ensaios Não Destrutivos

O elemento principal para iniciar a avaliação estrutural de pavimentos, é o levantamento deflectométrico, ou seja, medir as deformações ocorridas no pavimento quando sujeito à ação do tráfego.

Três elementos são fundamentais neste estudo, que são assim definidos:

a) Deformada, deformada completa, ou bacia de deflexão ou bacia de deformação, apresentada pelo pavimento sob a ação de carga de tráfego, que é o efeito causado no pavimento, em termos de deflexão, no ponto abaixo da carga aplicada e em pontos pré determinados, afastados da mesma, até uma distância máxima de 1,50m.

b) Deflexão máxima é a maior deformação sofrida pelo pavimento, ocorrendo sob o centro da carga aplicada, comumente chamada de d_0 .

c) Raio de Curvatura é o arqueamento da deformada em seu ponto mais crítico, geralmente entre o d_0 e o d_{25} , ou seja, o raio entre o ponto de deflexão máxima e a deflexão a 25 cm deste ponto, sendo a expressão que fornece este raio:

$$R_c = 3.125 / (d_0 - d_{25}) \quad (7)$$

Sendo:

R_c o raio de curvatura;

d_0 a deflexão levantada embaixo do centro de carga;

d_{25} a deflexão levantada a uma distância de 25 cm do eixo de carga.

2.5.3 Tipos de Aparelhos de Medição de Deflexões

O desenvolvimento dos medidores de deflexões tiveram como fatores determinantes da necessidade de execução de ensaios, com um menor dispêndio de tempo e que os resultados quantificassem a realidade com menor custo possível.

Os equipamentos disponíveis para a medição em campo são classificados em:

- estático
- vibratórios
- impulsos

a) Medidores Estáticos

a.1 Ensaio de Placa

Consistem na aplicação de cargas estáticas sobre uma placa circular de raio conhecido e a medição das deformações recuperáveis, entre os medidores estáticos o mais comumente utilizado é o ensaio de placa. (HAAS et al, 1994)

a.2 Viga Benkelman

É basicamente uma viga móvel apoiada em um suporte metálico, que mede a deformação ocasionada pelo movimento de um caminhão, sob seu eixo traseiro, com carregamento de 8,2

toneladas. A leitura é manual, sendo serviço moroso e de baixa produtividade (YODER e WITCZAK 1975; HAAS et al, 1994; HUANG, 1993; MEDINA, 1997).

a.3 Viga Benkelman Automatizada

Equipamento instalado em caminhão, de maior produção, com sensores que medem as deflexões, medindo a bacia de deformação completa, temperatura ambiente e do pavimento. Como exemplo podemos citar o Lacroix Deflectograph e o California Traveling Deflectometer (HAAS et al, 1994; MEDINA, 1997).

b) Medidores Vibratórios

Consistem na aplicação de uma carga dinâmica no pavimento, produzindo uma vibração senoidal, cuja medição é feita no pico da força dinâmica, entre os quais pode-se citar:

b.1 Dynaflect

Normalizado pelo DNER-ME 039/94 – Determinação das Deflexões pelo Dynaflet (DNER, 1994-g), o equipamento é montado em um reboque, utilizando carga dinâmica de pico de 4,4 KN, frequência de 8Hz, com as deflexões medidas por 5 (cinco) geofones montados em uma barra perpendicular ao eixo do veículo (YODER e WITZACK, 1975; HAAS et al, 1994; HUANG, 1993; MEDINA, 1997).

Devido à magnitude da carga produzida pelo aparelho ser frequentemente pequena, faz-se necessário correlacionar os resultados deste aparelho com os obtidos com a viga Benkelman (YODER e WITZACK, 1975).

b.2 Road Rater

Neste equipamento as cargas podem ser aplicadas com variação da frequência, com as deflexões medidas por quatro transdutores, sendo um deles no eixo da carga aplicada (HAAS et al, 1994; HUANG, 1993).

c) Medidores de Pulso

Consistem em equipamentos que produzem um pulso de carga, cujas deflexões provenientes são medidas por geofones ou sismógrafos, entre os quais pode-se citar: Falling Weight Deflectometer (FWD), fabricados pela Kuab, Dynatest e Phoenix (HAAS et al, 1994; HUANG, 1993; MEDINA; 1997).

d) Medidores de Deflexão Utilizados no Brasil

Para este estudo foi dada ênfase a dois tipos de equipamentos para levantamento de deflectometria em pavimentos, que são os mais utilizados no Brasil, também defendidos por ULLIDTZ (1987), que sugere à utilização da Viga Benkelman para determinação da deflexão máxima causada pelo rodado de um caminhão e o uso do FWD em conjunto com retroanálise para determinação do módulo das camadas considerando a não linearidade do subleito. Nos Estados Unidos a maior parte dos levantamentos realizados foram com a Viga Benkelman e o Dynaflect (TWENEBOAH, 1993).

d.1 Medida de Deflexão com a Viga Benkelman

Desenvolvida por A.C. Benkelman durante os testes da WASHO Road Test (YODER e WITCZAK, 1975), sendo normalizada pelas normas DNER-ME 24/94 (DNER, 1994-i) e DNER-ME 61/94 (DNER, 1994-r). Foi utilizada pela primeira vez em 1953, nas pistas experimentais da WASHO, sendo composta, basicamente, de um braço ou haste metálica, articulada e apoiada em um suporte metálico em três pés, sendo um deles regulável. Um extensômetro, com precisão de centésimos de milímetros ou menos, é fixado no suporte e apoiado em uma das extremidades da haste. O ponto de articulação divide a haste em duas partes proporcionais. No ensaio a extremidade da haste, que não contém o extensômetro é posicionada entre os pneus do rodado traseiro de um caminhão de rodas duplas, carregado, com uma carga de 8,2 tf. O caminhão desloca-se para frente, até peso não exercer mais efeito sobre o ponto de medição da viga. Faz-se a leitura final, que é corrigida em função do comprimento da haste com a ponta de prova e a haste com o extensômetro (MEDINA, 1997; PINTO e PREUSSLER, 2002).

Com a variação das leituras, ou seja, a mudança de posicionamento da ponta de prova, pode ser determinada a bacia de deflexão. Em relação ao tempo de execução deste tipo de levantamento, esclarece PAIVA et al (2003), que em pouco mais de 6 horas foram realizadas leituras de 60 (sessenta) bacias de deformação, dando uma média de 1 (uma) a cada 4 (quatro) minutos, em experiência realizada no campus da UNICAMP.

d.2 Medida de Deflexão com o Falling Weight Deflectometer (FWD)

No Brasil os equipamentos mais conhecidos são os Dynatest FWD e o Kuab FWD (DNER, 1998), nos quais os ensaios consistem em cargas projetadas no pavimento, através de elevação de pesos até uma pré-determinada altura e soltos em queda livre sobre placas posicionadas na superfície do pavimento (ULLIDTZ, 1987; HAAS et al, 1994).

A resposta do pavimento ou as deflexões sofridas são registradas por sensores colocados sobre o pavimento, espaçados a distâncias pré-estabelecidas, levantando assim a bacia de deflexão completa.

O levantamento deflectométrico com FWD é normalizado pela DNER PRO 273/96 (DNER, 1996).

A idéia deste teste consiste em simular uma deflexão no pavimento similar a carga equivalente a uma roda de um veículo com velocidade entre 70 a 80 Km/h (DNER, 1996).

Os métodos normalizados pelo DNIT utilizam as deflexões levantadas com a viga Benkelman para a determinação das deflexões máximas admissíveis, as deflexões obtidas com o FWD também podem ser utilizadas, desde que convertidas para a viga Benkelman, conforme preconizam os métodos do DNER (DUARTE et al, 2003).

2.6 AVALIAÇÃO FUNCIONAL DE PAVIMENTOS

A avaliação funcional de um pavimento está relacionada diretamente com a qualidade de rolamento, ou seja, quanto menos os usuários sentirem oscilações nos veículos, provenientes de ondulações no pavimento, melhor é a qualidade de rolamento.

As citadas ondulações caracterizam irregularidades nos pavimento, que é o parâmetro a ser quantificado, sendo definido pela ASTM (American Society for Testing and Materials) como: “Os desvios de uma superfície em relação a uma superfície verdadeiramente plana, com dimensões características, que afetem a dinâmica dos veículos, qualidade de rolamento, dinâmica de cargas e drenagem”, tendo conseqüência no aumento do custo operacional e desgaste dos veículos, gerando desconforto e insegurança.

Irregularidade é o fenômeno experimentado por um passageiro e um operador de um veículo ou avião quando trafegando sobre uma superfície. E também comum se ver irregularidade definida com distorções de uma superfície de pavimento a qual contribui para um indesejável e não confortável passeio (HAAS et al, 1994).

Através da DNER-PRO 182/94 (DNER, 1994-b), a escala adotada no Brasil é o Quociente de Irregularidade (QI) ou Índice de Quarto de Carro, expresso em contagens por quilômetro, entretanto a escala que vem sendo amplamente utilizada é o International Roughness Index (IRI), cuja correlação é:

$$QI = 13 \times IRI \quad (8)$$

2.6.1 Medidores de Perfil

Equipamentos que medem o perfil da superfície, identificando distorções que afetam a dinâmica dos veículos.

a) Régua

Equipamento de madeira ou metal, que colocado sobre o pavimento fornece uma linha base, e através de medidor manual (trena ou metro) são quantificadas as distorções.

b) Régua deslizante

Aparelho com rodas nas extremidades e roda sensora no centro de uma régua, que ao deslocar-se mede as distorções, manual ou automaticamente. Como exemplo a régua do Transport and Road Research Laboratory (TRRL) da Inglaterra (PINTO e PREUSSLER, 2002).

c) Perfilógrafos

O aparelho é uma estrutura rígida ou viga, com um sistema de rodas acopladas, que ao mover-se registram as distorções do pavimento em relação à estrutura fixa. Como exemplos o perfilógrafo do California Department of Transportation (CALTRANS), da TRRL (High Speed Road Monitor) da Inglaterra e da Rainhart Co. dos EUA (HAAS et al, 1994; PINTO e PREUSSLER, 2002).

d) Perfilômetros

Aparelho que mede o perfil da superfície do pavimento de modo contínuo ou a intervalos pequenos, em síntese é um nivelamento do pavimento. A maneira mais simples e precisa de executar é através do nível e mira, que é um serviço preciso, mas moroso. Assim, foram projetados aparelhos mais eficazes, sendo classificados em dois grupos, inerciais e não inerciais.

d.1 Inerciais

Equipamentos dotados de aparelhos de referência inercial (acelerômetro) para compensar movimentos verticais do corpo do veículo medidor, o qual gera uma linha de referência; aparelho que mede a distância entre o ponto de referência e a superfície do pavimento; odômetro para medir a posição longitudinal; computador de bordo com programas para coleta e processamento

dos dados levantados. Como exemplo pode-se citar Perfilômetro da General Motors Research (GMR) ou Perfilômetro Dinâmico de Superfície, do EUA, (PINTO e PREUSSLER, 2002), de alta velocidade , operando de 40 a 50 milhas por hora (YODER e WITCZAK, 1975), o Analyseur de Profil en Long (APL) do Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) e o Perfilômetro Dakota do Sul dos EUA (HAAS et al, 1994; PINTO e PREUSSLER, 2002).

d.2 Não Inerciais

São equipamentos de fácil operação, porém de pouca produtividade, onde se pode citar como exemplo:

d.2.1 Aparelho Face Dipstick

É um acelerômetro em uma estrutura apoiada em pés afastados 30 cm, cujas medidas são colhidas por um computador acoplado, quando do giro de uma armação sobre o pé dianteiro (HAAS et al 1994).

d.2.2 Perfilômetro TRRL

Constituído de quatro medidores a laser, que mexem seqüencialmente a distância entre o aparelho e a superfície do pavimento, com dados repassados a computador acoplado, define o perfil da superfície do pavimento (HAAS et al 1994).

d.2.3 Machine for Evaluating Roughness Using Low-Cost Instrumentation - Merlin

Constituído por dois apoios distanciados de 180 cm, cujas medidas são colhidas através do desnível apresentado entre os mesmos, através de um braço mecânico, situado no ponto médio entre os apoios, que se desloca sobre folha de papel quadriculado, traçando o perfil da superfície do pavimento (PINTO e PREUSSLER, 2002).

2.6.2 Medidores Tipo Resposta

Equipamentos de medição de irregularidade, que medem a reação do veículo medidor às irregularidades do pavimento, os quais podem ser classificados em dois grupos:

a) Sistemas Mecânicos tipo Resposta

Medidor instalado em veículo de passeio médio ou reboque de um eixo, que se desloca com velocidade constante, sendo a irregularidade avaliada através dos deslocamentos entre o eixo e a carroceria do veículo ou reboque, podendo-se citar:

a.1 Rugosímetro BPR- Bureau of Public Roads

Desenvolvido a partir de 1925, baseia-se em um deslocamento constante, cujo reboque de uma roda (quarto de carro), mede o deslocamento da roda em relação à carroceria do reboque, através de um integrador mecânico acoplado a um contador elétrico (HAAS et al, 1994).

a.2 Rugosímetro da Portland Cement Association (PCA)

Desenvolvido a partir de 1965, cuja operação é com velocidade 80 km/h, sendo medido o número e a amplitude dos deslocamentos verticais entre a carroceria e o centro do eixo traseiro do carro (HAAS et al, 1994).

a.3 O equipamento “Mays Ride Meter” ou “Maysmeters”

Desenvolvido para o “Texas Highway Department”, na década de 60, mede os deslocamentos verticais entre a carroceria de um veículo de passeio e seu eixo traseiro, cuja evolução levou a montagem em reboque, operando com a velocidade de 80 km/h (HAAS et al, 1994; MEDINA, 1997).

a.4 O “Bump Integrator – (BI)” do TRRL

É um desenvolvimento do BPR, instalado em um reboque, também mede o deslocamento entre a carroceria e o eixo em uma direção a uma velocidade de 32 km/h (PINTO e PREUSSLER, 2002).

a.5 Integrador IPR/USP

Desenvolvido pela Universidade de São Paulo (USP) em parceria com o Instituto de Pesquisas Rodoviárias do DNER, é o mais utilizado no Brasil, cujo equipamento é montado em um veículo de passeio, com velocidade padronizada de 50 a 80 km/h, medindo os deslocamentos verticais entre o eixo traseiro e a carroceria do veículo (PINTO e PREUSSLER, 2002).

b) Sistemas Tipo Resposta Baseados em Acelerômetros

São equipamentos que usam acelerômetros para medir o deslocamento vertical, podendo ser montados no eixo ou na carroceria dos veículos. Pode-se citar como exemplos:

b.1 Automatic Road Analyser - (ARAN)

Um acelerômetro instalado no eixo do veículo, mede a irregularidade, profundidade de trilha de roda, inclinação longitudinal e defeitos de superfície (HAAS et al, 1994).

b.2 Portable Universal Roughness Device - (PURD)

Aparelho instalado em um reboque, mede a irregularidade através do acelerômetro instalado no eixo. Possui também computador acoplado. O qual processa os dados e calcula o índice de conforto, que varia de 1(um) a 10 (dez). Também pode medir a trilha de roda (HAAS et al, 1994).

b.3 Laser Road Surface Tester - (RST)

O aparelho mede a irregularidade através de um acelerômetro instalado na parte frontal de um veículo (chassi), trafega a 88 km/h, podendo medir também a trilha de roda, perfil longitudinal, perfil transversal, macroestrutura, largura e profundidade de trinca e distância percorrida.

Semelhante ao RST é o “Dynatest 5000 – Roughness and Distress Meter”, com velocidade de operação de 70 Km/h (ULLIDTZ, 1997; HAAS et al, 1994).

2.7 AVALIAÇÕES SUBJETIVAS DE PAVIMENTOS

Realizadas através de levantamentos visuais contínuos (LVC) de pavimentos, com levantamentos em nível de rede, estabelecendo a frequência dos defeitos e a condição de tráfego por segmentos homogêneos.

A norma DNIT 008/2003 – PRO – Levantamento Visual Contínuo para Avaliação da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos (DNIT, 2003-a), a qual consiste em quantificar a condição do pavimento através do Índice de Condição dos Pavimentos Flexíveis (ICPF), do Índice de Gravidade Global Expedito (IGGE) e do Índice do Estado de Superfície do Pavimento (IES), onde dois técnicos, em veículo com motorista a 40 km/h, em um único sentido em pista simples, e nos dois sentidos em pista dupla, com extensão de 1(um) a 6 (seis) quilômetros, preenchem ficha padrão, estabelecendo conceitos para a frequência dos defeitos, panelas e remendos conjuntamente, e demais defeitos em separado. Os valores avaliados são lançados em equações e tabelas, os quais fornecem os índices citados, e conseqüentemente a avaliação do segmento estudado.

A norma DNIT 009/2003 – PRO – Avaliação Subjetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos (DNIT, 2003-b), que substitui e cancela a norma DNER-PRO 007/94 – Avaliação Subjetiva da Superfície de Pavimentos (DNER, 1994-s), que é uma adaptação às condições brasileiras do Índice de Serventia Atual (ISA) ou Valor da Serventia Atual (VSA), desenvolvida pela Roads and Transportation Association of Canada (RTAC), durante o Ensaio Rodoviário AASHTO.

Esta norma, como citado acima, de avaliação subjetiva, estabelece procedimento na avaliação em relação ao conforto e suavidade do rolamento, durante o deslocamento sobre a superfície do pavimento.

O Valor da Serventia Atual (VSA) é obtido através da avaliação visual e conforto de rolamento, por um grupo de 5(cinco) membros devidamente qualificados e treinados, em 10 (dez) segmentos experimentais de aproximadamente 600 (seiscentos) metros, com o preenchimento de fichas padrão, durante o deslocamento de um veículo de produção nacional, de tamanho médio, tendo no máximo 3(três) avaliadores no mesmo carro, com velocidade próxima ao limite da via, os trechos devem ser seqüenciais e abranger variada qualidade de rolamento.

Os resultados, sempre que possível, devem ser comparados com os dados levantados por equipe maior, de dez a quinze membros, com experiência no assunto.

A avaliação deve ser realizada com boas condições climáticas, dando ênfase a defeitos como buracos, saliências e irregularidade transversal e longitudinal da superfície. Grandes depressões e recalques de aterros, por exemplo, devem ser ignorados. Também devem ser ignorados cruzamentos ferroviários, acesso a pontes e recalques de bueiros.

2.8 AVALIAÇÕES OBJETIVAS DE PAVIMENTOS

Consistem na quantificação e definição da freqüência de ocorrência de defeitos na superfície de pavimentos, como trincamentos, panelas, escorregamentos, exsudação, remendos, desgaste, profundidade de trilha de roda, etc, sendo no Brasil executadas pelas normas DNIT 006/2003 – PRO – Avaliação Objetiva de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos (DNIT, 2003-c), que substitui e cancela a norma PRO 008/94 – Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos (DNER, 1994-a) e também a norma DNIT 007/2003 PRO – Levantamento para Avaliação da Condição de Superfície de Subtrecho Homogêneo de Rodovias de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos para Gerência de Pavimentos e Estudos e Projetos (DNIT, 2003-d), que substitui a norma DNER-ES 128/83 – Levantamento das Condições de Superfície de Segmentos Testemunha de Rodovias de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos (DNER, 1983).

2.8.1 DNIT 006/2003 – PRO – Avaliação Objetiva de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos (DNIT, 2003-c)

A norma DNIT 006/2003 – PRO – Avaliação Objetiva de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos consiste na avaliação e quantificação de segmentos homogêneos através do Índice de Gravidade Global (IGG), que resulta das frequências absolutas e relativas dos defeitos existentes e do peso estabelecido a cada um pela norma.

Esta norma difere apenas da anterior, DNER PRO 008/79, na qualificação do estado do pavimento, conforme o demonstrado na tabela 2.2.

Esta metodologia permite não só uma análise das condições do pavimento à luz do IGG, como também uma interpretação detalhada do perfil das falhas ocorrentes em cada segmento homogêneo (PINTO e PREUSSLER, 2002).

TABELA 2.2 – Valores do IGG

DNER PRO 008/79		DNIT 006/2003 PRO	
CONCEITOS	LIMITES IGG	CONCEITOS	LIMITES IGG
Bom	0 - 20	Ótimo	0 - 20
Regular	20 - 80	Bom	20 - 40
Mau	80 - 150	Regular	40 - 80
Péssimo	150 - 500	Ruim	80 - 160
		Péssimo	160 - 500

2.8.2 DNIT 007/2003 PRO – Levantamento para Avaliação da Condição de Superfície de Subtrecho Homogêneo de Rodovias de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos para Gerência de Pavimentos e Estudos e Projetos (DNIT, 2003-d)

A norma DNIT 007/2003 PRO – Levantamento para Avaliação da Condição de Superfície de Subtrecho Homogêneo de Rodovias de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos para Gerência de Pavimentos e Estudos e Projetos consiste no levantamento dos defeitos e levantamento de trilhas de roda através de medidas com régua padrão das deformações permanentes ocasionadas pelo

tráfego, determinando os percentuais de área do pavimento atingidos por trincamento, desgaste, etc.

A inovação em relação a DNER ES 128/83 está no fato de definir procedimentos de levantamentos em nível de rede e para estudos e projetos.

2.9 FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

A fadiga é um fenômeno de trincamento induzido pela ação de cargas repetidas, onde as tensões e deformações delas decorrentes se encontram a um nível inferior ao da tensão ou da deformação correspondente à resistência de ruptura do material (YODER e WITCZAK, 1975).

A concepção de danos cumulativos de Miner (1945), tem sido largamente usada para prever a fadiga por trincamento. O número de repetições de carga estabelece a intensidade das tensões e deformações na base das camadas asfálticas (HUANG, 1993).

Assim, a vida de fadiga é o período compreendido entre a execução do pavimento e o momento que o mesmo necessite receber melhorias de recuperação da capacidade estrutural.

Em síntese os esforços oriundos do tráfego, provocam movimentos contínuos de compressão e alívio em toda a estrutura do pavimento, levando as camadas mais resilientes a trincamentos mais precoces por fadiga.

Nos pavimentos flexíveis os principais esforços gerados são deslocamento na superfície da camada de rolamento, tensões e deformações embaixo da camada de rolamento e esforço de tensão de compressão e deslocamento sobre o subleito (SUZUKI et al, 2001), esforços que são quantificados e utilizados para o dimensionamento de pavimentos novos, como também para restauração de pavimentos, através da determinação da vida de fadiga do pavimento proposto.

As formulações envolvendo tensões, deformações e vida de fadiga de pavimentos foram desenvolvidas através de pesquisas da área rodoviária, dentre as quais pode-se citar:

2.9.1 Revestimento

- Modelo Pinto e Preussler (DNER, 1994-h)

Para a determinação da deflexão máxima admissível no topo do revestimento foi utilizado o modelo:

$$\log D = 3,148 - 0,188 \times \log N_u \quad (9)$$

Onde: D é a deflexão máxima admissível

N_u é o número de repetições do eixo padrão de 8,2 toneladas da USACE

- Modelo da AASHTO (AASHTO, 1986)

Para a determinação da vida de fadiga para pavimentos flexíveis, em função da deformação máxima de tração embaixo do revestimento (ϵ_t) e do módulo de resiliência do revestimento (E_1), utilizou-se o modelo:

$$N_a = f_0 (4,325 \times 10^{-3} \times \epsilon_t^{-3,291} \times E_1^{-0,854}) \quad (10)$$

Sendo: N_a é a vida de fadiga em repetições do eixo padrão de 8,2 toneladas da AASHTO

f_0 é o fator laboratório/campo, cujo valor sugerido é 18,4.

- Modelo Salomão Pinto (PINTO e PREUSSLER, 2002)

Também para a determinação da vida de fadiga para pavimentos flexíveis, em função da deformação máxima de tração embaixo do revestimento (ϵ_t), utilizou-se o modelo:

$$N = 1,21 \times 10^{-8} \times (1/\epsilon_t)^{2,66} \times f_0 \quad (11)$$

Onde: N é a vida de fadiga em repetições do eixo padrão de 8,2 toneladas da USACE

f_0 é o fator laboratório/campo, cujo valor sugerido é 10^5

➤ Modelo da USACE (TRICHÊS, 2002-b)

Outro modelo para determinação da vida de fadiga para pavimentos flexíveis, em função das diferenças de tensões de tração e compressão embaixo do revestimento (σ_t e σ_c), usou-se:

$$N_u = 5,63 \times 10^5 \times (1/\Delta\sigma)^{2,61} \times f_0 \quad (12)$$

Onde: N_u é o número de repetições do eixo padrão de 8,2 toneladas da USACE

$\Delta\sigma$ é a diferença de tensões de tração e compressão = ($\sigma_t - \sigma_c$)

f_0 é o fator laboratório/campo, cujo valor sugerido é 10^4

➤ Asphalt Institute (WSDOT, 1995)

Para a determinação do número permitido de aplicações de carga na camada de asfalto em função da tensão de deformação horizontal na base da camada do revestimento (ϵ_t) e das características da mistura (módulo), utilizou-se o modelo:

$$\log N_f = 15,947 - 3,291 \times \log (\epsilon_t / 10^{-6}) - 0,854 \times \log (E_{ac} / 10^3) \quad (13)$$

Onde: N_f é a vida de fadiga em repetições do eixo padrão de 8,2 toneladas da AASHTO

E_{ac} é o módulo resiliente da camada de revestimento de asfalto

2.9.2 Subleito

➤ Asphalt Institute (WSDOT, 1995)

Para a determinação da vida de fadiga em função da deformação vertical máxima por compressão da camada do subleito (ϵ_v), utilizou-se o modelo:

$$N_f = 1,07 \times 10^{18} \times (10^{-6} / \epsilon_v)^{4,4843} \quad (14)$$

Onde: N_f é a vida de fadiga em repetições do eixo padrão de 8,2 toneladas da AASTHO

2.9.3 Bases Cimentadas

➤ Modelo de De Beer et al (Trichês, 1993)

Modelo obtido em campo a partir dos resultados com o “Heavy Vehicle Simulator” (HVS), para pavimentos com base cimentada, para determinação da vida de fadiga, em função da tensão de ruptura (σ_r) e da tensão máxima de tração (σ_t), ambas na face inferior da base cimentada, usou-se o modelo:

$$N = 10^{(7,19 - 0,899 \times SSR)} \quad (15)$$

Sendo: $SSR = \sigma_t / \sigma_r$ (16)

σ_r adotado em conformidade com o utilizado em projetos igual a 10,5 kgf/cm²

N é a vida de fadiga em repetições do eixo padrão de 8,2 toneladas da USACE

3 METODOLOGIA

3.1 ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

A metodologia empregada no presente estudo foi constituída das seguintes etapas:

ETAPA 1

Dados utilizados no estudo: obtidos antes das restaurações, basicamente os utilizados para a execução dos projetos de dimensionamento dos reforços, complementados com outros dados anteriores às restaurações, com dados de deflectometria. Os dados posteriores às restaurações constituíram-se em levantamentos de irregularidade longitudinal e deflectometria. Para o presente estudo foi adotada a mesma divisão por subtrechos homogêneos constantes nos projetos de restauração.

ETAPA 2

Ensaio: Foram realizados os seguintes ensaios em campo e laboratório:

→ Campo: foram executados ensaios “in situ”, densidade e umidade dos solos em quatro estações de sondagem de dois trechos escolhidos, um da região norte e outro da região sul.

→ Laboratório: foram executados ensaios de laboratório em nove estações de sondagem dos trechos escolhidos citados no item anterior.

Para os solos colhidos foram realizados os ensaios de densidade máxima seca, análise granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade, compactação, Índice Suporte Califórnia (ISC) e módulo de resiliência.

Foram realizados ensaios de módulo de resiliência do revestimento antigo e do reforço do pavimento, neste trabalho denominado revestimento novo.

Também foram realizados ensaios de extração de asfalto das camadas de revestimento, granulometria do agregado constituinte da massa asfáltica, ensaios de percentagem de betume, penetração, viscosidade e ponto de amolecimento anel e bola do ligante recuperado.

ETAPA 3

Estudos de Tráfego e Métodos de Dimensionamento:

→ Primeiramente procurou-se realizar uma análise do tráfego imposto aos pavimentos, mostrando que o mesmo vem aumentando com o passar dos anos, não só quantitativamente, e que os veículos atualmente em circulação, tem prejudicado em muito os pavimentos.

→ Verificação dos métodos de dimensionamento disponíveis, com os dados constantes nos próprios projetos, procurou-se realizar os dimensionamentos, seguindo a risca o preconizado nos referidos métodos.

ETAPA 4

Partindo-se para o objetivo principal proposto, que é avaliar a eficiência das intervenções de restaurações de pavimentos, realizou-se estudos, determinando através de programas computacionais, módulos de resiliência, tensões e deformações no parte inferior da camada de revestimento, na parte inferior de camadas cimentadas e no topo do subleito.

ETAPA 5

Aplicação dos valores obtidos na etapa anterior em equações de vida de fadiga, no sentido a verificar a vida remanescente.

ETAPA 6

Análise em relação a deflectometria e a irregularidade longitudinal, comparando os valores do antes e do depois das intervenções de reforço do pavimento.

ETAPA 7

Foram realizadas comparações com dados obtidos em laboratório e dados de outros estudos já realizados, no sentido a verificar a eficácia dos resultados obtidos pelos programas computacionais.

ETAPA 8

Análise dos resultados obtidos e as conclusões geradas.

A Figura 3.1 demonstra as diversas etapas da metodologia aplicada no presente estudo.

3.2 TRÁFEGO

Tem-se observado, que os veículos utilizados para transporte de cargas vem sofrendo aumento significativo do número e peso por eixo em sua composição, aumentando conseqüentemente os fatores de veículos e fatores de carga.

Isto devido ao aumento sistemático anual de nossa produção agrícola, animal e industrial, cuja tendência levou ao aumento da carga, visando maior lucro no transporte, e também ao aumento do número de veículos transportadores, diminuindo a vida útil dos pavimentos.

Tentou-se assim verificar o aumento destas composições e o reflexo no dimensionamento executado, assim procurou-se relacionar o tráfego dos diferentes segmentos, levando todos os dados para uma mesma base, com aplicação dos mesmos fatores de veículos, para assim obter-se o número de repetições equivalente do eixo padrão de 8,2 toneladas para todos.

Estabeleceu-se como base as categorias para cobrança de pedágio no Estado do Paraná, correlacionando-a com a classificação do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1986), atual Departamento Nacional de Infra-Estrutura Terrestre, conforme a Tabela 3.1.

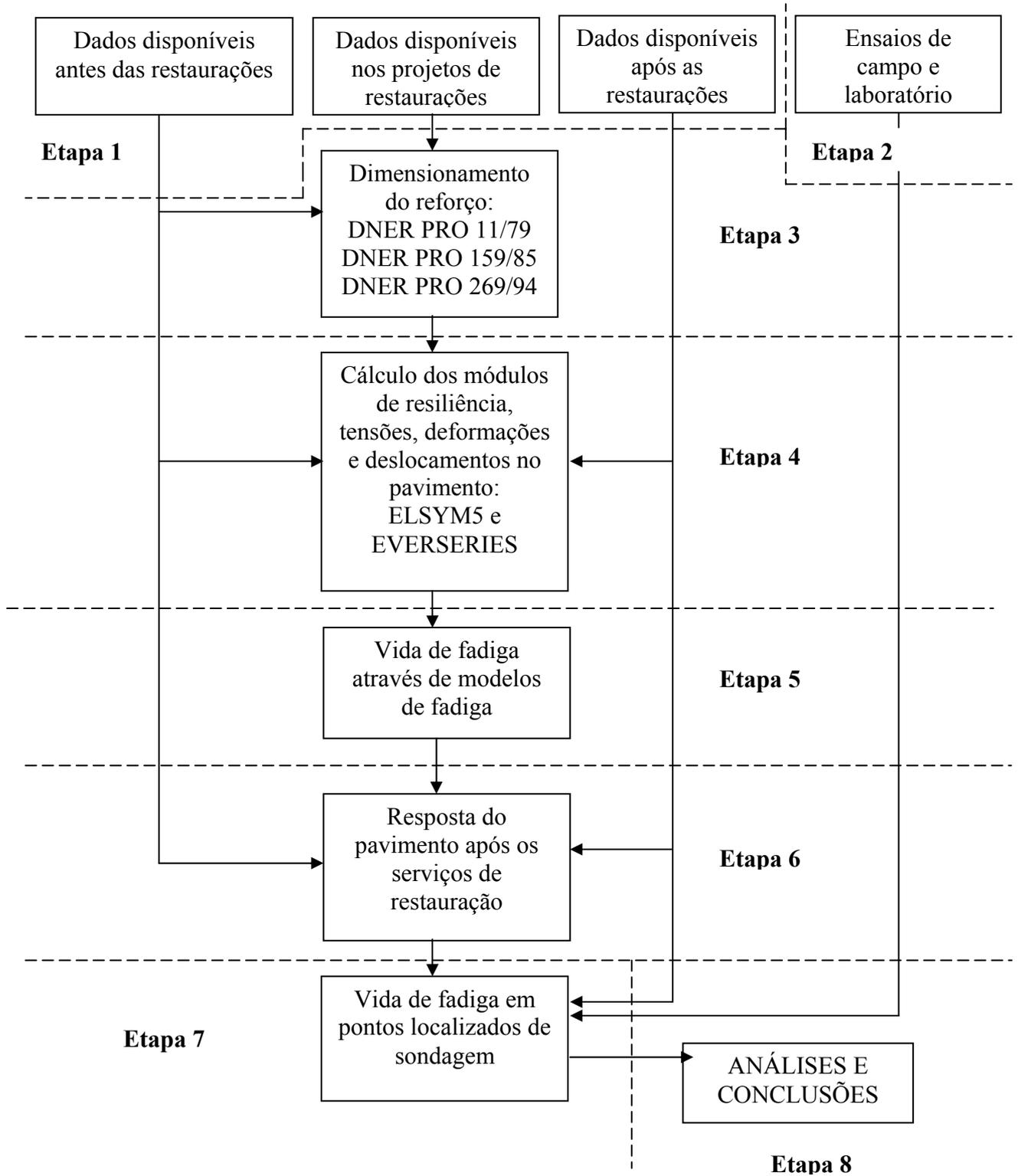


FIGURA 3.1 – Metodologia Aplicada no Desenvolvimento do Estudo

TABELA 3.1 - Enquadramento dos veículos em função do número de eixos.

CATEGORIA	TIPO DE VEÍCULO	NÚMERO DE EIXOS
2 + 2A	2C	2
4 + 4A	3C + 2S1	3
6	2S2	4
7	2S3 + 3S2 + 2C3	5
8	3S3	6

Utilizou-se os fatores de veículos do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1986), Tabela 3.2, assim dispostos:

- Trecho 01 Norte : Posto 909 – Mauá da Serra – Ortigueira;
- Trecho 02 Norte : Posto 909 – Mauá da Serra – Ortigueira;
- Trecho 03 Norte : Posto 912 – Ourinhos – Cambará;
- Trecho 04 Norte : Posto 912 – Ourinhos – Cambará;
- Trecho 01 Sul : Posto 901 – São Luiz do Purunã – Curitiba;
- Trecho 02 Sul : Posto 902 – Guarapuava – Relógio – Três Pinheiros;
- Trecho 03 Sul : Posto 902 – Guarapuava – Relógio – Três Pinheiros;
- Trecho 04 Sul : Posto 902 – Guarapuava – Relógio – Três Pinheiros.

TABELA 3.2 - Fatores de Veículos – DNER/DNIT (DNER, 1986)

FATORES DE VEÍCULOS – DNER/DNIT						
POSTO	Nº EIXOS	2	3	4	5	6
901	USACE	0,42	5,31	8,21	12,72	15,26
	AASHTO	0,29	1,01	2,54	3,11	2,35
902	USACE	0,57	5,81	9,88	12,42	15,71
	AASHTO	0,41	1,13	2,23	3,21	3,56
909	USACE	0,43	4,7	5,93	10,08	10,48
	AASHTO	0,32	0,94	1,97	2,63	2,25
912	USACE	0,43	2,22	2,48	4,53	7,68
	AASHTO	0,41	0,57	1,06	1,50	1,81

Adotou-se as Taxas de Crescimento calculadas constantes na Tabela 3.3, para o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER/PR, 2002):

- Trecho 01 Norte : Taxa Maringá – Marialva;
- Trecho 02 Norte : Taxa Apucarana;
- Trecho 03 Norte : Taxa Londrina;
- Trecho 04 Norte : Taxa Londrina;
- Trecho 01 Sul : Taxa Irati;
- Trecho 02 Sul : Taxa Guarapuava;
- Trecho 03 – Sul : Taxa Ponta Grossa;
- Trecho 04 – Sul : Taxa Guarapuava.

TABELA 3.3 - Taxas de Crescimento DER/PR (DER/PR, 2002)

TAXA DE CRESCIMENTO		
LOCAL	ÔNIBUS	CAMINHÕES
PONTA GROSSA	2,46	2,71
IRATI	1,50	3,91
LONDRINA	3,79	2,19
APUCARANA	2,31	2,59
GUARAPUAVA	2,47	3,21
MARINGÁ/MARIALVA	2,86	2,79

Com os dados obtidos pretende-se demonstrar a evolução do tráfego nos últimos anos, principalmente pelo aumento das composições transportadoras de cargas.

3.3 RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS

As análises dos projetos de restaurações de pavimentos foram realizadas através dos métodos DNER-PRO 011/79 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis (DNER, 1979-b), DNER-PRO 159/85 – Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos (DNER, 1985), e DNER-PRO 269/94 – Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis – TECNAPAV (DNER, 1994-h). Foram utilizados os dados constantes nos projetos de restauração, com o objetivo de verificar os critérios e margens de segurança adotadas por cada projetista.

3.4 CONVERSÃO DE DEFLEXÕES OBTIDAS COM O FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD) PARA VALORES EQUIVALENTES AOS DA VIGA BENKELMAN

No sentido a efetuar comparações do antes e o depois dos serviços de restauração de pavimento, no que se refere a deflectometria, tendo em vista que os levantamentos deflectométricos após as restaurações foram obtidos com o FWD e os dados de projeto são com viga Benkelman, tornou-se necessário à conversão dos valores de deflexões obtidos com o FWD para valores equivalentes da viga Benkelman.

Para tanto, pesquisou-se na bibliografia disponível, qual seria a fórmula a ser usada para as conversões, procurou-se primeiramente, por correlações estabelecidas com estruturas de pavimento, similares às estudadas nesta dissertação não tendo sido encontradas.

Assim sendo, optou-se pelo modelo constante do Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos (1998), com utilização para qualquer tipo de estrutura de pavimento para revestimentos em CAUQ, para deflexões menores que 85×10^{-2} mm:

$$D_B = 20,645 \times (D_{FWD} - 19)^{0.351} \quad (17)$$

Onde:

D_B é a deflexão com a viga Benkelman

D_{FWD} é a deflexão com o FWD

3.5 CORREÇÃO DAS DEFLEXÕES OBTIDAS COM O FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD) EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO PAVIMENTO

O Cimento Asfáltico de Petróleo é um material viscoso, que muda de comportamento com a variação da temperatura, e sendo ele o elemento da massa asfáltica que fornece a sua flexibilidade, é evidente que as variações térmicas causem também variações na massa asfáltica (MEDINA, 1997).

A rigidez do revestimento asfáltico depende da temperatura. As variações diárias e sazonais da temperatura causam variações da rigidez. Assim a deformabilidade maior ou menor do

pavimento é condicionada pelas variações da temperatura do ar e das condições meteorológicas de um modo em geral. É o asfalto um material negro de viscosidade variável com a temperatura (MEDINA, 2002). ULLIDTZ (1987), refere-se em função da temperatura: “A temperatura da camada de asfalto influenciará o módulo elástico do material, a deformação plástica e a vida de fadiga do asfalto, e a temperatura é, portanto, muito importante para a performance do pavimento”. Assim optou-se em ajustar as deflexões obtidas pela temperatura do pavimento, medidas durante a execução do ensaio.

A AASHTO, a WSDOT e MEDINA (2002) apontam que as deflexões medidas com o FWD e também com a viga Benkelman, devem ser ajustadas pela temperatura do pavimento colhida no momento do ensaio, pois com temperaturas maiores, a massa asfáltica encontra-se menos viscosa, gerando deflexões maiores.

Neste trabalho adotou-se o critério utilizado pela AASHTO (AASHTO, 1993-a), para bases granulares e bases cimentadas, utilizando-se os gráficos das Figuras 3.2 e 3.3.

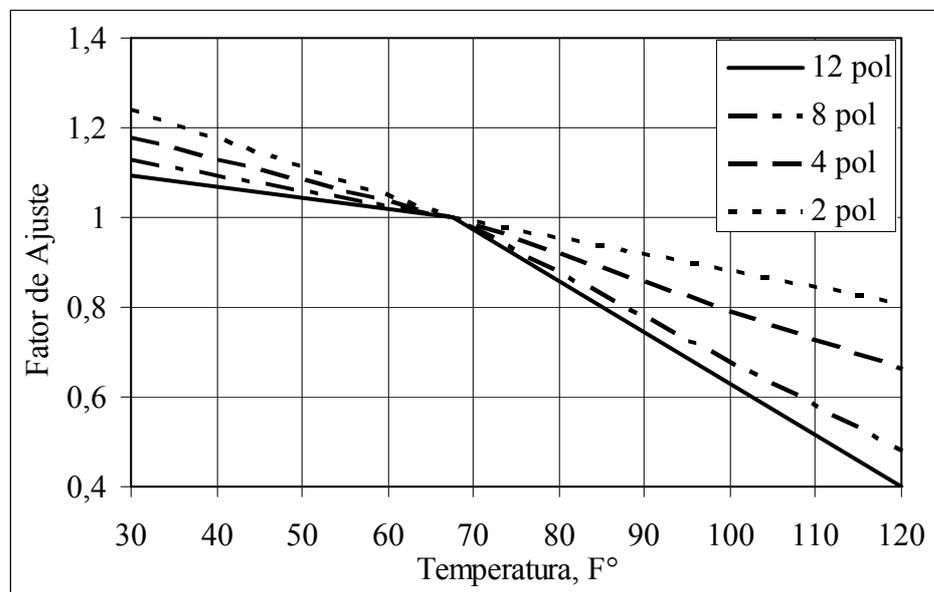


FIGURA 3.2 – Ajuste das deflexões pela temperatura para bases cimentadas
(Adaptação de AASHTO, 1993-a)

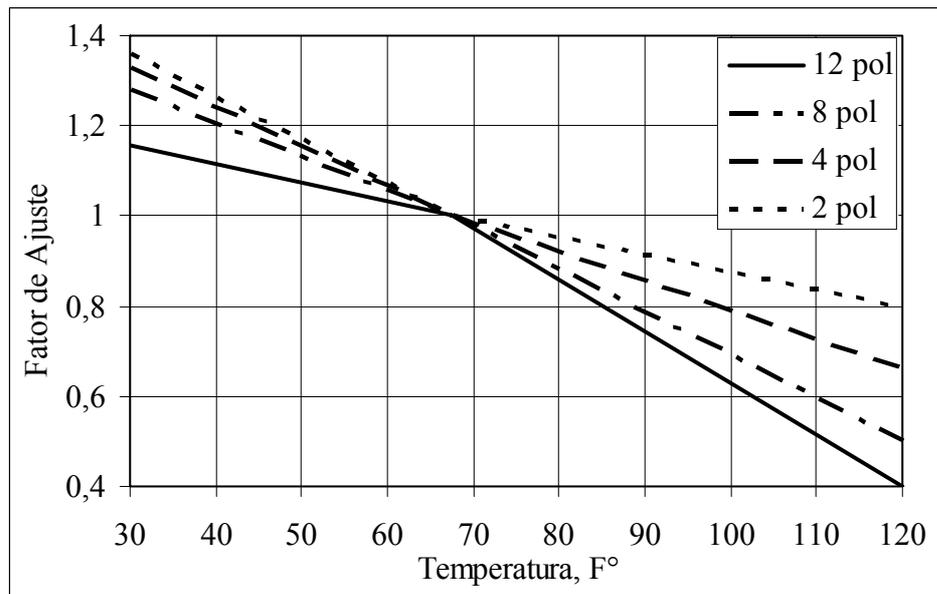


FIGURA 3.3 - Ajuste das deflexões pela temperatura para bases granulares
(Adaptação de AASHTO, 1993-a)

3.6 PROGRAMAS DE RETROANÁLISE

3.6.1 Programa ELSYM5 – Elastic Layered System

O procedimento para utilização do programa:

a) Levantamento das bacias de deformação antes e após a restauração em todos os trechos estudados.

b) Tratamento estatístico, conforme DNER PRO 10/79 (DNER, 1979-a), para obtenção das bacias de deformação médias de cada subtrecho homogêneo obtido com as estruturas dos pavimentos existentes. Foram determinadas bacias médias para as deflexões antes e após restauração, e também considerando-se os efeitos causados pela temperatura, sendo analisadas bacias de deformação com e sem correção de temperatura. As temperaturas foram corrigidas através dos gráficos de Fator de Ajustamento de Temperaturas para revestimentos asfálticos, para bases granulares e tratadas com cimento, obtidas junto ao Guia da AASHTO (AASHTO, 1993-a).

c) A alimentação do programa ELSYM5 foi baseada na literatura existente, notas de aula e projetos de dimensionamento de restauração, adotando-se os critérios:

c.1 - Carga: em apenas um rodado do eixo também, duplo, ficando o carregamento disposto em duas cargas de 2.050 quilos, aplicadas no eixo dos pneus, conforme figura 3.4.

c.2 - Pressão: imposta pelo pneu ao pavimento 5,7 kg/cm², sendo as coordenadas de aplicação P1=(0,0; 0,0) e P2=(32,0; 0,0).

c.3 - Pontos de estudo: no plano x - y, sobre o eixo x, com y=0 e para x=0, 10 e 16, ou seja, no pneu externo, na sua borda interna e no seu eixo, e no eixo central entre os dois pneus.

No plano Z (profundidade), definido em relação aos pontos críticos do pavimento, para pavimentos com bases granulares, sob o revestimento asfáltico e no topo do sub-leito, e para pavimentos com bases cimentadas incluiu-se também sob a base cimentada.

Para este estudo, adotou-se, conforme utilizado por técnicos da área, as seguintes margens de aceitação, para a bacia de deformação:

→ D0 e D1 = mais ou menos 10%

→ D2 e D3 = mais ou menos 30%

→ D4, D5 e D6 = mais ou menos 50%

Foram também quantificados os erros acumulados entre as diferenças das bacias de deformações retroanalisadas e as obtidas em campo, através de levantamentos deflectométricos, RMS (Root Mean Square) ou RMSE (Root Mean Square Error), (WSDOT, 1995), que é a raiz quadrada das somas dos quadrados das diferenças entre as deformadas calculadas e medidas (PINTO e PREUSSLER, 2002), expressa por:

$$\text{RMS ERROR} = [1/n \cdot \sum(100 \cdot (d_c - d_m) / 2)^2]^{1/2} \quad (18)$$

Onde:

d_c é a deformada de campo

d_m é a deformada por retroanálise

n é o número de sensores do FWD

Após ajustadas as bacias de deformação pelo ELSYM5, em relação às bacias levantadas em campo, através de um processo de tentativas, com a variação dos módulos das camadas do

pavimento, estes módulos são adotados como os módulos obtidos por retroanálise, e também são obtidas tensões, deformações e deslocamentos nos pontos críticos pré-definidos.

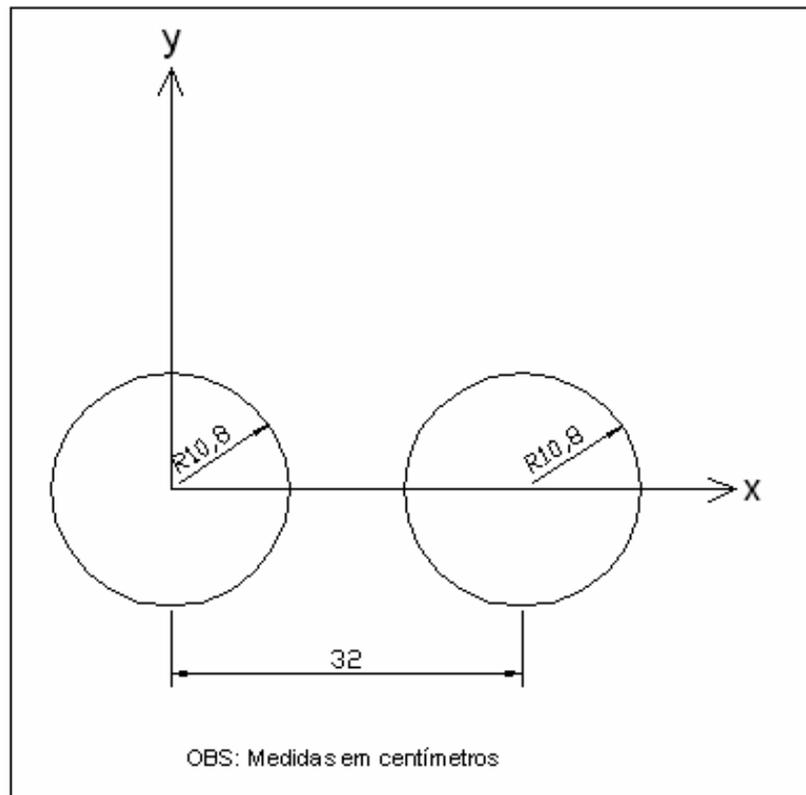


FIGURA 3.4.- Aplicação de cargas – ELSYM5

3.6.2 – Programa EVERCALC – Pavement Backcalculation

Procedimentos para utilização do programa:

a) Levantamento das bacias de deformação antes e após a restauração em todos os trechos estudados (mesmos dados utilizados no ELSYM5).

b) Tratamento estatístico, conforme DNER PRO 10/79 (DNER, 1979-a), para obtenção das bacias de deformação médias de cada subtrecho homogêneo obtido com as estruturas dos pavimentos existentes. Foram determinadas bacias médias para as deflexões antes e após restauração, similar ao ELSYM5. Também levadas em conta às correções de temperatura, pelo mesmo critério adotado para o ELSYM5.

c) A alimentação do programa EVERCALC foi idêntica à utilizada no programa ELSYM5, com exceção no carregamento, adotando-se os critérios:

c.1 - Carga: apenas uma carga de 4.100 quilos, conforme Figura 3.5, seguindo as orientações do manual técnico.

A retroanálise é baseada no levantamento com o FWD, o qual mede as reações no pavimento provenientes da queda de um peso pré determinado.

c.2 - Pressão: imposta pelo pneu ao pavimento 5,7 kg/cm².

c.3 - Pontos de estudo: no plano x - y, sobre o eixo x.

Pelo programa EVERCALC foram calculados apenas os módulos de resiliência das camadas constituintes do pavimento. Para este estudo, adotou-se, conforme utilizado por técnicos da área as seguintes margens de aceitação para a bacia de deformação, as mesmas do ELSYM5:

→ Do e D1 = mais ou menos 10%

→ D2 e D3 = mais ou menos 30%

→ D4, D5 e D6 = mais ou menos 50%

Foram também quantificados os erros acumulados RMS.

O EVERCALC calcula os módulos através de processo iterativo, onde o operador pode definir a quantidade máxima de iterações, que neste caso foram adotadas 10(dez) iterações, conforme sugere o método.

3.7 PROGRAMA EVERSTRESS – LAYERED ELASTIC ANALYSIS

De posse dos módulos obtidos através do EVERCALC foi alimentado o programa EVERSTRESS, cuja inserção é simples, seguindo os seguintes procedimentos:

- a) Módulos de resiliência obtidos pelo EVERCALC.
- b) Espessuras das camadas do pavimento.
- c) Coeficiente de Poisson das camadas do pavimento.

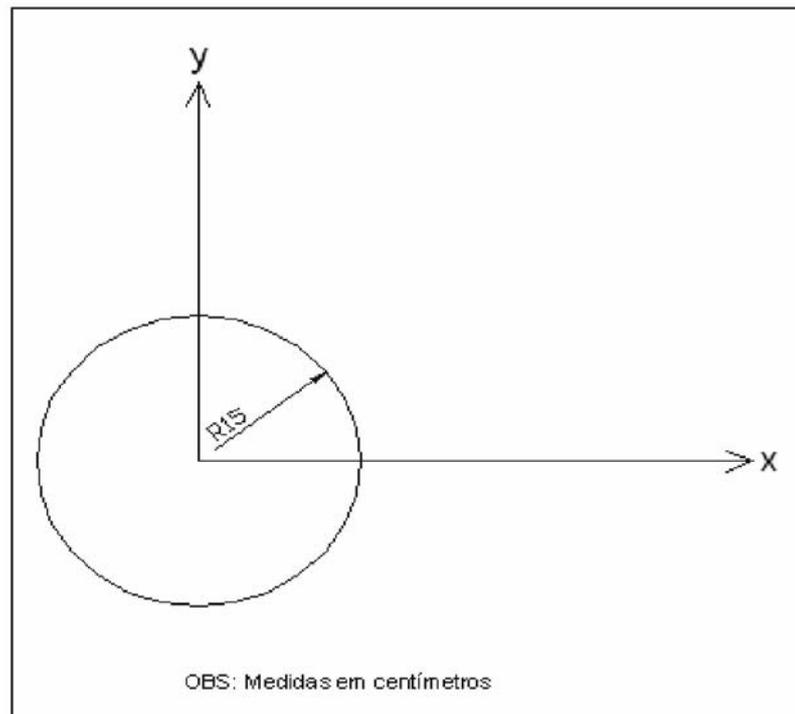


FIGURA 3.5.- Aplicação de cargas - EVERCALC

- d) Carga aplicada, que neste caso foi de 4.100 kg, conforme a Figura 3.5.
- e) Raio de aplicação de carga, ou área do prato do FWD, que a usual é 15,0 cm.
- f) Pontos em que se deseja obter os dados, em coordenadas tri-dimensionais (x, y e z).

3.8 VIDA DE FADIGA

A idéia principal do presente estudo é verificar se as intervenções de restauração estão atendendo ao seu fim, ou seja, se a vida proposta no projeto realmente seria atingida. Assim sendo utilizou-se o critério mecanístico para a determinação da vida remanescente, seguindo-se o seguinte procedimento:

- a) Determinação das tensões, deformações e deslocamentos, nos pontos críticos de análise para revestimentos asfálticos, através das bacias de deformação obtidas após as restaurações.

b) Através de modelos de vida de fadiga, determinar a quantidade de repetições do eixo padrão de 8,2 toneladas que os pavimentos tem capacidade de suportar.

c) Verificação do número de repetições do eixo padrão de 8,2 toneladas que os pavimentos já foram solicitados após a restauração.

d) Somando-se os resultados dos itens b e c, comparou-se com a vida útil apontada e de projeto, concluindo-se pelo atendimento ou não do pretendido.

Estes procedimentos foram realizados através dos dados obtidos com os programas computacionais ELSYM5 e EVERCALC, cujos resultados serão analisados no Capítulo 5.

Para o programa ELSYM5 foram utilizados os modelos de vida de fadiga referentes às equações 9, 10, 11, 12 e 15 e para o programa EVERCALC foram utilizadas as equações 13 e 14, constantes no Capítulo 2.

3.9 RESPOSTA DO PAVIMENTO APÓS A RESTAURAÇÃO

Concluídos os serviços de restauração dos pavimentos, realizou-se estudo no sentido a verificar se os comportamentos estrutural e funcional estavam atendendo as expectativas de projeto.

Para tanto, com a utilização de equações de previsões de comportamento, colhidas junto ao DNER PRO 159/85 (DNER, 1985), foram realizados estudos comparativos em relação a deflectometria e irregularidade longitudinal.

3.9.1 Deflexões Apresentadas Após a Restauração

Utilizou-se a equação (DNER, 1985):

$$B_d = B_a (1 - 0,0687 H^{0,415}) \quad (18)$$

Onde:

B_d é a deflexão esperada do pavimento após a restauração

B_a é a deflexão do pavimento anterior à restauração em análise

H é a espessura do reforço executado.

O método DNER PRO 159/85 (DNER, 1985) foi concebido para deflexões levantadas com a Viga Benkelman . Para realização da análise da resposta do pavimento, pelo presente critério adotado, se faz necessário à conversão dos dados deflectométricos levantados com o FWD, para deflexões para a Viga Benkelman, tendo sido adotada a equação constante no Manual de Reabilitação do DNER (DNER, 1998).

Os dados deflectométricos a serem analisados, colhidos antes e após as intervenções de restauração, foram levantados com o FWD.

Os resultados serão apresentados no Capítulo 5 – Previsão da Deflectometria, e podem ser melhores visualizados nos gráficos constantes no capítulo acima referido.

A depuração dos dados foi realizada através do critério constante no método DNER PRO 10/79 (DNER, 1979-a), cujos limites de aceitação dos valores da amostra são determinados pelo intervalo $dm = z \pm \sigma$, onde dm é a média dos valores da amostra, σ é o desvio padrão da amostra e z é o valor tabelado de acordo com o número de elementos da amostra, conforme demonstrado na Tabela 3.4.

TABELA 3.4 – Valores de z

n	z
3	1,0
4	1,5
5 - 6	2,0
7 - 19	2,5
≥ 20	3,0

Os dados deflectométricos do antes e depois da restauração foram analisados em função do Coeficiente de Variação (CV), que estatisticamente define a confiabilidade de uma amostra quando o CV é inferior a 25%, mas neste caso o CV identifica a heterogeneidade da deflectometria por segmento homogêneo, e numa análise do CV do antes e o depois das

intervenções de restauração podem identificar a eficiência dos serviços de restauração e também a variação que pode ocorrer para pontos localizados.

Assim sendo, em segmentos com CV inferior a 25%, pode-se dizer que o segmento é heterogêneo em relação a deflectometria.

3.9.2 Irregularidades Longitudinais Apresentadas Após a Restauração

Utilizou-se a equação (DNER, 1985):

$$Q_d = 19 + \left\{ (Q_a - 19) / (0,602 H + 1) \right\} \quad (19)$$

Onde:

Q_d é a irregularidade longitudinal esperada depois da restauração

Q_a é a irregularidade longitudinal antes da restauração

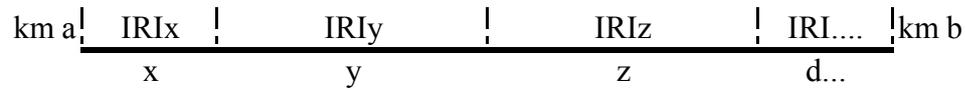
H é a espessura do reforço executado, em centímetros

O valor máximo permitido para a irregularidade longitudinal (IRI), adotado neste estudo, é o mesmo admitido no Programa de Exploração (PER) do DER/PR, para as concessões rodoviárias, o qual condiciona o limite máximo à condição funcional dos trechos estudados, que é de 2,5 m/km (dois vírgula cinco metros por quilômetro).

Os valores das irregularidades longitudinais medidas antes das restaurações, foram retiradas dos próprios projetos, utilizando-se as irregularidades dos segmentos homogêneos.

Os valores das irregularidades longitudinais após as restaurações foram calculadas a partir de levantamento realizado em abril de 2003 (DER/PR, 2003), em um único sentido de tráfego, em todas as rodovias concessionadas no Estado do Paraná, determinando-se valores para intervalos de 200 m (duzentos metros).

Os valores das irregularidades longitudinais para os segmentos homogêneos deste estudo, foram determinados através médias ponderadas, da seguinte forma:



$$IRI = \frac{(x \cdot IRI_x + y \cdot IRI_y + z \cdot IRI_z + IRI_{...} \cdot D...)}{km\ b - km\ a} \quad (20)$$

Sendo:

IRI em metro por quilômetro

km b – km a em metros

3.10 ANÁLISE DOS TRECHOS 02 NORTE E 03 SUL

No trecho 02 Norte do km 218,400 ao 220,200 e do segmento 03 Sul do km 193,700 ao 195,650 foram realizados ensaios, conforme os procedimentos apontados a seguir:

Posicionamento das sondagens:

Trecho 02 Norte

- Sondagem 01 – km 218,400 – lado direito – sondagem profunda
- Sondagem 02 – km 218,600 – lado direito
- Sondagem 03 – km 219,000 – lado esquerdo
- Sondagem 04 – km 219,200 – lado esquerdo – sondagem profunda
- Sondagem 05 – km 219,400 – lado esquerdo
- Sondagem 06 – km 219,600 – lado esquerdo – sondagem profunda
- Sondagem 07 – km 219,800 – lado esquerdo
- Sondagem 08 – km 220,000 – lado esquerdo
- Sondagem 08 – km 220,200 – lado esquerdo – sondagem profunda

A seqüência pelo lado esquerdo foi devido a melhor representatividade do pavimento antigo, pois observadas as planilhas de serviços de remoção de pavimento, durante as intervenções de

restauração, verificou-se que nesta faixa não ocorreram remoções totais da capa original, cuja coleta de materiais eram imprescindíveis ao desenvolvimento deste estudo.

Trecho 03 Sul

- Sondagem 01 – km 193,725 – lado direito – sondagem profunda
- Sondagem 02 – km 194,025 – lado esquerdo
- Sondagem 03 – km 194,325 – lado esquerdo – sondagem profunda
- Sondagem 04 – km 194,625 – lado direito – sondagem profunda
- Sondagem 05 – km 194,685 – lado direito
- Sondagem 06 – km 195,050 – lado esquerdo
- Sondagem 07 – km 195,265 – lado direito
- Sondagem 08 – km 195,465 – lado esquerdo – sondagem profunda
- Sondagem 09 – km 195,645 – lado direito

3.10.1 Coleta de Amostras e Ensaios de Laboratório e Campo

a) Coleta de Amostras

Foram coletadas amostras do revestimento novo e do revestimento antigo através de sonda rotativa em todos os pontos citados acima.

Foram coletadas amostras do revestimento novo e do revestimento antigo através de “janelas”, com dimensões de 0,50 x 0,50m, em quatro pontos denominados de sondagem profunda. Nestes pontos também foram coletadas amostras dos solos.

b) Ensaios de Campo

Foram realizados ensaios “in situ” para a determinação da umidade de campo e densidade.

c) Ensaio de Laboratório

Com as amostras extraídas com sonda rotativa, para o pavimento novo e o antigo, foram realizados ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral.

Com as amostras do revestimento novo e antigo, colhidas através de sondagem profunda, foram realizados ensaios de caracterização do ligante asfáltico. O ligante da mistura foi recuperado através do Método de Abson, procedimento normalizado pela AASHTO T 170-93 (AASHTO, 1993-b) e ASTM D 1856-95^a (ASTM, 1995), cujas amostras de massa asfáltica são deixadas a temperatura ambiente para resfriamento, e após colocadas em uma bandeja e levadas a estufa por três horas, a uma temperatura de 135 °C para homogeneização e extração com o solvente tricloroetileno. Após a extração a massa asfáltica, juntamente com o tricloroetileno, são submetidos ao Método de Abson, que basicamente consiste no emprego de um equipamento padrão do método, cuja amostra recuperada é aquecida à temperatura controlada e simultaneamente injetado CO₂, a uma vazão também controlada, para facilitar o arraste do solvente, até a separação do ligante.

Foram realizados os ensaios de composição granulométrica dos agregados da mistura.

Ensaio de viscosidade, penetração e ponto de amolecimento anel e bola para o CAP extraído.

Com as amostras do subleito foram executados ensaios de granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, compactação, Índice Suporte Califórnia e ensaio de comportamento resiliente.

3.10.2 Análise Mecânica e Retroanálise

A análise mecânica e a retroanálise foram efetuadas através dos programas:

- a) Programa ELSYM5 para o cálculo dos módulos de resiliência, tensões e deformações.
- b) Programa EVERSERIES utilizando dois subprogramas:
 - Programa EVERCALC para a determinação dos módulos de resiliência.
 - Programa EVERSTRESS para a determinação das tensões e deformações.

As análises efetuadas obedeceram aos seguintes critérios:

- a) As bacias de deformações utilizadas foram as bacias individuais, pontuais, levantadas por FWD, no mesmo posicionamento dos furos de sondagens executados.
- b) A retroanálise foi efetuada mantendo-se constantes os módulos obtidos em laboratório e determinando os módulos das demais camadas da estrutura do pavimento.
- c) Foram calculados as tensões, as deformações e os deslocamentos, com os programas computacionais ELSYM5 e EVERSTRESS.
- d) Foram calculadas as vidas de fadiga, utilizando os modelos mencionados na revisão bibliográfica..
- e) Foram executadas retroanálises, pelo programa computacional EVERCALC, considerando o revestimento novo e o antigo, trabalhando interligados, através do programa EVERSTRESS calculadas as tensões e deformações e com a utilização de modelos de fadiga, estimadas as vidas remanescentes.

Foram também quantificados os erros acumulados entre as diferenças das bacias de deformações retroanalisadas e as obtidas em campo, através de levantamentos deflectométricos, RMS (Root Mean Square) ou RMSE (Root Mean Square Error), (WSDOT, 1995), que é a raiz quadrada das somas dos quadrados das diferenças entre as deformadas calculadas e medidas (PINTO e PREUSSLER, 2002), expressa por:

$$\text{RMS ERROR} = [1/n \cdot \sum(100 \cdot (d_c - d_m) / 2)^2]^{1/2} \quad (21)$$

Onde:

d_c é a deformada de campo

d_m é a deformada por retroanálise

n é o número de sensores do FWD

Após ajustadas as bacias de deformação pelo Programa ELSYM5, em relação às bacias levantadas em campo, através de um processo de tentativas, com a variação dos módulos das camadas do pavimento, estes módulos são adotados como os módulos obtidos por retroanálise, e também são obtidas tensões, deformações e deslocamentos nos pontos críticos pré-definidos. Foram também quantificados os erros acumulados entre as diferenças das bacias de deformações retroanalisadas e as obtidas em campo, através de levantamentos deflectométricos, RMS (Root

Mean Square) ou RMSE (Root Mean Square Error), (WSDOT, 1995), que é a raiz quadrada das somas dos quadrados das diferenças entre as deformadas calculadas e medidas (PINTO e PREUSSLER, 2002), expressa por:

$$\text{RMS}_{\text{ERROR}} = [1/n \cdot \sum(100 \cdot (d_c - d_m) / 2)^2]^{1/2} \quad (22)$$

Onde:

d_c é a deformada de campo

d_m é a deformada por retroanálise

n é o número de sensores do FWD

Após ajustadas as bacias de deformação pelo Programa ELSYM5, em relação às bacias levantadas em campo, através de um processo de tentativas, com a variação dos módulos das camadas do pavimento, estes módulos são adotados como os módulos obtidos por retroanálise, e também são obtidas tensões, deformações e deslocamentos nos pontos críticos pré-definidos.

CAPÍTULO 4 DADOS UTILIZADOS NO ESTUDO

Visando proporcionar uma fácil visualização dos dados utilizados no presente trabalho, os mesmos foram inseridos em quadro demonstrativo, divididos pelos trechos estudados e apresentados na seguinte forma:

TRECHO – Especifica o trecho, com a nomenclatura utilizada no presente trabalho, denominados de 01 a 04 Norte, e de 01 a 04 Sul.

RODOVIA – Apresenta a rodovia a que pertence o trecho e os pontos característicos que conecta, como cidades ou interseções, e as quilometragens oficiais do DNIT ou DER/PR.

PERÍODO DE RESTAURAÇÃO – Aponta o período em que as intervenções de restauração foram realizadas.

4.1 DADOS DOS PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS

Dados colhidos especificamente dos projetos de restaurações, utilizados para os seus dimensionamentos:

a) **TRÁFEGO** – Apresentando o período, local e tipo de contagem, a taxa de crescimento utilizada na determinação do tráfego futuro e a fonte dos fatores de veículos. O tráfego em todos os projetos foram calculados pelos critérios da AASHTO e USACE.

b) **LEVANTAMENTOS DE SUPERFÍCIE** – Especificando os levantamentos de superfície, normalizados pelo DNIT, que foram utilizados, vigentes na época, DNER PRO 08/94 (DNER, 1994-a) e DNER ES 128/83 (DNER, 1983).

c) AVALIAÇÃO FUNCIONAL – Levantamentos de irregularidade longitudinal, apontando a data da realização dos ensaios e o tipo de aparelho utilizado.

d) AVALIAÇÃO ESTRUTURAL – Refere-se a levantamentos de deflectometria realizados, com data e tipo de equipamento utilizado e também de ensaios destrutivos, com as quantidades de furos de sondagens executados e os ensaios de laboratório realizados.

4.2 OUTROS ENSAIOS ANTERIORES À RESTAURAÇÃO

Com o objetivo de completar os dados necessários, para a realização da correlação do antes e o depois das intervenções de restauração, foram pesquisados dados de levantamentos deflectométricos com o aparelho FWD.

4.3 DADOS POSTERIORES À RESTAURAÇÃO

Conforme o discorrido no item anterior, foram pesquisados dados de irregularidade longitudinal e de deflectometria com o aparelho FWD, para realização da correlação do antes e depois das intervenções de restauração.

Foram executados ensaios “in situ”, densidade e umidade dos solos, e de laboratório em nove estações de sondagem de dois trechos escolhidos, um da região norte e outro da região sul.

No Laboratório Central do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná foram ensaiados os solos colhidos, com ensaios de densidade máxima seca, análise granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade, compactação e Índice Suporte Califórnia (ISC).

Os ensaios de módulo de resiliência dos solos e módulo de resiliência do revestimento antigo e reforço, neste trabalho denominado revestimento novo, foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Também foram realizados ensaios de extração de asfalto das camadas de revestimento, granulometria do agregado constituinte da massa asfáltica, ensaios de percentagem de betume, penetração, viscosidade e ponto de amolecimento anel e bola do ligante recuperado, no laboratório da Greca Asfaltos S.A.

Os dados obtidos estão relacionados nos quadros de 4.1 a 4.8.

4.4 ESTRUTURA DOS PAVIMENTOS

Com os dados obtidos dos ensaios de sondagem 'in loco', levantamentos deflectométricos e de irregularidade longitudinal, traçou-se o perfil longitudinal dos trechos estudados, estando demonstrado nas figuras 4.1 a 4.8.

4.5 LOCALIZAÇÃO DOS TRECHOS ESTUDADOS

Os trechos estudados podem ser visualizados nas Figuras 4.9 e 4.10, mostrando suas localizações na Região Norte e Região Sul, respectivamente, do Estado do Paraná.

TRECHO:	01 Norte																										
RODOVIA:	BR-376	TRECHO:	Paranavá - Nova Esperança																								
LOCALIZAÇÃO:	DO KM:	107,000	AO KM: 115,500																								
PERÍODO DA RESTAURAÇÃO:	DE:	fev/01	A: nov/01																								
1) DADOS DOS PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS																											
a) TRÁFEGO																											
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">CONTAGEM</td> <td colspan="2">Local</td> </tr> <tr> <td>Início</td> <td>Término</td> <td>Tipo</td> <td>Km</td> </tr> <tr> <td>8/1/2001</td> <td>14/1/2001</td> <td>Contagem automatizada</td> <td>110,940</td> </tr> <tr> <td colspan="3">TAXA DE CRESCIMENTO</td> <td>3%</td> </tr> <tr> <td colspan="2">FATORES DE VEÍCULOS</td> <td colspan="2">Fonte</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Balanças Peabiru e Nova Esperança</td> </tr> </table>				CONTAGEM		Local		Início	Término	Tipo	Km	8/1/2001	14/1/2001	Contagem automatizada	110,940	TAXA DE CRESCIMENTO			3%	FATORES DE VEÍCULOS		Fonte				Balanças Peabiru e Nova Esperança	
CONTAGEM		Local																									
Início	Término	Tipo	Km																								
8/1/2001	14/1/2001	Contagem automatizada	110,940																								
TAXA DE CRESCIMENTO			3%																								
FATORES DE VEÍCULOS		Fonte																									
		Balanças Peabiru e Nova Esperança																									
b) LEVANTAMENTOS DE SUPERFÍCIE																											
DNER PRO 08/94		DNER ES 128/83																									
Data:	jan/01	Data:	jan/01																								
c) AVALIAÇÃO FUNCIONAL - IRREGULARIDADE LONGITUDINAL																											
DATA		TIPO DE APARELHO																									
nov/97		Bump Integrator																									
jul/98		Bump Integrator																									
d) AVALIAÇÃO ESTRUTURAL																											
Ensaios não destrutivos	Viga Benkelman	Falling Weight Deflectometer																									
Data / Aparelho	jan/01	KUAB - mar/00 e jan/01																									
Ensaios destrutivos	Nº de furos	ISC	Caracterização																								
	10	sim	sim																								
2) OUTROS DADOS ANTERIORES À RESTAURAÇÃO																											
Falling Weight Deflectometer		abr/00																									
3) DADOS POSTERIORES À RESTAURAÇÃO																											
Irregularidade longitudinal		abr/03																									
Falling Weight Deflectometer		nov/01																									
Módulos de resiliência em laboratório		não																									
Ensaios de solo em laboratório		não																									

QUADRO 4.1 - Tipos de dados coletados no Trecho 01 Norte

TRECHO:	02 Norte			
RODOVIA:	BR-376	TRECHO:	Mandaguari - Jandaia do Sul	
LOCALIZAÇÃO:	DO KM:	209,000	AO KM:	220,500
PERÍODO DA RESTAURAÇÃO:	DE:	jan/01	A:	set/01
1) DADOS DOS PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS				
a) TRÁFEGO				
CONTAGEM		Local		
Início	Término	Tipo	Km	Sentidos
10/11/2001	16/11/2001	Contagem automatizada	210,000	2
TAXA DE CRESCIMENTO				3%
FATORES DE VEÍCULOS		Fonte		
		Balanças Peabiru e Nova Esperança		
b) LEVANTAMENTOS DE SUPERFÍCIE				
DNER PRO 08/94		DNER ES 128/83		
Data:	nov/01	Data:	out/98	
c) AVALIAÇÃO FUNCIONAL - IRREGULARIDADE LONGITUDINAL				
DATA		TIPO DE APARELHO		
nov/97		Bump Integrator		
jul/98		Bump Integrator		
d) AVALIAÇÃO ESTRUTURAL				
Ensaio não destrutivo	Viga Benkelman		Falling Weight Deflectometer	
Data / Aparelho	nov/00		KUAB - mar/00 e DYNATEST 07/98	
Ensaio destrutivo	Nº de furos	ISC	Caracterização	
	9	sim	sim	
2) OUTROS DADOS ANTERIORES À RESTAURAÇÃO				
Falling Weight Deflectometer		abr/00		
3) DADOS POSTERIORES À RESTAURAÇÃO				
Irregularidade longitudinal		abr/03		
Falling Weight Deflectometer		out/01		
Módulos de resiliência em laboratório		sim		
Ensaio de solo em laboratório		sim		

QUADRO 4.2 - Tipos de dados coletados no Trecho 02 Norte

TRECHO:	03 Norte																																	
RODOVIA:	PR-323	TRECHO:	Warta - Porto Charles Nauffall																															
LOCALIZAÇÃO:	DO KM:	20,740	AO KM:	26,175																														
	DO KM:	31,000	AO KM:	39,175																														
PERÍODO DA RESTAURAÇÃO:	DE:	mai/01	DE:	nov/01																														
1) DADOS DOS PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS																																		
a) TRÁFEGO																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">CONTAGEM</th> <th colspan="3">Local</th> </tr> <tr> <th>Início</th> <th>Término</th> <th>Tipo</th> <th>Km</th> <th>Sentidos</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1/4/1999</td> <td>1/3/2000</td> <td>Praça de Pedágio - Sertaneja</td> <td>3,600</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td colspan="4">TAXA DE CRESCIMENTO</td> <td>2,4%</td> </tr> <tr> <td colspan="2">FATORES DE VEÍCULOS</td> <td colspan="3">Fonte</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="3">Balanças de Cambará</td> </tr> </tbody> </table>					CONTAGEM		Local			Início	Término	Tipo	Km	Sentidos	1/4/1999	1/3/2000	Praça de Pedágio - Sertaneja	3,600	2	TAXA DE CRESCIMENTO				2,4%	FATORES DE VEÍCULOS		Fonte					Balanças de Cambará		
CONTAGEM		Local																																
Início	Término	Tipo	Km	Sentidos																														
1/4/1999	1/3/2000	Praça de Pedágio - Sertaneja	3,600	2																														
TAXA DE CRESCIMENTO				2,4%																														
FATORES DE VEÍCULOS		Fonte																																
		Balanças de Cambará																																
b) LEVANTAMENTOS DE SUPERFÍCIE																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">DNER PRO 08/94</th> <th colspan="2">DNER ES 128/83</th> </tr> <tr> <th>Data:</th> <th>nov/01</th> <th>Data:</th> <th>nov/00</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					DNER PRO 08/94		DNER ES 128/83		Data:	nov/01	Data:	nov/00																						
DNER PRO 08/94		DNER ES 128/83																																
Data:	nov/01	Data:	nov/00																															
c) AVALIAÇÃO FUNCIONAL - IRREGULARIDADE LONGITUDINAL																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>DATA</th> <th>TIPO DE APARELHO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>mai/00</td> <td>Bump Integrator</td> </tr> <tr> <td>xxx</td> <td>xxxxx</td> </tr> </tbody> </table>					DATA	TIPO DE APARELHO	mai/00	Bump Integrator	xxx	xxxxx																								
DATA	TIPO DE APARELHO																																	
mai/00	Bump Integrator																																	
xxx	xxxxx																																	
d) AVALIAÇÃO ESTRUTURAL																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ensaio não destrutivo</th> <th>Viga Benkelman</th> <th>Falling Weight Deflectometer</th> </tr> <tr> <th>Data / Aparelho</th> <th>jul/01</th> <th>DYNATEST 05/00</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Ensaio não destrutivo	Viga Benkelman	Falling Weight Deflectometer	Data / Aparelho	jul/01	DYNATEST 05/00																								
Ensaio não destrutivo	Viga Benkelman	Falling Weight Deflectometer																																
Data / Aparelho	jul/01	DYNATEST 05/00																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Ensaio destrutivo</th> <th>Nº de furos</th> <th>ISC</th> <th>Caracterização</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11</td> <td>sim</td> <td>sim</td> </tr> </tbody> </table>					Ensaio destrutivo	Nº de furos	ISC	Caracterização	11	sim	sim																							
Ensaio destrutivo	Nº de furos	ISC	Caracterização																															
	11	sim	sim																															
2) OUTROS DADOS ANTERIORES À RESTAURAÇÃO																																		
3) DADOS POSTERIORES À RESTAURAÇÃO																																		
Irregularidade longitudinal		abr/03																																
Falling Weight Deflectometer		out/03																																
Módulos de resiliência em laboratório		não																																
Ensaio de solo em laboratório		não																																

QUADRO 4.3 - Tipos de dados coletados no Trecho 03 Norte

TRECHO:	04 Norte			
RODOVIA:	PR-323	TRECHO:	Warta - Porto Charles Nauffall	
LOCALIZAÇÃO:	DO KM:	26,175	AO KM:	31,000
PERÍODO DA RESTAURAÇÃO:	DE:	mai/00	A:	nov/00
1) DADOS DOS PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS				
a) TRÁFEGO				
CONTAGEM		Local		
Início	Término	Tipo	Km	Sentidos
1/4/1999	1/3/2000	Praça de Pedágio - Sertaneja	3,600	2
TAXA DE CRESCIMENTO				2,4%
FATORES DE VEÍCULOS		Fonte		
		Balanças de Cambará		
b) LEVANTAMENTOS DE SUPERFÍCIE				
DNER PRO 08/94		DNER ES 128/83		
Data:	nov/01	Data:	nov/00	
c) AVALIAÇÃO FUNCIONAL - IRREGULARIDADE LONGITUDINAL				
DATA		TIPO DE APARELHO		
mai/00		Bump Integrator		
xx		xxx		
d) AVALIAÇÃO ESTRUTURAL				
Ensaio não destrutivo		Viga Benkelman	Falling Weight Deflectometer	
Data / Aparelho		jul/01	DYNATEST 05/00	
Ensaio destrutivo		Nº de furos	ISC	Caracterização
		2	sim	sim
2) OUTROS DADOS ANTERIORES À RESTAURAÇÃO				
3) DADOS POSTERIORES À RESTAURAÇÃO				
Irregularidade longitudinal		abr/03		
Falling Weight Deflectometer		out/03		
Módulos de resiliência em laboratório		não		
Ensaio de solo em laboratório		não		

QUADRO 4.4 - Tipos de dados coletados no Trecho 04 Norte

TRECHO:	01 Sul			
RODOVIA:	BR-277	TRECHO:	Sprea - Palmeira	
LOCALIZAÇÃO:	DO KM:	140,042	AO KM:	143,990
PERÍODO DA RESTAURAÇÃO:	DE:	nov/00	A:	dez/00
1) DADOS DOS PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS				
a) TRÁFEGO				
CONTAGEM		Local		
Início	Término	Tipo	Km	Sentidos
1/6/1998	1/10/1999	Praça de Porto Amazonas	158,000	2
TAXA DE CRESCIMENTO				Real *
FATORES DE VEÍCULOS		Fonte		
		Pesagens da concessionária		
* aumento real de veículos na praça de pedágio				
b) LEVANTAMENTOS DE SUPERFÍCIE				
DNER PRO 08/94		DNER ES 128/83		
Data:	xxx	Data:	ago/00	
c) AVALIAÇÃO FUNCIONAL - IRREGULARIDADE LONGITUDINAL				
DATA		TIPO DE APARELHO		
jun/00		Maysmeters		
xxx		xxx		
d) AVALIAÇÃO ESTRUTURAL				
Ensaio não destrutivo	Viga Benkelman		Falling Weight Deflectometer	
Data / Aparelho	ago/00		xxx	
Ensaio destrutivo	Nº de furos	ISC	Caracterização	
	20	sim	sim	
2) OUTROS DADOS ANTERIORES À RESTAURAÇÃO				
Falling Weight Deflectometer		jul/00		
3) DADOS POSTERIORES À RESTAURAÇÃO				
Irregularidade longitudinal		abr/03		
Falling Weight Deflectometer		ago/02		
Módulos de resiliência em laboratório		não		
Ensaio de solo em laboratório		não		

QUADRO 4.5 - Tipos de dados coletados no Trecho 01 Sul

TRECHO:	02 Sul			
RODOVIA:	BR-277	TRECHO:	Relógio - Guarapuava	
LOCALIZAÇÃO:	DO KM:	338,611	AO KM:	344,009
PERÍODO DA RESTAURAÇÃO:	DE:	dez/00	A:	dez/00
1) DADOS DOS PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS				
a) TRÁFEGO				
CONTAGEM		Local		
Início	Término	Tipo	Km	Sentidos
1/7/1998	31/12/1998	Praça de Morungaba	302,580	2
TAXA DE CRESCIMENTO				Real *
FATORES DE VEÍCULOS		Fonte		
		Pesagens da concessionária		
* aumento real de veículos na praça de pedágio				
b) LEVANTAMENTOS DE SUPERFÍCIE				
DNER PRO 08/94		DNER ES 128/83		
Data:	xxx	Data:	out/00	
c) AVALIAÇÃO FUNCIONAL - IRREGULARIDADE LONGITUDINAL				
DATA		TIPO DE APARELHO		
jun/00		Maysmeters		
xxx		xxx		
d) AVALIAÇÃO ESTRUTURAL				
Ensaio não destrutivo		Viga Benkelman	Falling Weight Deflectometer	
Data / Aparelho		xxx	jul/00	
Ensaio destrutivo		Nº de furos	ISC	Caracterização
		3	sim	sim
2) OUTROS DADOS ANTERIORES À RESTAURAÇÃO				
3) DADOS POSTERIORES À RESTAURAÇÃO				
Irregularidade longitudinal		abr/03		
Falling Weight Deflectometer		ago/02		
Módulos de resiliência em laboratório		não		
Ensaio de solo em laboratório		não		

QUADRO 4.6 - Tipos de dados coletados no Trecho 02 Sul

TRECHO:	03 Sul			
RODOVIA:	BR-373	TRECHO:	Ponta Grossa - Relógio	
LOCALIZAÇÃO:	DO KM:	183,405	AO KM:	196,000
PERÍODO DA RESTAURAÇÃO:	DE:	nov/00	A:	jan/01
1) DADOS DOS PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS				
a) TRÁFEGO				
CONTAGEM		Local		
Início	Término	Tipo	Km	Sentidos
1/7/1998	31/12/1998	Praça de Imbituva	217,000	2
TAXA DE CRESCIMENTO				Real *
FATORES DE VEÍCULOS		Fonte		
		Pesagens da concessionária		
* aumento real de veículos na praça de pedágio				
b) LEVANTAMENTOS DE SUPERFÍCIE				
DNER PRO 08/94		DNER ES 128/83		
Data:	xxx	Data:	out/00	
c) AVALIAÇÃO FUNCIONAL - IRREGULARIDADE LONGITUDINAL				
DATA		TIPO DE APARELHO		
jun/00		Maysmeter		
xxx		xxx		
d) AVALIAÇÃO ESTRUTURAL				
Ensaio não destrutivo	Viga Benkelman		Falling Weight Deflectometer	
Data / Aparelho	abr/00		jul/00	
Ensaio destrutivo	Nº de furos	ISC	Caracterização	
	13	sim	sim	
2) OUTROS DADOS ANTERIORES À RESTAURAÇÃO				
3) DADOS POSTERIORES À RESTAURAÇÃO				
Irregularidade longitudinal		abr/03		
Falling Weight Deflectometer		ago/02		
Módulos de resiliência em laboratório		sim		
Ensaio de solo em laboratório		sim		

QUADRO 4.7 - Tipos de dados coletados no Trecho 03 Sul

TRECHO:	04 Sul			
RODOVIA:	BR-277	TRECHO:	Guarapuava - Três Pinheiros	
LOCALIZAÇÃO:	DO KM:	357,000	AO KM:	367,000
PERÍODO DA RESTAURAÇÃO:	DE:	set/00	A:	fev/01
1) DADOS DOS PROJETOS DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS				
a) TRÁFEGO				
CONTAGEM		Local		
Início	Término	Tipo	Km	Sentidos
1/1/1999	31/12/1999	Praça de Candói	387,000	2
TAXA DE CRESCIMENTO				*Programa
FATORES DE VEÍCULOS		Fonte		
		DNER - Balança S.Luiz do Purunã - 1988		
* Programa de Concessões de Rodovias				
b) LEVANTAMENTOS DE SUPERFÍCIE				
DNER PRO 08/94		DNER ES 128/83		
Data:	jul/00	Data:	jul/00	
c) AVALIAÇÃO FUNCIONAL - IRREGULARIDADE LONGITUDINAL				
DATA		TIPO DE APARELHO		
jul/00		não citado		
XXX		XXX		
3) DADOS POSTERIORES À RESTAURAÇÃO				
Ensaio não destrutivo	Viga Benkelman		Falling Weight Deflectometer	
Data / Aparelho	*		mar/00	
* Para projeto Viga Benkelman = 1,4 x FWD				
Ensaio destrutivo	Nº de furos	ISC	Caracterização	
	10	sim	sim	
ANTERIORES A RESTAURAÇÃO				
POSTERIORES A RESTAURAÇÃO				
Irregularidade longitudinal		abr/03		
Falling Weight Deflectometer		dez/02		
Módulos de resiliência em laboratório		não		
Ensaio de solo em laboratório		não		

QUADRO 4.8 - Tipos de dados coletados no Trecho 04 Sul

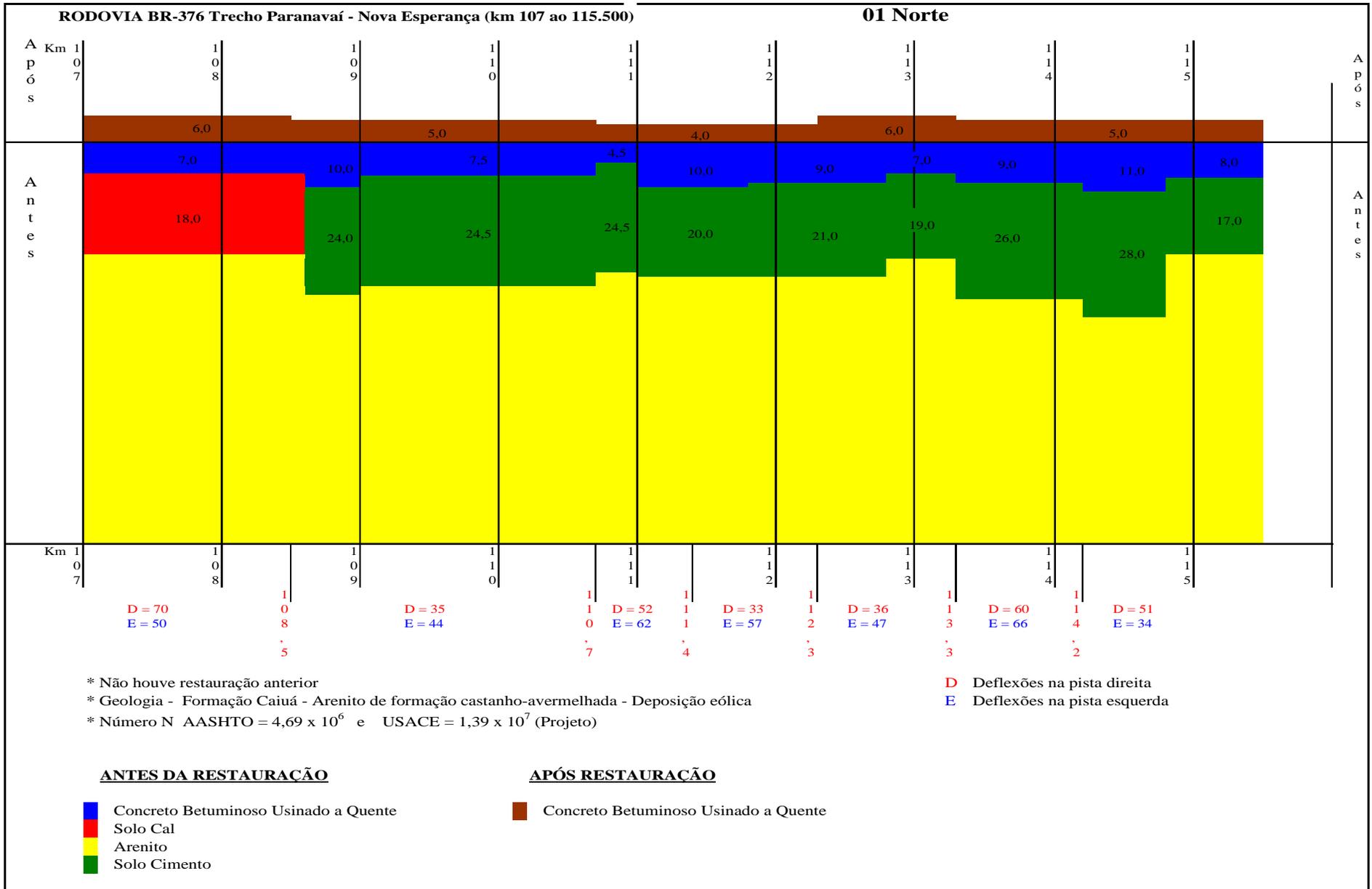


FIGURA 4.1 - Estruturas de Camadas - Trecho 01Norte

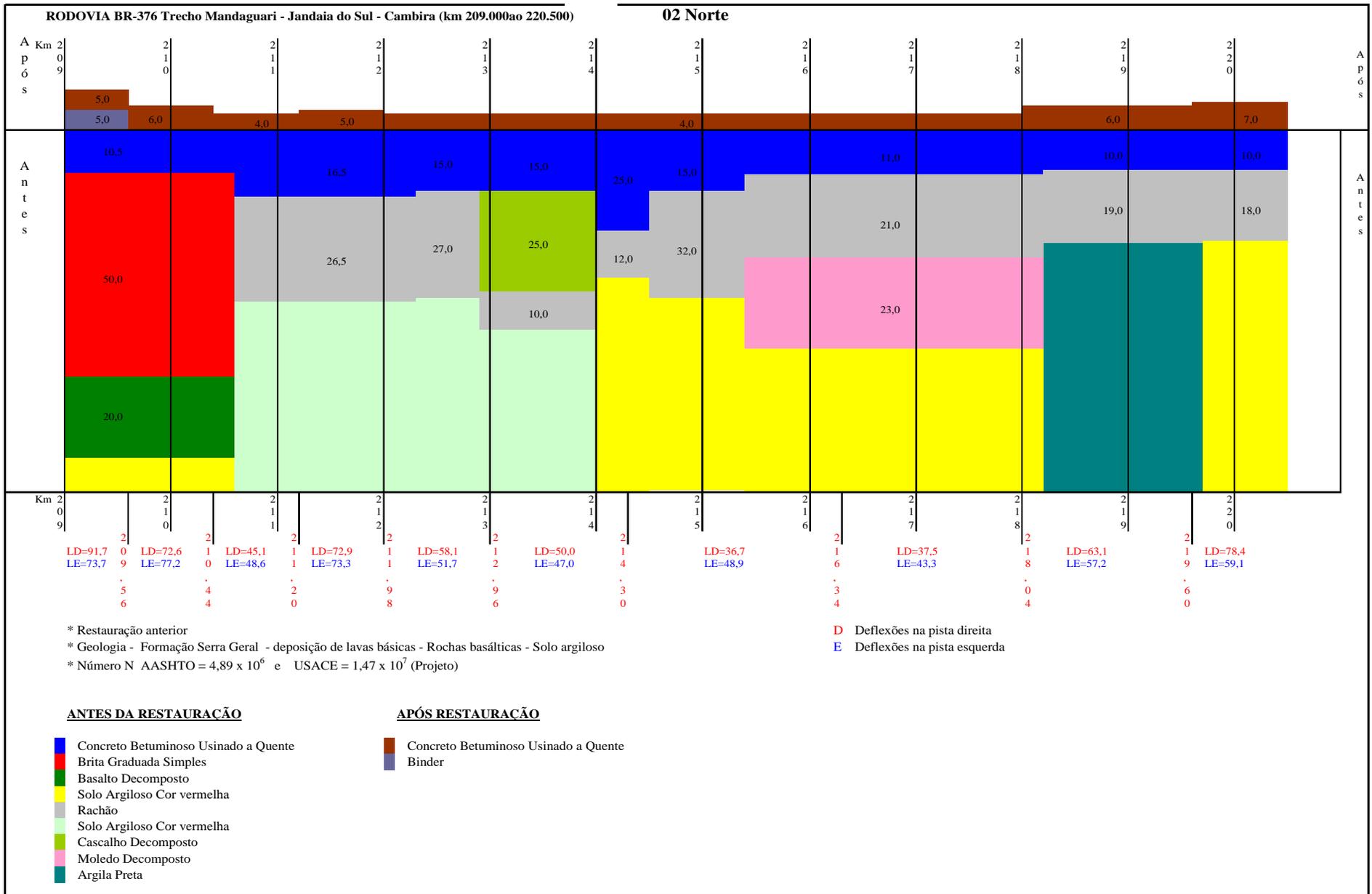


FIGURA 4.2 - Estruturas de Camadas - Trecho 02 Norte

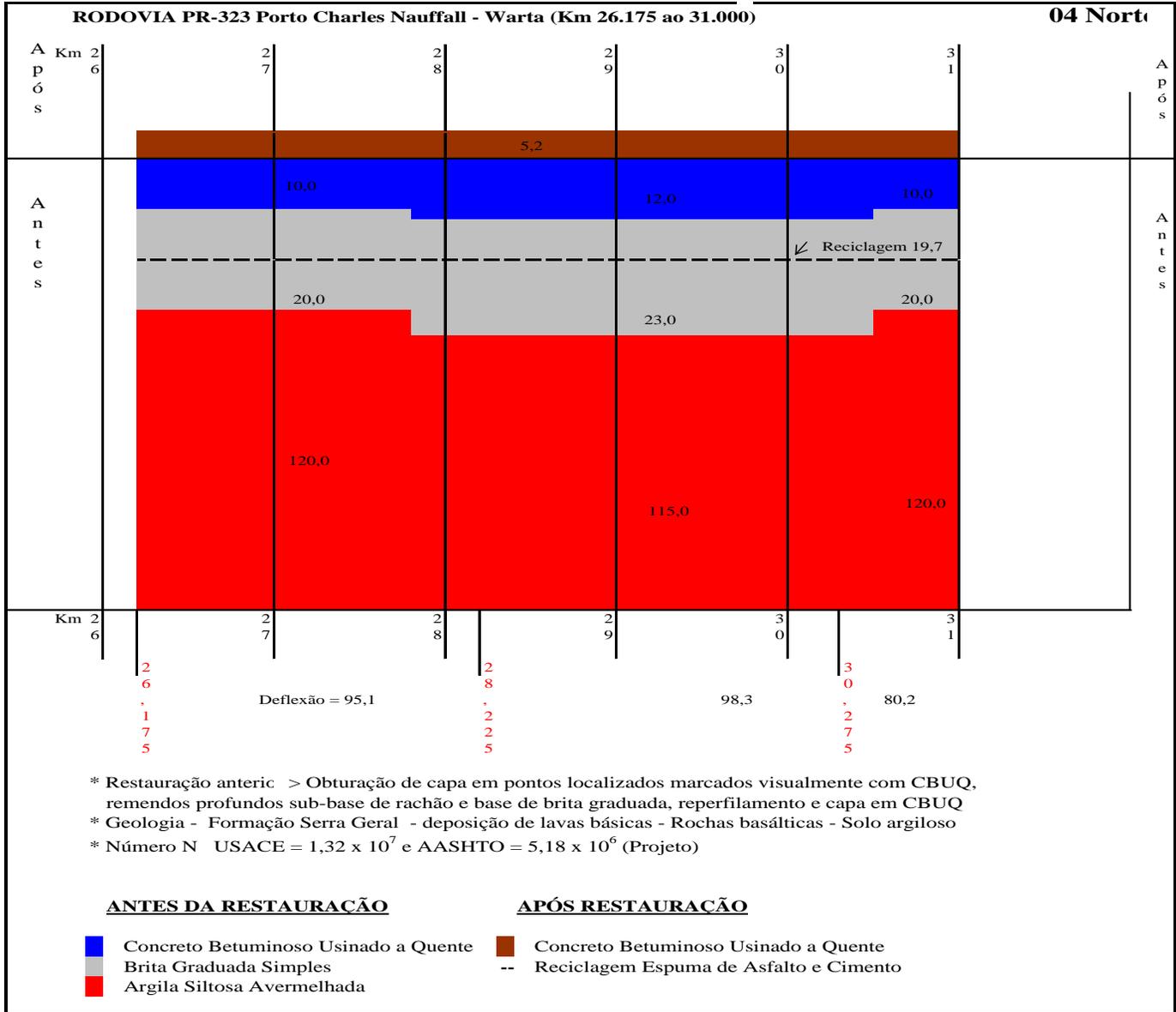


FIGURA 4.4 - Estruturas de Camadas - Trecho 04 Norte

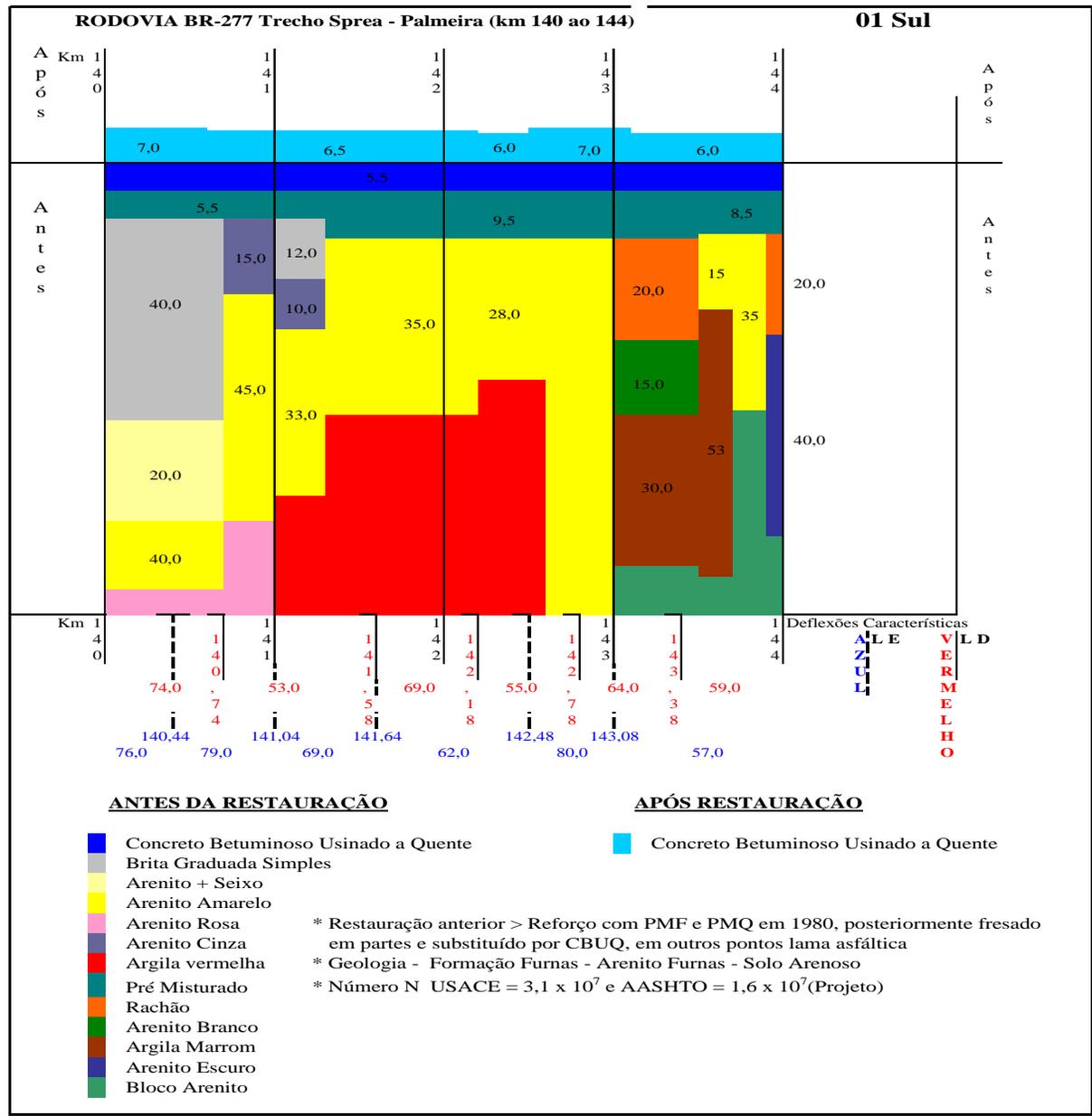


FIGURA 4.5 - Estruturas de Camadas - Trecho 01 Sul

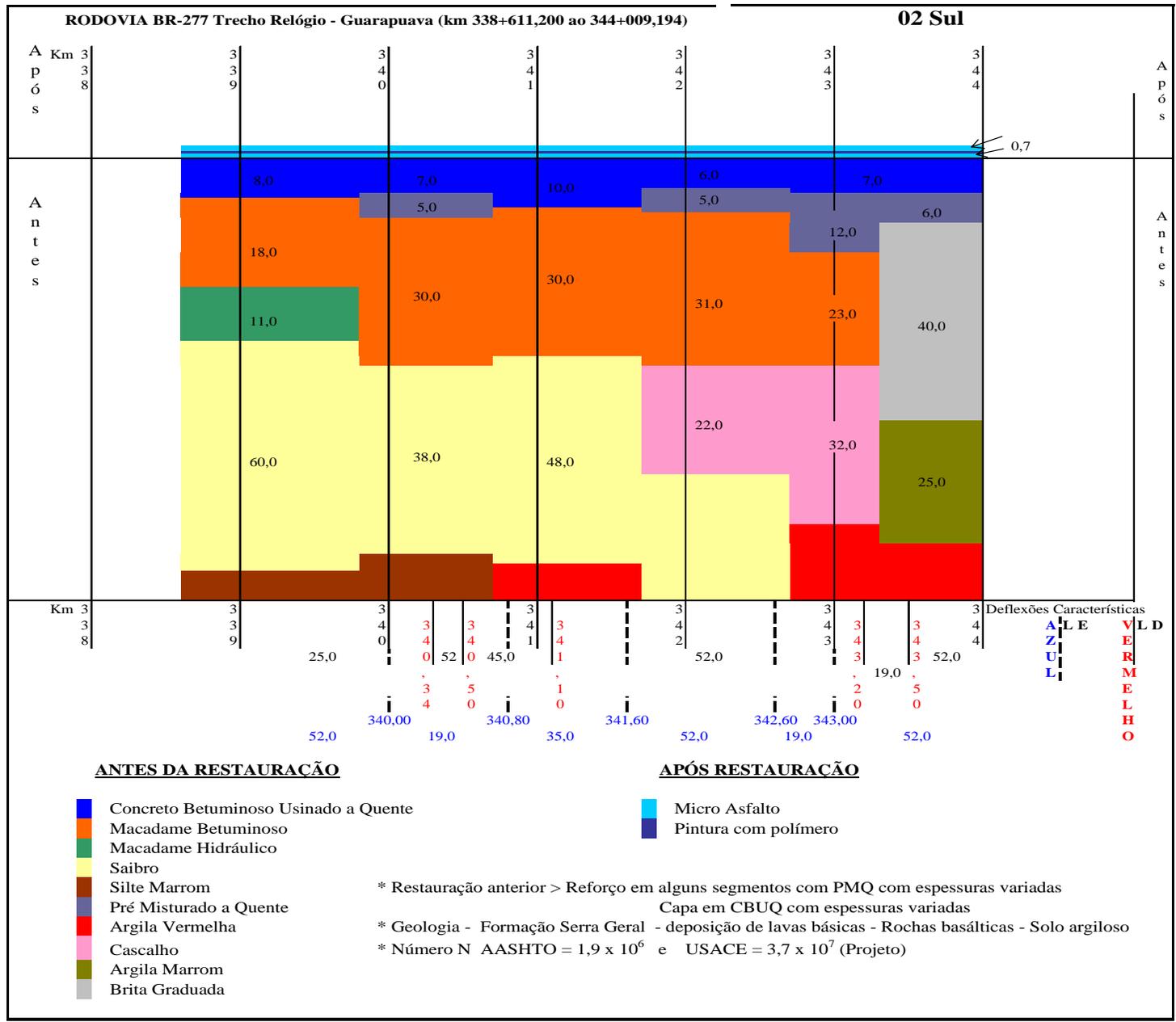


FIGURA 4.6 - Estruturas de Camadas - Trecho 02 Sul

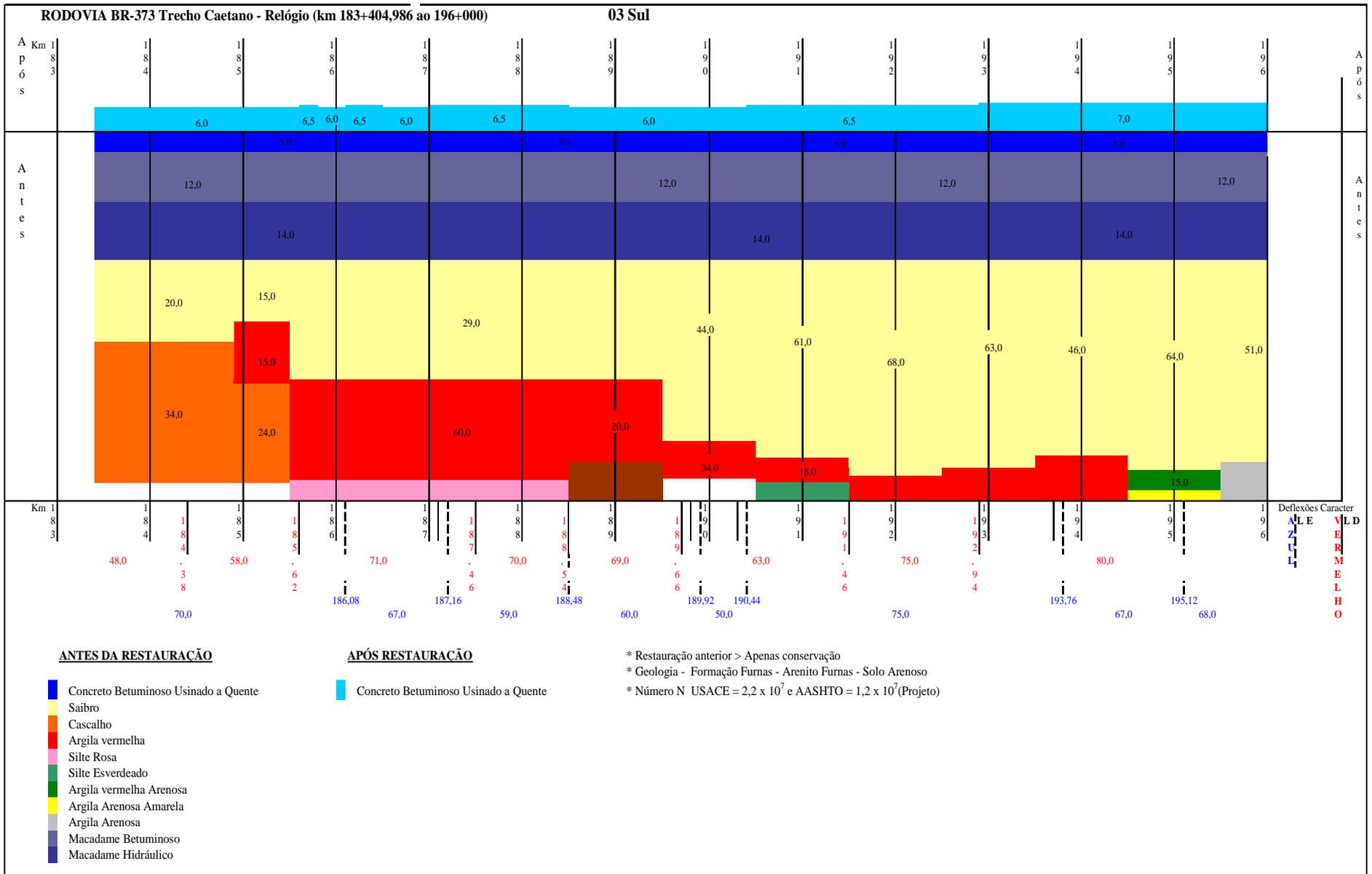


FIGURA 4.7- Estruturas de Camadas - Trecho 03 Sul

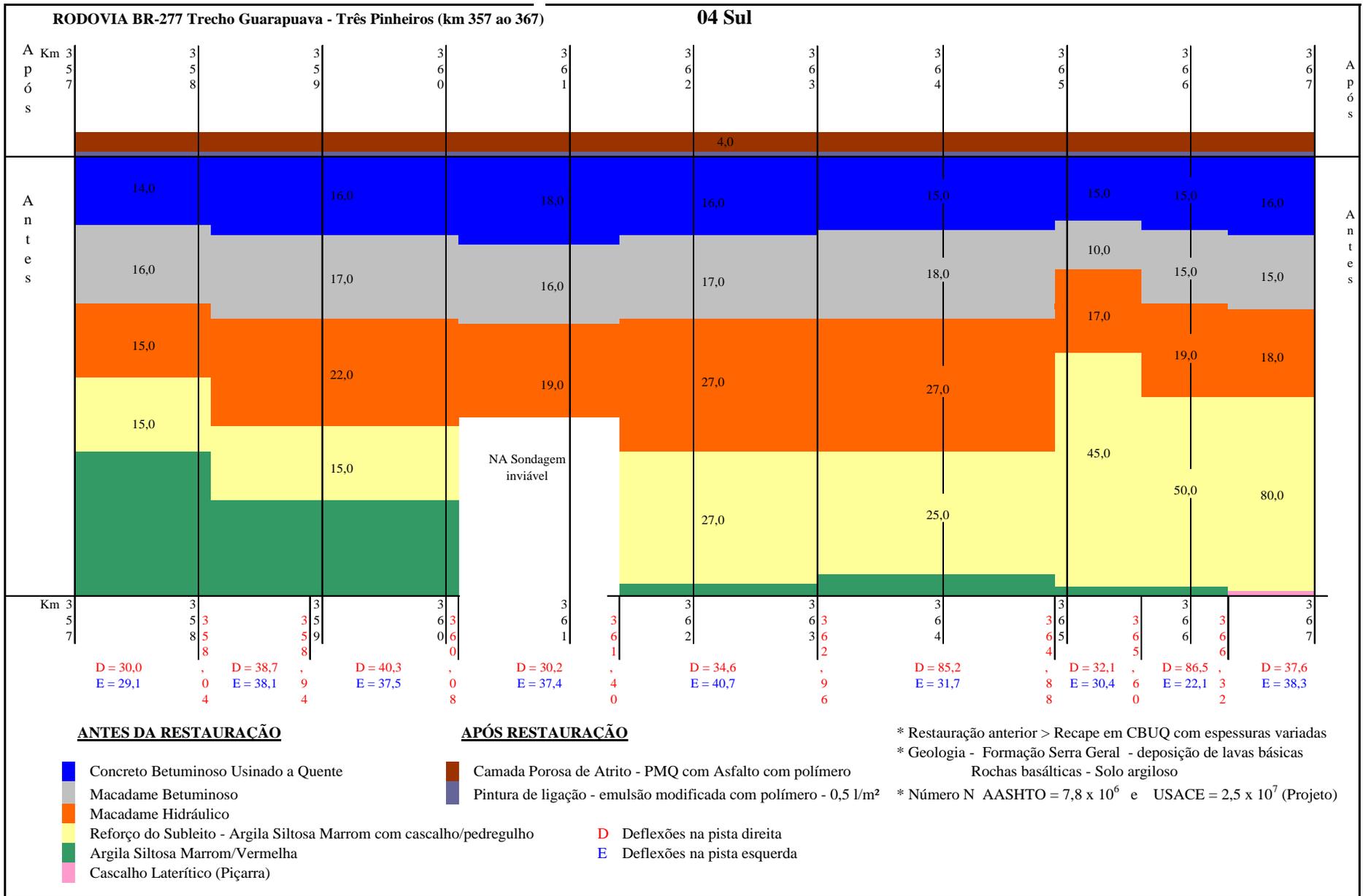


FIGURA 4.8 - Estruturas de Camadas - Trecho 04 Sul

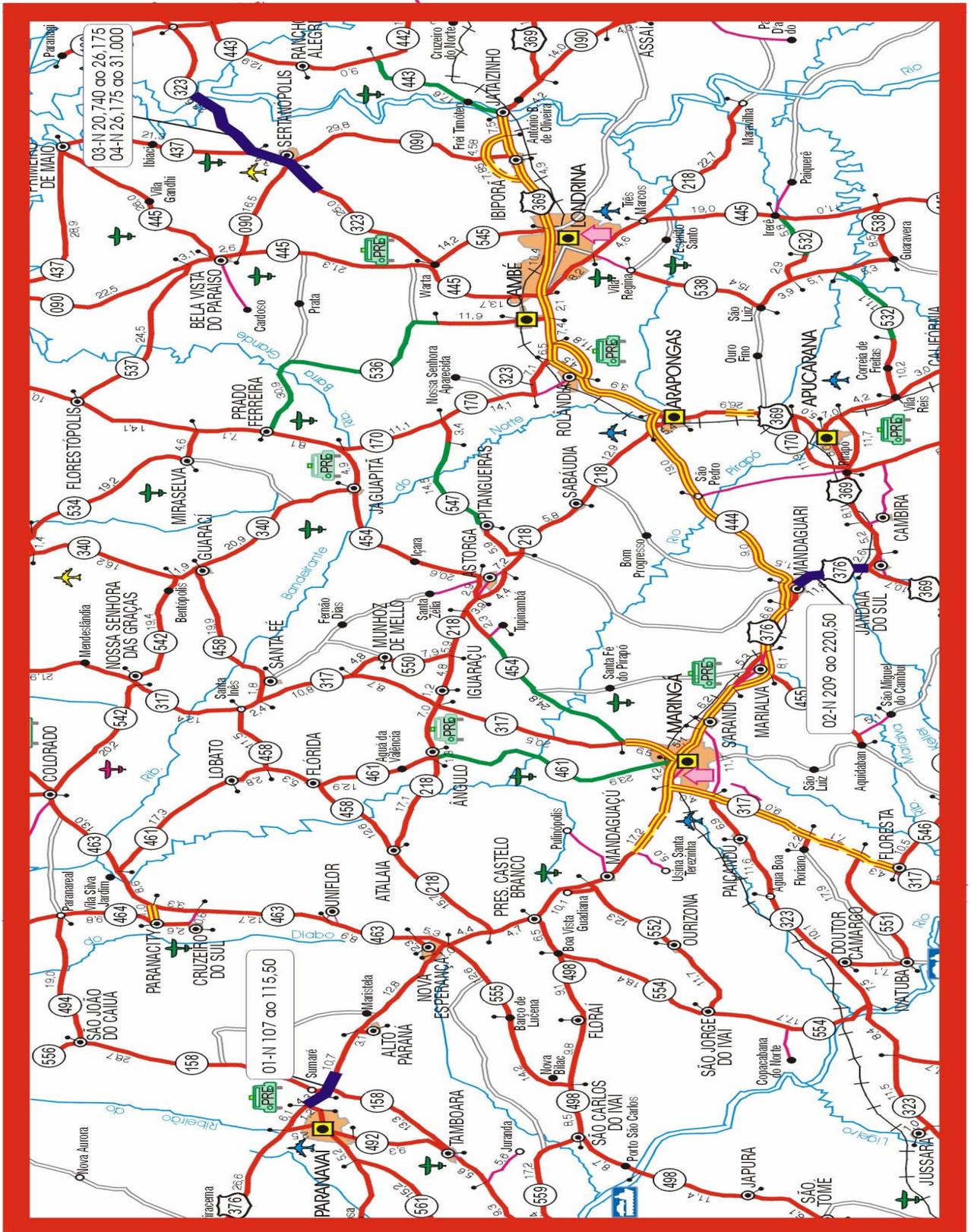


FIGURA 4.9 – Trechos da Região Norte

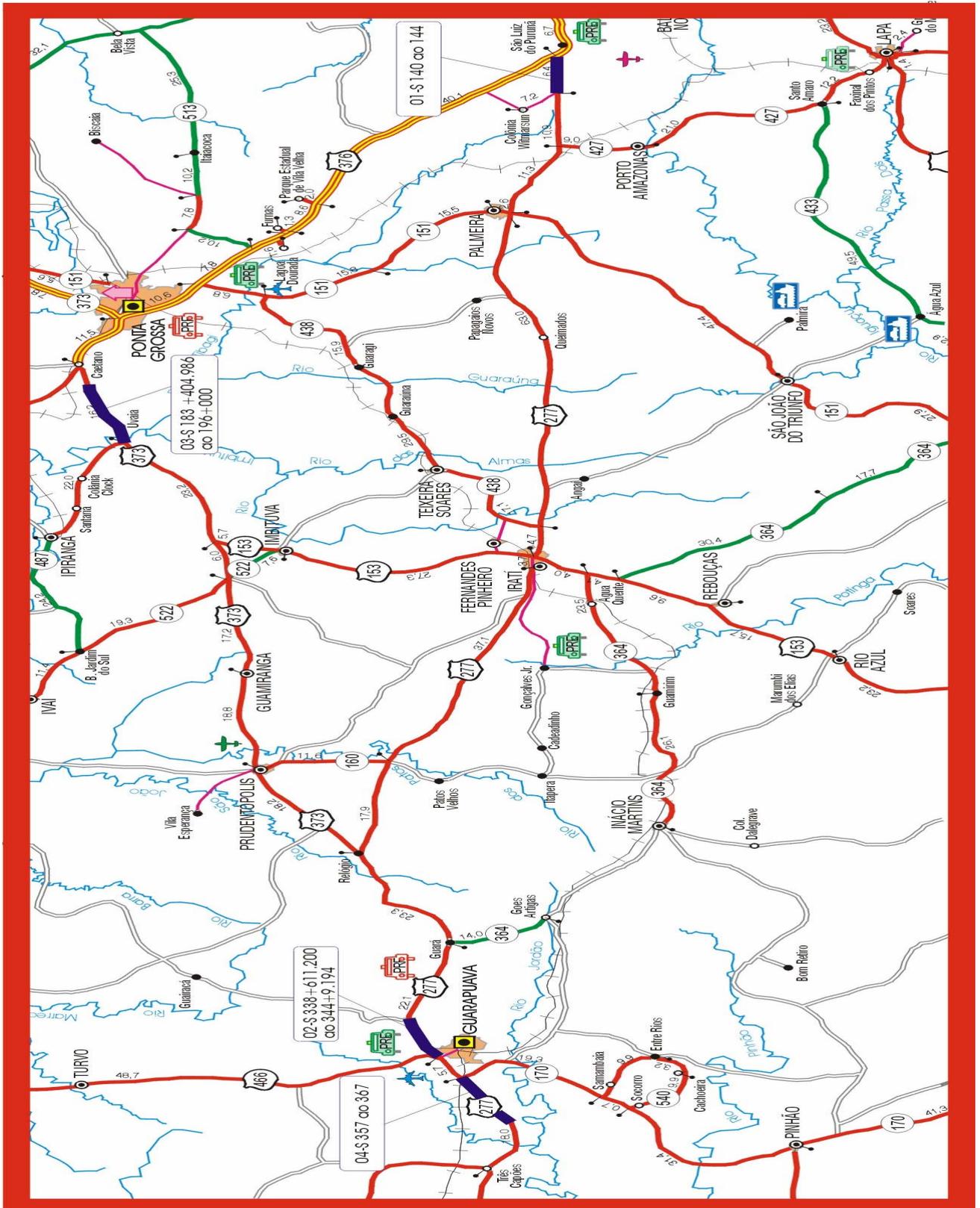


FIGURA 4.10 – Trechos da Região Sul

CAPÍTULO 5 ANÁLISE DOS DADOS

5.1 ANÁLISE DOS TRECHOS ESTUDADOS

Com base nos dados dos projetos de restauração, intervenções realizadas, levantamentos deflectométricos e de irregularidade longitudinal, foi feita uma análise do comportamento estrutural e funcional, antes e após a execução de intervenções de restauração em cada trecho.

5.1.1 Trecho 01 Norte – Rodovia BR/376, trecho Paranavaí – Nova Esperança

5.1.1.1 Características e condições gerais do trecho

- a) Extensão: 8,5 km (km 107,000 ao km 117,500);
- b) Local de início: trevo de acesso a Paranavaí;
- c) Aspectos gerais das condições do pavimento: apresentava-se em bom estado de conservação;
- d) Problemas específicos: foram constatados defeitos (remendos e fissuras) em dois segmentos, o primeiro no trevo de acesso a Paranavaí, km 108+000, subtrecho 1, com dispositivos redutores de velocidade, sonorizadores e lombadas, em rampa, com remendos localizados e afundamento de trilha de rodas, devido ao efeito de frenagem e aceleração, existindo também nas proximidades posto da Polícia Rodoviária Estadual, km 108+700. O segundo segmento no km 112+000, subtrecho 4, apresentava alguns remendos, verificou-se na faixa de domínio, a existência de caixas de retenção de água, cuja função é diminuir a velocidade de escoamento durante as enxurradas, evitando o fenômeno de erosões, mas neste caso transmitindo umidade para o subleito do pavimento. Em vistoria realizada no dia 04-11-2003, verificou-se início de desagregação da camada de revestimento novo em todo o trecho, aparentando problema do ligante ou falta de adesividade do ligante com o agregado;
- e) Tipo de solos do subleito: arenoso;
- f) Condições de drenagem: com exceção do apontado no item d) acima, o restante do trecho apresentou-se em boas condições, não acarretando problemas ao pavimento;
- g) Tipo e espessura do reforço: em CAUQ, com espessuras variando de 4,0 a 6,0 cm, demonstradas na Tabela 5.1;

TABELA 5.1 - Módulos de Resiliência – Trecho 01 Norte

EVERCALC	ANTES	TRECHO 01 NORTE					MÓDULOS DE RESILIÊNCIA (MPa)						
		Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Antigo (cm)	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	REFORÇO	SUBLEITO	
		1	24	10	43	16	6,0	8.000	386				392
2	20	7	34	22	7,0	8.000	425				496		
3	19	10	50	7	10,0	7.780	345				500		
4	22	6	26	9	9,0	8.000	291				425		
5	20	9	47	22	7,0	8.000	490				448		
6	21	11	50	9	9,0	8.000	299				500		
7	22	11	49	15	10,0	7.773	270				461		
DEPOIS	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Novo (cm)	REVEST. NOVO	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO		
	1	18	8	47	6	6,0	8.000	1.259	476		459		
	2	17	7	37	22	5,0	1.851	8.000	522		447		
	3	22	6	27	7	4,0	1.359	3.430	285		456		
	4	21	8	39	9	4,0	1.633	3.227	374		453		
	5	16	6	36	10	6,0	8.000	1.121	698		500		
	6	18	6	31	9	5,0	1.707	8.000	334		470		
	7	20	8	41	14	5,0	2.136	3.426	314		438		
ELSYM5	ANTES	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Antigo (cm)	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	REFORÇO	SUBLEITO	
		1	24	10	43	16	6,0	4.500	230				400
		2	20	7	34	22	7,0	4.500	310				430
		3	19	10	50	7	10,0	2.000	300				460
		4	22	6	26	9	9,0	2.000	300				370
		5	20	9	47	22	7,0	3.700	360				380
		6	21	11	50	9	9,0	2.800	290				410
	7	22	11	49	15	10,0	2.000	260				410	
	DEPOIS	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Novo (cm)	REVEST. NOVO	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	REFORÇO	SUBLEITO
		1	18	8	47	6	6,0	70	4.000	400			400
		2	17	7	37	22	5,0	70	4.500	380			430
		3	22	6	27	7	4,0	70	1.200	243			400
		4	21	8	39	9	4,0	80	1.200	280			410
		5	16	6	36	10	6,0	80	300	800			450
6		18	6	31	9	5,0	80	2.800	310			435	
7	20	8	41	14	5,0	80	1.800	280			400		

5.1.1.2 Resultados obtidos na análise

a) Retroanálise: Comparativo dos módulos de resiliência, constantes na Tabela 5.1:

→ subleito: similaridade entre os módulos obtidos por ambos programas, nas análises antes e depois da restauração, com valores em torno de 400 MPa, acima da média apontada pela bibliografia, que é de 150 MPa, devido a tratar-se de solo arenoso laterítico;

→ base: similaridade entre os módulos obtidos por ambos programas, nas análises antes e depois da restauração, entretanto com valores muito baixos, em torno de 390 MPa pelo

EVERCALC e 340 MPa pelo ELSYM5, em comparação aos valores médios normais para o tipo de material (solo-cimento), que deveria apresentar no mínimo 2.000 MPa, estes resultados podem indicar um alto grau de fissuração ou baixo teor de cimento. Não foi constatado a reflexão de trincas para o revestimento da restauração;

→ revestimento antigo: nenhuma similaridade entre os módulos obtidos no estudo do antes da restauração com o do depois, que apresentaram valores mais baixos por ambos programas computacionais. Pelo programa EVERCALC os valores dos módulos do antes restauração estavam em torno de 8.000 MPa, baixaram para 3.400 MPa, pelo ELSYM5 de 3.000 MPa para 2.000 MPa;

→ revestimento novo: pelo programa EVERCALC os módulos, com exceção dos subtrechos 1 e 5, encontraram-se no limite inferior dos valores normais apresentados na bibliografia, em torno de 1.500 MPa e os obtidos pelo ELSYM5, com módulos de 70 e 80 MPa, muito abaixo dos valores normais encontrados, sem explicação aparente para tanto. O programa EVERCALC apresentou módulos com valores acima do limite superior típico constante na bibliografia, que é 5.820 MPa.

b) Vida de fadiga: Pelo modelo de Salomão Pinto, com tensões e deformações calculadas pelo programa ELSYM5, os subtrechos 3, 4, 5, 6 e 7, apresentaram estimativas de vida inferior comparada com o valor de projeto, e pelo modelo do Asphalt Institute, com tensões e deformações calculadas pelo programa EVERCALC, os subtrechos 1, 3 e 4, com estimativa de vida inferior, conforme Tabela 5.2, que compara a vida remanescente apontada pelos modelos utilizados no presente estudo, com as vidas de fadiga, que os subtrechos terão de atender para cumprir a vida apontada em projeto, realçadas em *itálico* nas tabelas de vida de fadiga. Os subtrechos com estimativa de vida inferior à especificada nos projetos de restaurações estão realçados em **negrito** nas tabelas de vida de fadiga. Acredita-se que com a degradação apresentada, o trecho deverá receber correções e rejuvenescimento em curto prazo de tempo, o subtrecho 3 pelo modelo De Beer apresentou comprometimento da vida útil em função da base cimentada. Foi constatada diferença nos resultados entre os modelos de previsão de vida de fadiga estudados.

c) Irregularidade longitudinal: Nos levantamentos realizados em abril de 2.003, verificou-se o não atendimento dos níveis esperados após as intervenções de restauração, sendo que o subtrecho 2 apresentou-se mais irregular após as intervenções de restauração. Justifica-se o

problema devido à implantação de redutores físicos de velocidade (lombadas) e posto policial, onde os veículos transmitem ao pavimento frenagens, acelerações e cargas devido a pouca velocidade. A Tabela 5.3 mostra um comparativo da irregularidade longitudinal levantada antes da restauração, a levantada após e a esperada, calculada com elementos do DNER PRO 159/85, podendo esta comparação ser visualizada na Figura 5.1, com nenhum subtrecho atendendo a irregularidade longitudinal esperada;

TABELA 5. 2 – Vida de Fadiga – Trecho 01 Norte

VIDA DE FADIGA	MODELOS					
	Pinto	USACE	AASHTO	De Beer	Asphalt Institute	
	Revestimento	Revestimento	Revestimento	Base cimento	Revestimento	Subleito
01 NORTE	<i>1,39E+07</i>	<i>1,39E+07</i>	<i>4,69E+06</i>	<i>1,39E+07</i>	<i>4,69E+06</i>	<i>4,69E+06</i>
1	1,80E+07	1,28E+11	1,17E+08	1,49E+07	1,68E+06	3,15E+07
2	1,86E+07	1,24E+11	1,23E+08	1,51E+07	9,36E+06	1,34E+08
3	4,33E+06	1,55E+14	2,02E+07	1,34E+07	2,65E+06	9,46E+07
4	4,87E+06	4,42E+11	2,08E+07	1,53E+07	3,83E+06	1,24E+07
5	2,21E+06	1,56E+11	7,81E+06	1,40E+07	2,03E+07	9,11E+08
6	1,21E+07	2,29E+12	6,42E+07	1,53E+07	6,91E+06	4,13E+07
7	8,47E+06	8,55E+13	4,13E+07	1,53E+07	1,10E+07	2,73E+08

TABELA 5.3 – Comparativo de Irregularidades – Trecho 01 Norte

01 NORTE	Comparativo de Irregularidades							
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Espessura do Reforço (cm)	IRI Antes (m/km)	IRI Esperado (m/km)	IRI Depois (m/km)	Variação (%)
1	107,000	108,500	1.500	6,0	2,2	1,6	2,2	36
2	108,500	110,700	2.200	5,0	2,6	1,7	2,7	56
3	110,700	111,400	700	4,0	2,5	1,8	2,1	19
4	111,400	112,300	900	4,0	2,5	1,8	2,4	37
5	112,300	113,300	1.000	6,0	2,5	1,7	2,0	19
6	113,300	114,200	900	5,0	2,7	1,8	1,9	7
7	114,200	115,500	1.300	5,0	2,2	1,6	1,9	16
							Média	27
							Desvio padrão	17
							CV (%)	13

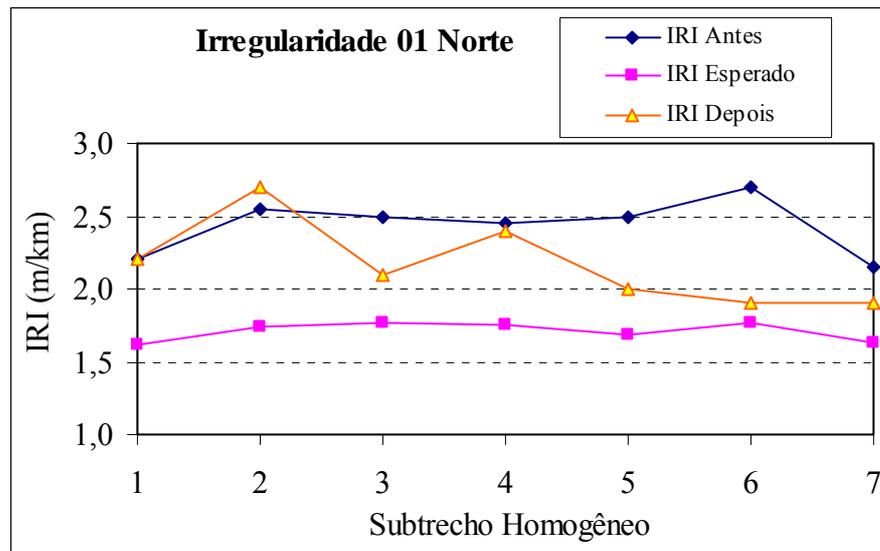
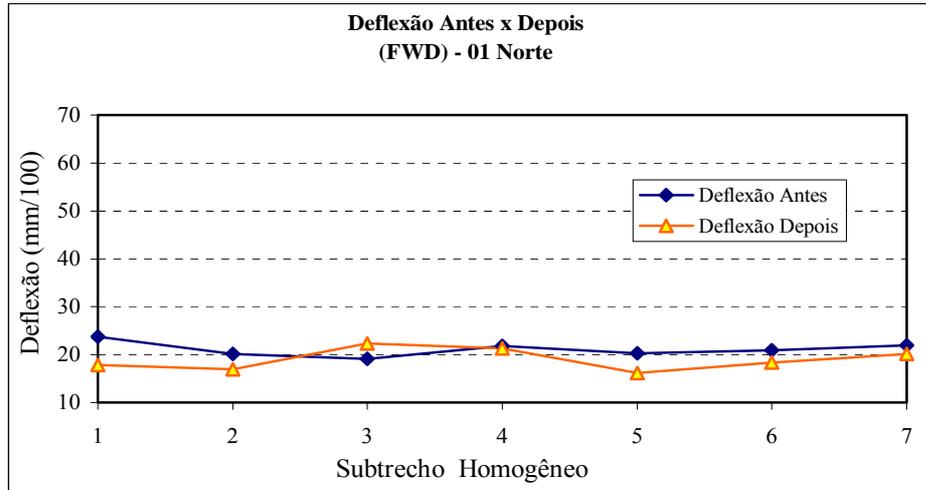


FIGURA 5.1 – Irregularidade Longitudinal – Trecho 01 Norte

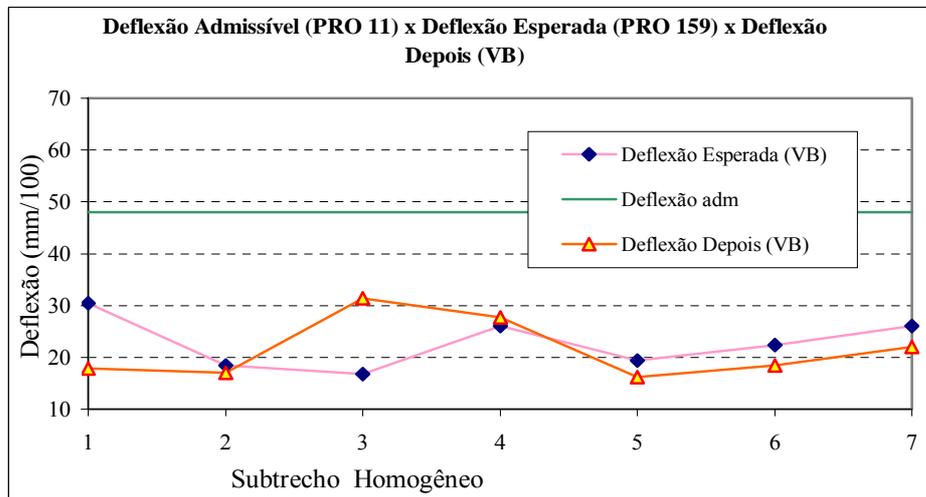
d) Deflexões: as intervenções de restauração apenas não baixaram as deflexões no subtrecho 3, estando todas abaixo das deflexões admissíveis determinadas pelos métodos DNER PRO 269/94 e 011/79, porém os subtrechos 03 e 04 não atenderam a expectativa calculada pelo método DNER PRO 159/85, mas com a do subtrecho 04 muito próxima da esperada. Estes números estão demonstrados na Tabela 5.4 e podem ser visualizados na Figura 5.2. O tratamento estatístico adotado do método DNER PRO 010/79 não depurou a amostra o necessário para atender ao mínimo exigido pelo coeficiente de variação (CV) que é de no máximo 25%, isto devido à heterogeneidade que o pavimento apresenta em relação a deflectometria, com alterações a cada estação levantada, conforme pode ser visto na tabela 5.1. Neste segmento pode-se afirmar que as intervenções baixaram as deflexões.

TABELA 5.4 – Comparativo de Deflexões – Trecho 01 Norte

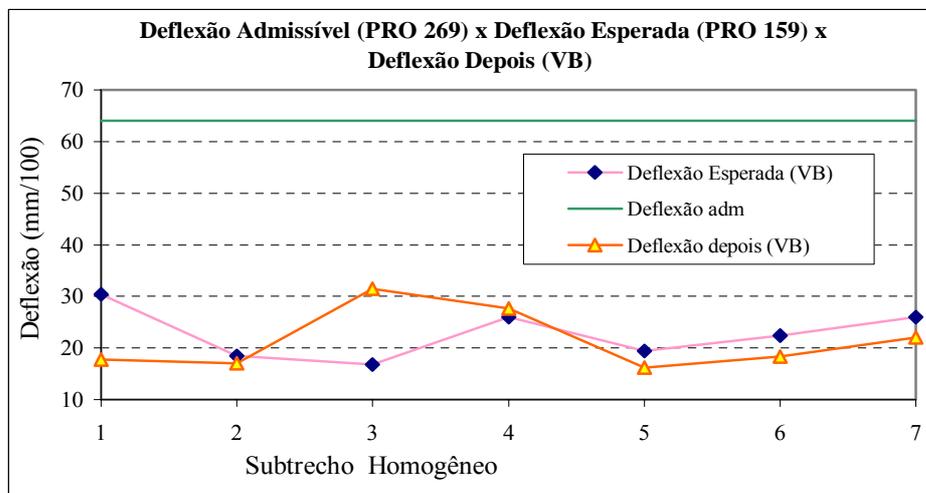
01 NORTE		COMPARATIVO DE DEFLEXÕES ($\text{mm} \times 10^{-2}$)							Variação (%)
Subtrecho	Reforço (cm)	Deflexão Antes (FWD)	Deflexão Antes (VB)	Deflexão Esperada (PRO 159)	Deflexão Depois (FWD)	Dadm PRO 11	Dadm PRO 269	Deflexão Depois (VB)	
1	6,0	24	36	30	18	48	64	18	-42
2	5,0	20	21	18	17	48	64	17	-8
3	4,0	19	19	17	22	48	64	31	87
4	4,0	22	30	26	21	48	64	28	6
5	6,0	20	23	19	16	48	64	16	-16
6	5,0	21	26	22	18	48	64	18	-18
7	5,0	22	30	26	20	48	64	22	-15
Média									-1
Desvio padrão									41
CV (%)									42



(a) Antes e Depois da Restauração



(b) Admissível (PRO 11), Esperada (PRO 159) e Depois



(c) Admissível (PRO 269), Esperada (PRO159) e Depois

FIGURA 5.2 – Comparativo de Deflexões – Trecho 01 Norte

5.1.2 Trecho 02 Norte – Rodovia BR/376, trecho Mandaguari – Jandaia do Sul

5.1.2.1 Características e condições gerais do trecho

- a) Extensão: 11,5 km (km 209,000 ao km 220,500);
- b) Local de início: no perímetro urbano da cidade de Mandaguari;
- c) Aspectos gerais e condições do pavimento: apresentava-se em bom estado de conservação;
- d) Problemas específicos: constatou-se remendos e afundamentos de trilha de roda no km 210+700, subtrecho 03, devido à existência de represa longitudinal à via, numa extensão de aproximadamente 200 (duzentos) metros, devido estar quase em nível com a pavimento, aproximadamente 2 (dois) metros abaixo, com certeza aumenta a umidade do subleito. Outros pontos problemáticos encontrados foram no km 209+500, subtrecho 1, trevo de acesso a Mandaguari, km 217+000, subtrecho 8, trevo de acesso a Jandaia do Sul, e no km 217+300, no mesmo subtrecho, com a existência de lombadas, mas estes locais não apresentaram problemas visuais. Em vistoria, realizada no dia 05-11-2.004, em todo o trecho, verificou-se início de desagregação da camada de revestimento novo, aparentando problema do ligante ou falta de adesividade do ligante com o agregado;
- e) Tipo de solos do subleito: argiloso;
- f) Condições de drenagem: o trecho não apresentou problemas de drenagem, além do apresentado no item d);
- g) Tipo e espessura do reforço: em CAUQ, com espessuras variando de 4,0 a 10,0 cm.

5.1.2.2 Resultados obtidos na análise

- a) Retroanálise: Comparativo dos módulos de resiliência, apresentados na Tabela 5.5:
 - subleito: similaridade entre os módulos obtidos pelos programas adotados, nas análises antes e depois das restaurações, próximos da média, 150 MPa e dentro do intervalo apresentado pela bibliografia, de 80 e 270 MPa, os resultados deste trecho foram de 950 e 214,6 MPa;
 - bases e sub-bases: foi constatada diferença entre os resultados apresentados pelos dois programas utilizados em relação aos subtrechos individualmente, mas dentro do intervalo apontado pela bibliografia, que é de 70 e 730 MPa;

TABELA 5.5 – Módulos de Resiliência – Trecho 02 Norte

		TRECHO 02 NORTE					MÓDULOS DE RESILIENCIA (MPa)					
		Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Antigo (cm)	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	REFORÇO	SUBLEITO
EVERCALC	ANTES	1	47	13	28	29	10,5	3.618	300	64	147	112
		2	42	9	22	44	10,5	4.974	300	95	50	143
		3	24	5	22	38	16,5	5.287	192			215
		4	39	8	22	37	16,5	4.108	106			121
		5	28	7	26	49	15,0	6.604	216			151
		6	26	7	27	65	15,0	5.585	500	45		170
		7	21	6	26	88	15,0	5.594	490			176
		8	21	4	17	16	11,0	8.000	500	500		174
		9	32	9	27	16	10,0	6.535	353			174
		10	40	8	21	9	10,0	3.363	474			128
	DEPOIS	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Novo (cm)	REVEST. NOVO	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO
		1	28	10	35	6	10,0	5.827	1.413	178	300	134
		2	31	6	19	10	6,0	6.116	2.313	300	127	148
		3	26	8	28	8	4,0	8.000	2.194	202		157
		4	33	8	22	6	5,0	8.000	1.976	109		116
		5	22	7	32	10	4,0	8.000	3.818	382		158
		6	27	15	54	14	4,0	8.000	1.804	415	76	150
		7	20	6	27	20	4,0	8.000	2.462	500		176
		8	21	3	15	18	4,0	8.000	4.767	500	500	169
		9	24	3	11	16	6,0	8.000	3.759	315		201
10	31	7	23	10	7,0	3.061	2.641	300		152		
ELSYM5	ANTES	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Antigo (cm)	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	REFORÇO	SUBLEITO
		1	47	13	28	29	10,5	1.800	180	140	120	95
		2	42	9	22	44	10,5	2.200	190	150	120	120
		3	24	5	22	38	16,5	2.200	250			200
		4	39	8	22	37	16,5	2.200	110			125
		5	28	7	26	49	15,0	2.500	340			140
		6	26	7	27	65	15,0	3.200	360	170		150
		7	21	6	26	88	15,0	3.500	420			170
		8	21	4	17	16	11,0	3.200	550	500		170
		9	32	9	27	16	10,0	2.500	300			170
	10	40	8	21	9	10,0	2.000	300			125	
	DEPOIS	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Novo (cm)	REVEST. NOVO	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO
		1	28	10	35	6	10,0	1.800	1.800	170	250	135
		2	31	6	19	10	6,0	700	3.500	280	140	148
		3	26	8	28	8	4,0	100	2.500	250		156
		4	33	8	22	6	5,0	70	2.100	230		111
		5	22	7	32	10	4,0	500	3.500	480		155
		6	27	15	54	14	4,0	400	1.600	320	350	142
		7	20	6	27	20	4,0	80	2.500	550		168
		8	21	3	15	18	4,0	80	2.500	600		165
9		24	3	11	16	6,0	80	1.600	600		195	
10	31	7	23	10	7,0	80	1.600	450		150		

→ revestimento antigo: foi constatada diferença nos resultados dos estudos realizados com os dados obtidos antes da restauração, em relação aos obtidos após a restauração, sendo mais significativos os resultados apresentados pelo programa EVERCALC, quando os valores antes

da restauração estavam no intervalo de 3.300 e 8.000 MPa, baixaram para o intervalo de 1.400 a 4.700 MPa;

→ revestimento novo: nenhuma similaridade entre os resultados obtidos pelos dois métodos adotados, o EVERCALC apresentou em sete dos dez subtrechos o valor de 8.000 MPa, mostrando que o revestimento novo está respondendo por toda capacidade estrutural do revestimento asfáltico, enquanto o ELSYM5 no intervalo de 70 e 1.800 MPa. Os módulos gerados pelo programa EVERCALC para camadas de CAUQ são maiores que os gerados pelo programa ELSYM5. O programa EVERCALC apresentou módulos com valores acima do limite superior típico constante na bibliografia, que é 5.820 MPa, mostrando ser uma camada muito rígida.

b) Vida de fadiga: Os subtrechos 4 e 10, pelo modelo de Salomão Pinto e 1 pelo modelo do Asphalt Institute, como de vida inferior à esperada no projeto, conforme o demonstrado na Tabela 5.6. O trecho já recebeu serviços de rejuvenescimento, em função do comportamento apresentado na camada de revestimento nova e deverá receber novas intervenções.

TABELA 5.6 – Vida de Fadiga – Trecho 02 Norte

VIDA DE FADIGA	MODELOS				
	Pinto	USACE	AASHTO	Asphalt Institute	
	Revestimento	Revestimento	Revestimento	Revestimento	Subleito
02 NORTE	<i>1,47E+07</i>	<i>1,47E+07</i>	<i>4,89E+06</i>	<i>4,89E+06</i>	<i>4,89E+06</i>
1	3,98E+08	9,33E+09	3,39E+08	2,27E+06	3,77E+06
2	2,92E+07	1,09E+10	2,99E+07	2,04E+08	3,26E+22
3	1,51E+07	1,30E+11	6,99E+07	9,65E+08	5,47E+07
4	1,09E+07	6,49E+10	6,32E+07	1,26E+09	1,50E+07
5	4,52E+07	9,92E+09	6,86E+07	6,62E+07	7,68E+07
6	1,65E+07	6,00E+09	2,38E+07	3,61E+12	3,26E+22
7	2,80E+07	2,68E+11	1,81E+08	1,10E+09	1,41E+08
8	2,16E+07	2,40E+11	1,31E+08	6,18E+07	8,14E+08
9	1,51E+07	1,71E+10	8,46E+07	3,20E+09	3,67E+07
10	1,07E+07	6,58E+09	5,54E+07	2,37E+10	1,13E+07

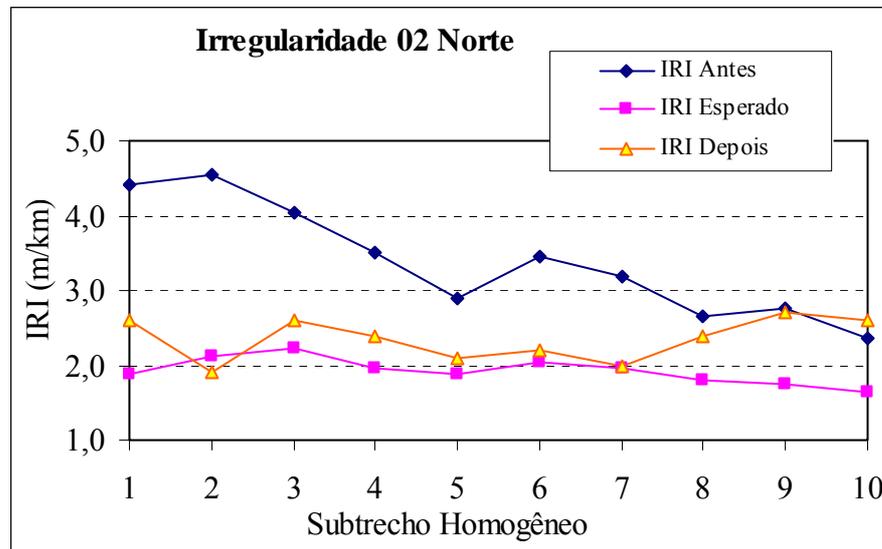
c) Irregularidade longitudinal: Diminuiu com a execução dos serviços de restauração, mas não atendeu ao esperado calculado pelo método DNER PRO 159/85, mostrando pouca eficiência das intervenções de reforço. Os subtrechos 1, 3, 9 e 10, perante os limites de aceitação, que os

trechos estão condicionados pelo Programa de Exploração Rodoviária do Estado do Paraná, que é no máximo 2,5 m/km, devem receber correções para baixar os valores para dentro do limite citado. A Tabela 5.7 apresenta os resultados dos estudos realizados, podendo ser visualizados na Figura 5.3.

TABELA 5.7 – Comparativo de Irregularidades – Trecho 02 Norte

02 NORTE		Comparativo de Irregularidades						
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Espessura do Reforço (cm)	IRI Antes (m/km)	IRI Esperado (m/km)	IRI Depois (m/km)	Varição (%)
1	209,000	209,560	560	10,0	4,4	1,9	2,6	38
2	209,560	210,440	880	6,0	4,6	2,1	1,9	-11
3	210,440	211,200	760	4,0	4,1	2,2	2,6	17
4	211,200	211,980	780	5,0	3,5	2,0	2,4	22
5	211,980	212,960	980	4,0	2,9	1,9	2,1	11
6	212,960	214,300	1.340	4,0	3,5	2,0	2,2	8
7	214,300	216,340	2.040	4,0	3,2	2,0	2,0	1
8	216,340	218,040	1.700	4,0	2,7	1,8	2,4	33
9	218,040	219,600	1.560	6,0	2,8	1,7	2,7	55
10	219,600	220,500	900	7,0	2,4	1,6	2,6	59
Média								23
Desvio padrão								23
CV (%)								19

FIGURA 5.3 – Irregularidade Longitudinal – Trecho 02 Norte



d) Deflexões: as deflexões baixaram após os serviços de restauração, estando também abaixo das deflexões admissíveis calculadas pelos métodos DNER PRO 269/94 e 011/79, porém não baixando em todos os subtrechos aos níveis esperados conforme o critério estabelecido pelo

método DNER PRO 159/85. A deflectometria levantada antes da restauração mostrou-se mais heterogênea que a levantada após a restauração, com as do antes restauração aproximadamente no limite de confiabilidade, baseado no coeficiente de variação ($CV < 25\%$), conforme Tabela 5.5. Foi constatada uma heterogeneidade muito grande entre as médias das deflectometrias comparando os subtrechos homogêneos, conforme demonstrado na Tabela 5.8.

Os subtrechos homogêneos 1, 2, 4 e 10 apresentam vapores mais altos que os demais subtrechos, muito próximos dos máximos admissíveis, conforme Figura 5.8.

Neste caso pode-se dizer que as intervenções não foram eficientes para a diminuição dos valores das deflexões.

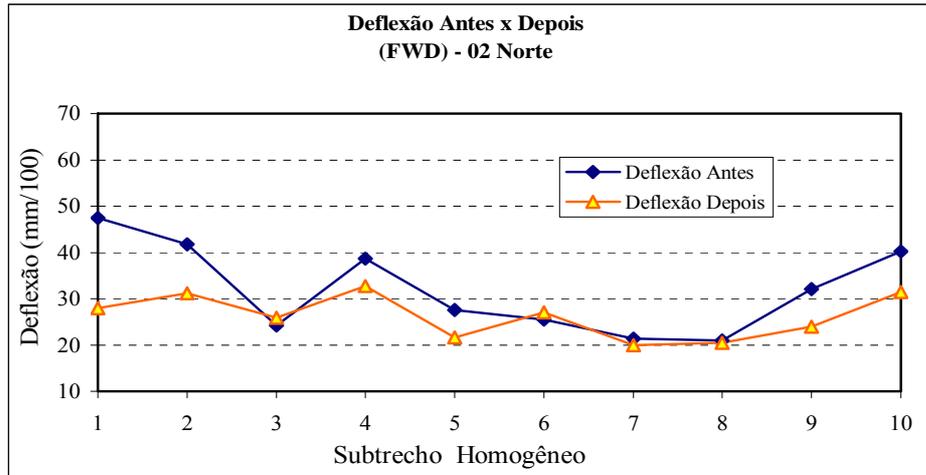
TABELA 5.8 – Comparativo de Deflexões – Trecho 02 Norte

02 NORTE		COMPARATIVO DE DEFLEXÕES ($\text{mm} \times 10^{-2}$)							Variação (%)
Subtrecho	Reforço (cm)	Deflexão Antes (FWD)	Deflexão Antes (VB)	Deflexão Esperada (PRO 159)	Deflexão Depois (FWD)	Dadm PRO 11	Dadm PRO 269	Deflexão Depois (VB)	
1	10,0	47	67	55	28	56	63	45	-19
2	6,0	42	62	53	31	56	63	50	-6
3	4,0	24	37	32	26	56	63	41	26
4	5,0	39	59	51	33	56	63	52	2
5	4,0	28	44	39	22	56	63	29	-25
6	4,0	26	40	35	27	56	63	43	23
7	4,0	21	28	25	20	56	63	21	-16
8	4,0	21	26	23	21	56	63	24	3
9	6,0	32	51	44	24	56	63	36	-17
10	7,0	40	60	51	31	56	63	50	-2
Média									-3
Desvio padrão									17
CV (%)									18

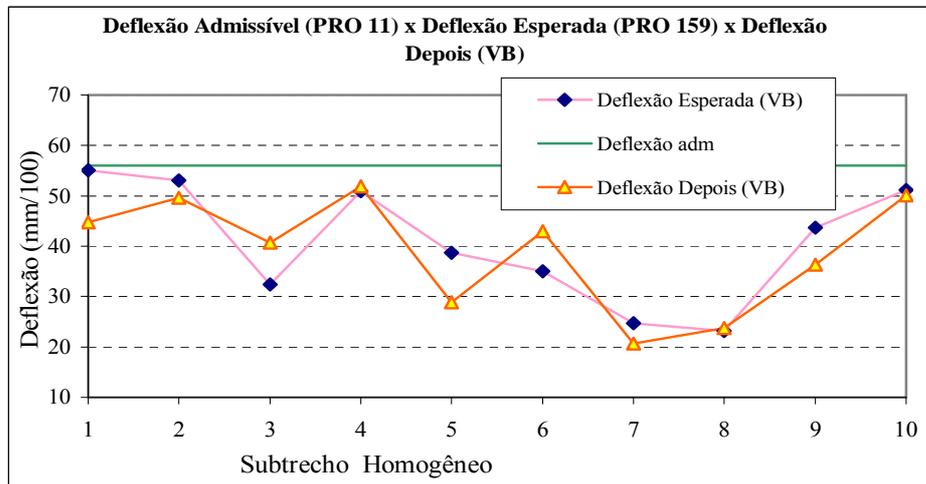
5.1.3 Trecho 03 Norte – PR/323, trecho Warta – Porto Charles Nauffall, km 20,740 ao 26,175 e km 31,000 ao 39,175

5.1.3.1 Características e condições gerais do trecho

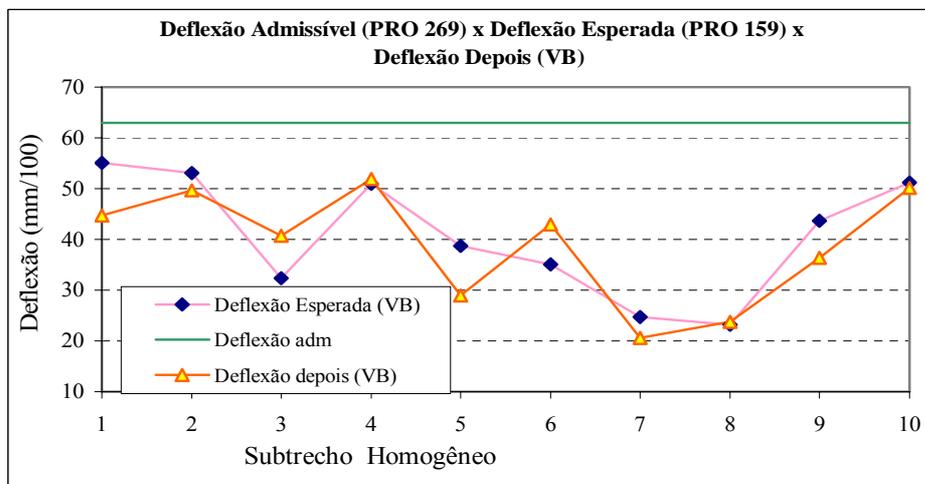
- a) Extensão: 13,61 km (km 20,740 ao km 26,175 e km 31,000 ao km 39,175);
- b) Local de início: Ponte sobre o Rio Tibagi;
- c) Aspectos gerais das condições do pavimento: em vistoria realizada no dia 06-11-2004 constatou-se que os subtrechos com base de solo-cimento, apresentaram trincas nas áreas com afundamentos de trilhas de roda, classificadas de FC-1 a FC-3, com bombeamento e exposição



(a) Antes e Depois da Restauração



(b) Admissível (PRO 11), Esperada (PRO 159) e Depois



(c) Admissível (PRO 269), Esperada (PRO159) e Depois

FIGURA 5.4 – Comparativo de Deflexões – Trecho 02 Norte

de finos oriundos das camadas inferiores. Os subtrechos com base de brita graduada, apresentaram trincas FC-1 e FC-2, em pontos localizados;

d) Problemas específicos: foi constatado, através de análise visual, que as bases de solo-cimento encontram-se trincadas e estas estão refletindo as trincas para o revestimento;

e) Tipo de solos do subleito: Argiloso;

f) Condições de drenagem: sem problemas de drenagem;

g) Tipo e espessura do reforço: em CAUQ, com espessuras variando de 3,5 a 6,2cm, conforme pode ser verificado na Tabela 5.9.

5.1.3.2 Resultados obtidos na análise

a) Retroanálise: Comparativo dos módulos de resiliência.

→ subleito: os módulos obtidos apresentaram valores mais baixos para o programa ELSYM5, de 19 e 380 MPa, comparado com os EVERCALC, de 165,9 a 407 MPa, mas ambos com poucos valores fora dos limites especificados na bibliografia, mas apresentaram similaridade os resultados dos dois programas;

→ base e sub-base: similaridade entre os dois programas nos valores obtidos para a sub-base com elementos do antes restauração, mas sem similaridade após a restauração. Em relação à base os resultados obtidos não foram similares entre os dois métodos, demonstrando ainda grande heterogeneidade de resultados, com módulos variando de 15 a 5.000 MPa, pelo ELSYM5 e variando de 32,1 a 1.615 MPa pelo EVERCALC. A maioria dos valores obtidos foram abaixo da média apontada pela bibliografia, que é de 270 MPa para bases não cimentadas e de 3.000 MPa para bases cimentadas, evidenciando problemas nestas camadas.

→ revestimento antigo: não foi constatada similaridade entre os dois programas, os valores obtidos pelo programa EVERCALC, de 887,3 a 8.000 MPa, foram maiores que os obtidos pelo programa ELSYM5, de 75 a 4.000 MPa, para elementos colhidos antes da restauração, mas ambos muito heterogêneos comparando os valores de subtrecho para subtrecho. Após a restauração os módulos do revestimento antigo aumentaram, ficando no intervalo de 2683,6 a 8.000 MPa pelo EVERCALC e no intervalo de 120 a 4.000 MPa pelo ELSYM5, com resultados mais homogêneos para o EVERCALC e muito heterogêneos pelo ELSYM5 comparando os subtrechos homogêneos.

TABELA 5.9 – Módulos de Resiliência – Trecho 03 Norte

EVERCALC	TRECHO 03 NORTE						MÓDULOS DE RESILIÊNCIA (MPa)					
	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Antigo (cm)	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	REFORÇO	SUBLEITO	
	ANTES	1	28	13	46	32	10,0	887	665	81		407
2		29	16	55	5	10,0	4.720	331			225	
3		18	27	14	7	10,0	8.000	813			260	
4		36	10	28	8	10,0	4.665	200			290	
5		33	13	39	8	10,0	2.757	387	500		180	
6		23	3	11	6	10,0	8.000	552	500		176	
7		37	8	21	6	10,0	4.348	200	224		186	
8		25	7	28	28	10,0	5.566	523			210	
9		22	8	35	8	10,0	8.000	612			194	
10		20	7	35	62	10,0	8.000	1.125			189	
11		34	11	32	29	15,0	2.399	264			166	
12		35	11	32	40	10,0	4.598	160			255	
13		42	10	23	8	10,0	3.321	66			269	
14		39	7	18	26	10,0	3.481	144			281	
DEPOIS	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Novo (cm)	REVEST. NOVO	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO	
	1	23	8	33	16	4,0	701	8.000	581	50	290	
	2	28	9	30	3	6,2	959	8.000	225		206	
	3	22	0	0	3	3,5	1.134	8.000	529		236	
	4	30	5	18	4	4,0	693	8.000	200		221	
	5	28	2	7	4	6,2	1.240	2.684	569	50	194	
	6	19	3	13	3	3,5	1.899	7.252	1.615	50	215	
	7	26	2	9	3	5,5	1.442	8.000	710	50	183	
	8	25	7	29	14	3,5	8.000	1.839	372		215	
	9	20	3	18	4	3,5	8.000	8.000	495		196	
	10	15	6	38	22	5,7	3.387	8.000	1.161		238	
	11	16	5	30	25	3,5	2.704	4.995	313		240	
	12	27	8	30	20	6,2	1.023	8.000	179		255	
	13	41	3	8	4	4,0	500	7.442	32		310	
14	29	9	29	12	6,2	8.000	3.152	62		310		
ELSYM5	ANTES	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Antigo (cm)	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	REFORÇO	SUBLEITO
		1	28	13	46	32	10,0	100	350	130		380
		2	29	16	55	5	10,0	75	1.200			190
		3	18	27	14	7	10,0	800	2.200			220
		4	36	10	28	8	10,0	4.000	150			170
		5	33	13	39	8	10,0	70	1.000	500		150
		6	23	3	11	6	10,0	1.000	1.200	500		155
		7	37	8	21	6	10,0	2.000	200	150		170
		8	25	7	28	28	10,0	200	1.100			180
		9	22	8	35	8	10,0	300	1.800			170
		10	20	7	35	62	10,0	150	5.000			165
		11	34	11	32	29	15,0	150	1.200			154
		12	35	11	32	40	10,0	4.000	120			225
		13	42	10	23	8	10,0	2.500	50			235
	14	39	7	18	26	10,0	2.500	120			235	
	DEPOIS	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Novo (cm)	REVEST. NOVO	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO
		1	23	8	33	16	4,0	3.500	1.300	250	276	276
		2	28	9	30	3	6,2	800	1.900	200		207
		3	22	0	0	3	3,5	3.500	3.500	250		242
		4	30	5	18	4	4,0	500	4.000	140		230
		5	28	2	7	4	6,2	100	4.000	250	190	190
		6	19	3	13	3	3,5	1.200	4.000	900	200	200
		7	26	2	9	3	5,5	2.000	2.500	360	180	180
		8	25	7	29	14	3,5	3.500	120	400		113
		9	20	3	18	4	3,5	3.500	3.500	120		133
		10	15	6	38	22	5,7	2.000	4.000	220		155
		11	16	5	30	25	3,5	1.000	1.500	90		160
		12	27	8	30	20	6,2	500	1.500	57		167
13		41	3	8	4	4,0	500	700	15		180	
14	29	9	29	12	6,2	1.000	1.000	25		19		

→ Revestimento novo: não foi constatada similaridade entre os dois programas, os valores obtidos pelo programa EVERCALC, no intervalo de 500 a 8.000 MPa, foram maiores em relação ao ELSYM5, no intervalo de 100 a 3.500 MPa, mas ambos muito heterogêneos comparando os subtrechos. O programa EVERCALC apresentou módulos com valores acima do limite superior típico constante na bibliografia, que é 5.820 MPa.

b) Vida de fadiga: Os estudos de vida remanescente apontaram os segmentos 3, 4, 8 e 13, pelos modelos de Salomão Pinto e AASHTO, 4, 7 e 13, pelos modelos do Asphalt Institute, como o de vida inferior ao esperado em projeto, conforme a Tabela 5.10.

TABELA 5.10 – Vida de Fadiga – Trecho 03 Norte

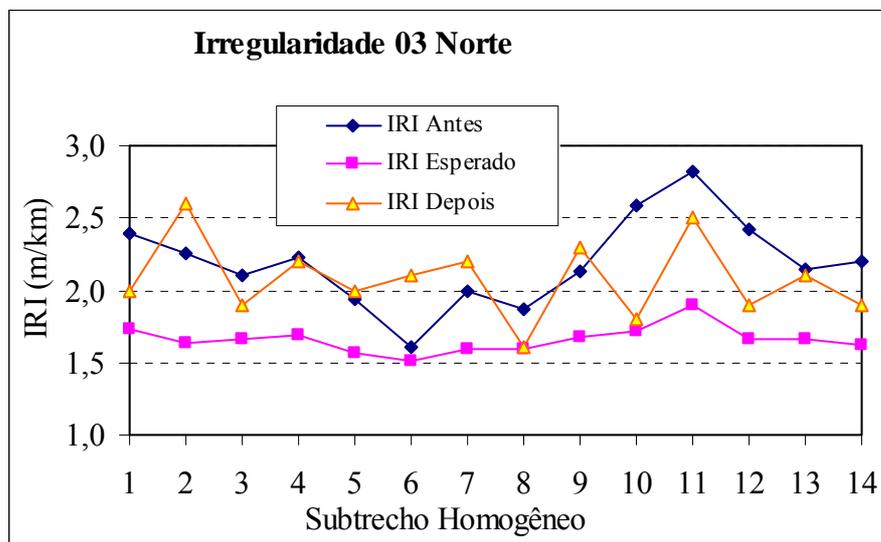
VIDA DE FADIGA	MODELOS					
	Pinto	USACE	AASHTO	De Beer	Asphalt Institute	
	Revestimento	Revestimento	Revestimento	Base cimento	Revestimento	Subleito
03 NORTE	1,20E+07	1,20E+07	4,59E+06	1,20E+07	4,59E+06	4,59E+06
1	5,14E+07	9,90E+07	1,53E+07	1,52E+07	7,33E+06	3,26E+22
2	4,88E+07	1,21E+09	5,05E+07	1,51E+07	5,53E+06	1,84E+07
3	2,62E+05	2,12E+08	2,20E+04	1,51E+07	5,12E+06	1,56E+07
4	1,04E+07	3,54E+09	1,12E+07	1,54E+07	2,82E+06	1,62E+07
5	1,37E+07	1,13E+10	6,20E+07	1,49E+07	1,12E+07	3,26E+22
6	8,56E+07	2,11E+09	7,15E+07	1,32E+07	1,34E+07	3,26E+22
7	9,97E+07	6,49E+08	5,57E+07	1,44E+07	4,57E+06	3,26E+22
8	1,65E+07	2,39E+08	3,73E+06	1,46E+07	5,09E+07	3,52E+07
9	3,47E+08	6,55E+08	1,62E+08	1,49E+07	1,32E+07	6,27E+08
10	8,18E+08	3,49E+09	7,54E+08	1,52E+07	4,98E+07	1,05E+08
11	2,02E+10	6,40E+09	7,19E+10	1,55E+07	1,48E+09	3,35E+08
12	4,42E+07	6,13E+09	6,65E+07		5,15E+06	9,33E+06
13	9,45E+06	2,68E+09	9,88E+06		1,37E+06	2,25E+08
14	5,68E+07	2,20E+09	5,03E+07		4,84E+08	7,02E+07

c) Irregularidade longitudinal: Os serviços de restauração melhoraram a irregularidade em alguns subtrechos e pioraram em outros, conforme pode visto na Tabela 5.11, mostrando valores muito heterogêneos para os subtrechos, conforme verificados pelos CV na Figura 5.5. Apenas dois subtrechos atenderam ao esperado na projeção realizada pelo método DNER PRO 159/85, podendo-se dizer que eficiência do reforço em relação à irregularidade longitudinal foi muito baixa.

TABELA 5.11 – Comparativo de Irregularidades – Trecho 03 Norte

03 NORTE		Comparativo de Irregularidades						
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Espessura do Reforço (cm)	IRI Antes (m/km)	IRI Esperado (m/km)	IRI Depois (m/km)	Varição (%)
1	20,740	22,350	1.610	4,0	2,4	1,7	2,0	15
2	22,350	22,650	300	6,2	2,3	1,6	2,6	60
3	22,650	22,950	300	3,5	2,1	1,7	1,9	14
4	22,950	23,350	400	4,0	2,2	1,7	2,2	30
5	23,350	23,750	400	6,2	1,9	1,6	2,0	28
6	23,750	24,050	300	3,5	1,6	1,5	2,1	39
7	24,050	24,350	300	5,5	2,0	1,6	2,2	39
8	24,350	25,750	1.400	3,5	1,9	1,6	1,6	1
9	25,750	26,175	425	3,5	2,1	1,7	2,3	37
10	31,000	34,100	3.100	5,7	2,6	1,7	1,8	5
11	34,100	35,600	1.500	3,5	2,8	1,9	2,5	32
12	35,600	37,600	2.000	6,2	2,4	1,7	1,9	14
13	37,600	38,000	400	4,0	2,2	1,7	2,1	26
14	38,000	39,175	1.175	6,2	2,2	1,6	1,9	17
Média								26
Desvio padrão								16
CV (%)								13

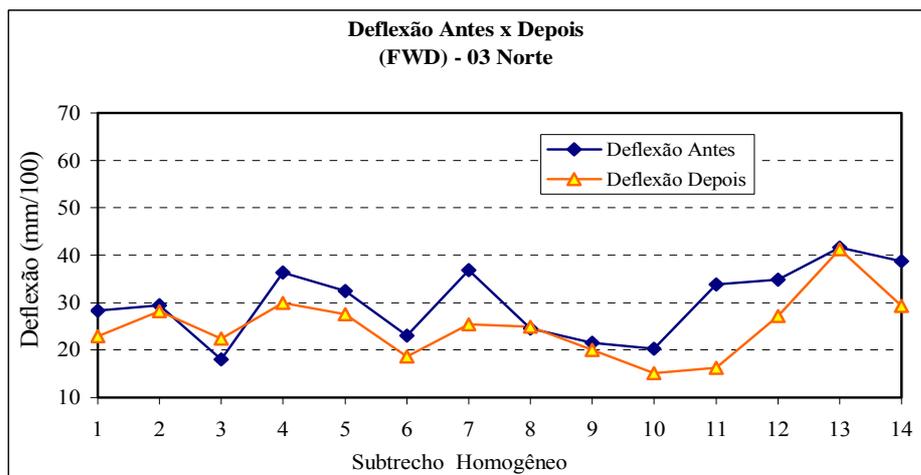
FIGURA 5.5 – Irregularidade Longitudinal – Trecho 03 Norte



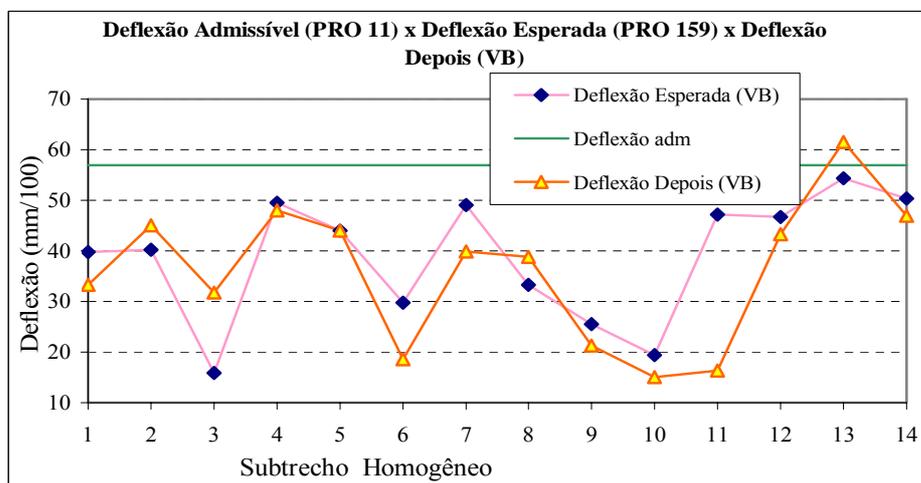
d) Deflexões: Os subtrechos com base de solo-cimento, 1 a 11, apresentaram deflexões muito altas em comparação com a média típica para este material, no máximo 20 mm/100. As deflexões encontraram-se maiores, que o esperado nas projeções realizadas pelo método DNER PRO 159/85, nos segmentos mais trincados e nas bases com brita graduada, nos segmentos não trincados, ou com intensidade pequena, apresentaram conforme o esperado, conforme demonstrado na Tabela 5.12 e Figura 5.6, estando o subtrecho 13 com deflexão muito alta. As deflexões apresentaram heterogeneidade, com os coeficientes de variação muito altos, acima de 25%, nos levantamentos realizados antes da restauração. As deflexões passaram a serem mais homogêneas, ocorrendo uma substancial redução no CV após a restauração. Este segmento deverá receber intervenção em breve de remendos de capa e remendos profundos de base, devido ao elevado grau de trincamento constatado. Pode-se afirmar que as intervenções de restauração não foram eficientes para baixar as deflexões.

TABELA 5.12 – Comparativo de Deflexões – Trecho 03 Norte

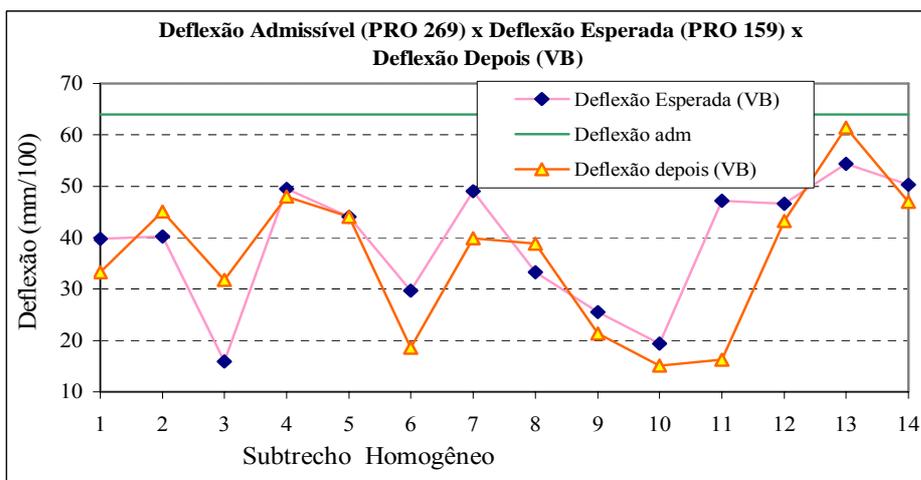
03 NORTE		COMPARATIVO DE DEFLEXÕES (mm x 10 ⁻²)							Variação (%)
Subtrecho	Reforço (cm)	Deflexão Antes (FWD)	Deflexão Antes (VB)	Deflexão Esperada (PRO 159)	Deflexão Depois (FWD)	Dadm PRO 11	Dadm PRO 269	Deflexão Depois (VB)	
1	4,0	28	45	40	23	57	64	33	-16
2	6,2	29	47	40	28	57	64	45	12
3	3,5	18	18	16	22	57	64	32	100
4	4,0	36	56	50	30	57	64	48	-3
5	6,2	33	52	44	28	57	64	44	0
6	3,5	23	34	30	19	57	64	19	-37
7	5,5	37	57	49	26	57	64	40	-19
8	3,5	25	38	33	25	57	64	39	17
9	3,5	22	29	26	20	57	64	21	-16
10	5,7	20	23	19	15	57	64	15	-22
11	3,5	34	53	47	16	57	64	16	-65
12	6,2	35	55	47	27	57	64	43	-7
13	4,0	42	62	54	41	57	64	61	13
14	6,2	39	59	50	29	57	64	47	-7
Média									-4
Desvio padrão									37
CV (%)									38



(a) Antes e Depois da Restauração



(b) Admissível (PRO 11), Esperada (PRO 159) e Depois



(c) Admissível (PRO 269), Esperada (PRO159) e Depois

FIGURA 5.6 – Comparativo de Deflexões – Trecho 03 Norte

5.1.4 Trecho 04 Norte, Rodovia PR/323, trecho Warta – Porto Charles Nauffall, km 26,175 ao 31,000

5.1.4.1 Características e condições gerais do trecho

- a) Extensão: 3,825 km (km 26,175 ao km 31,000);
- b) Local de início: km 26,125 (sem ponto característico);
- c) Aspectos gerais e condições do pavimento: apresentava-se em bom estado de conservação;
- d) Problemas específicos: sem problemas aparentes, que possam comprometer a durabilidade das intervenções realizadas. Foi constatado a existência de remendos de pouca intensidade em pontos localizados em todo o trecho.
- e) Tipo de solos do subleito: argiloso;
- f) Condições da drenagem: não apresenta problemas de drenagem;
- g) Tipo e espessura do reforço: em CAUQ, com espessura de 5,2 cm, com base reciclada com adição de cimento e espuma de asfalto, conforme pode ser visto na Tabela 5.13.

TABELA 5.13 – Módulos de Resiliência – Trecho 04 Norte

		TRECHO 04 NORTE					MÓDULOS DE RESILIENCIA (MPa)					
		Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Antigo (cm)	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	REFORÇO	SUBLEITO
EVERCALC	ANTES	1	44	12	29	42	10,0	4.646	121			171
		2	43	13	30	40	12,0	2.202	124			216
		3	35	12	32	14	10,0	1.982	300			206
	DEPOIS	1	27	6	23	36	5,2	8.000	1.001	77		257
		2	23	5	19	32	5,2	780	3.688	63		302
		3	24	4	16	15	5,2	8.000	922	156		276
ELSYM5	ANTES	1	44	12	29	42	10,0	4.000	100			150
		2	43	13	30	40	12,0	900	130			180
		3	35	12	32	14	10,0	100	550			170
	DEPOIS	1	27	6	23	36	5,2	3.000	330	18		190
		2	23	5	19	32	5,2	3.000	330	45		190
		3	24	4	16	15	5,2	3.000	330	27		190

5.1.4.2 Resultados obtidos na análise

a) Retroanálise: Comparativo dos módulos de resiliência:

→ subleito: os módulos do subleito aumentaram após os serviços de restauração pelos resultados dos dois programas computacionais, pelo programa EVERCALC estava em torno de 200 MPa e passou para 270 MPa, pelo ELSYM5 de 170 MPa passou para 190 MPa, mas ambos dentro da média usual apresentada na bibliografia;

→ Base e sub-base: os módulos apresentados pelos valores do antes restauração comprovaram a necessidade da reconstrução do trecho, estavam no limite inferior apontado pela bibliografia para bases de brita graduada, de 100 e 130 MPa, e 550 MPa para base de solo-cimento. Após os serviços de restauração a nova base reciclada com adição de cimento e espuma de asfalto mostrou resultados idênticos pelo programa ELSYM5, 330 MPa e diferentes pelo EVERCALC, 921,9, 1.000,5 e 3.688,2 MPa. O principal problema apontado pelos módulos foi em relação à camada inferior a reciclada, com módulos muito baixo, pelo ELSYM5 de 18 a 45 MPa, pelo EVERCALC de 63,2 a 156,3 MPa, evidenciando poder comprometer a estrutura.

→ Revestimento antigo: não foi constatada similaridade entre os programas computacionais, variando de 1.982 a 4.646,4 MPa pelo EVERCALC e de 100 a 4.000 MPa pelo ELSYM5, mostrando módulos abaixo da média típica para os subtrechos 2 e 3, comprovando a necessidade da intervenção realizada.

→ Revestimento novo: módulos altos pelos dois programas computacionais comparando-se os resultados obtidos por ambos, com exceção do subtrecho 2 pelo programa EVERCALC, que apresentou módulo de 780 MPa, muito baixo, mas foi constatado que o módulo da base reciclada neste subtrecho foi muito alto, 3.688,1 MPa, onde concluímos que ocorreu uma transferência de valores, o módulo da base muito alto gerou um módulo baixo para o revestimento, para enquadrar a bacia fornecida, que foi gerada pela média dos valores, podendo ter ocorrido erro neste caso.

b) Vida de fadiga: Os estudos de vida remanescente indicaram o subtrecho 2, pelos modelos de Salomão Pinto e AASHTO, e 1 e 2 pelos modelos do Asphalt Institute, como de vida inferior à estimada em projeto, conforme o contido na tabela 5.14.

TABELA 5.14 – Vida de Fadiga – Trecho 04 Norte

VIDA DE FADIGA	MODELOS					
	Pinto	USACE	AASHTO	De Beer	Asphalt Institute	
	Revestimento	Revestimento	Revestimento	Base cimento	Revestimento	Subleito
04 NORTE	$1,32E+07$	$1,32E+07$	$5,18E+06$	$1,32E+07$	$5,18E+06$	$5,18E+06$
1	$4,64E+07$	$6,19E+09$	$1,53E+07$	$1,33E+07$	$4,97E+06$	$4,75E+05$
2	$9,65E+04$	$8,63E+09$	$7,37E+03$	$1,38E+07$	$6,18E+06$	$9,80E+05$
3	$4,52E+07$	$2,00E+08$	$1,49E+07$	$1,36E+07$	$1,12E+08$	$1,32E+08$

c) Irregularidade longitudinal: Melhorou após a execução dos serviços, conforme mostram a Tabela 5.15 e Figura 5.7, não apresentado valores esperados pelo DNER PRO 159/85, pois os serviços foram de reciclagem, ocorrendo a eliminação do IRI anterior à restauração. Neste caso pode-se dizer que os serviços de restauração foram eficientes para baixar a irregularidade longitudinal.

TABELA 5.15 – Comparativo de Irregularidades – Trecho 04 Norte

04 NORTE	Comparativo de Irregularidades						
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Espessura do Reforço (cm)	IRI Antes (m/km)	IRI Esperado (m/km)	IRI Depois (m/km)
1	26,175	28,225	2.050	5,2	2,4		1,6
2	28,225	30,275	2.050	5,2	2,6		1,7
3	30,275	31,000	725	5,2	2,3		2,0

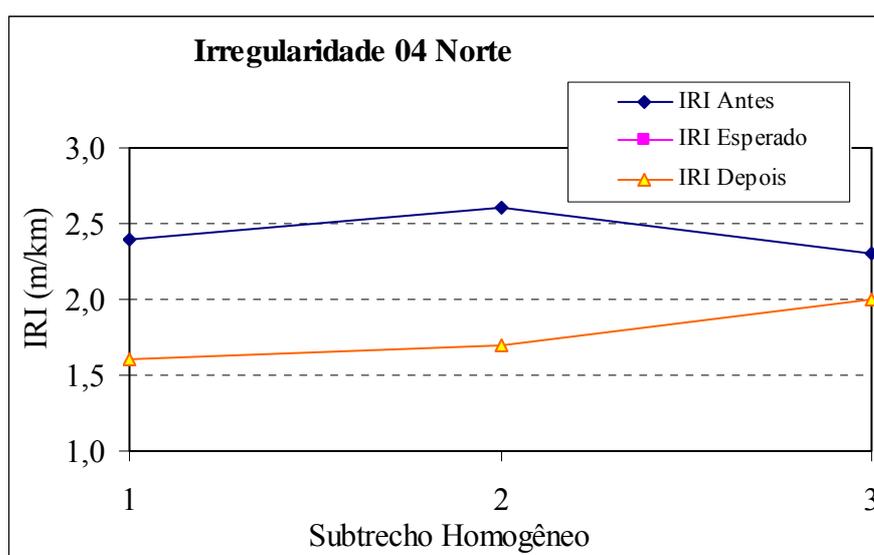


FIGURA 5.7 – Irregularidade Longitudinal – Trecho Norte 04

d) Deflexões: Baixaram após a execução dos serviços de restauração, estando abaixo das deflexões admissíveis conforme pode ser verificado na Tabela 5.16 e Figura 5.8. As deflexões após a restauração apresentaram-se mais homogêneas, dentro do intervalo de confiabilidade, com $CV < 25\%$. Pode-se afirmar que as intervenções de restauração com reciclagem e adição de espuma de asfalto foram eficientes, baixando os valores das deflexões.

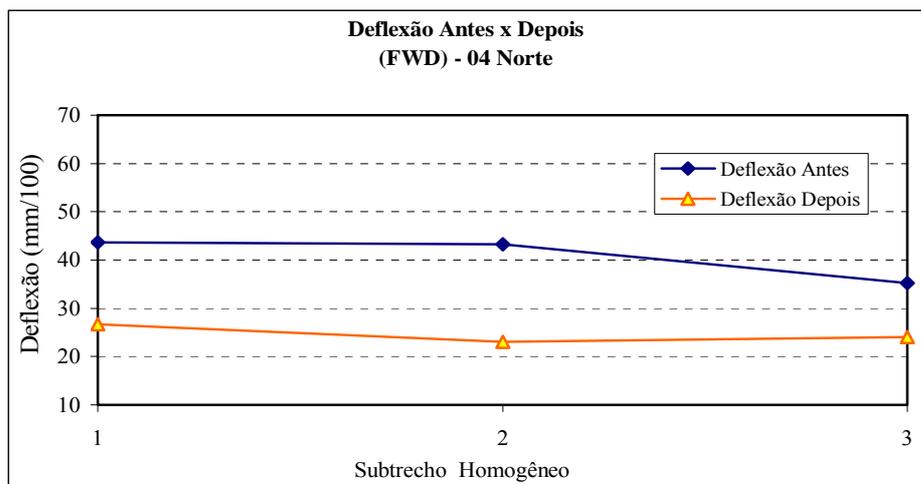
TABELA 5.16 – Comparativo de Deflexões – Trecho 04 Norte

04 NORTE		COMPARATIVO DE DEFLEXÕES (mm x 10 ⁻²)						
Subtrecho	Reforço (cm)	Deflexão Antes (FWD)	Deflexão Antes (VB)	Deflexão Esperada (PRO 159)	Deflexão Depois (FWD)	Dadm PRO 11	Dadm PRO 269	Deflexão Depois (VB)
1	5,2	44	64		27	57	64	42
2	5,2	43	63		23	57	64	34
3	5,2	35	55		24	57	64	37

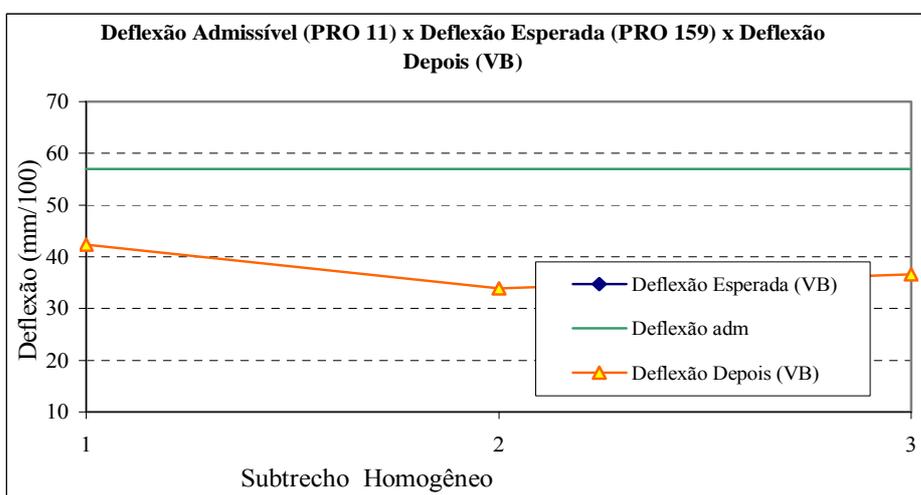
5.1.5 Trecho 01 Sul – Rodovia BR/277, trecho São Luiz do Purunã - Palmeira

5.1.5.1 Características e condições gerais do trecho

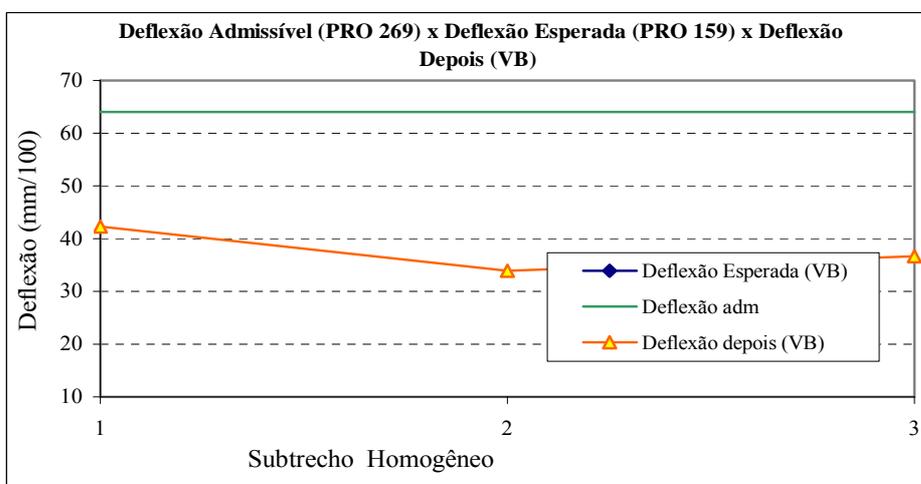
- a) Extensão: 3,948 km (km 140,042 ao km 143,990);
- b) Local de início: trevo do Sprea (interseção BR-277 com BR-376);
- c) Aspectos gerais das condições do pavimento: apresentava-se em bom estado de conservação;
- d) Problemas específicos: trecho com declividade acentuada, apresentando afundamento de trilha de roda na faixa ascendente, o segmento compreendido entre o km 140+120 ao km 140+700 subtrecho 1, lado esquerdo, refere-se a acesso a posto de combustíveis e trevo da BR-277 com BR-376;
- e) Tipo de solos do subleito: arenoso e argiloso;
- f) Condições de drenagem: boas condições de drenagem;
- g) Tipo e espessura do reforço: em CAUQ, com espessuras variando de 6,0 a 7,0 cm, conforme pode ser visto na Tabela 5.17.



(a) Antes e Depois da Restauração



(b) Admissível (PRO 11), Esperada (PRO 159) e Depois



(c) Admissível (PRO 269), Esperada (PRO159) e Depois

FIGURA 5.8 – Comparativo de Deflexões – Trecho 04 Norte

5.1.5.2 Resultados obtidos na análise

a) Retroanálise: Comparativo dos módulos de resiliência:

→ subleito: os dois programas computacionais apresentam módulos similares variando de 116 a 310 MPa, sendo este último o único módulo fora do intervalo de variação apresentado pela bibliografia, que é de 80 a 270 MPa;

→ base e sub-base: foi constatada similaridade no intervalo dos módulos obtidos em ambos os programas computacionais, de 35 a 800 MPa, com alguns módulos muito baixos antes dos serviços de restauração, com melhorias após as intervenções, cujos valores mínimos para a base foram de 95 MPa, abaixo do limite mínimo apontado pela bibliografia;

→ revestimento antigo: o programa EVERCALC apresentou valores maiores comparados ao ELSYM5, com variação após os serviços de restauração nos módulos dos subtrechos individuais por ambos programas, de modo geral os valores baixaram, apresentaram módulos abaixo do limite mínimo apontado pela bibliografia, no intervalo de 64,2 a 900 MPa;

→ revestimento novo: não foi constatada nenhuma similaridade entre os resultados obtidos pelos programas computacionais, com o EVERCALC fornecendo valores maiores que o ELSYM5, de 770,4 a 8.000 MPa para o EVERCALC, contra 100 a 4.000 MPa pelo ELSYM5, a Tabela 5.17 mostra os valores citados acima;

b) Vida de fadiga: O estudo da vida remanescente apresentou o trecho com muitos problemas, com os subtrechos 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10, pelos modelos de Salomão Pinto e AASHTO, e subtrechos 1, 4, 6, 8, e 10, pelos modelos do Asphalt Institute, não atendendo a expectativa de vida apontada nos projetos, conforme o demonstrado na tabela 5.18.

c) Irregularidade longitudinal: O subtrecho 5 piorou em relação à irregularidade após os serviços de restauração, verificou-se serviços de correção, com fresagem e novo revestimento, evidenciando problema localizado, tendo ocorrido escorregamento do CAUQ, os demais subtrechos melhoraram, mas não atenderam ao esperado pelo critério do método DNER PRO 159/85, conforme mostram a Tabela 5.19 e figura 5.9. Pode-se afirmar que as intervenções de restauração não foram eficientes em relação à melhoria da irregularidade longitudinal.

TABELA 5.17 - Módulos de Resiliência – Trecho 01 Sul

		TRECHO 01 SUL					MÓDULOS DE RESILIÊNCIA (MPa)					
		Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Antigo (cm)	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	REFORÇO	SUBLEITO
EVERCALC	ANTES	1	53	17	34	6	11,0	4.026	67	500	500	142
		2	23	5	23	2	11,0	8.000	500	283	0	180
		3	32	9	29	4	11,0	8.000	139	50	429	184
		4	32	11	35	9	15,0	2.418	96			148
		5	25	4	14	5	15,0	4.146	381			172
		6	47	18	39	4	15,0	1.804	119			135
		7	29	10	35	5	15,0	3.589	70	500	2.000	261
		8	31	14	47	2	14,0	3.794	50	271		256
		9	44	15	34	2	14,0	3.849	40			231
		10	54	0	1	2	14,0	2.569	42	69		339
	DEPOIS	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Novo (cm)	REVEST. NOVO	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO
		1	31	4	12	11	7,0	3.931	64	500	500	138
		2	28	8	29	5	6,5	8.000	1.901	500	129	188
		3	24	8	31	5	6,5	1.214	8.000	500	141	196
		4	31	8	28	1	6,5	770	5.820	159		175
		5	25	9	38	5	6,5	835	8.000	153		194
		6	32	5	15	8	6,5	1.302	4.163	99		161
		7	26	10	36	8	6,0	4.009	1.621	460	50	200
		8	36	4	10	3	7,0	8.000	546	322	119	192
		9	32	9	27	4	7,0	5.251	1.452	117		194
10	30	9	27	4	6,0	8.000	729	395	68	225		
ELSYM5	ANTES	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Antigo (cm)	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	REFORÇO	SUBLEITO
		1	53	17	34	6	11,0	2.700	80	155	165	140
		2	23	5	23	2	11,0	5.000	500	250		173
		3	32	9	29	4	11,0	4.200	170	280	150	173
		4	32	11	35	9	15,0	1.600	300			120
		5	25	4	14	5	15,0	2.700	395			150
		6	47	18	39	4	15,0	1.000	132			116
		7	29	10	35	5	15,0	1.800	150	170	235	237
		8	31	14	47	2	14,0	3.000	95	150		234
		9	44	15	34	2	14,0	3.000	35			235
	10	54	0	1	2	14,0	2.200	34	70		310	
	DEPOIS	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Novo (cm)	REVEST. NOVO	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO
		1	31	4	12	11	7,0	900	900	240	170	145
		2	28	8	29	5	6,5	1.100	1.200	650	145	145
		3	24	8	31	5	6,5	500	1.800	300	200	200
		4	31	8	28	1	6,5	4.000	200	700		147
		5	25	9	38	5	6,5	3.000	400	800		150
		6	32	5	15	8	6,5	3.500	450	250		133
		7	26	10	36	8	6,0	800	800	400	100	190
		8	36	4	10	3	7,0	700	700	100	177	177
9		32	9	27	4	7,0	100	3.500	95		185	
10	30	9	27	4	6,0	100	3.500	95	185	185		

TABELA 5.18 – Vida de Fadiga – Trecho 01 Sul

VIDA DE FADIGA	MODELOS				
	Pinto	USACE	AASHTO	Asphalt Institute	
	Revestimento	Revestimento	Revestimento	Revestimento	Subleito
01 SUL	2,49E+07	2,49E+07	1,40E+07	1,40E+07	1,40E+07
1	2,12E+07	4,73E+09	1,62E+07	1,26E+04	3,26E+22
2	2,92E+07	4,42E+08	2,03E+07	1,34E+07	8,78E+08
3	3,40E+07	1,87E+09	4,82E+07	1,00E+07	3,26E+22
4	6,33E+06	6,46E+07	1,02E+06	9,91E+06	1,16E+08
5	2,86E+07	3,62E+10	8,41E+06	1,43E+07	1,03E+08
6	2,12E+07	6,86E+08	5,09E+06	8,80E+06	1,08E+08
7	1,23E+07	4,63E+08	8,99E+06	1,66E+09	2,84E+07
8	9,59E+06	5,30E+08	7,54E+06	3,29E+05	7,74E+08
9	1,16E+07	1,61E+10	5,02E+07	2,24E+07	4,59E+07
10	1,23E+07	1,60E+10	5,41E+07	8,25E+05	3,26E+22

TABELA 5.19 – Comparativo de Irregularidades – Trecho 01 Sul

01 SUL		Comparativo de Irregularidades						
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Espessura do Reforço (cm)	IRI Antes (m/km)	IRI Esperado (m/km)	IRI Depois (m/km)	Varição (%)
1	140,120	140,740	620	7,0	2,2	1,6	1,8	12
2	140,740	141,000	260	6,5	2,2	1,6	1,8	12
3	141,000	141,300	300	6,5	2,6	1,7	1,8	6
4	141,300	142,200	900	6,5	2,5	1,7	1,8	8
5	142,200	142,600	400	6,5	2,2	1,6	2,8	74
6	142,600	143,000	400	6,5	2,2	1,6	1,9	18
7	143,000	143,500	500	6,0	2,2	1,6	1,8	11
8	143,500	143,700	200	7,0	2,1	1,6	1,9	20
9	143,700	143,900	200	7,0	2,5	1,7	1,9	14
10	143,900	144,000	100	6,0	2,7	1,7	1,8	4
							Média	18
							Desvio padrão	20
							CV (%)	13

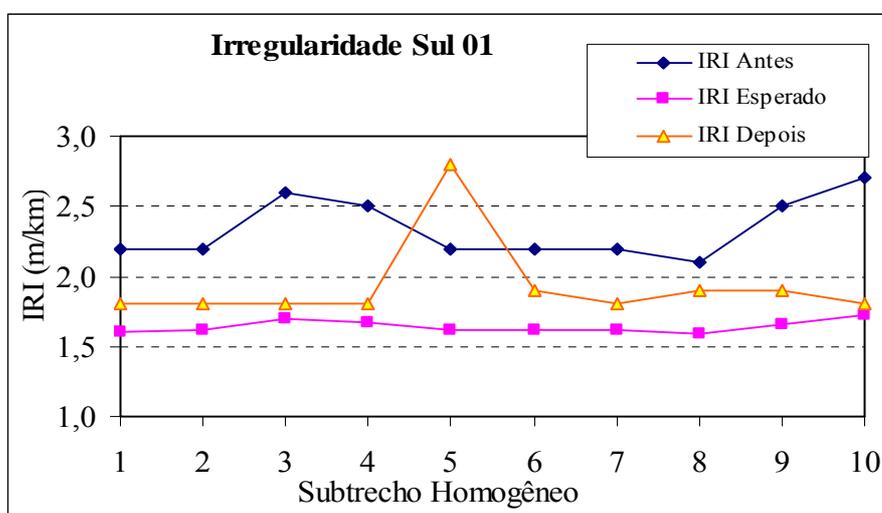


FIGURA 5.9 – Irregularidade Longitudinal – Trecho Sul 01

d) Deflexões: Com a restauração a defletometria ficou mais homogênea, estando porém muito próxima da admissível, conforme demonstrado na Tabela 5.20 e Figura 5.10, com os subtrechos 6 e 9 não atendendo ao limite máximo estabelecido pelos DNER PRO 11/79, e o subtrecho 8 não atendendo aos DNER PRO 11/79 e DNER PRO 269/94. Este trecho apresentou

TABELA 5.20 – Comparativo de Deflexões – Trecho 01 Sul

01 SUL		COMPARATIVO DE DEFLEXÕES (mm x 10 ⁻²)							Variação (%)
Subtrecho	Reforço (cm)	Deflexão Antes (FWD)	Deflexão Antes (VB)	Deflexão Esperada (PRO 159)	Deflexão Depois (FWD)	Dadm PRO 11	Dadm PRO 269	Deflexão Depois (VB)	
1	7,0	53	71	60	31	49	55	49	-18
2	6,5	23	34	29	28	49	55	45	53
3	6,5	32	51	44	24	49	55	37	-15
4	6,5	32	51	43	31	49	55	49	13
5	6,5	25	39	33	25	49	55	39	18
6	6,5	47	66	56	32	49	55	51	-10
7	6,0	29	47	40	26	49	55	40	0
8	7,0	31	50	42	36	49	55	56	34
9	7,0	44	64	54	32	49	55	51	-6
10	6,0	54	72	61	30	49	55	49	-21
Média									5
Desvio padrão									24
CV (%)									23

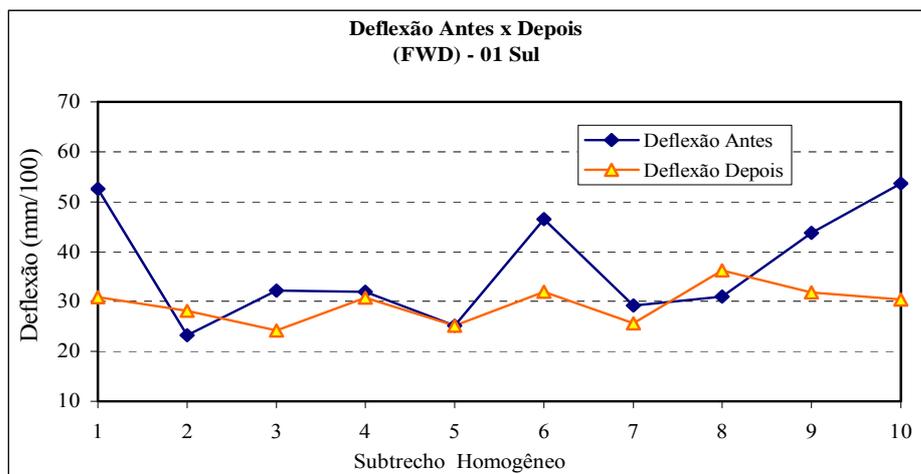
problemas de afundamento de trilha de rodas, verificado em inspeção realizada no dia 03-11-2.003, já recebeu intervenção de fresagem e recape. As análises levaram a constatação que o CAUQ não suportou a carga a ele imposta, podendo ser problema do CAP, do agregado, da fabricação ou aplicação da massa asfáltica. Pode-se afirmar que os serviços executados não foram eficientes para baixar as deflexões.

5.1.6 Trecho 02 Sul – Rodovia BR/277, trecho Relógio - Guarapuava

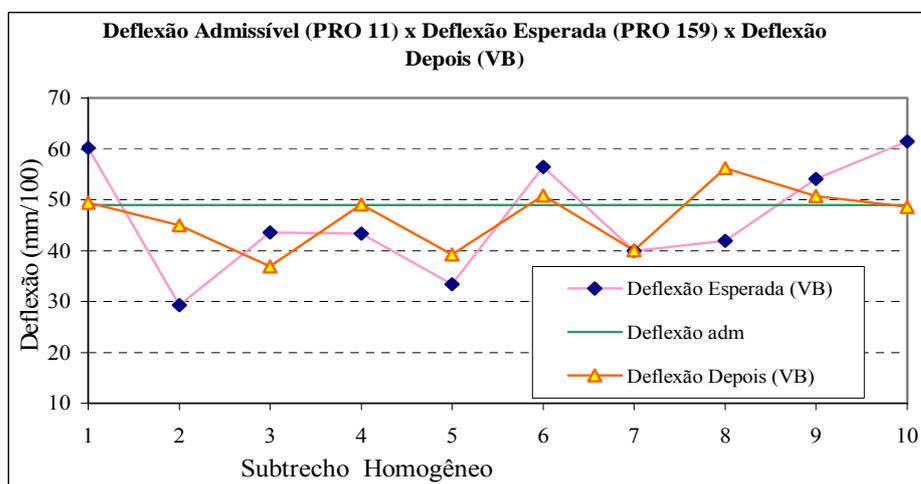
5.1.6.1 Características e condições gerais

a) Extensão: 5,398 km (km 338,611 ao km 344,009);

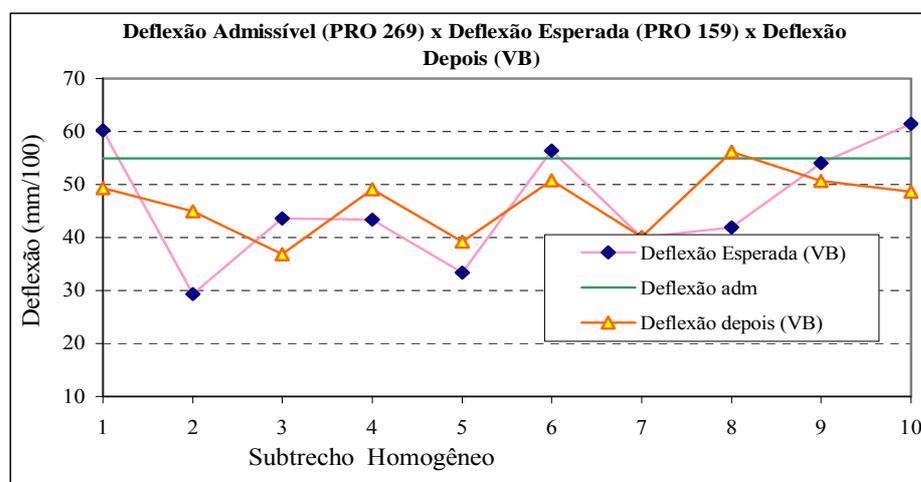
b) Local de início: km 338,611, não apresentando ponto característico, tendo como ponto de término o trevo principal de acesso a cidade de Guarapuava;



(a) Antes e Depois da Restauração



(b) Admissível (PRO 11), Esperada (PRO 159) e Depois



(c) Admissível (PRO 269), Esperada (PRO159) e Depois

FIGURA 5.10 – Comparativo de Deflexões – Trecho 01 Sul

c) Aspectos gerais da condição do pavimento: apresentava-se em bom estado de conservação;

d) Problemas específicos: os subtrechos estão situados em área urbana, com acesso a pontos comerciais, postos de gasolina com alta incidência de tráfego pesado e trevo de acesso a cidade de Guarapuava, verificado em inspeção realizada no dia 04-11-2.003;

e) Tipo de solos do subleito: argiloso;

f) Condições de drenagem: não apresentou problemas de drenagem;

g) Tipo e espessura do reforço: micro concreto asfáltico com polímero SBS, em duas camadas de 0,7 cm de espessura cada.

5.1.6.2 Resultados obtidos na análise

a) Retroanálise: Comparativo dos módulos de resiliência:

→ subleito: similaridade entre os módulos obtidos por ambos programas computacionais, com intervalo entre 103 e 209,1 MPa, dentro dos limites apontados na bibliografia;

→ base e sub-base: os módulos obtidos entre os programas não foram similares, o EVERCALC apresentou módulos maiores para a base em relação ao ELSYM5, enquanto que o ELSYM5 apresentou módulos maiores para a sub-base. Ambos programas apresentaram módulos acima do limite superior contido na bibliografia, com valor de 2.764,2 MPa pelo EVERCALC e 1.400 MPa pelo ELSYM5. Os valores dos módulos obtidos após os serviços de restauração foram diferentes dos obtidos antes dos serviços de restauração;

→ revestimento velho: os módulos obtidos pelo programa EVERCALC foram maiores que pelo programa ELSYM5, com o EVERCALC na faixa de 7.000 a 8.000 MPa e o ELSYM5 entre 3.500 e 5.500 MPa. Os valores do EVERCALC encontraram-se acima do limite superior apontado pela bibliografia;

→ revestimento novo: não pode-se considerar a aplicação de duas camadas de micro concreto asfáltico como reforço, mas sim como selagem e rejuvenescimento. Mesmo assim foram executadas retroanálises, considerando como uma camada fina, sendo os resultados obtidos similares aos módulos do revestimento antigo, em ambos programas. A Tabela 5.21 mostra os valores obtidos.

TABELA 5.21 – Módulos de Resiliência – Trecho 02 Sul

		TRECHO 02 SUL					MÓDULOS DE RESILIÊNCIA (MPa)					
		Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Antigo (cm)	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	REFORÇO	SUBLEITO
EVERCALC	ANTES	1	28	9	35	12	8,0	8.000	1.041	64	500	114
		2	18	4	21	10	12,0	8.000	1.139	423		125
		3	20	6	32	10	10,0	8.000	1.074	251		131
		4	28	8	30	10	11,0	7.469	500	55	500	104
		5	18	2	11	4	19,0	6.003	500	500		138
		6	25	9	37	9	13,0	4.528	300			141
	DEPOIS	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Novo (cm)	REVEST. NOVO	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO
		1	21	6	30	21	1,4	8.000	5.521	2.764	53	189
		2	17	4	24	15	1,4	8.000	8.000	1.538	50	209
		3	16	5	33	16	1,4	8.000	8.000	1.869	50	204
		4	23	6	25	17	1,4	7.996	8.000	615	50	179
		5	18	5	30	8	1,4	2.027	7.867	934	50	187
6	23	10	45	14	1,4	8.000	8.000	277		170		
ELSYM5	ANTES	1	28	9	35	12	8,0	4.500	500	300	250	110
		2	18	4	21	10	12,0	4.000	1.100	450		120
		3	20	6	32	10	10,0	3.700	800	380		122
		4	28	8	30	10	11,0	4.000	350	130	350	103
		5	18	2	11	4	19,0	5.000	600	300		133
		6	25	9	37	9	13,0	5.500	300			116
	DEPOIS	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Novo (cm)	REVEST. NOVO	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO
		1	21	6	30	21	1,4	3.500	3.900	1.400	280	167
		2	17	4	24	15	1,4	3.500	3.900	1.000	180	180
		3	16	5	33	16	1,4	3.500	3.900	1.330	170	190
		4	23	6	25	17	1,4	5.000	4.500	400	170	170
		5	18	5	30	8	1,4	3.500	4.000	650	160	160
6	23	10	45	14	1,4	3.500	4.000	290		172		

b) Vida de fadiga: O estudo de vida remanescente apresentou apenas o subtrecho 6 , pelo modelo da ASSHTO, e o subtrecho 4 pelo modelo da USACE, como de vida inferior a de projeto, sendo que pelo modelo do Asphalt Institute, todos os subtrechos não atenderam a vida de fadiga, conforme a Tabela 5.22.

TABELA 5.22 – Vida de Fadiga – Trecho 02 Sul

VIDA DE FADIGA	MODELOS				
	Pinto	USACE	AASHTO	Asphalt Institute	
	Revestimento	Revestimento	Revestimento	Revestimento	Subleito
02 SUL	2,86E+07	2,86E+07	1,55E+07	1,55E+07	1,55E+07
1	5,43E+07	1,61E+08	1,63E+07	2,73E+06	3,26E+22
2	8,19E+07	2,41E+08	2,71E+07	5,49E+06	2,09E+09
3	9,83E+07	2,96E+08	3,40E+07	6,04E+06	6,76E+08
4	4,30E+07	1,23E+05	9,03E+06	1,71E+06	1,22E+08
5	9,44E+07	2,56E+08	3,23E+07	1,28E+07	9,63E+08
6	3,18E+07	9,12E+07	8,42E+06	1,61E+06	2,97E+08

c) Irregularidade longitudinal: Ficou pior após os serviços de restauração, tendo como ponto crítico os segmentos 5 e 6, devido ao tráfego urbano, acesso a postos de combustíveis e o trevo principal de acesso a cidade de Guarapuava, evidenciando em muito o efeito de frenagem e aceleração do tráfego pesado, apresentando afundamento de trilha de roda, como pode ser visto na Tabela 5.23 e Figura 5.11. Nenhum subtrecho atendeu ao esperado pelo critério do método DNER PRO 159/85, podendo-se afirmar que as intervenções não foram eficientes para baixar a irregularidade longitudinal.

TABELA 5.23 – Comparativo de Irregularidades – Trecho 02 Sul

02 SUL	Comparativo de Irregularidades								
	Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Espessura do Reforço (cm)	IRI Antes (m/km)	IRI Esperado (m/km)	IRI Depois (m/km)	Varição (%)
	1	338,600	339,800	1.200	1,4	1,9	1,7	2,0	18
	2	339,800	340,700	900	1,4	1,6	1,5	1,7	11
	3	340,700	341,700	1.000	1,4	1,8	1,6	1,9	15
	4	341,700	342,700	1.000	1,4	2,0	1,8	2,0	14
	5	342,700	343,200	500	1,4	2,2	1,9	2,4	29
	6	343,200	344,000	800	1,4	2,4	2,0	2,3	17
								Média	17
								Desvio padrão	6
								CV (%)	5

d) Deflexões: Apresentou-se melhor que a esperada pelo critério do método DNER PRO 159/85 e a admissível, conforme demonstrado na Tabela 5.24 e figura 5.12, mostrando que o conjunto de serviços realizados melhoraram as deflexões, salientando que não foi realizado reforço no pavimento.

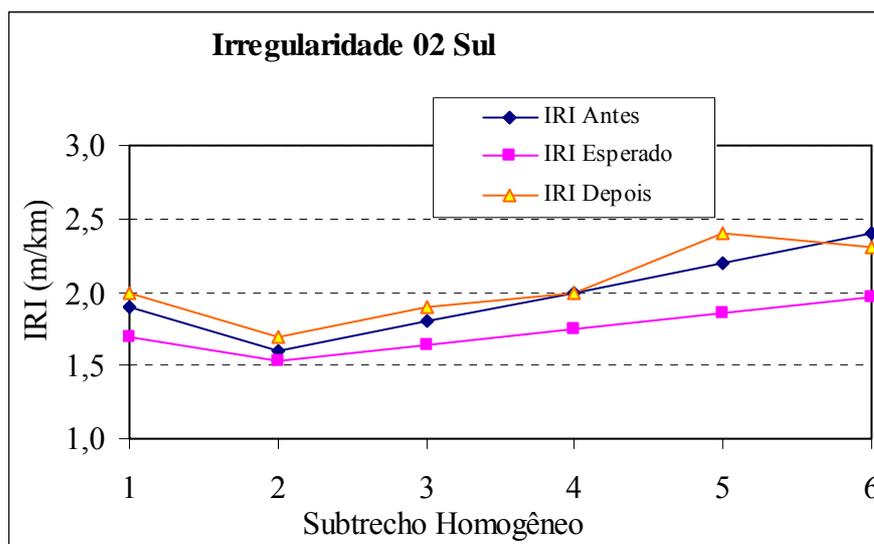


FIGURA 5.11 – Irregularidade Longitudinal – Trecho 02 Sul

TABELA 5.24 – Comparativo de Deflexões – Trecho 02 Sul

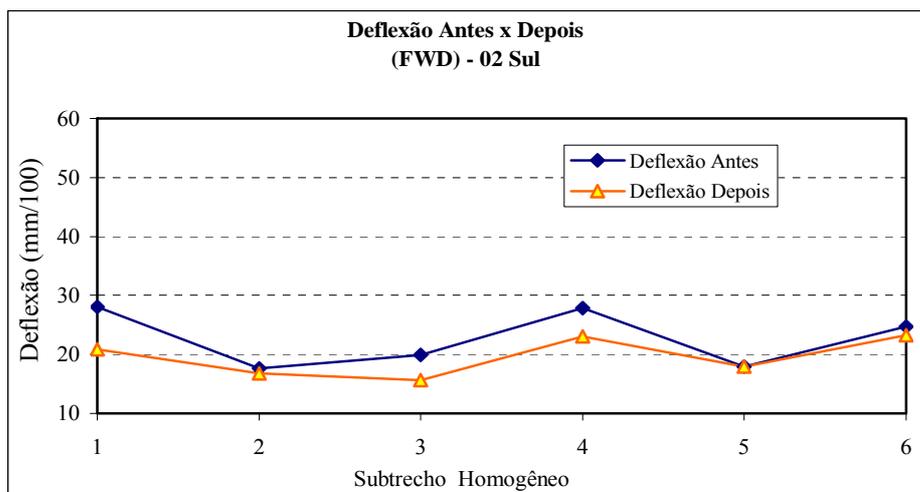
02 SUL		COMPARATIVO DE DEFLEXÕES (mm x 10 ⁻²)							Variação (%)
Subtrecho	Reforço (cm)	Deflexão Antes (FWD)	Deflexão Antes (VB)	Deflexão Esperada (PRO 159)	Deflexão Depois (FWD)	Dadm PRO 11	Dadm PRO 269	Deflexão Depois (VB)	
1	1,4	28	45	41	21	48	53	26	-37
2	1,4	18	18	16	17	48	53	17	4
3	1,4	20	20	18	16	48	53	16	-15
4	1,4	28	45	41	23	48	53	34	-18
5	1,4	18	18	16	18	48	53	18	9
6	1,4	25	38	35	23	48	53	34	-2
Média									-10
Desvio padrão									17
CV (%)									19

Este trecho deverá receber serviços de reforço em seu pavimento para atender ao tráfego solicitante.

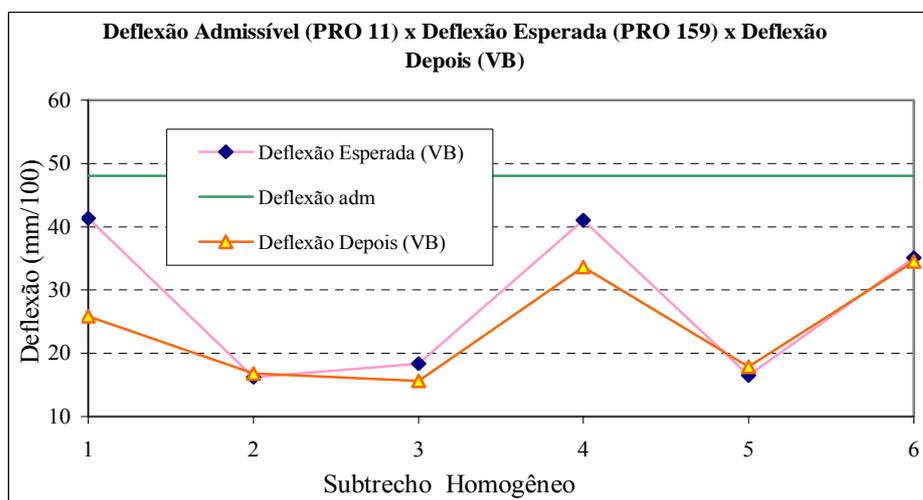
5.1.7 Trecho 03 Sul – Rodovia BR/373, trecho Ponta Grossa – Relógio

5.1.7.1 Características e condições gerais do trecho

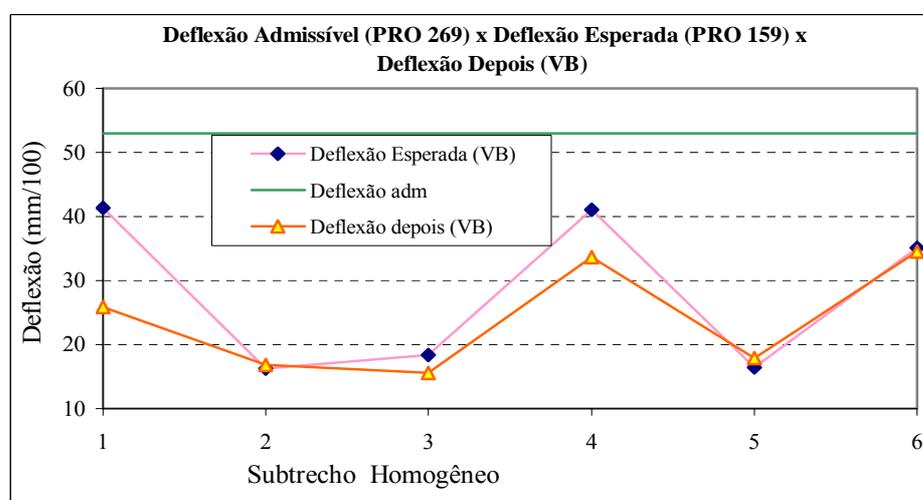
- Extensão: 12,595 km (km 183,405 ao km 196,000);
- Local de início: trevo Caetano Mendes, entroncamento da BR-376 com BR-373;



(a) Antes e Depois da Restauração



(b) Admissível (PRO 11), Esperada (PRO 159) e Depois



(c) Admissível (PRO 269), Esperada (PRO159) e Depois

FIGURA 5.12 – Comparativo de Deflexões – Trecho 02 Sul

c) Aspectos gerais das condições do pavimento: apresentava-se em bom estado de conservação;

d) Problemas específicos: Em vistoria realizada no dia 04-11-2.003 foram verificadas baixas velocidades no trecho compreendido entre o trevo Caetano Mendes e o posto da Polícia Rodoviária Federal, com leve declive, gerando afundamento de trilha de roda. O segmento do km 192+500 ao 193+500, subtrecho 8, local em rampa, apresentou o mesmo problema ocorrido próximo ao trevo Caetano Mendes, tendo ambos recebido trabalhos corretivos de fresagem e revestimento novo;

e) Tipo dos solos do subleito: argiloso;

f) Condições de drenagem: boas condições;

g) Tipo e espessura do reforço: em CAUQ, com 5,0 cm de espessura.

5.1.7.1 Resultados obtidos na análise

a) Retroanálise: Comparativo dos módulos de resiliência:

→ subleito: similaridade entre os módulos obtidos por ambos programas computacionais, constatado que os módulos obtidos após a restauração foram maiores, porém não devem ser considerados, pois o programa aceita até cinco camadas e foi necessário considerar a camada de reforço do subleito como subleito, gerando módulos mais altos. Os valores ficaram em torno de 200 MPa, acima da média apontada pela bibliografia, que é de 150 MPa, mas dentro do intervalo usual apontado pela bibliografia;

→ base e sub-base: não foi constatada similaridade entre os resultados obtidos pelos dois programas computacionais, ocorrendo mudanças dos valores do antes restauração para o depois, com os valores aumentando muito, apresentando valores muito acima do limite superior apontado pela bibliografia, que é de 730 MPa. O EVERCALC gerou valores de até 5.000 MPa e o ELSYM5 valores de até 1.400 MPa;

→ revestimento antigo: nenhuma similaridade entre os resultados obtidos e variação muito grande do antes para o depois da restauração, baixando por ambos métodos, sendo constatada uma variação maior para o EVERCALC, que apresentava valores máximos de 8.000 MPa, passando a apresentar valores máximos de 1.876,1 MPa;

→ revestimento novo: nenhuma similaridade entre os resultados obtidos por ambos programas computacionais, com valores altos pelo EVERCALC, entre 3.029,3 e 8.000 MPa, e valores de 60 a 1.000 MPa, pelo programa ELSYM5.

A Tabela 5.25 mostra os valores obtidos.

TABELA 5.25 – Módulos de Resiliência – Trecho 03 Sul

	Subtrecho	TRECHO 03 SUL				MÓDULOS DE RESILIÊNCIA (MPa)						
		D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espe- ssura Revest. Antigo (cm)	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	REFORÇO	SUBLEITO	
EVERCALC	ANTES	1	27	14	53	8	5,0	1.822	3.021	111	500	248
		2	32	19	61	6	5,0	8.000	1.173	122	500	196
		3	39	10	26	30	5,0	1.201	1.798	67	500	208
		4	26	8	30	10	5,0	8.000	1.039	177	500	281
		5	27	6	23	10	5,0	8.000	1.354	111	500	231
		6	42	2	45	9	5,0	988	1.446	49	500	195
		7	31	17	33	11	5,0	1.169	2.092	80	500	208
		8	42	8	18	10	5,0	1.022	1.723	51	500	168
		9	44	17	39	10	5,0	973	1.319	48	500	226
		10	38	13	33	10	5,0	1.198	2.008	61	500	153
		11	32	13	40	6	5,0	8.000	774	122	500	235
EVERCALC	DEPOIS	1	24	11	46	24	6,0	7.074	658	5.000	49	286
		2	20	6	28	13	6,0	6.267	1.175	4.272	127	268
		3	20	6	30	47	6,5	5.900	673	5.000	100	298
		4	17	5	25	17	6,0	3.029	741	5.000	399	331
		5	18	6	30	17	6,0	8.000	827	5.000	165	300
		6	17	4	23	16	6,5	3.329	1.876	1.936	500	319
		7	20	8	36	17	6,5	5.238	679	5.000	130	280
		8	29	9	32	17	7,0	6.965	500	2.353	105	210
		9	27	8	30	16	7,0	4.036	784	2.118	109	251
		10	26	3	11	17	7,0	5.236	569	5.000	105	203
		11	19	5	27	8	7,0	7.733	562	3.810	500	279
ELSYM5	ANTES	1	27	14	53	8	5,0	5.000	1.200	110	320	215
		2	32	19	61	6	5,0	5.000	850	110	500	168
		3	39	10	26	30	5,0	5.000	500	80	250	183
		4	26	8	30	10	5,0	5.000	650	140	500	236
		5	27	6	23	10	5,0	5.000	1.000	100	400	210
		6	42	2	45	9	5,0	5.000	600	36	550	170
		7	31	17	33	11	5,0	2.000	1.200	55	550	190
		8	42	8	18	10	5,0	2.000	630	50	350	156
		9	44	17	39	10	5,0	2.000	630	43	310	200
		10	38	13	33	10	5,0	1.500	1.000	48	500	142
		11	32	13	40	6	5,0	1.550	500	100	480	200
ELSYM5	DEPOIS	1	24	11	46	24	6,0	300	4.500	1.350	150	235
		2	20	6	28	13	6,0	1.000	4.500	1.350	280	240
		3	20	6	30	47	6,5	80	4.500	1.350	280	260
		4	17	5	25	17	6,0	60	2.500	1.350	500	310
		5	18	6	30	17	6,0	60	2.500	1.350	500	280
		6	17	4	23	16	6,5	60	2.500	1.350	500	300
		7	20	8	36	17	6,5	60	1.100	1.340	420	258
		8	29	9	32	17	7,0	60	1.100	450	380	192
		9	27	8	30	16	7,0	100	1.100	450	380	220
		10	26	3	11	17	7,0	100	1.100	1.300	400	180
		11	19	5	27	8	7,0	100	1.100	1.400	600	260

b) Vida de Fadiga: Apresentou problemas nos subtrechos 8, 9 e 10, modelo de Salomão Pinto, com tensões e deformações do programa Elsym5 e constatou-se problemas com os modelos do Asphalt Institute, indicando que os subtrechos 1, 8, 10 e 11, não atenderão a vida estimada em projeto, em conformidade com o demonstrado na Tabela 5.26.

TABELA 5.26 – Vida de Fadiga – Trecho 03 Sul

VIDA DE FADIGA	MODELOS				
	Pinto	USACE	AASHTO	Asphalt Institute	
	Revestimento	Revestimento	Revestimento	Revestimento	Subleito
03 SUL	<i>1,91E+07</i>	<i>1,91E+07</i>	<i>1,04E+07</i>	<i>1,04E+07</i>	<i>1,04E+07</i>
1	3,25E+07	5,73E+09	7,05E+07	7,08E+06	3,26E+22
2	1,31E+08	1,73E+09	1,42E+08	1,15E+08	3,26E+22
3	3,40E+07	2,32E+10	2,31E+08	1,06E+07	3,26E+22
4	3,91E+07	2,30E+10	3,40E+08	1,51E+08	3,26E+22
5	3,56E+07	1,92E+10	3,12E+08	1,17E+07	3,26E+22
6	4,20E+07	1,31E+10	3,83E+08	1,23E+12	3,26E+22
7	2,74E+07	1,04E+10	2,26E+08	1,48E+07	3,26E+22
8	1,25E+07	6,92E+09	8,53E+07	1,68E+06	3,26E+22
9	1,86E+07	5,57E+09	9,04E+07	2,01E+07	3,26E+22
10	1,83E+07	1,15E+10	8,84E+07	7,69E+06	3,26E+22
11	3,91E+07	2,30E+10	3,50E+08	3,00E+06	3,26E+22

c) Irregularidade longitudinal: O trecho teve melhoria, com exceção dos subtrechos 1, 2 e 8, que sofreram intervenções corretivas, tendo os subtrechos 7, 9 e 11 atendido ao esperado pelos critérios do método DNER PRO 159/85, estando os resultados contidos na Tabela 5.27 e Figura 5.13. Pode-se afirmar que as intervenções de restauração não foram eficientes para baixar a irregularidade longitudinal.

d) Deflexões: Apresentou melhoria após os serviços de restauração, comprovando a existência de drenagem eficiente, pois encontra-se abaixo da esperada pelo método DNER PRO 159/85 e admissível pelos métodos DNER PRO 011/79 e 269/94, conforme demonstrado na Tabela 5.28 e Figura 5.14.

TABELA 5.27 – Comparativo de Irregularidades – Trecho 03 Sul

03 SUL		Comparativo de Irregularidades						
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Espessura do Reforço (cm)	IRI Antes (m/km)	IRI Esperado (m/km)	IRI Depois (m/km)	Varição (%)
1	183,500	184,900	1.400	6,0	2,5	1,7	2,5	48
2	184,900	185,500	600	6,0	2,5	1,7	2,5	48
3	185,500	188,500	3.000	6,5	2,4	1,7	2,0	21
4	188,500	189,500	1.000	6,0	2,6	1,7	1,8	5
5	189,500	190,500	1.000	6,0	2,8	1,8	2,0	14
6	190,500	191,500	1.000	6,5	2,3	1,6	1,8	10
7	191,500	192,500	1.000	6,5	2,3	1,6	1,6	-2
8	192,500	193,500	1.000	7,0	2,3	1,6	2,3	42
9	193,500	194,500	1.000	7,0	2,3	1,6	1,6	-1
10	194,500	195,500	1.000	7,0	2,3	1,6	1,7	5
11	195,500	196,000	500	7,0	2,3	1,6	1,5	-8
Média								17
Desvio padrão								21
CV (%)								18

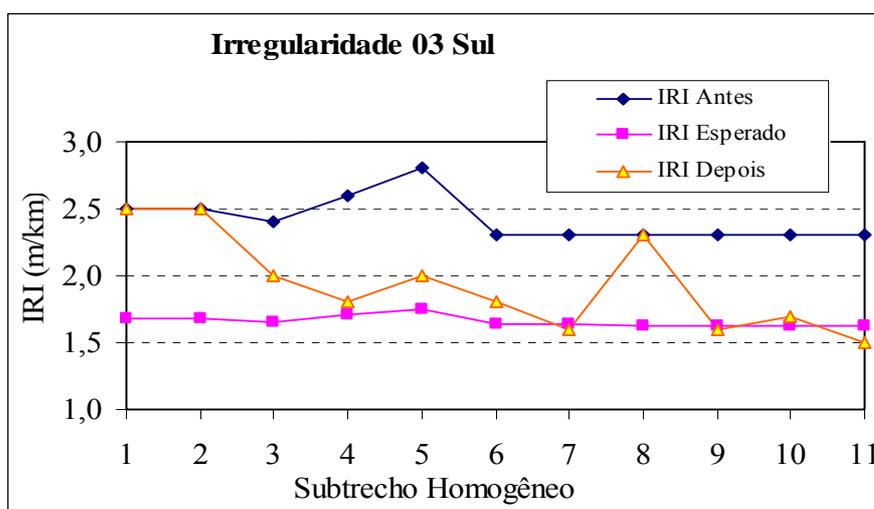


FIGURA 5.13 – Irregularidade Longitudinal – Trecho 03 Sul

Os coeficientes de variação forneceram resultados muito altos, acima de 25%, mostrando serem amostras muito heterogêneas. Este trecho apresentou problemas de afundamento de trilha de rodas, já recebeu intervenção de fresagem e recape. As análises levaram a constatação que o CAUQ não suportou a carga a ele imposta, podendo ser problema do CAP, do agregado, da fabricação ou aplicação da massa asfáltica. Pode-se afirmar que os serviços de restauração foram eficientes para baixar as deflexões.

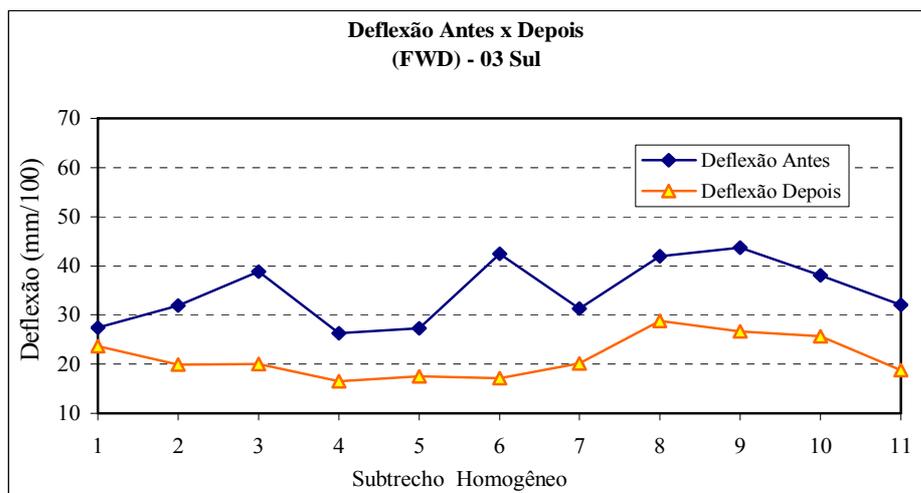
TABELA 5.28 – Comparativo de Deflexões – Trecho 03 Sul

03 SUL		COMPARATIVO DE DEFLEXÕES (mm x 10 ⁻²)							Variação (%)
Subtrecho	Reforço (cm)	Deflexão Antes (FWD)	Deflexão Antes (VB)	Deflexão Esperada (PRO 159)	Deflexão Depois (FWD)	Dadm PRO 11	Dadm PRO 269	Deflexão Depois (VB)	
1	6,0	27	44	37	24	52	59	35	-5
2	6,0	32	51	43	20	52	59	20	-54
3	6,5	39	59	50	20	52	59	21	-59
4	6,0	26	42	36	17	52	59	17	-54
5	6,0	27	43	37	18	52	59	18	-53
6	6,5	42	63	53	17	52	59	17	-68
7	6,5	31	50	42	20	52	59	21	-50
8	7,0	42	62	53	29	52	59	46	-12
9	7,0	44	64	54	27	52	59	42	-22
10	7,0	38	58	49	26	52	59	40	-19
11	7,0	32	51	43	19	52	59	19	-56
Média									-41
Desvio padrão									22
CV (%)									37

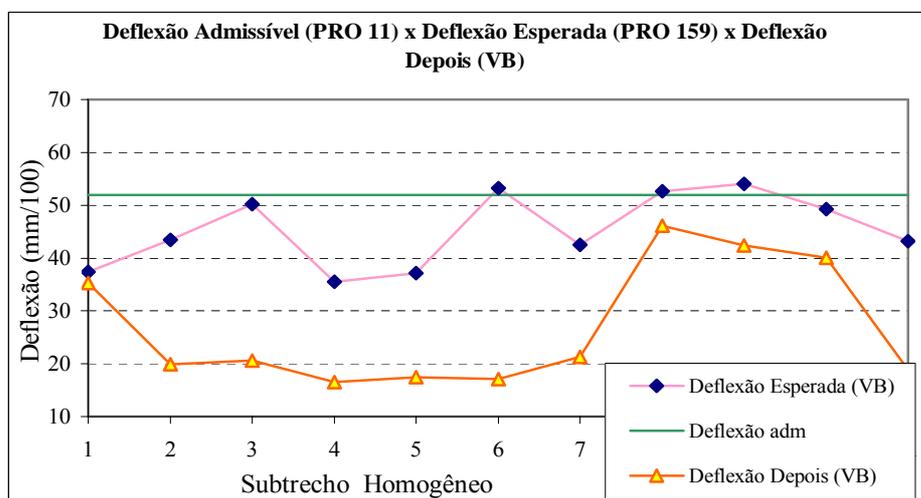
5.1.8 Trecho 04 Sul – Rodovia BR/277, trecho Guarapuava – Três Pinheiros

5.1.8.1 Características e condições gerais do trecho

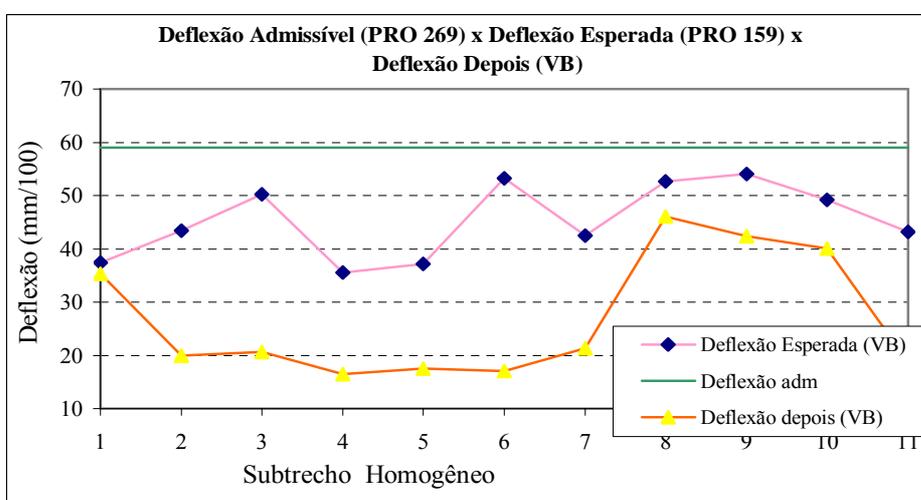
- a) Extensão: 10,0 km (km 357,000 ao km 367,000);
- b) Local de início: km 357,000, sem ponto característico;
- c) Aspectos gerais: apresentava-se com péssimo visual;
- d) Problemas específicos: Em vistoria realizada no dia 05-11-2003, foram constatadas fissuras transversais em toda extensão do trecho, similares às provocadas por trincas de dilatação de bases cimentadas e desagregação generalizada do revestimento. As causas mais prováveis do problema apresentado podem ser a usinagem ou a adesividade do agregado com o asfalto utilizado, o trecho já foi fresado e recebeu camada de micro concreto asfáltico;
- e) Tipo de solos do subleito: argiloso;
- f) Condições de drenagem: em boas condições;
- g) Tipo e espessura do reforço: em Camada Porosa de Atrito com Polímero ou Asfalto Drenante, vazios de 23%, com espessura de 4,0 cm.



(a) Antes e Depois da Restauração



(b) Admissível (PRO 11), Esperada (PRO 159) e Depois



(c) Admissível (PRO 269), Esperada (PRO159) e Depois

FIGURA 5.14 – Comparativo de Deflexões – Trecho 03 Sul

5.1.8.2 Resultados obtidos na análise

a) Retroanálise: Comparativo dos módulos de resiliência:

→ subleito: módulos similares obtidos por ambos programas, com apenas duas amostras fora do intervalo apontado pela bibliografia, os demais variando entre 126 a 243,9 MPa, tendo ocorrido uma pequena diminuição nos valores obtidos após a restauração;

→ base e sub-base: ocorreu similaridade entre alguns resultados obtidos pelos dois métodos, porém o EVERCALC calculado alguns valores muito acima do limite superior apontado pela bibliografia que é de 730 MPa para a base, os valores foram de até 5.000 MPa. O ELSYM5 forneceu valores maiores para a sub-base e o EVERCALC maiores para a base;

→ revestimento velho: foram obtidos alguns resultados similares entre os dois métodos, mas no geral o EVERCALC apresentou valores maiores, alguns acima do limite máximo apontado pela bibliografia, chegando a 8.000 MPa, enquanto os valores máximos obtidos pelo ELSYM5 foram de 4.000 MPa, os módulos baixaram após os serviços de restauração;

→ revestimento novo: nenhuma similaridade entre os resultados obtidos pelos dois programas, com o EVERCALC fornecendo valores mais altos, de 1.648,7 a 8.000 MPa, o ELSYM5 variou de 80 a 300 MPa;

Os valores obtidos podem ser vistos na Tabela 5.29;

b) Vida de fadiga: Pelo modelo de Salomão Pinto foram obtidas vidas remanescentes em todos os subtrechos como abaixo da estimada no projeto, realçados em negrito, pelos modelos do Asphalt Institute, os subtrechos 1, 2 e 9, não atenderam a vida esperada no projeto, realçadas com escrita em cor azul, conforme a Tabela 5.30.

c) Irregularidade longitudinal: Os problemas apontados não trouxeram prejuízos à irregularidade longitudinal do trecho, tendo a mesma melhorado com as intervenções de restauração e praticamente atendido ao esperado pelo método DNER PRO 159/85, com os subtrechos 1, 5 e 6 não atendendo, mas próximos dos valores esperados, conforme mostrado na Tabela 5.31 e Figura 5.15;

TABELA 5.29 – Módulos de Resiliência – Trecho 04 Sul

EVERCALC	TRECHO 04 SUL						MÓDULOS DE RESILIÊNCIA (MPa)					
	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Antigo (cm)	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	REFORÇO	SUBLEITO	
	ANTES	1	21	5	23	25	14,0	8.000	894	143	500	157
	2	22	4	20	24	16,0	4.397	939	217	500	138	
	3	30	13	42	28	16,0	4.411	500	48	500	132	
	4	26	11	42	32	18,0	4.231	500	111		138	
	5	30	12	43	39	16,0	4.278	500	67	500	134	
	6	34	18	54	48	15,0	500	2.670	261	500	211	
	7	20	9	42	18	13,0	2.080	4.914	238	500	188	
	8	29	16	54	18	15,0	575	5.000	100	500	331	
	9	21	5	25	17	15,0	4.030	500	68	500	427	
	DEPOIS	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Novo (cm)	REVEST. NOVO	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO
		1	27	3	12	14	4,0	8.000	1.642	573	213	142
		2	29	5	18	11	4,0	8.000	1.226	500	211	135
		3	29	5	16	14	4,0	3.439	983	500	408	132
		4	26	5	18	17	4,0	8.000	1.118	500	464	148
		5	31	7	24	18	4,0	6.387	798	520	284	140
		6	24	7	30	24	4,0	8.000	848	2.417	89	183
		7	23	11	44	8	4,0	8.000	802	4.446	500	184
		8	23	10	43	9	4,0	1.649	1.570	577	500	244
		9	31	5	15	9	4,0	1.747	982	500	81	221
ELSYM5	ANTES	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Antigo (cm)	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	REFORÇO	SUBLEITO
		1	21	5	23	25	14,0	3.300	700	350	245	153
		2	22	4	20	24	16,0	2.000	650	350	245	137
		3	30	13	42	28	16,0	4.000	500	60	100	126
		4	26	11	42	32	18,0	4.000	300	150		132
		5	30	12	43	39	16,0	4.000	300	100	125	128
		6	34	18	54	48	15,0	90	700	330	400	195
		7	20	9	42	18	13,0	1.800	700	330	400	195
		8	29	16	54	18	15,0	130	700	300	280	290
		9	21	5	25	17	15,0	1.400	570	150	220	350
	DEPOIS	Subtrecho	D ₀ (mm/100)	Desvio Padrão (mm/100)	CV (%)	n	Espessura Revest. Novo (cm)	REVEST. NOVO	REVEST. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO
		1	27	3	12	14	4,0	300	1.000	400	600	140
		2	29	5	18	11	4,0	300	600	350	550	130
		3	29	5	16	14	4,0	80	600	360	550	130
		4	26	5	18	17	4,0	80	600	480	550	150
		5	31	7	24	18	4,0	300	350	300	550	140
		6	24	7	30	24	4,0	80	1.000	300	550	170
7		23	11	44	8	4,0	80	1.000	550	900	170	
8		23	10	43	9	4,0	80	500	430	500	240	
	9	31	5	15	9	4,0	100	1.200	200	120	200	

d) Deflexões: as deflexões obtidas estão abaixo da admissível determinadas pelos métodos DNER PRO 011/79 e 294/94, conforme demonstrado na tabela 5.32 e figura 5.16, porém pioraram após os serviços de restauração, aparentemente ocasionado pelo tipo de material aplicado como revestimento, por ser muito aberto deforma-se mais comparado ao revestimento antigo, quando submetido ao carregamento.

Pode-se afirmar que as intervenções realizadas não foram eficientes para baixar as deflexões. Com exceção dos subtrechos 7 e 8, os demais encontraram-se dentro do limite de confiabilidade em relação ao coeficiente de variação, abaixo de 25%, mostrando homogeneidade das amostras por subtrechos.

TABELA 5.30 – Vida de Fadiga – Trecho 04 Sul

VIDA DE FADIGA	MODELOS				
	Pinto	USACE	AASHTO	Asphalt Institute	
	Revestimento	Revestimento	Revestimento	Revestimento	Subleito
04 SUL	<i>2,13E+07</i>	<i>2,13E+07</i>	<i>5,14E+06</i>	<i>5,14E+06</i>	<i>5,14E+06</i>
1	1,39E+07	7,95E+09	2,47E+07	4,97E+06	4,75E+05
2	1,56E+07	5,69E+09	2,85E+07	8,46E+05	9,80E+05
3	6,11E+06	6,32E+10	2,76E+07	1,39E+10	3,62E+08
4	8,47E+06	7,28E+10	4,13E+07	6,51E+07	3,26E+22
5	3,95E+06	2,13E+09	5,20E+06	1,44E+07	3,74E+08
6	7,83E+06	9,93E+10	3,74E+07	2,00E+07	1,24E+08
7	1,25E+07	1,22E+11	6,67E+07	1,63E+07	2,89E+08
8	7,93E+06	6,32E+10	3,80E+07	1,26E+07	3,26E+22
9	4,57E+06	4,97E+10	1,59E+07	1,23E+07	3,24E+06

TABELA 5.31 – Comparativo de Irregularidades – Trecho 04 Sul

04 SUL	Comparativo de Irregularidades							
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Espessura do Reforço (cm)	IRI Antes (m/km)	IRI Esperado (m/km)	IRI Depois (m/km)	Varição (%)
1	357,000	358,040	1.040	4,0	2,9	1,9	2,1	11
2	358,040	358,940	900	4,0	4,0	2,2	2,1	-5
3	358,940	360,080	1.140	4,0	3,7	2,1	1,9	-10
4	360,080	361,400	1.320	4,0	3,7	2,1	1,7	-20
5	361,400	362,960	1.560	4,0	3,5	2,0	2,2	8
6	362,960	364,880	1.920	4,0	3,1	1,9	2,1	8
7	364,880	365,600	720	4,0	3,5	2,1	1,7	-17
8	365,600	366,320	720	4,0	3,1	1,9	1,7	-12
9	366,320	367,000	680	4,0	3,4	2,0	1,8	-11
							Média	-5
							Desvio padrão	12
							CV (%)	12

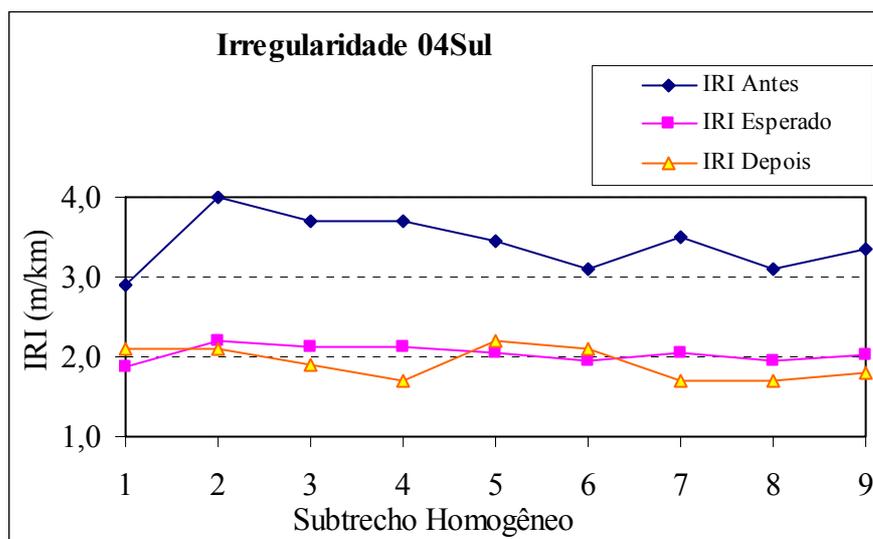
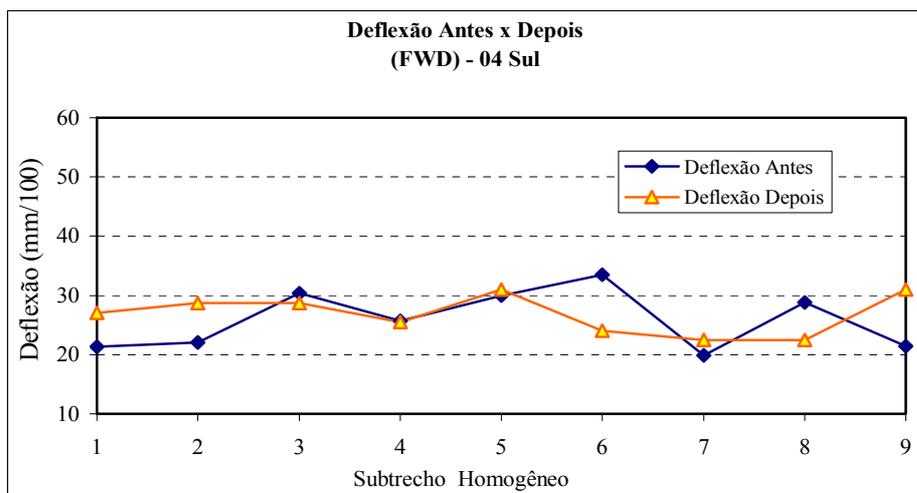


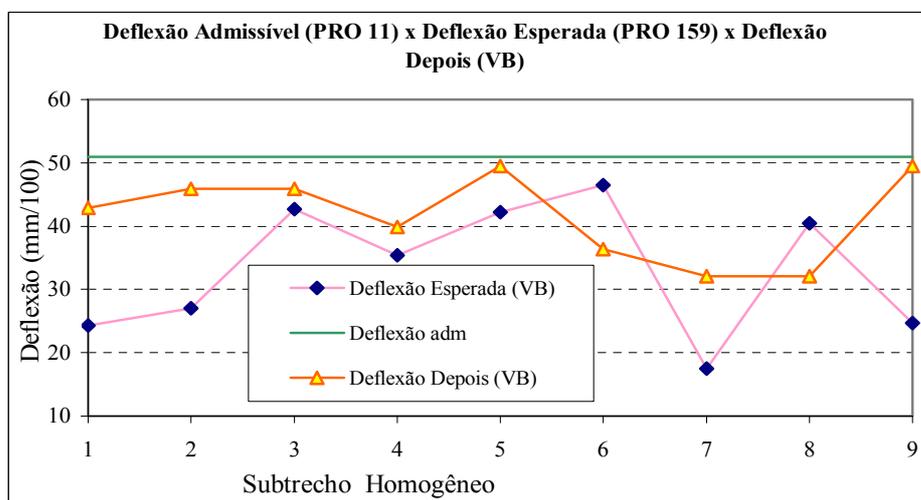
FIGURA 5.15 – Irregularidade Longitudinal – Trecho 04 Sul

TABELA 5.32 – Comparativo de Deflexões – Trecho 04 Sul

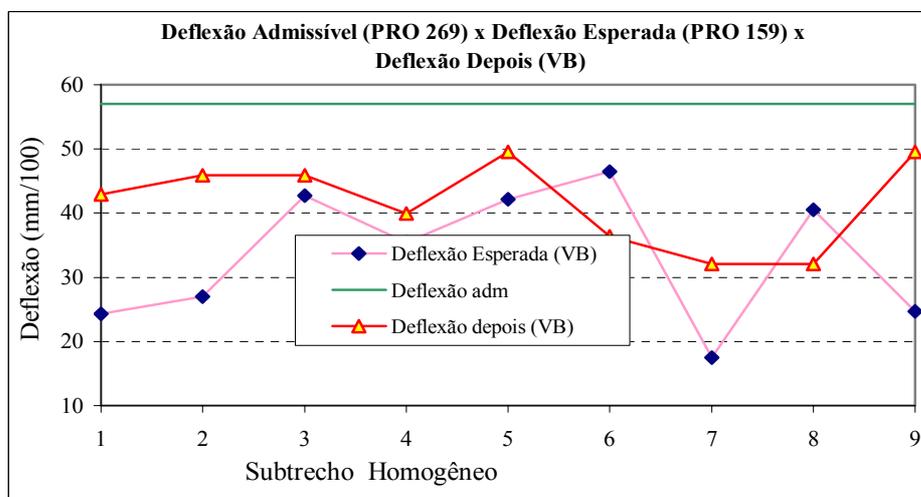
04 SUL		COMPARATIVO DE DEFLEXÕES (mm x 10 ⁻²)							Variação (%)
Subtrecho	Reforço (cm)	Deflexão Antes (FWD)	Deflexão Antes (VB)	Deflexão Esperada (PRO 159)	Deflexão Depois (FWD)	Dadm PRO 11	Dadm PRO 269	Deflexão Depois (VB)	
1	4,0	21	28	24	27	51	57	43	77
2	4,0	22	31	27	29	51	57	46	70
3	4,0	30	49	43	29	51	57	46	8
4	4,0	26	40	35	26	51	57	40	13
5	4,0	30	48	42	31	51	57	50	17
6	4,0	34	53	46	24	51	57	36	-22
7	4,0	20	20	17	23	51	57	32	84
8	4,0	29	46	40	23	51	57	32	-21
9	4,0	21	28	25	31	51	57	50	101
Média									36
Desvio padrão									47
CV (%)									34



(a) Antes e Depois da Restauração



(b) Admissível (PRO 11), Esperada (PRO 159) e Depois



(c) Admissível (PRO 269), Esperada (PRO159) e Depois

FIGURA 5.16 – Comparativo de Deflexões – Trecho 04 Sul

5.2 ANÁLISE DE MÓDULOS POR RETROANÁLISE E VIDA DE FADIGA CONSIDERANDO-SE AS CAMADAS DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO COMO ÚNICA COM MÓDULO EQUIVALENTE

Os resultados obtidos no item anterior levaram em consideração a atuação independente das camadas de Concreto Asfáltico Usinado a Quente, sendo analisadas em função de suas espessuras e módulos individualmente, entretanto verificou-se uma união entre as camadas, quando da extração de amostras para os estudos em laboratório, cujos revestimentos novo e antigo foram separados através de serragem.

Assim admitiu-se, que durante a aplicação do revestimento novo, a pintura de ligação e a massa quente, provocaram a união das mesmas, passando a trabalharem como uma só camada, foram realizados estudos neste sentido, através de retroanálise e cálculo de tensões e deformações, utilizando-se do programa computacional EVERCALC, verificando-se a vida de fadiga gerada, com os modelos do Asphalt Institute, para o subleito e revestimento asfáltico, conforme o contido na tabela 5.33.

TABELA 5.33 – Módulos de Resiliência e Vida de Fadiga – Camadas com Módulo Equivalente

01 NORTE	Módulos de Resiliência (MPa)						Vida de fadiga		Mr antes Mr ligada (%)	
	Subtrecho	Revestimento	Base	Sub-base	Reforço	Subleito	Rev. antigo	Revestim.		Subleito
1	3.192	885				461	8.000	3,24E+06	6,88E+12	-60
2	3.714	480				451	8.000	7,44E+05	1,48E+08	-54
3	2.418	278				459	7.780	3,11E+05	1,01E+08	-69
4	2.497	364				455	8.000	4,45E+05	1,21E+07	-69
5	2.648	700				500	8.000	6,28E+06	1,08E+08	-67
6	4.028	318				474	8.000	4,79E+05	4,76E+07	-50
7	2.848	302				439	7.773	4,63E+06	2,95E+08	-63

02 NORTE	Módulos de Resiliência (MPa)						Vida de fadiga		Mr ligada Mr antes (%)	
	Subtrecho	Ligadas	Base	Sub-base	Reforço	Subleito	Rev. antigo	Ligadas		Subleito
1	2.743	206	218	169	135	3.618	5.585	5,56E+05	2,01E+08	-24
2	2.702	300	203	50	153	4.974	5.585	3,31E+05	1,07E+18	-46
3	2.661	234			157	5.287	5.585	5,87E+05	4,74E+07	-50
4	2.768	141			115	4.108	5.585	4,19E+05	1,88E+07	-33
5	4.417	444			158	6.604	5.585	1,56E+06	6,54E+07	-33
6	2.244	500	85		150	5.585	5.585	1,03E+06	9,87E+07	-60
7	3.697	500			178	5.594	5.585	1,79E+06	1,32E+08	-34
8	6.047	500	500		170	8.000	5.585	1,30E+06	7,87E+08	-24
9	3.951	363			201	6.535	5.585	5,88E+05	2,92E+07	-40
10	2.548	348			158	3.363	5.585	4,41E+05	1,28E+07	-24

03 NORTE	Módulos de Resiliência (MPa)						Vida de fadiga		Mr ligada Mr antes (%)	
	Subtrecho	Ligadas	Base	Sub-base	Reforço	Subleito	Rev. antigo	Ligadas		Subleito
1	2.887	402	500			252	887	6,44E+05	1,38E+08	225
2	1.846	395				190	4.720	6,48E+05	5,65E+06	-61
3	2.745	811				223	8.000	2,76E+06	9,29E+06	-66
4	2.327	292				205	4.665	2,75E+05	5,00E+06	-50
5	2.034	284	500			173	2.757	4,01E+05	2,86E+07	-26
6	4.865	1.061	500			186	8.000	5,32E+06	7,41E+08	-39
7	4.140	446	500			162	4.348	7,34E+05	2,85E+07	-5
8	2.449	512				210	5.566	1,13E+06	2,49E+07	-56
9	5.131	879				179	8.000	3,06E+06	2,85E+09	-36
10	3.954	1.954				221	8.000	5,72E+08	3,20E+11	-51
11	2.503	1.065				210	2.399	2,11E+07	1,12E+10	4
12	2.064	278				235	4.598	2,89E+05	1,66E+07	-55
13	2.141	51				274	3.321	3,97E+04	1,32E+07	-36
14	2.389	217				283	3.481	1,59E+05	2,46E+06	-31

01 SUL	Módulos de Resiliência (MPa)						Vida de fadiga		Mr ligada Mr antes (%)	
	Subtrecho	Ligadas	Base	Sub-base	Reforço	Subleito	Rev. antigo	Ligadas		Subleito
1	2.546	150	500	404		134	4.026	2,34E+05	1,94E+10	-37
2	2.669	251	323			151	8.000	3,97E+05	7,23E+08	-67
3	2.800	300	138	500		168	8.000	4,34E+05	5,63E+09	-65
4	1.843	281				160	2.418	6,09E+05	5,33E+07	-24
5	1.933	480				170	4.146	1,38E+06	9,77E+07	-53
6	1.660	242				139	1.804	4,80E+05	3,27E+07	-8
7	2.374	101	500	232		149	3.589	3,13E+05	6,04E+08	-34
8	1.445	50	431			156	3.794	9,24E+04	1,35E+09	-62
9	1.423	228				174	3.849	3,87E+05	1,29E+09	-63
10	1.692	104	500			171	2.569	1,77E+05	2,03E+09	-34

02 SUL	Módulos de Resiliência (MPa)						Vida de fadiga		Mr ligada Mr antes (%)	
	Subtrecho	Ligadas	Base	Sub-base	Reforço	Subleito	Rev. antigo	Ligadas		Subleito
1	8.000	1.465	99	500		132	8.000	3,85E+06	1,07E+18	0
2	8.000	1.107	338			144	8.000	4,56E+06	7,21E+09	0
3	8.000	1.572	328			152	8.000	8,55E+06	2,51E+09	0
4	8.000	620	51	500		130	7.469	1,16E+06	1,07E+18	7
5	5.555	523	500			129	6.003	3,76E+06	4,48E+09	-7
6	8.000	300				160	4.528	7,55E+05	3,44E+08	77

03 SUL	Módulos de Resiliência (MPa)						Vida de fadiga		Mr ligada Mr antes (%)	
	Subtrecho	Ligadas	Base	Sub-base	Reforço	Subleito	Rev. antigo	Ligadas		Subleito
1	3.989	1.094	131	500		203	1.822	1,57E+06	1,07E+18	119
2	6.061	807	500	500		228	8.000	1,26E+06	1,07E+18	-24
3	5.202	500	429	500		240	1.201	5,48E+05	1,51E+09	333
4	3.099	1.204	500	500		300	8.000	4,18E+06	2,66E+09	-61
5	6.658	605	500	500		244	8.000	8,64E+05	1,07E+18	-17
6	5.553	663	500	500		267	988	9,32E+05	1,07E+18	462
7	3.395	1.199	193	500		216	1.169	2,78E+06	1,07E+18	191
8	4.786	500	114	500		162	1.022	3,12E+05	1,17E+10	368
9	4.374	500	155	500		205	973	3,41E+05	1,07E+18	350
10	3.316	1.108	129	500		152	1.198	1,98E+06	1,30E+10	177
11	3.928	863	500	500		237	8.000	1,57E+06	1,45E+10	-51

04 SUL	Módulos de Resiliência (MPa)						Vida de fadiga		Mr ligada Mr antes (%)
	Subtrecho	Ligadas	Base	Sub-base	Reforço	Subleito	Rev. antigo	Ligadas	
1	2.266	391	500	500	124	8.000	8,66E+05	4,65E+08	-72
2	1.721	333	500	500	116	4.397	8,46E+05	1,07E+18	-61
3	1.287	424	500	500	116	4.411	1,24E+06	1,07E+18	-71
4	1.427	1.040	500		144	4.231	1,51E+07	1,07E+08	-66
5	1.305	274	500	500	117	4.278	5,46E+05	3,26E+09	-70
6	1.570	58	500	500	134	500	7,98E+04	2,68E+09	214
7	1.808	647	500	500	153	2.080	1,88E+06	6,41E+09	-13
8	1.740	361	500	500	201	575	8,45E+05	2,44E+10	203
9	1.591	144	129	500	158	4.030	1,84E+05	1,30E+11	-61

Cabe ressaltar que o trecho 04 Norte não possui duas camadas de revestimento, pois refere-se a trecho reciclado com espuma de asfalto como base e nova camada de revestimento asfáltico, por isso não foi apresentado.

Os módulos obtidos considerando-se as camadas dos revestimentos novo e antigo como atuando separadas, mostraram, que na maior parte das retroanálises executadas, uma das citadas camadas obteve módulo elevado, com a outra com módulo baixo, e vice-versa, na maioria dos casos com inversão dos resultados obtidos nas retroanálises realizadas antes da restauração com as realizadas depois.

As distorções verificadas referem-se principalmente na análise do revestimento antigo, pois em muitos casos apresentaram módulos altos antes da restauração, passando a apresentar módulos baixos após a citada intervenção, ocorrendo também o inverso, apresentaram módulos baixos antes da restauração e altos após. Apresentaram também módulos baixos para os revestimentos novos, que são as camadas responsáveis pela recuperação da capacidade estrutural do trecho.

Com os cálculos realizados considerando-se como apenas uma camada, os módulos obtidos encaixaram-se melhor dentro da média normal citada na bibliografia, não gerando distorções nas demais camadas e também com bom ajuste das bacias de deformação em função do RMSE.

As vidas de fadiga apontadas na tabela 5.33 mostram também a realidade dos trechos estudados, onde todos não devem atender à vida proposta em projeto, devido aos problemas apontados no item 5.1, dentre os quais destaca-se a falência precoce dos revestimentos em CAUQ e CPA, por

problemas construtivos ou tráfego em excesso e bases trincadas refletindo estes trincamentos ao revestimento.

A Tabela 5.33 também mostra um comparativo entre os módulos de resiliência do revestimento antigo com o módulo de resiliência considerando-se as duas camadas atuando juntas. As retroanálises realizadas com dados anteriores às restaurações mostraram módulos de resiliência de revestimentos rígidos, com valores altos e até acima do limite máximo apresentado pela bibliografia, 5.820 MPa (CARDOSO, 1995), ou módulos baixos, devido a revestimentos trincados, comprometidos estruturalmente.

Com a aplicação do reforço os módulos apresentaram-se dentro do intervalo constante na bibliografia e também mais próximos da média, com valores, que apontam rigidez, mas com elasticidade, justificando a correção estrutural pelo reforço executado. Os valores dos módulos de resiliência também comprovaram problemas constatados visualmente em alguns trechos, como o 04 Norte, com subtrechos com módulos de resiliência baixos para o revestimento e para a base, devido aos trincamentos existentes.

Os módulos de resiliência obtidos em laboratório, com materiais coletados dos trechos 02 Norte e 03 Sul, que mostraram módulos altos, também comprovam os módulos de resiliência obtidos por retroanálise, acima da média, que é de 2.900 MPa (CARDOSO, 1995), considerando-se camadas interligadas, chegou-se a módulos de até 4.300 MPa.

5.3 ANÁLISE LABORATÓRIO E CAMPO

Pode-se considerar que os estudos desenvolvidos nos itens 5.1 e 5.2 foram de escritório, com a utilização de bacias de deflexão levantadas em campo, levantamento de irregularidade longitudinal, dados usuais para execução de projeto e com isso foi determinada a vida remanescente dos trechos em estudo.

Assim, no sentido de comparar resultados de módulos de resiliência de retroanálise e laboratório, selecionou-se dois segmentos testemunhas, um na região norte e outro na região sul do Estado do Paraná, BR-376 Mandaguari – Jandaia do Sul e BR-373 Ponta Grossa – Relógio,

respectivamente, onde foram colhidas amostras de campo e realizados ensaios de laboratório, como pode-se verificar nas Tabelas 5.34, com os resultados dos ensaios nas camadas de revestimento asfáltico de módulos de resiliência, através de ensaios de compressão diametral. As Tabelas 5.35 e 5.36 mostram os resultados dos ensaios de módulos de resiliência para solos, através do ensaio triaxial de cargas repetidas.

Tabela 5.34 – Módulos de Resiliência das Camadas de Revestimento Asfáltico

AMOSTRAS (km)	REVESTIMENTO	MÓDULO MPa	AMOSTRAS (km)	REVESTIMENTO	MÓDULO MPa
218,400	NOVO	9.680	193,725	NOVO	6.710
	ANTIGO	11.470		ANTIGO	6.790
218,600	NOVO	10.340	194,025	NOVO	7.470
	ANTIGO	12.940		ANTIGO	7.370
219,000	NOVO	13.440	194,325	NOVO	6.270
	ANTIGO	15.610		ANTIGO	8.240
219,200	NOVO	19.080	194,625	NOVO	5.740
	ANTIGO	13.010		ANTIGO	
219,400	NOVO	12.700	194,685	NOVO	7.050
	ANTIGO	9.790		ANTIGO	4.310
219,600	NOVO	7.780	105,050	NOVO	4.930
	ANTIGO	13.140		ANTIGO	11.410
219,800	NOVO	11.540	195,285	NOVO	8.480
	ANTIGO	12.770		ANTIGO	8.340
220,000	NOVO	9.060	195,465	NOVO	3.640
	ANTIGO	12.010		ANTIGO	13.090
220,200	NOVO	9.110	195,645	NOVO	4.980
	ANTIGO	11.540		ANTIGO	8.930

Tabela 5.35 – Módulos de Resiliência da Camada do Subleito – BR/376

CONFINAMENTO					
$\sigma_3 : 0,021 \text{ MPa}$		$\sigma_d : 0,070 \text{ MPa}$			
ESTADO DE TENSÕES SOLO COESIVO		AMOSTRAS (km)			
		220,200	219,200	219,600	218,400
$\sigma_3 : 0,021 \text{ MPa}$	$\sigma_d : 0,021 \text{ MPa}$	248,4	212,6	130,4	194,2
	$\sigma_d : 0,035 \text{ MPa}$	205,0	87,7	97,0	147,8
	$\sigma_d : 0,053 \text{ MPa}$	171,9	72,5	92,7	125,6
	$\sigma_d : 0,070 \text{ MPa}$	162,9	61,8	75,2	111,1
	$\sigma_d : 0,105 \text{ MPa}$	165,0	48,4	61,5	83,8
	$\sigma_d : 0,140 \text{ MPa}$	160,7	18,8	46,3	71,8
	$\sigma_d : 0,210 \text{ MPa}$	125,1	-----	-----	65,5

Tabela 5.36 – Módulos de Resiliência das Camada do Subleito – BR/373

CONFINAMENTO					
$\sigma_3 : 0,070$ MPa		$\sigma_d : 0,070$ MPa			
		$\sigma_d : 0,210$ MPa			
$\sigma_3 : 0,05$ MPa		$\sigma_d : 0,315$ MPa			
ESTADO DE TENSÕES SOLO GRANULAR		AMOSTRAS (km)			
		193,725	194,325	194,685	195,465
		Módulos de Resiliência (MPa)			
$\sigma_3 : 0,021$ MPa	$\sigma_d : 0,021$ MPa	288,7	252,4	208,3	163,1
	$\sigma_d : 0,042$ MPa	162,0	120,1	114,9	106,6
	$\sigma_d : 0,063$ MPa	136,1	96,8	107,8	87,0
$\sigma_3 : 0,035$ MPa	$\sigma_d : 0,35$ MPa	199,4	212,3	203,3	186,4
	$\sigma_d : 0,070$ MPa	139,0	118,6	128,0	103,7
	$\sigma_d : 0,05$ MPa	130,3	110,7	116,4	96,9
$\sigma_3 : 0,053$ MPa	$\sigma_d : 0,053$ MPa	207,6	170,9	187,6	155,4
	$\sigma_d : 0,105$ MPa	149,0	134,7	144,4	118,1
	$\sigma_d : 0,158$ MPa	146,7	127,9	134,9	113,4
$\sigma_3 : 0,070$ MPa	$\sigma_d : 0,070$ MPa	201,2	183,1	176,5	160,3
	$\sigma_d : 0,140$ MPa	162,5	148,8	151,3	129,5
	$\sigma_d : 0,210$ MPa	164,0	157,6	159,4	131,6
$\sigma_3 : 0,105$ MPa	$\sigma_d : 0,105$ MPa	214,1	212,4	207,6	197,4
	$\sigma_d : 0,210$ MPa	203,6	196,4	196,5	184,4
	$\sigma_d : 0,315$ MPa	212,3	200,8	214,2	193,4
$\sigma_3 : 0,140$ MPa	$\sigma_d : 0,140$ MPa	247,8	248,1	276,2	240,1
	$\sigma_d : 0,280$ MPa	243,4	240,4	251,9	229,1
	$\sigma_d : 0,360$ MPa	256,9	251,6	268,4	229,0

5.3.1 Módulos de Resiliência e Vida Remanescente

Foram executadas retroanálises com o programa computacional EVERCALC, pela maior facilidade de operação e também a maior similaridade entre os módulos obtidos por retroanálise

por este método e os módulos obtidos em laboratório, com valores entre 3.640 e 19.080 MPa em laboratório e até 8.000 MPa pelo EVERCALC, valor limite estipulado neste estudo. Dos módulos de resiliência das camadas do subleito obtidos em laboratório, através de diferentes estados de tensões, foram adotados para fixação nos processos de retroanálise os valores mais elevados, pela simples constatação de similaridade. Os valores obtidos pelo programa ELSYM5 foram muito abaixo, entre 100 e 4.000 MPa.

Os módulos de resiliência, destacados em negrito, na Tabela 5.37, foram obtidos através de ensaio de laboratório, com a fixação destes os demais foram obtidos através de retroanálise, onde foi verificado que devido a fixação de módulos altos para o revestimento novo ou para o revestimento antigo, o programa gerou módulos muito baixos para a base. No único caso em que não foi possível ensaiar a amostra do revestimento antigo em laboratório para obtenção do módulo de resiliência, trecho Sul km 194,685, quando da retroanálise o programa gerou módulo baixo para esta camada e alto para a base.

Para as vidas remanescentes, conforme tabela 5.38, foram obtidos os valores esperados, com as amostras dos km 219,400, km 219,800, km 220,000 e km 220,200 da Região Norte, com módulos de resiliência maiores que os reais, pelo fato de terem sido utilizadas amostras colhidas nos bordos do revestimento, onde a estrutura apresentava-se sã, sem trincamentos e a bacia de deformação obtida em local trincado. A retroanálise levou a valores muito baixos na base, com módulos de 7,9 a 34,5 MPa, gerando tensões muito altas no topo do subleito, assim foram obtidas vidas de fadiga inferiores as de projeto.

Para o trecho da Região Sul, que não apresentava vida remanescente para atender a de projeto, no critério de deformação na face inferior do revestimento, nas amostras km 194,625, km 194,684, km 195,050, km 195,285 e km 195,465, passou a atender, isto pela utilização de módulos maiores para a capa antiga, também colhidas do bordo do pavimento. Pelo fato de que para estas amostras não resultaram valores muito elevados para os módulos de resiliência, menores em comparação aos obtidos na Região Norte, não comprometeram o subleito.

5.3.2 Comparativo Módulos de Resiliência de Laboratório e Retroanálise

Foram analisados os módulos obtidos em laboratório com os obtidos por retroanálise individualmente para a região Norte e Sul, onde constatou-se:

→ Na Região Norte, para o reforço e revestimento antigo foram obtidos módulos em laboratório mais altos que os obtidos por retroanálise, ficando os obtidos pelo programa EVERCALC mais próximos, enquanto que os módulos do subleito apresentaram similaridades entre laboratório e ambos métodos de retroanálise.

→ Na Região Sul, o reforço apresentou similaridade entre laboratório e pelo programa EVERCALC, estando os módulos obtidos pelo programa ELSYM5 muito abaixo. Para o revestimento antigo ambos programas apresentaram módulos muito mais baixos comparados aos de laboratório, mas mostrando para o subleito também similaridade dos módulos de resiliência de laboratório com ambos programas computacionais.

Os módulos obtidos em laboratório para camadas de CAUQ ficaram muito acima dos obtidos por retroanálise, e também muito acima dos limites máximos encontrados na bibliografia, o que justifica-se por serem os módulos obtidos de amostras sãs, colhidas em pontos cujo tráfego não incidiu tão intensivamente quanto ao imposto na trilha de rolamento convencional de carga pesada ou no centro do pavimento, portanto sem trincas e com o asfalto muito rígido, devido ao envelhecimento, apresentando valores modulares muito mais altos que os obtidos pela retroanálise, que foram em locais com maior intensidade de tráfego, portanto com maior evolução de trincamentos, gerando valores modulares menores.

Os módulos de resiliência para o subleito obtidos em laboratório coincidiram com os obtidos por retroanálise, apresentando maior similaridade com os módulos de resiliência obtidos com tensões desvio e radial baixas, 0,021 MPa.

Experimentalmente, com os módulos fixos obtidos em laboratório, destacados em negrito, considerando para o subleito os módulos obtidos com tensões desvios e radiais mais baixas, devido a similaridade apontada no parágrafo acima, foram calculados por retroanálise com o programa EVERCALC os módulos das demais camadas do pavimento, para realizar uma comparação com os segmentos homogêneos das regiões Norte e Sul, obtidos por unicamente por retroanálise, conforme constantes na Tabela 5.38.

Os resultados apresentados pelos programas em relação aos módulos de resiliência, quando existe a fixação de alguns módulos e a obtenção dos demais podem apresentar distorções, pois os programas de retroanálise fornecem valores modulares para as estruturas dos pavimentos, compatíveis com as bacias de deformação fornecidas, caso os valores fixados para qualquer camada sejam muito altos ou muito baixos, estes valores refletirão nas outras, gerando valores distorcidos para os módulos de resiliência, principalmente nas camadas em CAUQ, base e sub-base, pouco refletindo no subleito.

TABELA 5.37 – Módulos de Resiliência – Laboratório e Retroanálise

Subtrecho	NORTE	MÓDULOS DE RESILIÊNCIA (MPa)				
	Km	REV. NOVO	REV. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO
9	218,400	9.680	11.470	548		194
9	218,600	10.340	12.940	104		182
9	219,000	13.440	15.610	259		255
9	219,200	19.080	13.110	246		213
9	219,400	12.700	9.790	35		340
10	219,600	7.780	13.140	684		130
10	219,800	11.540	12.770	8		258
10	220,000	9.060	12.010	31		207
10	220,200	9.110	11.540	34		248

Subtrecho	SUL	MÓDULOS DE RESILIÊNCIA (MPa)				
	Km	REV. NOVO	REV. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO
9	193,725	6.710	6.790	881	43	289
9	194,025	7.470	7.370	32	600	349
9	194,325	7.050	4.310	235	3.000	208
10	194,625	6.270	8.240	2.209	524	252
10	194,685	5.740	1.000	4.576	44	240
10	195,050	4.930	11.410	193	3.000	208
10	195,285	8.440	8.340	613	174	154
10	195,465	3.640	13.090	1.581	3.000	163
11	195,645	4.980	8.930	1.158	450	221

Também os valores dos erros RMS obtidos nas retroanálises realizadas, comprovaram distorções com a fixação de valores incorretos, pois nas simulações os valores com módulos limitados para intervalos pré-estabelecidos no programa EVERCALC sofreram pouca diferença, de 2,23% para módulos limitados, para 2,37% para módulos livres, enquanto que a média dos valores de erro

RMS para o programa EVERCALC, com bacias obtidas após os serviços de restauração foi de 2,11%.

Com a fixação de valores para o revestimento novo e antigo, com dados de laboratório, com fundo amarelo na Tabela 5.37, com bacias de deformação individuais medida no mesmo local das sondagens, os valores do RMSE foram de 6,12% para a Região Sul e de 25,65% para a Região Norte, valores muito elevados, indicando que os módulos de alimentação do programa não estava propiciando um bom ajuste da bacia de deformação, portanto incorretos.

TABELA 5.38 – Comparativo de Vida remanescente

		MODELO			
		Asphalt Institute		Asphalt Institute	
		Revestimento		Revestimento	
	km	Novo	Subleito	Novo	Subleito
Subtrecho	NORTE 02	<i>4,89E+06</i>	<i>4,89E+06</i>	<i>4,89E+06</i>	<i>4,89E+06</i>
9	218,400	2,46E+08	3,82E+08	3,10E+09	3,67E+07
9	218,600	9,79E+08	1,48E+07	3,10E+09	3,67E+07
9	219,000	4,02E+08	2,06E+08	3,10E+09	3,67E+07
9	219,200	1,75E+10	2,09E+08	3,10E+09	3,67E+07
9	219,400	1,68E+09	4,38E+05	3,10E+09	3,67E+07
10	219,600	1,92E+08	4,58E+08	2,37E+10	1,13E+07
10	219,800	5,35E+08	1,35E+04	2,37E+10	1,13E+07
10	220,000	2,73E+08	4,65E+05	2,37E+10	1,13E+07
10	220,200	3,72E+08	5,47E+05	2,37E+10	1,13E+07
ST	SUL 03	<i>1,04E+07</i>	<i>1,04E+07</i>	<i>1,04E+07</i>	<i>1,04E+07</i>
9	193,725	9,74E+13	3,26E+22	2,01E+07	3,26E+22
9	194,025	1,05E+08	3,26E+22	2,01E+07	3,26E+22
9	194,325	3,40E+07	3,26E+22	2,01E+07	3,26E+22
10	194,625	8,20E+08	3,26E+22	7,69E+06	3,26E+22
10	194,685	1,15E+08	3,26E+22	7,69E+06	3,26E+22
10	195,050	1,96E+08	3,26E+22	7,69E+06	3,26E+22
10	195,285	1,09E+10	3,26E+22	7,69E+06	3,26E+22
10	195,465	9,92E+07	3,26E+22	7,69E+06	3,26E+22
11	195,645	3,10E+08	3,26E+08	3,00E+07	3,26E+22

Vale complementar, que os erros RMS médios obtidos nas retroanálises realizadas com o programa ELSYM5 foram de 9,03% para as bacias levantadas antes dos serviços de restauração e de 6,14% para as bacias pós restauração, e para os erros RMS obtidos pelo programa EVERCALC foram de 5,16% no antes restauração e de 2,11% para os serviços após as restaurações.

Foram também fixados os módulos de resiliência, calculados pelas médias das amostras obtidas em laboratório, para os subtrechos 9 e 10 Norte, 9, 10 e 11 Sul, conforme mostra a Tabela 5.39, e obtidos os módulos das camadas restantes por retroanálise e comparados com os módulos obtidos unicamente por retroanálise. Foi constatado que a fixação de módulos com valores diferentes, como são os valores dos módulos do CAUQ obtidos em laboratório, leva o programa a gerar módulos diferentes nas demais camadas, para ajustar a bacia de deformação.

Na figura 5.17 podem ser visualizados os resultados obtidos em relação aos subtrechos 11 Sul e 10 Norte, com diferença entre os módulos de resiliência dos revestimentos novo, antigo e base, não tendo ocorrido mudança significativa nos módulos do subleito.

TABELA 5.39 – Comparativo de Módulos Laboratório e Retroanálise

LABORATÓRIO + RETROANÁLISE					
NORTE	MÓDULOS (MPa)				
Subtrecho	REV. NOVO	REV. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO
9	13.048	12.584	238		237
10	9.373	12.365	189		211
SUL					
SUL	MÓDULOS (MPa)				
Subtrecho	REV. NOVO	REV. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO
9	7.077	6.157	383	1.214	282
10	5.804	8.416	1.835	1.348	204
11	4.980	8.930	1.158	450	221

RETROANÁLISE					
NORTE	MÓDULOS (MPa)				
Subtrecho	REV. NOVO	REV. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO
9	8.000	3.759	315		201
10	3.061	2.641	300		152
SUL					
SUL	MÓDULOS (MPa)				
Subtrecho	REV. NOVO	REV. ANTIGO	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO
9	4.036	784	2.118	109	251
10	5.236	569	5.000	105	203
11	7.733	562	3.810	500	279

5.3.3 Ensaio em Laboratório das Amostras Extraídas de Concreto Asfáltico Usinado à Quente

Dos furos de sondagem realizados na região norte e sul, foram selecionadas as amostras visualmente consideradas mais sãs e representativas, sendo elas as das sondagens Norte 1 (km 218,400) e 6 (km 219,600), e Sul 1 (km 193,725) e 8 (195,645), delas foram separados o material pétreo do ligante asfáltico, das camadas de revestimento novo e antigo, e analisados separadamente.

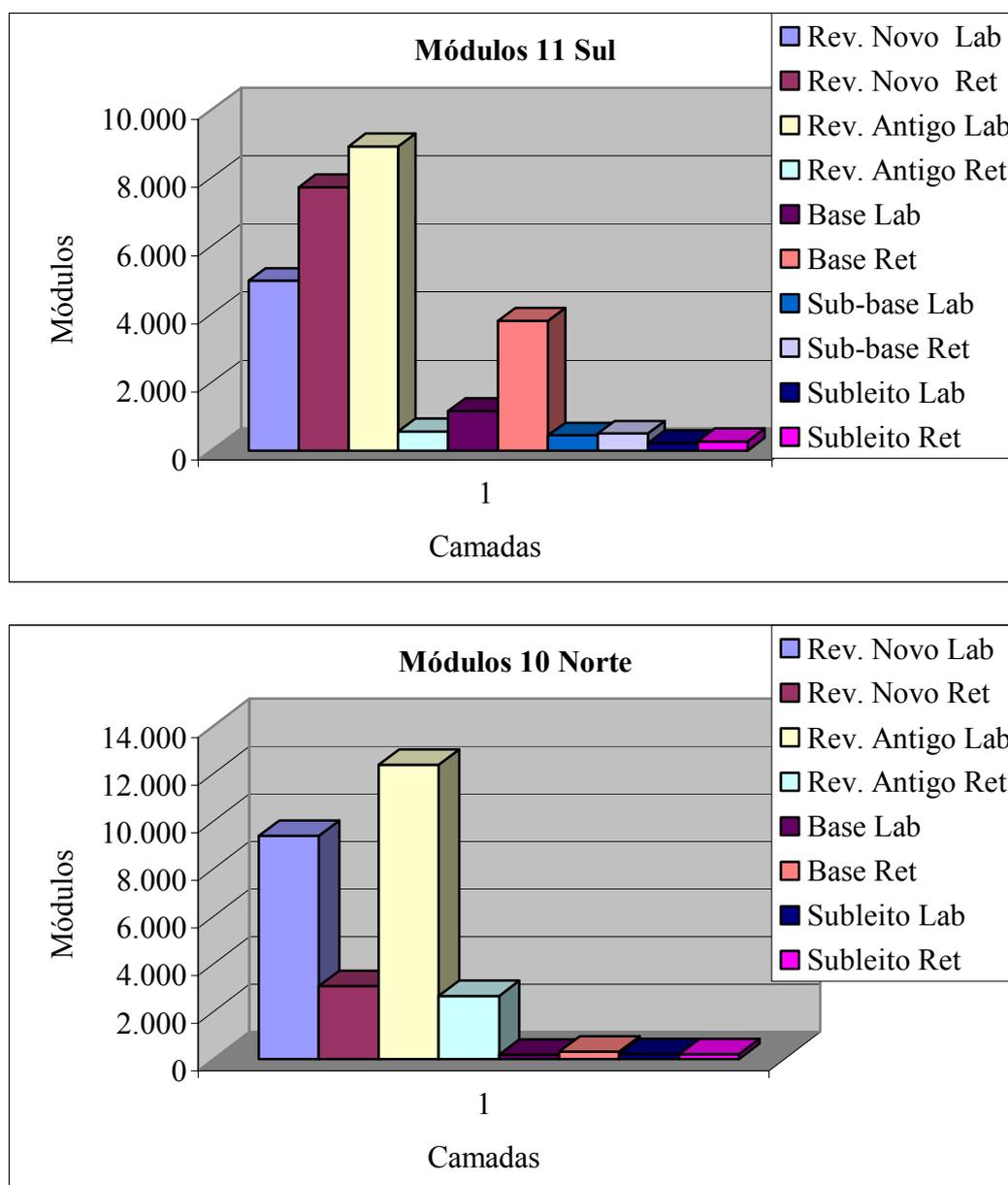


FIGURA 5.17 – Comparativo de Módulos de Resiliência

5.3.3.1 Ensaio de Granulometria das Misturas de Concreto Asfáltico Usinado à Quente

Para comparação foram adotadas as faixas de Concreto Asfáltico Usinado à Quente mais utilizadas no Estado do Paraná, que são as faixas “C” do Departamento Nacional de Infra-Estrutura Terrestre, normalizada pela DNER-ES 313/97 Pavimentação – Concreto Betuminoso (DNER, 1997) e a faixa III, normalizada pela DER/PR ES-P 21/91 – Especificações de Serviços Rodoviários (DER/PR, 1991), onde constatou-se, que dos traços analisados, de 8 (oito) amostras, apenas 3 (três) enquadraram-se na faixa III do DER/PR, as amostras Norte 01 Antiga (revestimento antigo), Norte 06 Antiga e Norte 06 Nova (reforço ou revestimento novo) e as amostras Norte 01 Antiga, Sul 01 Antiga, Norte 06 Antiga, Norte 01 Nova, Sul 01 Nova, Sul 08 Nova enquadram-se na faixa C do DNIT, sendo que a amostra Sul 08 Antiga não encaixou-se em nenhuma das faixas comparadas.

Da figura 5.18 pode-se verificar que a amostra colhida na sondagem Norte 01 Antiga enquadrar-se na faixa III do DER/PR e na faixa C do DNIT, enquanto que a amostra Sul 08 Antiga está fora de ambas faixas tomadas como referência.

Como o programa de exploração do Estado do Paraná (PER), estabelece que em primeiro lugar, devem ser adotadas as normas do DNIT, em relação a granulometria, as amostras de revestimento novo e antigo ensaiadas estão em conformidade.

5.3.3.2 Ensaio do Cimento de Asfalto de Petróleo Extraído do Concreto Asfáltico Usinado à Quente

Das amostras Norte 1 (km 218,400) e 6 (km 219,600), e Sul 1 (km 193,725) e 8 (195,645), foram colhidos os materiais dos revestimentos novos e antigos, removido o ligante de asfalto dos materiais pétreos, e pelo Método de Abson (AASHTO T 170-93 e ASTM D 1856-95a), separado o ligante asfáltico do solvente utilizado na remoção, estando os teores de asfalto obtidos nas misturas demonstrados na Tabela 5.40, onde pode-se observar que em relação às extrações de asfalto, as amostras estão com teores na faixa de 5,0 e 7,71%, estando as amostras 01 Sul Antiga e 08 Sul Nova com teores mas elevados que os demais, mas visualmente não foi constatado espelhamento ou exsudação.

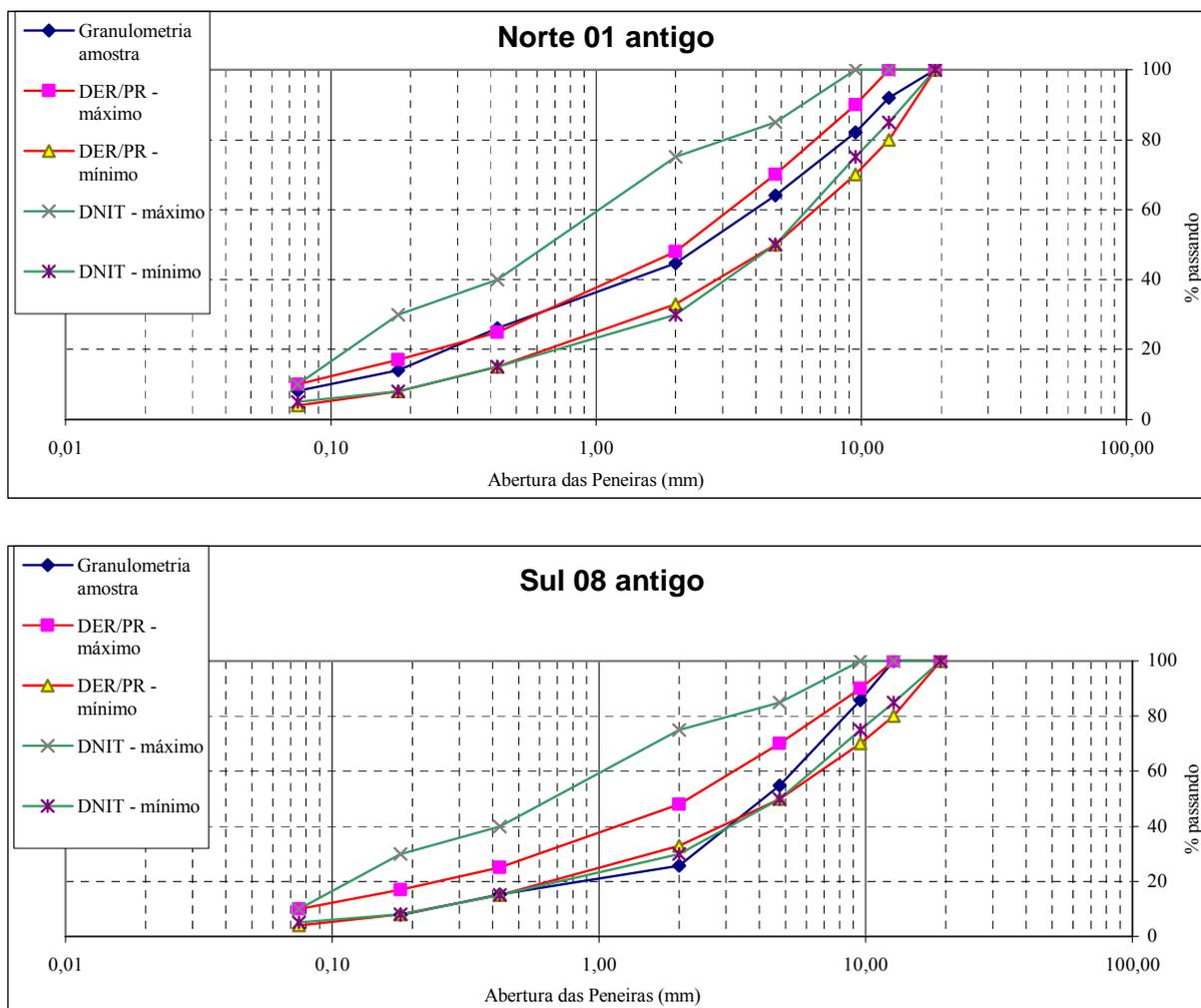


FIGURA 5.18 – Granulometria do Concreto Asfáltico Usinado a Quente

TABELA 5.40 – Teores de Ligante de Asfalto

AMOSTRA	TEOR DE LIGANTE DE ASFALTO
01 Sul Antiga	7,13 %
01 Sul Nova	6,33 %
08 Sul Antiga	6,49 %
08 Sul Nova	7,71 %
01 Norte Antiga	5,75 %
01 Norte Nova	5,00 %
06 Norte Antiga	5,91 %
06 Norte Nova	6,15 %

As principais constatações, conforme tabela 5.41, foram em relação aos ensaios de caracterização realizados nos CAP's extraídos, assim foram comparados os resultados das amostras deste estudo, com uma amostra original de CAP 20 e após o Rolling Thin Film Oven Test -RTFOT, que simula o envelhecimento do ligante asfáltico após a usinagem, realizados em um CAP 20, produzido na REPAR-Araucária-PR, em janeiro de 2.002, cujos resultados estão constantes na Tabela 5.42 (Morilha Júnior, 2.004), onde foram feitas as seguintes observações:

As penetrações após o RTFOT, adotado para comparação apresenta valor de 24 (0,1 mm), as amostras novas deste trabalho, entre 19 e 25 no Sul e entre 16 e 17 no Norte, e as amostras velhas, entre 6 e 8 no Norte, e entre 10 e 11 no Sul, portanto com exceção de uma amostra da região Sul, as demais estão abaixo do valor da penetração do ligante após RTFOT;

No ensaio de viscosidade dinâmica obtido pelo viscosímetro Brookfield para temperaturas de 135°, 155° e 175° C os valores de comparação desta grandeza após RTFOT foram de 476, 183 e 86 cP, respectivamente, todas as amostras ensaiadas mostraram valores muito acima, variando de 1.175 a 18.700 cP a 135° C, de 407 a 3.540 cP a 155° C e de 169 a 1.032 cP a 175° C, mostrando-se muito mais viscosos, quase rijos, do que o envelhecido em laboratório;

O ponto de amolecimento, que na amostra comparativa após o ensaio RTFOT é de 57° C, deste trabalho às amostras novas, 61 e 64, 67 e 68, Sul e Norte, respectivamente, e para as amostras velhas, para o Sul, 67 e 79, e para o Norte, 85 e 89. Todas as amostras estão acima da média, mostrando o aumento de consistência, característico do envelhecimento de longo prazo.

Segundo WHITEOAK (1990) o envelhecimento do asfalto, traduzido por aumento de consistência, é de aproximadamente 60% (sessenta por cento) durante a usinagem (Morilha Júnior, 2004). Assim, podemos considerar que todas as nossas amostras de asfalto, tanto as do revestimento novo como do antigo, encontram-se envelhecidas e mais rígidas. O ligante asfáltico nesta condição não consegue imprimir ductilidade à mistura asfáltica, a qual fica muito propícia ao trincamento por fadiga e desagregação.

TABELA 5.41 – Ensaios Característicos do Cimento Asfáltico de Petróleo

ENSAIOS NO CAP		SUL				NORTE			
		REVESTIMENTO							
		ANTIGO		NOVO		ANTIGO		NOVO	
ANÁLISES	MÉTODO	1	8	1	8	1	6	1	6
Ponto de Amolecimento (°C)	ASTM D 36	67	79	64	61	89	85	67	68
Penetração (25°C, 5s, 100g) (x 0,1 mm)	ASTM D 5	10	11	19	25	6	8	16	17
Viscosidade Brookfield 135°C, (cP)	ASTM D 4402	3.490	18.700	1.770	1.175	5.420	5.470	1.970	2.450
Viscosidade Brookfield 155°C, (cP)	ASTM D 4402	817	3.540	537	407	1.390	1.350	660	722
Viscosidade Brookfield 175°C, (cP)	ASTM D 4402	325	1.032	218	169	470	482	268	272

TABELA 5.42 – Ensaios de envelhecimento em um CAP-20 (Morilha Júnior, 2004)

ENSAIOS NO CAP		ORIGINAL	APÓS RTFOT
ANÁLISES	MÉTODO		
Ponto de Amolecimento (°C)	ASTM D 36	50	57
Penetração (25°C, 5s, 100g) (x 0,1 mm)	ASTM D 5	57	24
Viscosidade Brookfield 135°C, (cP)	ASTM D 4402	316	476
Viscosidade Brookfield 155°C, (cP)	ASTM D 4402	127	183
Viscosidade Brookfield 175°C, (cP)	ASTM D 4402	57	86

5.4 CORRELAÇÕES ENTRE MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DO SUBLEITO COM O ÍNDICE SUPORTE CALIFÓRNIA E FRAÇÃO DE FINOS PASSANDO NA PENEIRA Nº 200

Com os valores dos Índices Suporte Califórnia (ISC) obtidos nos projetos de restauração e módulos de resiliência obtidos por retroanálise, dos 8 (oito) segmentos estudados foram constatadas grandes variações de tipos de solos de subleito, a princípio dividindo-se em arenosos e argilosos, entretanto apresentou-se uma maior variação quando analisado o percentual de finos passando na peneira nº 200, conforme verificou-se na Tabelas 5.43, com ISC obtidos dos projetos de restaurações e módulos de resiliência por retroanálise, e Tabela 5.44, com ISC e módulos de resiliência obtidos em laboratório, e Figuras 5.19 e 5.20, que ilustram as Tabelas 5.43 e 5.44.

Foi constatado, que com a diminuição da fração fina, os módulos de resiliência aumentam, tendo sido encontrado módulos mais altos para argilas arenosas, e o mais elevado, com uma grande diferença para os demais, para o solo arenoso com baixos teores de finos.

Não existe uma relação entre o módulo de resiliência e ISC, que atenda a todos os tipos de solos.

Para os solos arenosos argilosos, que demonstraram os mais baixos ISC's, os módulos de resiliência foram de valores elevados.

Quanto maior é a porcentagem de silte passando na peneira nº 200, mais baixo é o ISC, mas não significa que os módulos sejam mais baixos.

Com os dados obtidos unicamente em laboratório, conforme o demonstrado na tabela 5.44, realizou-se também um comparativo no sentido de identificar relação entre os resultados obtidos nos ensaios de módulo de resiliência, ISC e quantidade de finos passando na peneira nº 200, não tendo sido encontrada nenhuma relação significativa, tendo ocorrido uma distorção em relação ao constatado com os dados da Tabela 5.42, pois nos ensaios da Tabela 5.44 o furo de sondagem 6 Norte difere dos demais resultados de ambas citadas tabelas, tendo um alto valor de finos e também um alto valor de módulo de resiliência.

TABELA 5.43 – Comparativo ISC, Módulo de Resiliência e % Passante na #200 – Dados de Projetos de Restauração e Retroanálise

Subtrecho	ISC	% pass 200	MÓDULO (MPa)	Classificação H.R.B.
01 Norte	19	17,8	451	A-2-4
02 Norte	16	92,8	158	A-7-5
03 Norte	11	78,2	237	A-4; A-5 e A-6
04 Norte	13	78,8	267	A-6 e A-7-5
01 Sul	9	59,2	194	A-7-6 e A-6
02 Sul	15	94,6	188	A-7-5
03 Sul	24	36,5	280	A-2-4
04 Sul	18	51,8	141	A-7-5

Cabe lembrar, que as amostras de solo colhidas em ambas regiões, norte e sul, foram às situadas abaixo da camada da subbase, cujo objetivo era determinação do módulo de resiliência de todas as camadas do pavimento, e condicionada a um máximo de 05 (cinco) camadas, portanto no caso da amostras da região sul, foi colhido material do reforço, neste caso arenoso, que difere do geral que é argiloso arenoso.

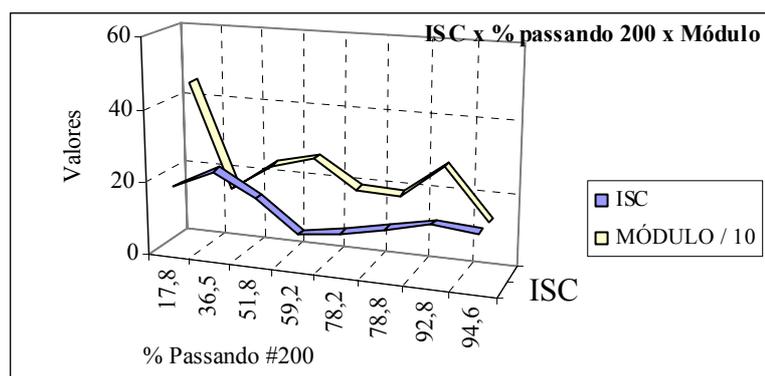


FIGURA 5.19 – Comparativo ISC, % Passante na #200 e Módulo de Resiliência por Retroanálise

TABELA 5.44- Comparativo ISC, Módulo de Resiliência e % Passante na #200 – Dados de Ensaios de Laboratório

Sondagem	ISC	% pass 200	MÓDULO (Mpa)	Classific. H.R.B.
1 Norte	21	77,4	194	A-7-5
4 Norte	12	68,6	213	A-7-5
6 Norte	12	83,5	130	A-7-5
9 Norte	13	90,8	248	A-7-5
1 Sul	30	21,4	289	A-2-6
3 Sul	34	20,1	252	A-2-4
5 Sul	32	21,0	208	A-2-4
8 Sul	17	33,1	163	A-2-4

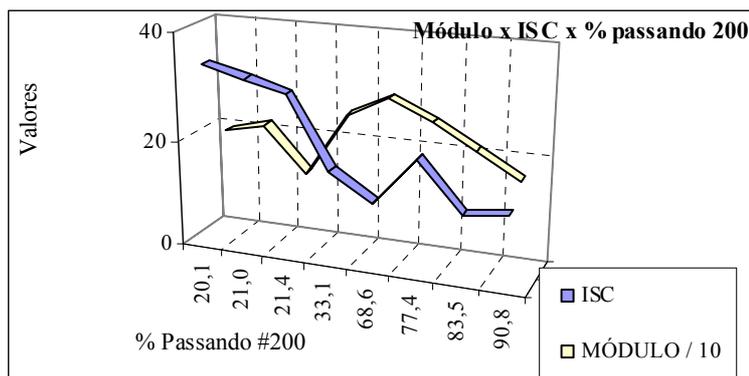


FIGURA 5.20 – Comparativo ISC, % Passante na #200 e Módulo de Resiliência em Laboratório

5.5 CONSIDERAÇÕES AOS PROJETOS DE RESTAURAÇÕES

Realizou-se uma análise dos projetos de restaurações, partindo-se dos dados de campo apresentados pelos mesmos, desenvolveu-se o dimensionamento de acordo com o preconizado pelos métodos DNER-PRO 011/79 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis, DNER-PRO 159/85 – Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos, e DNER-PRO 269/94 – Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis – TECNAPAV, obtendo-se as camadas de reforço conforme o demonstrado na Tabela 5.45 a, b, c e d.

5.5.1 Dimensionamento do Reforço

Os resultados obtidos não coincidiram com os constantes nos projetos de restaurações, as quais foram justificadas como interpretações e critérios utilizados pelos projetistas quando no manuseio dos dados.

No caso, partiu-se de dados constantes nos projetos, não teve-se contato em campo com trechos reforçados, critério fundamental para um bom projeto.

Foram verificadas algumas considerações sobre critérios adotados, justificados nos próprios projetos como experiência dos projetistas, mas que não fazem parte da norma, ou identificar como o resultado foi obtido, qual o critério para utilização de determinado dado, onde pôde-se citar:

a) Trecho 01 – Norte

→ A deflexão admissível calculada foi reduzida em 15%, justificada pelo projetista, devido sua experiência com bases semi-rígidas.

→ as camadas de reforço foram determinadas pelo critério mecânico, com a utilização do programa computacional ELSYM5.

b) Trecho 02 – Norte

→ as camadas de reforço foram determinadas pelo critério mecânico, com a utilização do programa computacional ELSYM5.

c) Trecho 03 – Norte

→ Os raios de curvatura foram adotados como maiores que 100 (cm), entretanto nem todos apresentavam estes valores.

→ Não conseguiu-se determinar como se chegou a deflexão admissível.

→ Não conseguiu-se determinar como foram obtidas as espessuras finais de reforço.

d) Trecho 01, 02 e 03 – Sul

→ As determinações dos percentuais das áreas com defeitos não coincidiram, onde foi constatado que anteriores à restauração os trechos receberam serviços de melhorias, com fresagem e nova capa, sendo que para estes segmentos foram consideradas nas avaliações como remendos.

→ Os trechos foram divididos em muitos segmentos homogêneos, diferentes para cada pista de rodagem.

→ Não conseguiu-se determinar como foram obtidas as espessuras finais de reforço.

e) Trecho 04 – Sul

→ Não houve levantamento deflectométrico com viga Benkelman, sendo utilizado o fator de conversão das deflexões do FWD para viga Benkelman a simples majoração em 40% (quarenta por cento).

f) No aspecto geral

→ Constatou-se que os técnicos projetistas, utilizam em conjunto com os métodos de projetos de reforços, suas experiências profissionais, fazendo ajustes próprios, sendo alguns deles citados nos próprios projetos.

→ Critérios pessoais na coleta e manuseio de dados de levantamentos de campo, às vezes não demonstrando como foram obtidos determinados resultados, de certa forma impedindo uma análise em escritório através de terceiros.

→ Para um bom projeto é necessário a presença do projetista no campo, a coleta de dados através das ferramentas apropriadas contidas na norma e cálculo dos valores por dois ou mais técnicos.

01-N				PRO 11/79				PRO 269/94				PRO 159/85					
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Executado - (cm) Direita/Esquerda	
1	107,000	108,500	1.500	3,7	-	6,5	0,7	2,9	1,3	5,1	-	3,0	3,0			5,0	5,0
2	108,500	110,700	2.200	-	-	-	-	0,6	0,6	-	-	4,8	4,8			5,0	5,0
3	110,700	111,400	700	-	1,6	1,4	4,4	-	0,9	-	3,1	4,8	4,8			4,0	4,0
4	111,400	112,300	900	-	-	-	2,9	-	-	-	1,6	4,8	6,5			3,5	3,5
5	112,300	113,300	1.000	-	-	-	-	1,3	1,3	-	-	4,8	4,8			6,0	6,0
6	113,300	114,200	900	1,0	2,7	3,8	5,5	0,3	2,0	2,5	4,2	4,8	6,5			4,0	4,0
7	114,200	115,500	1.300	-	-	1,0	-	-	-	-	-	3,0	4,8			5,0	5,0

Obs: Calculado pelo critério mecânico

02-N				PRO 11/79				PRO 269/94				PRO 159/85					
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Executado - (cm) Direita/Esquerda	
1	209,000	209,560	560	8,6	4,8	8,6	4,8	6,5	3,6	6,5	3,6	6,5	8,3			10,0	10,0
2	209,560	210,440	880	4,5	5,6	4,5	5,6	3,3	4,2	3,3	4,2	6,5	8,3			6,0	6,0
3	210,440	211,200	760	-	-	-	-	-	-	-	-	6,5	4,8			4,0	4,0
4	211,200	211,980	780	4,6	4,7	4,6	4,7	3,4	3,5	3,4	3,5	4,8	3,0			5,0	5,0
5	211,980	212,960	980	0,6	-	0,6	-	-	-	-	-	4,8	3,0			4,0	4,0
6	212,960	214,300	1.340	-	-	-	-	-	-	-	-	4,8	4,8			4,0	4,0
7	214,300	216,340	2.040	-	-	-	-	-	-	-	-	4,8	4,8			4,0	4,0
8	216,340	218,040	1.700	-	-	-	-	-	-	-	-	4,8	4,8			4,0	4,0
9	218,040	219,600	1.560	2,1	0,4	2,1	0,4	1,1	-	1,1	-	4,8	4,8			6,0	6,0
10	219,600	220,500	900	5,8	0,9	5,8	0,9	4,4	-	4,4	-	6,5	3,0			7,0	7,0

Obs: Calculado pelo critério mecânico

03-N				PRO 11/79				PRO 269/94				PRO 159/85					
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Executado - (cm) Direita/Esquerda	
1	20,740	22,350	1.610	-	-	-	-	-	-	1,1	-	4,8	-	-	-	-	4,0
2	22,350	22,650	300	-	-	3,7	-	-	-	1,1	-	3,0	-	-	-	-	6,2
3	22,650	22,950	300	-	-	-	-	-	-	1,1	-	3,0	-	-	-	-	3,5
4	22,950	23,350	400	-	-	4,0	-	-	-	8,7	-	4,8	-	-	-	-	4,0
5	23,350	23,750	400	-	-	4,0	-	-	-	8,3	-	4,8	-	-	-	-	6,2
6	23,750	24,050	300	-	-	-	-	-	-	7,2	-	3,0	-	-	-	-	3,5
7	24,050	24,350	300	-	-	5,5	-	-	-	8,2	-	3,0	-	-	-	-	5,5
8	24,350	25,750	1.400	-	-	-	-	-	-	9,9	-	-	-	-	-	-	3,5
9	25,750	26,175	5.250	-	-	-	-	-	-	8,2	-	-	-	-	-	-	3,5
10	31,000	34,100	3.100	-	-	1,3	-	-	-	6,5	-	4,8	-	-	-	-	5,7
11	34,100	35,600	1.500	0,7	-	7,7	-	-	-	4,8	-	4,8	-	-	-	-	10,2
12	35,600	37,600	2.000	-	-	-	-	-	-	6,1	-	4,8	-	-	-	-	6,2
13	37,600	38,000	400	-	-	-	-	-	-	7,0	-	4,8	-	-	-	-	4,0
14	38,000	39,175	1.175	-	-	-	-	-	-	9,2	-	3,0	-	-	-	-	6,2

TABELA 5.45 - a - Espessura de Reforço Calculadas

04-N				PRO 11/79				PRO 269/94				PRO 159/85				
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Executado - (cm) Direita/Esquerda
1	26,175	28,225	2.050	8,9		9,0		6,9		6,0		6,5				5,2
2	28,225	30,275	2.050	9,4		9,5		7,3		6,0		6,5				5,2
3	30,275	31,000	725	5,9		6,0		4,8		4,5		4,8				5,2

Reciclagem com espuma de asfalto

01-S Direita				PRO 11/79				PRO 269/94				PRO 159/85				
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Executado - (cm) Direita/Esquerda
1	140,120	140,540	420	7,1		7,0		10,1				3,0				7,0
2	140,540	140,740	200	7,1		7,0		10,1				3,0				7,0
3	140,740	141,020	280	1,3		2,5		10,1				4,8				6,5
4	141,020	141,340	320	1,3		2,5		10,1				4,8				6,5
5	141,340	141,580	240	1,3		2,5		-				4,8				6,5
6	141,580	141,660	80	5,9		6,0		4,7				4,8				6,5
7	141,660	142,020	360	5,9		6,0		4,7				3,0				6,5
8	142,020	142,180	160	5,9		6,0		4,7				4,8				6,5
9	142,180	142,300	120	2,0		2,5		0,7				3,0				6,0
10	142,300	142,780	480	2,0		2,5		0,7				4,8				6,0
11	142,780	142,980	200	4,6		5,0		3,5				4,8				7,0
12	142,980	143,180	200	4,6		5,0		3,5				3,0				7,0
13	143,180	143,380	200	4,6		5,0		3,5				6,5				6,0
14	143,380	143,460	80	3,2		3,5		2,0				4,8				6,0
15	143,460	143,740	280	3,2		3,5		10,1				4,8				6,0
16	143,740	144,000	260	3,2		3,5		10,1				4,8				6,0

01-S Esquerda				PRO 11/79				PRO 269/94				PRO 159/85				
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Executado - (cm) Direita/Esquerda
1	140,120	140,440	320		5,5		5,7		8,1				4,8		3,5	7,0
2	140,440	140,520	80		6,2		6,2		8,1				4,8		3,5	7,0
3	140,520	140,680	160		6,2		6,2		8,1				6,5		3,5	7,0
4	140,680	141,040	360		6,2		6,2		8,1				3,0		6,0	6,5
5	141,040	141,560	520		3,9		3,9		2,8				6,5		6,0	6,5
6	141,560	141,640	80		3,9		3,9		2,8				4,8		6,0	6,5
7	141,640	142,240	600		2,0		2,5		1,0				3,0		6,0	6,5
8	142,240	142,480	240		2,0		2,5		1,0				4,8		2,5	6,0
9	142,480	142,640	160		6,4		6,4		5,0				6,5		2,5	7,0
10	142,640	143,080	440		6,4		6,4		5,0				6,5		2,5	7,0
11	143,080	143,160	80		0,6		2,5		-				4,8		2,5	6,0
12	143,160	143,760	600		0,6		2,5		8,1				4,8		2,5	6,0
13	143,760	144,000	240		0,6		2,5		8,1				4,8		2,5	6,0

TABELA 5.45 - b - Espessura de Reforço Calculadas

02-S Direita				PRO 11/79				PRO 269/94				PRO 159/85				
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Executado - (cm) Direita/Esquerda
1	338,600	340,340	1.740	-		1,4		2,8				-		1,4		1,4
2	340,340	340,500	160	1,5		1,5		0,4				3,0		1,4		1,4
3	340,500	341,100	600	-		1,4		0,1				3,0		1,4		1,4
4	341,100	342,600	1.500	1,5		1,5		0,4				3,0		1,4		1,4
5	342,600	343,200	600	1,5		1,5		0,4				3,0		1,4		1,4
6	343,200	343,500	300	-		1,4		-				-		1,4		1,4
7	343,500	343,900	400	1,5		1,5		0,4				3,0		1,4		1,4

02-S Esquerda				PRO 11/79				PRO 269/94				PRO 159/85				
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Executado - (cm) Direita/Esquerda
1	338,600	340,000	1.400		1,5		1,5		2,8				3,0		1,4	1,4
2	340,000	340,800	800		-		1,4		-				-		1,4	1,4
3	340,800	341,600	800		-		1,4		0,1				-		1,4	1,4
4	341,600	342,600	1.000		1,5		1,5		0,4				3,0		1,4	1,4
5	342,600	343,000	400		-		1,4		-				3,0		1,4	1,4
6	343,000	343,900	900		1,5		1,5		0,4				4,8		1,4	1,4

03-S Direita				PRO 11/79				PRO 269/94				PRO 159/85				
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Executado - (cm) Direita/Esquerda
1	183,500	183,820	320	-		2,5		5,0				4,8		4,9		6,0
2	183,820	184,380	560	-		2,5		5,0				4,8		5,0		6,0
3	184,380	184,980	600	1,8		2,5		5,0				4,8		5,6		6,0
4	184,980	185,620	640	1,8		2,5		5,0				4,8		5,5 - 6,3		6,0
5	185,620	185,820	200	5,3		5,3		5,0				6,5		6,4		6,5
6	185,820	186,100	280	5,3		5,3		5,0				6,5		6,1		6,0
7	186,100	186,220	120	5,3		5,3		5,0				6,5		6,5		6,5
8	186,220	186,540	320	5,3		5,3		5,0				6,5		6,5		6,5
9	186,540	187,020	480	5,3		5,3		5,0				6,5		6,1		5,0
10	187,020	187,460	440	5,3		5,3		5,0				4,8		6,3		6,5
11	187,460	188,540	1.080	5,1		5,0		5,0				4,8		6,4 - 4,7		6,5
12	188,540	189,460	920	4,8		4,8		5,0				3,0		4,4 - 6,0		6,0
13	189,460	189,660	200	4,8		4,8		5,0				6,5		6,0		6,0
14	189,660	190,020	360	3,3		3,2		5,0				4,8		6,2 - 5,9		6,0
15	190,020	190,300	280	3,3		3,2		5,0				6,5		5,8		6,0
16	190,300	190,580	280	3,3		3,2		5,0				3,0		5,8		6,5
17	190,580	190,860	280	3,3		3,2		5,0				4,8		6,1		6,5
18	190,860	191,220	360	3,3		3,2		5,0				4,8		6,0		6,5
19	191,220	191,460	240	3,3		3,2		5,0				3,0		5,9		6,5
20	191,460	192,460	1.000	6,3		6,2		5,0				4,8		5,7 - 6,3		6,5
21	192,460	192,940	480	6,3		6,2		5,0				4,8		6,6 - 6,8		6,5
22	192,940	193,380	440	7,4		7,0		5,9				4,8		6,6		7,0
23	193,380	193,820	440	7,4		7,4		5,9				4,8		6,8		7,0
24	193,820	196,420	2.600	7,4		7,4		5,9				4,8		6,5 - 5,5 - 6,0		7,0
25	196,420	196,620	200	4,8		4,8		5,0				6,5		6,4		7,0
26	196,620	197,000	380	4,8		4,8		5,0				4,8		6,1 - 6,5		7,0

TABELA 5.45 - c - Espessura de Reforço Calculadas

03-S Esquerda				PRO 11/79				PRO 269/94				PRO 159/85				
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Executado - (cm) Direita/Esquerda
1	183,500	184,640	1.140		5,1		5,0		5,0				6,5		6,1 - 6,2	6,0
2	184,640	186,080	1.440		5,1		2,9		5,0				6,5		5,2	6,0 - 6,5
3	186,080	186,240	160		4,3		2,5		5,0				4,8		6,0	6,0 - 6,5
4	186,240	186,960	720		4,3		4,3		5,0				4,8		5,9	6,5 - 6,0
5	186,960	187,160	200		4,3		4,3		5,0				6,5		6,3	6,5
6	187,160	187,840	680		2,1		2,5		5,0				4,8		5,6	6,5
7	187,840	188,160	320		2,1		2,5		5,0				4,8		5,9	6,5
8	188,160	188,480	320		2,1		2,5		5,0				4,8		5,7	6,5
9	188,480	189,320	840		2,4		2,5		5,0				6,5		5,7	6,0
10	189,320	189,920	600		2,4		2,5		5,0				6,5		5,7 - 5,2	6,0
11	189,920	190,440	520		-		2,5		5,0				4,8		5,3	6,0
12	190,440	192,520	2.080		6,3		6,2		5,0				6,5		5,1 - 6,4 - 6,3	6,5
13	192,520	193,840	1.320		6,3		6,2		5,0				4,8		6,3 - 6,0	6,5 - 7,0
14	193,840	194,760	920		6,3		6,2		5,0				4,8		5,9	7,0
15	194,760	195,120	360		4,3		4,3		5,0				6,5		5,9	7,0
16	195,120	197,000	1.880		4,6		4,5		5,0				4,8		6,0 - 5,4 - 6,3	7,0

04-S				PRO 11/79				PRO 269/94				PRO 159/85				
Subtrecho	de km	à km	Extensão (m)	Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Calculado - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Projeto - (cm) Direita/Esquerda		Reforço Executado - (cm) Direita/Esquerda
1	357,000	358,040	1.040	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0	3,0	-	-	4,0
2	358,040	358,940	900	-	-	-	-	-	-	-	-	6,5	4,8	-	-	4,0
3	358,940	360,080	1.140	-	-	-	-	-	-	-	-	4,8	4,8	-	-	4,0
4	360,080	361,400	1.320	-	-	-	-	-	-	-	-	4,8	4,8	-	-	4,0
5	361,400	362,960	1.560	-	-	-	-	-	-	-	-	4,8	4,8	-	-	4,0
6	362,960	364,880	1.920	8,9		12,1		7,4		9,2		6,5	4,8	-	-	4,0
7	364,880	365,600	720	-	-	-	-	-	-	-	-	4,8	4,8	-	-	4,0
8	365,600	366,320	720	9,2		12,3		7,6		9,4		6,5	3,0	-	-	4,0
9	366,320	367,000	680	-	-	-	-	-	-	-	-	4,8	4,8	-	-	4,0

TABELA 5.45 - d - Espessura de Reforço Calculadas

Obs: Reforço com CPA

→ Cada projeto fornece uma espessura diferente de reforço, em função da deflectometria e defeitos apresentados. Foi observada uma alternância muito grande entre os mesmos, na definição de qual fornece o reforço mais espesso. Nos projetos analisados neste estudo, os diferentes projetistas utilizaram o mesmo critério para determinação do reforço de projeto, utilizando-se de dois ou três métodos de dimensionamento, dentre o DNER PRO 11/79, DNER PRO 159/85, DNER PRO 269/94 e pelo critério mecânico com utilização do programa computacional ELSYM5, adotando-se a camada mais espessa entre os resultados obtidos.

5.5.2 Considerações Sobre o Tráfego

De posse dos dados do último cálculo oficial de fatores de veículos DNIT/DNER (1986), e os dados atuais de tráfego colhidos dos próprios projetos de dimensionamento, procurou-se fazer um comparativo com o objetivo de mostrar a evolução do tráfego, não só com o aumento do número de veículos, mas também com o aumento das composições destes.

A Tabela 5.46 mostra o resultados obtidos, denominados ‘CALCULADOS’ e podem ser comparados com os números utilizados nos projetos, e pode-se chegar a algumas constatações.

TABELA 5.46 – Número N Calculados e de Projeto

TRECHO	PROJETOS		CALCULADOS	
	USACE	AASHTO	USACE	AASHTO
Norte 1	1,39E+07	4,69E+06	7,39E+06	1,91E+06
Norte 2	1,47E+07	4,89E+06	9,59E+06	2,37E+06
Norte 3	1,36E+07	5,18E+06	6,49E+06	2,17E+06
Norte 4	1,32E+07	5,18E+06	6,49E+06	2,17E+06
Sul 1	3,20E+07	1,80E+07	2,50E+07	5,88E+06
Sul 2	3,70E+07	2,00E+07	2,98E+07	7,20E+06
Sul 3	2,20E+07	1,20E+07	1,39E+07	3,35E+06
Sul 4	2,50E+07	7,80E+06	2,75E+07	6,65E+06

Os valores dos números de repetições do eixo padrão de 8,2 toneladas utilizados nos projetos são 57% (cinquenta e sete por cento) maiores que os calculados com os fatores de veículos DNIT/DNER (1986), para os critérios da USACE e 149% (cento e quarenta e nove por cento) maiores para os critérios da AASHTO.

Apenas para o projeto do trecho 04 SUL foram utilizados os fatores de veículos DNIT/DNER (1986), conforme pode ser visto pela similaridade dos números obtidos.

Para os números N de projeto para os trechos 01, 02 e 03 SUL, verificou-se uma proximidade entre os valores obtidos pelos critérios da USACE e AASHTO, que normalmente a diferença é maior para o critério da USACE.

O tráfego vem evoluindo a cada ano, não somente na quantidade de veículos em circulação, mas também no fator de veículos, a diferença entre os dados de projeto (2.000 e 2.001) e o último levantamento oficial do DNER (1.986), apontados neste estudo, foi que ocorreu um incremento de aproximadamente 100% (cem por cento), o que ocorreu nos trechos 01 e 02 Norte.

A figura 5.21 mostra comparativo dos trechos 01 Norte, 01 e 04 Sul, em relação aos valores de projeto e valores calculados com base nos levantamentos de fatores de veículos do DNER (1986).

5.5.3 Considerações Sobre a Necessidade das Intervenções de Restauração

Constatou-se que as deflexões médias por subtrecho homogêneo obtidas com o FWD antes das restaurações, convertidas para valores da Viga Benkelman pelo critério do Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos (DNER, 1998), encontraram-se abaixo das deflexões admissíveis dos métodos de projeto de restauração DNER PRO 11/79 e DNER PRO 269/94.

Assim foi realizada análise, com os mesmos valores citados, calculando-se as deflexões características por subtrecho homogêneo, pelos critérios dos mesmos métodos, para uma comparação com as deflexões máximas dos projetos de restauração e as deflexões admissíveis, como mostra a Tabela 5.47.

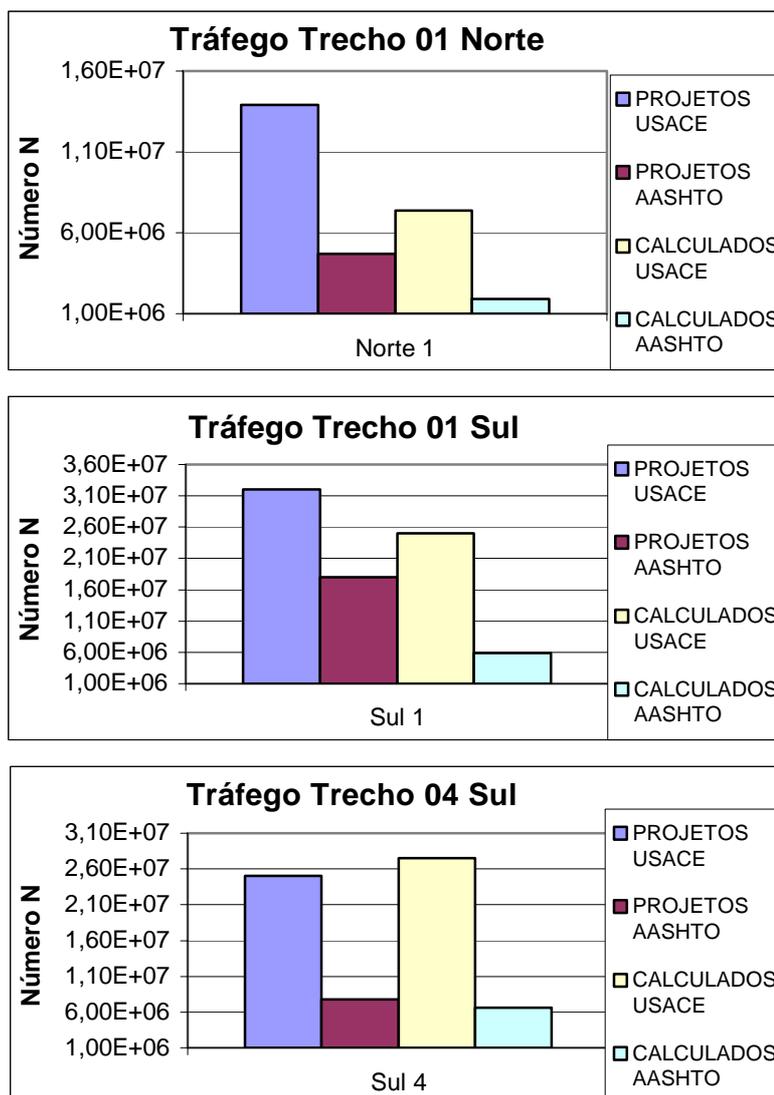


FIGURA 5.21 – Comparativo de Tráfego

As deflexões realçadas em **negrito** mostram os subtrechos, que necessitavam serem restaurados, baseados nos resultados deste estudo e as deflexões dos projetos de restauração, onde foi constatado que as deflexões calculadas neste estudo foram mais severas, em relação à necessidade de restauração, do que as deflexões constantes nos projetos de restauração, entretanto todos os subtrechos receberam intervenções.

O comparativo apresentou que 20 dos 70 subtrechos não necessitavam receber intervenções de reforço estrutural baseando-se no critério da deflectometria.

Tabela 5.47 – Comparativo Deflexões de Projeto e Deflexões Admissíveis

Trecho	Subtrecho	Deflexão (FWD)	Desvio Padrão	Deflexão Característica (FWD)	Deflexão Estudo (VB)	Deflexão de Projeto (VB)	Deflexão Admissível PRO 11/79 (VB)	Deflexão Admissível PRO 269/94 (VB)
01 Norte	1	24	10	33	53	60	48	64
	2	20	7	27	43	40	48	64
	3	19	10	29	46	57	48	64
	4	22	6	28	44	45	48	64
	5	20	9	30	47	42	48	64
	6	21	11	31	50	63	48	64
	7	22	11	33	52	43	48	64
02 Norte	1	47	13	61	76	83	56	63
	2	42	9	51	70	75	56	63
	3	24	5	30	47	47	56	63
	4	39	9	47	67	73	56	63
	5	28	7	35	55	55	56	63
	6	26	7	32	51	49	56	63
	7	21	6	27	43	43	56	63
	8	21	4	25	38	40	56	63
	9	32	9	41	61	60	56	63
	10	40	9	49	68	69	56	63
03 Norte	1	28	13	41	61	39	57	64
	2	29	16	45	65	47	57	64
	3	18	3	21	25	38	57	64
	4	36	10	46	66	48	57	64
	5	33	13	45	65	48	57	64
	6	23	3	26	40	33	57	64
	7	37	8	44	64	52	57	64
	8	25	7	32	50	33	57	64
	9	22	8	29	46	33	57	64
	10	20	7	27	43	41	57	64
	11	34	11	45	64	59	57	64
	12	35	11	46	65	45	57	64
	13	42	10	51	70	55	57	64
	14	39	7	46	65	51	57	64
04 Norte	1	44	12	56	73	95	57	64
	2	43	13	56	74	98	57	64
	3	35	12	47	66	80	57	64
01 Sul	1	53	18	71	82	76	49	55
	2	23	5	28	45	77	49	55
	3	32	9	42	62	66	49	55
	4	32	11	43	63	61	49	55
	5	25	4	29	46	69	49	55
	6	47	18	64	79	66	49	55
	7	29	10	40	60	59	49	55
	8	31	14	45	65	66	49	55
	9	44	15	58	75	63	49	55
	10	54	0	54	72	58	49	55
02 Sul	1	28	9	38	57	39	48	53
	2	18	4	21	28	39	48	53
	3	20	6	26	41	44	48	53
	4	28	8	36	56	52	48	53
	5	18	2	20	26	36	48	53
	6	25	9	34	53	41	48	53

03 Sul	1	27	14	42	62	59	52	59
	2	32	19	51	70	64	52	59
	3	39	10	49	68	64	52	59
	4	26	8	34	54	71	52	59
	5	27	6	34	53	65	52	59
	6	42	19	62	77	58	52	59
	7	31	11	42	62	75	52	59
	8	42	8	50	69	77	52	59
	9	44	17	61	77	78	52	59
	10	38	13	51	70	78	52	59
	11	32	13	45	65	69	52	59
04 Sul	1	21	5	26	41	30	51	57
	2	22	5	27	42	38	51	57
	3	30	13	43	63	39	51	57
	4	26	11	36	56	34	51	57
	5	30	12	42	62	38	51	57
	6	34	18	52	70	58	51	57
	7	20	9	29	45	31	51	57
	8	29	16	44	64	54	51	57
	9	21	5	27	42	38	51	57

5.6 MÓDULOS DE RESILIÊNCIA, TENSÕES E DEFORMAÇÕES NO PAVIMENTO ATRAVÉS DE PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

O presente trabalho mostrou que é possível, tendo disponíveis, os projetos de restauração ou de implantação de um pavimento, junto com os dados de deflectometria e irregularidade longitudinal, estes obtidos após as execuções dos serviços, fazer uma avaliação do comportamento funcional e estrutural do pavimento, e com previsão de vida remanescente.

Os dados de deflectometria também podem ser utilizados para verificação do dimensionamento do pavimento novo ou do reforço necessário, pelo processo inverso com o programa ELSYM5 ou pelo programa computacional EVERPAVE, um dos três programas do EVERSERIES do WSDOT.

Os módulos de resiliência devem ser calculados, no caso de subtrechos homogêneos, através dos valores médios das bacias, após tratamento estatístico de depuração, tomando-se por base a deflexão máxima, embaixo do centro do carregamento, para realização deste tratamento.

Os valores dos módulos de resiliência calculados com deflexões médias, acrescidas ou diminuídas do desvio padrão, apresentaram valores fora da média típica.

5.7 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS ELSYM5 E EVERSERIES

Encontramos muito mais coerências do que divergências na comparação dos resultados obtidos pelos dois programas computacionais. Para a realização de retroanálises, os módulos dos revestimentos em CAUQ e bases obtidos pelo EVERCALC – EVERSERIES foram superiores aos encontrados pelo ELSYM5, mas em ambos os módulos do subleito são muito similares.

Com os resultados das tensões e deformações obtidas em ambos os programas computacionais, quando aplicados aos modelos de fadiga constantes na bibliografia rodoviária, forneceram os resultados procurados, não podendo afirmar que esteja correto para todos os segmentos, pois o estudo foi feito através de médias, mas com certeza uma excelente ferramenta na mão dos avaliadores.

Os programas do EVERSERIES, de versões mais atuais que o ELSYM5, de utilização mais simples, o qual processa iterativamente, através do EVERCALC, os dados alimentados, obtendo-se os módulos de resiliência, e deve ter uma maior utilização, pois apresentou resultados similares, comparados aos obtidos em laboratório, cabendo citar, que para um máximo de 10 iterações fixadas, o mesmo processou as retroanálises em no máximo de 6 a 7 iterações, sendo que na maior parte dos casos não se chegou a um RMSE de 1 a 2%, como prescreve o método, o qual justifica-se pela não uniformidade das bacias de deformação médias, obtidas estatisticamente, das obtidas em campo, por segmento homogêneo, devido a enorme heterogeneidade do estado dos pavimentos.

5.8 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DAS INTERVENÇÕES REALIZADAS EM RELAÇÃO A DEFLECTOMETRIA E IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

Como foi verificado no item 5.5.3, alguns subtrechos não necessitavam receber intervenções de restauração em relação a deflectometria, mas também foi verificado que muitos necessitavam receber intervenções para diminuir a irregularidade longitudinal, assim foi realizado um comparativo para analisar conjuntamente os efeitos das intervenções realizadas em relação a deflectometria e irregularidade longitudinal, comparando os valores obtidos após as restaurações

com os esperados com o reforço aplicado, segundo o método DNER PRO 159/85, conforme apresentado na Tabela 5.48.

Tabela 5.48 – Eficiência das Intervenções de Reforço do Pavimento

Trecho	Subtrecho	Espessura do Reforço (cm)	IRI após / IRI esperado (%)	DEF após / DEF esperada (%)
01 Norte	1	6	36	-42
	2	5	56	-8
	3	4	19	87
	4	4	37	6
	5	6	19	-16
	6	5	7	-18
	7	5	16	-15
02 Norte	1	10	38	-19
	2	6	-11	-6
	3	4	17	26
	4	5	22	2
	5	4	11	-25
	6	4	8	23
	7	4	1	-16
	8	4	33	3
	9	6	55	-17
	10	7	59	-2
03 Norte	1	4	15	-16
	2	6,2	60	12
	3	3,5	14	100
	4	4	30	-3
	5	6,2	28	0
	6	3,5	39	-37
	7	5,5	39	-19
	8	3,5	1	17
	9	3,5	37	-16
	10	5,7	5	-22
	11	3,5	32	-65
	12	6,2	14	-7
	13	4	26	13
	14	6,2	17	-7

Trecho	Subtrecho	Espessura do Reforço (cm)	IRI após / IRI esperado (%)	DEF após / DEF esperada (%)
01 Sul	1	7	12	-18
	2	6,5	12	53
	3	6,5	6	-15
	4	6,5	8	13
	5	6,5	74	18
	6	6,5	18	-10
	7	6	11	0
	8	7	20	34
	9	7	14	-6
	10	6	4	-21
02 Sul	1	1,4	18	-37
	2	1,4	11	4
	3	1,4	15	-15
	4	1,4	14	-18
	5	1,4	29	9
	6	1,4	17	-2
03 Sul	1	6	48	-5
	2	6	48	-54
	3	6,5	21	-59
	4	6	5	-54
	5	6	14	-53
	6	6,5	10	-68
	7	6,5	-2	-50
	8	7	42	-12
	9	7	-1	-22
	10	7	5	-19
	11	7	-8	-56
04 Sul	1	4	11	77
	2	4	-5	70
	3	4	-10	8
	4	4	-20	13
	5	4	8	17
	6	4	8	-22
	7	4	-17	84
	8	4	-12	-21
	9	4	-11	101

Observação: Sinal (-) significa que o valor após a intervenção é menor que o esperado, isto é, atendeu a previsão de projeto.

Em relação aos serviços de restauração pode-se afirmar, conforme os percentuais apresentados na Tabela 5.48, que as intervenções realizadas não foram eficientes para baixar as deflexões e a

irregularidade longitudinal, pois em relação a deflectometria dos 67 subtrechos estudados 42 atingiram o esperado no método DNER PRO 159/85, e apenas 10 atingiram a irregularidade esperada pelo mesmo método, salientados em fundo escuro e negrito, mostrando deficiência na execução dos serviços, tendo ocorrido problemas com os materiais utilizados ou no processo construtivo.

Apenas quatro subtrechos homogêneos atenderam ao esperado pelo método DNER PRO 159/85, conjuntamente em relação a irregularidade e a deflectometria, destacados em fundo escuro e letras em itálico na Tabela 5.48, e apenas os subtrechos 2 do trecho 2 Norte e 7 do trecho 3 Sul atenderam conjuntamente a irregularidade, deflectometria, pelo citado método, e a vida de fadiga, calculada pelas equações adotadas neste estudo.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

6.1.1 Módulos de Resiliência

Os estudos realizados com os dois programas computacionais, EVERCALC e ELSYM5, para a obtenção dos valores dos módulos de resiliência das camadas das estruturas dos pavimentos foram assim resumidos:

a) Subleito: apresentou similaridade nos resultados de ambos programas computacionais em todos os trechos estudados. Ressalta-se que os módulos de resiliência obtidos para o trecho 01 Norte foram acima da média apresentada pela bibliografia e o trecho 04 Norte apresentou módulos diferentes comparando os resultados do antes com o depois dos serviços de restauração do pavimento.

b) Bases e sub-bases: observou-se similaridade nos módulos de resiliência obtidos para os trechos 01 Norte, 02 Norte, 01 Sul e 04 Sul. Os trechos 01 Norte, 03 Norte e 01 Sul apresentando módulos abaixo da média apontada pela bibliografia, e os trechos 02 Norte, 03 Norte, 01 Sul, 02 Sul e 03 Sul, variação significativa nos resultados obtidos do antes para o depois dos serviços de restauração.

c) Revestimento antigo: apresentou similaridade nos resultados obtidos apenas no trecho 04 Norte. Observou-se variação dos resultados dos módulos comparando o antes com o depois dos serviços de restauração nos trechos 01 Norte, 02 Norte, 01 Sul, 03 Sul e 04 Sul. O programa EVERCALC gerou módulos mais altos que o programa ELSYM5, para as camadas de revestimento antigo.

d) Revestimento novo: não foi apresentada nenhuma similaridade nos resultados obtidos pelos dois programas computacionais.

e) Avaliação geral dos módulos obtidos: com exceção do subleito, o programa EVERCALC gerou módulos de resiliência maiores que o ELSYM5, estando os resultados do EVERCALC acima da média apontada pela bibliografia e os do ELSYM5 da média para baixo.

O programa EVERCALC apresentou em alguns subtrechos, resultados acima do limite superior apresentado pela bibliografia, enquanto o ELSYM5 apresentou alguns subtrechos com valores abaixo ao limite inferior da citada bibliografia.

6.1.2 Vida de Fadiga

O estudo do atendimento da vida de fadiga, tomando como base o proposto nos projetos de restauração e comparadas com os resultados obtidos pelos programas computacionais e equações de vida de fadiga utilizados neste trabalho, os resultados foram:

- Trecho 01 Norte: 1(um) subtrecho;
- Trecho 02 Norte: 7 (sete) subtrechos;
- Trecho 03 Norte: 9 (nove) subtrechos;
- Trecho 04 Norte: 1(um) subtrecho;
- Trecho 01 Sul: nenhum;
- Trecho 02 Sul: nenhum;
- Trecho 03 Sul: 6 (seis) subtrechos;
- Trecho 04 Sul: nenhum.

6.1.3 Irregularidade Longitudinal

Após as intervenções de restauração de pavimento, os atendimentos ao esperado pelo DNER PRO 159/85, em relação à irregularidade longitudinal foram:

- Trecho 01 Norte: nenhum;
- Trecho 02 Norte: 1 (um) subtrecho;
- Trecho 03 Norte: nenhum;
- Trecho 01 Sul: nenhum;
- Trecho 02 Sul: nenhum;

- Trecho 03 Sul: 3 (três) subtrechos;
- Trecho 04 Sul: 6 (seis) subtrechos.

6.1.4 Deflexões

Após as intervenções de restauração de pavimento, o atendimento ao esperado pelo DNER PRO 159/85, em relação à deflectometria foram:

- Trecho 01 Norte: 5 (cinco) subtrechos;
- Trecho 02 Norte: 6 (seis) subtrechos;
- Trecho 03 Norte: 9 (nove) subtrechos;
- Trecho 01 Sul: 5 (cinco) subtrechos;
- Trecho 02 Sul: 4 (quatro) subtrechos;
- Trecho 03 Sul: todos;
- Trecho 04 Sul: 2 (dois) subtrechos.

6.1.5 Atendimento ao Esperado em uma Análise Geral

A análise conjunta do atendimento ao esperado levando-se em consideração a vida prevista em projeto e o esperado em relação à irregularidade longitudinal e a deflectometria pelo DNER PRO 159/85, após as intervenções de restauração, apontaram apenas o subtrecho 2 do trecho 02 Norte e o subtrecho 7 do trecho 03 Sul, atendendo ao três critérios citados, ou seja, pode-se dizer que nestes subtrechos as intervenções foram eficientes.

6.1.6 Considerações do Revestimento Asfáltico como Camada Única com Módulo Equivalente

Os resultados obtidos nos estudos de retroanálise e vida de fadiga considerando o revestimento novo e antigo trabalhando atuando como camada única foram mais consistentes que os resultados obtidos considerando as camadas trabalhando isoladas, devido às distorções ocorridas nos resultados dos módulos de resiliência, sempre com uma das camadas respondendo pela

rigidez de ambas, com grandes distorções do antes para o depois. A vida de fadiga simplesmente demonstrou o que vem ocorrendo em campo, com intervenções prematuras, atestando o não atendimento da vida proposta em projeto.

6.1.7 Conclusões Gerais

Dos oito trechos estudados:

- cinco tem problemas verificados na camada de revestimento, que podem ser por deficiência do CAP, pela adesividade do CAP com o agregado, do próprio agregado ou da confecção do CAUQ;
- dois por problemas construtivos, sendo um pela possível não remoção de base de solo-cimento danificada com alto grau de trincamento e o outro pela não compactação de camada inferior da estrutura;
- um não teve problemas, mas sim optou-se por uma intervenção não interpretada como reforço estrutural, mas sim de rejuvenescimento.

De modo geral, com o presente estudo verificou-se:

a) Projetos de Restauração

Devido a problemas construtivos não pôde-se determinar, se as espessuras dimensionadas pelos métodos atenderiam na íntegra à vida útil estipulada nos projetos. De maneira geral, as espessuras aplicadas corrigiram as irregularidades longitudinais e as deflexões máximas, colocando-as dentro dos limites aceitáveis, mas não atendendo ao esperado pelo método DNER PRO 159/85.

Os problemas constatados não foram atribuídos aos projetos de dimensionamento, mas questionou-se em relação ao procedimento adotado por todos os projetistas, na utilização de vários métodos de dimensionamento e a adoção da camada mais espessa calculada pelos métodos como a de reforço. Nem todos subtrechos tinham necessidade de receber reforço, com base em análise realizada em função da deflectometria.

b) Módulos de Resiliência por Retroanálise e Laboratório

Os módulos de resiliência por retroanálise e de laboratório, por ambos programas utilizados, para o subleito, apresentaram-se semelhantes, encontraram-se também dentro dos limites apresentados pela bibliografia.

Para a base e sub-base em alguns casos foi constatada similaridade entre os resultados apontados pelos dois programas computacionais, com a maioria dos dados dentro dos limites apresentados pela bibliografia.

Para as camadas de revestimento asfáltico, os módulos fornecidos pelo programa EVERCALC foram mais altos que os fornecidos pelo programa ELSYM5, estando em grande parte acima do limite superior apontado pela bibliografia. O programa ELSYM5 apresentou resultados abaixo do limite inferior apontado pela bibliografia. Os módulos de resiliência por retroanálise obtidos pelo programa EVERCALC para o revestimento asfáltico foram mais próximos dos obtidos por laboratório, em comparação com o programa ELSYM5, cabendo lembrar que as amostras colhidas foram nos bordos, sem trincamentos propiciando módulos maiores.

c) Vida de Fadiga

O processo desenvolvido com a utilização de programas computacionais, partindo-se de bacias de deformação fornecem resultados que podem ser considerados como diagnóstico do pavimento, mas com resultados muito diferentes entre os modelos estudados.

d) Cimentos Asfálticos de Petróleo

Os ensaios em laboratório mostraram os asfaltos como muito rígidos após a usinagem, fato que pode tornar as misturas mais suscetíveis ao trincamento prematuro.

e) Eficiência das Intervenções de Restauração

Os serviços realizados, motivados por deficiência dos materiais utilizados ou processo construtivo não foram eficientes, de modo geral, não apresentaram os resultados esperados, previstos pelo método DNER PRO 159/85.

Pelos valores analisados, verificou-se que as intervenções não foram eficientes para melhorar as condições funcionais e/ou estruturais dos pavimentos.

6.2 RECOMENDAÇÕES

6.2.1 Módulos de Resiliência

Intensificar estudos de retroanálise e laboratório para a determinação de módulos de resiliência, estabelecendo correlações, utilizando os resultados para análise das condições estruturais das camadas dos pavimentos, para a definição das intervenções necessárias em projetos de restaurações.

6.2.2 Projetos de Restauração

Estudo para estabelecer qual método pode ser utilizado, em função da deflectometria, irregularidade longitudinal e defeitos no revestimento asfáltico.

6.2.3 Revestimentos Asfálticos

Desenvolver estudos por retroanálise e laboratório, visando uma melhor definição do comportamento de camadas como camada única com módulo equivalente, definindo se após o reforço, o revestimento asfáltico antigo e o novo trabalham ou não como uma só.

CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFIA

7.1 Bibliografia Utilizada

APPEA, A. K.; AL-QADI, I. L., “*Assessment of Falling Weight Deflectometer Data for Stabilized Flexible Pavements*” - Record – Journal of the Transportation Research Board nº 1709 – National Academy Press – Washington, D.C., USA, 2000. 9p.

AASHTO, “*AASHTO - Guide for Design of Pavement Structures*”. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, 1986. 270p.

AASHTO, “*AASHTO - Guide for Design of Pavement Structures*”. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, 1993-a. 587P.

AASHTO T 170-93 (ASTM D 1856-95a) – “*Recovery of Asphalt from Solution by Absorption Method*”. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, 1993-b. 4P.

AHLBORN, G., “*Elastic Layered Systems with Normal Loads*”. Institute of Transportation and Traffic in Engineering, Universidade da Califórnia. Berkeley, 1972.

ALBERNAZ, C.A.V., “*Método Simplificado de Retroanálise de Módulos de Resiliência de Pavimentos Flexíveis a Partir da Bacia de Deflexão*” . Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1997. 99 p.

ALBERNAZ, C. A.V.; NEVES, M.A. ; COSTA, A.C. , “*Aplicação Prática da Análise Mecânica de Pavimentos na Rodovia BA-052*”. 34ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Campinas, 2003. 23p.

ARANOVICH, L. A. S., “*Treinamento em Sistema de Gerência de Pavimentos*”. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná. Curitiba, 1991. 84 p.

ASTM . “*Pavement Management Implementation*”. American Society for Testing and Materials. Philadelphia. PA., (ASTM. Special Technical Publ. 1121).

BALBO, J. T., “*Análise de Tráfego para Finalidade de Projetos de Pavimentos*”. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997-a. 17p.

BALBO, J.T. , “*Pavimentos Asfálticos: Patologias e Manutenção*”. Editora Plêiade. São Paulo, 1997-b, 103p.

BROWN, S.F., “*Soil Mechanics in Pavement Engineering*”. Géotechnique. Institution of Civil Engineers by Thomas Telford Services Limited. Londres, 1996. 47p.

CARDOSO, S.H. , “*Faixas de Módulos Dinâmicos (Elásticos) Obtidos por Retroanálise Durante Sete Anos*” .29^a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Cuiabá, 1995. 23p.

CARDOSO, S.H., “*Avaliação Estrutural e Funcional de Pavimentos Asfálticos*”. Programa de Capacitação Técnica – DER-SC. Florianópolis, 1997-a.

CARDOSO, S.H., “*Subgrade Modulus Models Based on the Backcalculation of 2,220 Deflection Basins. Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*”, Editora Almeida. Rotterdam, 1997-b. 2p.

COUTINHO NETO, B. ; FABBRI, G.T.P. , “*O Uso de Redes Neurais Artificiais na Retroanálise de Pavimentos Flexíveis*” . 34^a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Campinas, 2003. 17p.

DER/PR – “*Especificações de Serviços Rodoviários*”. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná. Curitiba, 1991. 656p.

DER/SP – CONCESSIONÁRIA RODOVIA DAS COLINAS – “*Projeto de Dimensionamento de Pavimento Flexível – SP-300 – Rodovia Marechal Rondon*”. São Paulo, 2001. 79p.

DNER – “*Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento A - DNER - PRO 10/79*”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1979-a., 31p.

DNER – “*Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento B – DNER - PRO 11/79*”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1979-b. 16p.

DNER – “*Levantamento da Condição de Superfície de Segmentos-Testemunha de Rodovias de Pavimento Flexível ou Semi-Rígido para Gerência de Pavimentos a Nível de Rede – DNER – ES - 128/83*” - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1983. 9p.

DNER – “*Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos – DNER - PRO 159/85*”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1985. 31p.

DNER – “*Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos – DNER - PRO 08/94*”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-a. 10p.

DNER – “*Medição de Irregularidade da Superfície de Pavimento com Sistemas Integradores IPR/USP e Maysmeter – DNER - PRO 182/94*”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-b. 18p.

DNER– Material Betuminoso - “*Determinação da Penetração – DNER – ME - 003/94*” - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-c. 7p.

DNER– Material Betuminoso - “*Determinação da Viscosidade – DNER – ME - 004/94*” - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-d. 2p.

DNER– Misturas Betuminosas - “*Determinação do Módulo de Resiliência – DNER – ME – 133/94*” - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-e. 5p.

DNER– Misturas Betuminosas - “*Porcentagem de Betume – DNER – ME - 053/94*” - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-f. 5p.

DNER – “*Pavimento – Determinação das Deflexões pelo Dynaflect – DNER – ME - 39/94*”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-g. 3p.

DNER – “*Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis – TECNAPAV – DNER - PRO 269/94*”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-h. 17p.

DNER– “*Pavimento – Determinação das Deflexões pela Viga Benkelman – DNER – ME - 24/94*” - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-i. 6p.

DNER– Solos - “*Análise Granulométrica – DNER – ME - 051/94*” - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-j. 12p.

DNER– Solos - “*Ensaio de Compactação Utilizando Amostras Não Trabalhadas – DNER – ME - 162/94*” - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-k. 7p.

DNER– Solos - “*Determinação da Massa Específica Aparente ‘in situ’, com Emprego do Frasco de Areia – DNER – ME - 092/94*” - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-l. 5p.

DNER– Solos - “*Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras Não Trabalhadas – DNER – ME - 049/94*” - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-m. 14p.

DNER– Solos - “*Determinação do Limite de Liquidez – DNER – ME - 122/94*” - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-n. 7p.

DNER– Solos - “*Determinação do Limite de Plasticidade – DNER – ME - 082/94*” - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-o. 3p.

DNER– Solos - “*Determinação do Módulo de Resiliência – DNER – ME - 131/94*” - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-p. 8p.

DNER – “*Solo – Determinação do Teor de Umidade - DNER-ME 213/94*”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-q. 3p.

DNER – “*Pavimento – Delineamento de Linha de Influência Longitudinal da Bacia de Deformação por Intermédio da Viga Benkelman - DNER-ME 061/94*”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-r. 8p.

DNER – “*Avaliação Subjetiva da Superfície de Pavimentos - DNER-ME 007/94*”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994-s. 16p.

DNER – “*Determinação de Deflexões Utilizando o Deflectometro de Impacto Tipo Falling Weight Deflectometer (FWD) – DNER - PRO 273/96*”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1996. 4p.

DNER – “*Pvimentação – Concreto Betuminoso – DNER –ES - 313/97*”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1997. 16p.

DNER - “*Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos*”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1998. 242p.

DNIT - “*Levantamento Visual Contínuo para Avaliação da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos – DNIT 008-2003 PRO*”. Departamento Nacional de Infra-Estrutura Terrestre. Rio de Janeiro, 2003-a. 11p.

DNIT - “*Avaliação Subjetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos – DNIT 009-2003 PRO*”. Departamento Nacional de Infra-Estrutura Terrestre. Rio de Janeiro, 2003-b. 6p.

DNIT - “*Avaliação Objetiva de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos – DNIT 006-2003 PRO*”. Departamento Nacional de Infra-Estrutura Terrestre. Rio de Janeiro, 2003-c. 10p.

DNIT - “*Levantamento para Avaliação da Condição de Superfície de Subtrecho Homogêneo de Rodovias de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos para Gerência de Pavimentos e Estudos e Projetos – DNIT 007-2003 PRO*”. Departamento Nacional de Infra-Estrutura Terrestre. Rio de Janeiro, 2003-c. 11p.

DUARTE, J.C. ; SILVA, P.D. ; FABRÍCIO, J.M. , *Correlação entre Deflexões Características em Pavimentos Flexíveis Medidos com Viga Benkelman e com o FWD . 30ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Salvador, 2003. 11p.*

FABRÍCIO, J.M. ; MAGALHÃES, J.P. ; QUEIROZ, C. ; FABRÍCIO, O.F., “*Utilização dos Modelos de Desempenho da Norma DNER PRO-159/85 na Avaliação da Qualidade de Pavimentos Flexíveis*”. 33ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Florianópolis, 2001. 7p.

FERNANDES, I.S., “*Caracterização do Comportamento Mecânico da Camada de Brita Graduada ‘in situ’*”. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina , Florianópolis, 2000. 101 p.

GONÇALVES, F.J.P., “*Utilização de Expert System na Manutenção de Pavimentos*” . Tese de Mestrado apresentada ao Instituto Tecnológico da Aeronáutica – ITA, São José dos Campos, 1997.

GONTIJO, L.C. ; RIBEIRO, M. H. ; SILVA, P.L. ; GONTIJO, P.R.A. “*Roteiro Técnico para Aplicação dos Métodos Oficiais do DNIT para Dimensionamento do Reforço de Pavimentos Flexíveis*” . 34ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv , Campinas, 2003. 44p.

HAJEK, J. J.; KAZMIEROWSKI, T. J.; MUSGROVE, G., “*Switching to International Roughness Index*” - Journal of the Transportation Research Board nº 1643 – National Academy Press – Washington, D.C., USA, 1998. 9p.

HAAS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. “*Modern Pavement Management*”. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida, 1994. 583p.

HERMANSON, A. – “*Simulation of Asphalt Concrete Pavement Temperatures for use with FWD*” – Road Materials and Pavement Design – Volume 3 – Editores Associados – Pennsylvania Transportation Institute, USA – Roads and Transportation Technology, Pretoria, South Africa – Centre de Recherches Routières, Brussels, Belgium – Tongji University, Shanghai, P.R. of China – Chuo University, Tokyo, Japan – University Laval, Sainte-Foy, Canada – University of Florida, USA, 2003. 19p.

HEUKELOM, W ; KLOMP, A.J.G., “*Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction*”. Proceedings, 1. INTER. CONF. SATRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS, Universidade de Michigan, Ann Arbor, 1962. 1039 p.

HUANG, Y. H., “*Pavement Analysis and Design*”. Editora Prentice-Hall, New Jersey, 1993. 805 p.

KOPPERMAN, S. ; TILLER, G. ; TSENG, M.T., “*Elsym5 Interactive Microcomputer Version: user Manual IBM-PC and Compatible Version*” – FHWA , EUA, 1985.

KULKARNI, R. B. – “*Rational Approach in Applying Reliability Theory to Pavement Structural Design*” – Record – Journal of the Transportation Research Board nº 1449 – National Academy Press – Washington, D.C., USA, 1994. 10p.

MARCON, A. F., “*Gerência e Avaliação de Pavimentos – Notas de Aula*”. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFSC. Florianópolis, 2002-a.

MARCON, A. F., “*Restauração de Pavimentos – Notas de Aula*”. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFSC. Florianópolis, 2002-b.

MARCON, A.F. ; BASÍLIO, R., “*Caracterização do Comportamento Mecânico das Camadas de Pavimentos de Rodovias Estaduais de Goiás*” . 34ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Campinas, 2003. 20p.

MARCON, A.F., “*Previsão de Comportamento Estrutural e Funcional de Pavimentos Flexíveis*”. Simpósio de Novos Métodos de Avaliação Funcional e Estrutural de Pavimentos – ABPv, Rio de Janeiro, 1998. 34p.

MEDINA, J. “*Mecânica dos Pavimentos*”. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Editora UFRJ, Rio de Janeiro, 1997. 380 p.

MORILHA JÚNIOR, A., “*Estudo Sobre a Ação de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas*”. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004. 166p.

NÓBREGA, E. S. ; MOTTA, L.M.G. , “*Comparação de Métodos de Retroanálise sua Influência no Dimensionamento de Reforço*” . 34ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Campinas, 2003. 15p.

PAIVA, C.E.L.; PEDRAZI, T.B. , “*Estudo Comparativo dos Métodos de Projeto de Recapeamento de Pavimentos Flexíveis*” . 34ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Campinas, 2003. 13p.

PEREIRA SOBRINHO, O. M. ; CAVALCANTE, J. C. “*Curso Intensivo de Restauração de Pavimentos. Noções sobre Mecânica dos Pavimentos*”. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná – Maringá, 1999.

PETERLINI, P. S., “*Treinamento em Reabilitação de Pavimentos Asfálticos*”. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná. Curitiba, 2000. 199p.

PITTA, D.M., “*Contribuição à Retroanálise das Superfícies Deformadas em Pavimentos Asfálticos Típicos da Região Sul do Brasil*”. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1998. 127 p.

PREUSSLER, E. S. ; VALE, A. F. ; CARVALHO, R. L. E. ; PINTO, I. E., “*Retroanálise – Processos para Avaliação Estrutural de Pavimentos*”. 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Brasília, 2000. 10p.

PINTO, S.; PREUSSLER,. “*Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis*”. Rio de Janeiro: Editora Copiarte. 2002. 259 p.

ROCHA FILHO, N. R., “*Estudo de Técnicas para Avaliação Estrutural de Pavimentos por Meio de Levantamentos Deflectométricos*”. Dissertação de Mestrado – ITA/SP. São José dos Campos, 1996. 138p.

RODRIGUES, R.M., “*Gerência de Pavimentos*” Apostila – Parte II, ITA, São José dos Campos, 2001.

SANTANA, H. – “*Evolução dos Métodos de Projeto, Avaliação e Reforço de Pavimentos Asfálticos no Brasil*” – 2º SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS E PROJETO DE REFORÇO – Volume II, 1989.

SUZUKI, C. Y. ; NAGAO, E. M. ; FUJII, W. “*Considerações de Parâmetros de Curvatura da Bacia de Deformação e do Número Estrutural no Dimensionamento de Reforço de Pavimentos Flexíveis*”, 33ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Florianópolis, 2001-a. 11p.

SUZUKI, C. Y. ; NAGAO, E. M. ; OSÓRIO, C.A.A.C. ; AZEVEDO, A.M. “*Considerações Sobre o Conceito de Confiabilidade na Análise Mecânica de Estruturas de Pavimentos Flexíveis*” 33ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Florianópolis, 2001-b. 12p.

TRICHÊS, G., “*Concreto Compactado a Rolo para Aplicação em Pavimentação: Estudo do Comportamento na Fadiga e Proposição de Metodologia de Dimensionamento*”. Tese de Doutorado, ITA/SP. São José dos Campos, 1993.

TRICHÊS, G., “*Comportamento dos Materiais Empregados em Pavimentação – Notas de Aula*”. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFSC. Florianópolis, 2002-a.

TRICHÊS, G., “*Dimensionamento de Pavimentos – Notas de Aula*”. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFSC. Florianópolis, 2002-b.

TWENEBOAH, K.B. ; RUTH, B.E. ; MILEY, W.G., “*Dynaflect Evaluation of Layer Moduli in Florida's Flexible Pavement Systems*”. Transportation Research Record n° 1196, 1990., New Jersey, 1993. 805 p.

ULLIDTZ, P., “*Pavement Analysis*”. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., Holanda, 1987. 318p.

VILLELA, A. R. A. ; MARCON, A. F., “*Análise da Base de dados de Rodovias Catarinenses para a Aplicação em Projetos de Reabilitação*”. 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Brasília, 2000. 11p.

VILLELA, A.R.A. ; MARCON, A. F., “*Avaliação Estrutural de Pavimentos Utilizando um Método Simplificado de Retroanálise – RETRAN-2CL*”. 33ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Florianópolis, 2001-a. 12p.

VILLELA, A.R.A. ; MARCON, A. F., “*Retroanálises em Estruturas de Pavimento Asfáltico, em Trechos de Rodovias do Sul de Santa Catarina*”. 33ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Florianópolis, 2001-b. 12p.

WITCZAK, M. W., “*Uses and Misuses of Pavement Deflection Data*”. 2º Simpósio Internacional de Avaliação e Projeto de Pavimentos, ABPv, Rio de Janeiro, 1989. 53p.

YODER, E.J. ; WITCZAK, M.W., “*Principles of Pavement Design*”. John Wiley & Sons, Inc . New York, 1975. 711p.

WSDOT, “*Pavement Guide for Design, Evaluation and Rehabilitation*”. Washington State Department of Transportation, EUA, 1995. 969p.

7.2 Bibliografia Consultada

CHAGAS, L.C.M. ; LOPES, L.A.S. ; VIEIRA, A. , “*Comportamento Resiliente de Solos Tropicais da Região Amazônica*” . 34ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Campinas, 2003. 20p.

CHUA,K.H. , MONISMITH,C.L. e CRANDALL,K.C. “*Mechanist Performance Model for Pavemet Management*”. Third International Conference on Managing Pavements, vol. 1, San Antonio – Texas, 1994. 85p.

CRAWLEY, A. B. – “*Innovative Hot In-Place Recycling of Hot-Mix Asphalt Pavement in Mississippi*” - Record – Journal of the Transportation Research Board nº 1654 – National Academy Press – Washington, D.C., USA, 1999. 9p.

DUARTE, J.C. ; SILVA, P.D. ; FABRÍCIO, J.M. , *Correlação entre Deflexões Características em Pavimentos Flexíveis Medidos com Viga Benkelman e com o FWD*” 30ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Salvador, 2003. 11p.

ELTAHAN, A. A. – DALEIDEN, J. F. – SIMPSON, A. L. – “*Effectiveness of Maintenance Treatments of Flexible Pavements*” - Record – Journal of the Transportation Research Board n° 1680 – National Academy Press – Washington, D.C., USA, 1999. 8p.

ELTAHAN, A. A. – LYTTON, R. L. – “*Mechanistic-Empirical Approach for Modeling Reflection Cracking*” - Record – Journal of the Transportation Research Board n° 1730 – National Academy Press – Washington, D.C., USA, 2000. 7p.

FABRÍCIO, J.M., “*A Avaliação Funcional de Pavimentos Flexíveis e Semi Rígidos*”. Simpósio de Novos Métodos de Avaliação Funcional e Estrutural de Pavimentos – ABPv, Rio de Janeiro, 1998. 21p.

FABRÍCIO, J.M. ; FABRÍCIO, J.V.F. “*Utilização do Produto Rd na Retroanálise Simplificada das Medidas de Deflexão em Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos*” . 34ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Campinas, 2003. 16p.

FERREIRA, B.S. ; CARVALHO, C.A.B. ; LIMA, D.C. ; TRINDADE, T.P. ; SILVA, C.H.C. ; BARBOSA, P.S.A. , “*Estimativa de Módulos de Resiliência em Função da Tensão Desvio e Índices Suporte Califórnia de um Latossolo Vermelho Amarelo*” . 34ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Campinas, 2003. 16p.

FLINTSCH, G. W. – ZANIEWSKI, J. P. – MEDINA, A. – “*Development of a Knowledge-Based Formula to Prioritize Pavement Rehabilitation Projects*” - Journal of the Transportation Research Board n° 1643 – National Academy Press – Washington, D.C., USA, 1998. 12p.

GONTIJO, P.R.A., “*Método de Avaliação e Diagnóstico de Pavimentos Rodoviários*”. Simpósio de Novos Métodos de Avaliação Funcional e Estrutural de Pavimentos – ABPv, Rio de Janeiro, 1998. 104p.

HOSSAIN, M. - LA TORELLA, T. M. – CHEN, J.– “*Use of Falling Weight Deflectometer and Dynamic Cone Penetrometer in Pavement Evaluation*” - Record – Journal of the Transportation Research Board n° 1655 – National Academy Press – Washington, D.C., USA, 1999. 8p.

KIM, H.B. – BUCH, N. – PARK, D.Y. – “*Mechanistic-Empirical Rut Prediction Model for In-Service Pavements*” - Record – Journal of the Transportation Research Board nº 1730 – National Academy Press – Washington, D.C., USA, 2000. 11p.

MOMM, L. ; KRYCKYJ, P.R. ; SANT’ANA, W.C., “*Deformação da Camada de Concreto Asfáltico no Pavimento em Função do Raio de Curvatura da Deformada*” 33ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Florianópolis, 2001. 15p.

NÓBREGA, E. S. ; MOTTA, L.M.G. , “*Comparação de Métodos de Retroanálise sua Influência no Dimensionamento de Reforço*” . 34ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Campinas, 2003. 15p.

OLIVEIRA, R. M. B. ; SUZUKI, C. Y., “*Análise do Desempenho Funcional de Pavimento Asfáltico de um Corredor de Ônibus em São Paulo*”. 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Brasília, 2000. P 308 – 319. 12p.

PAIVA, C. E. L. ; CAUSIM, P. B., “*Estudos de Avaliações das Condições Estruturais de um Pavimento a Partir de Bacias de Deformações*”. 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Brasília, 2000. 16p.

PAIVA, J.A.C. ; REZENDE, D.S.A. ; LIMA, D.C. ; CARVALHO, C.A.B. ; SILVA, C.H.C. ; BARBOSA, P.S.A. , “*Influência do Método de Ensaio no Módulo Resiliente de Dois Solos Argilosos da Zona da Mata Norte de Minas Gerais*” . 34ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Campinas, 2003. 10p.

TAFFE JÚNIOR, E. J. ; RODRIGUES R. M., “*Estudo da Aplicabilidade de Procedimentos para Projeto de Restauração de Pavimentos Asfálticos Rodoviários*” . 34ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ABPv, Campinas, 2003. 24p.

TIMM, D.H. – NEWCOMB, D. E. – GALUMBOS, T. V. – “*Incorporation of Reability into Mechanistic-Empirical Pavement Design*” – Record – Journal of the Transportation Research Board nº 1730 – National Academy Press – Washington, D.C., USA, 2000. 10p.

VAN DAM, T. J. – REAY, S., APPELYARD, M. – EACKER, M. J. – “*Development of Laboratory Screening Test for Asphalt Pavement Crack Sealants*” - Record – Journal of the Transportation Research Board n° 1680 – National Academy Press – Washington, D.C., USA, 1999. 8p.

WEISSMAN, S. L. – HARVEY, J. – SACKMAN, J. L. – LONG, F. – “*Selection of Laboratory Test Specimen Dimension for Permanent Deformation of Asphalt Concrete Pavements*” - Record – Journal of the Transportation Research Board n° 1681 – National Academy Press – Washington, D.C., USA, 1999. 8p.

WIMSATT, A. J. – “*Direct Analysis Methods for Falling Weight Deflectometer Deflection Data*” - Record – Journal of the Transportation Research Board n° 1655 – National Academy Press – Washington, D.C., USA, 1999. 12p.

ZAGHLOUL, S. – MOHAMED, E. – “*Pavement Rehabilitation Selection Based on Mechanistic Analysis and Field Diagnosis of Falling Weight Deflectometer Data*” - Record – Journal of the Transportation Research Board n° 1730 – National Academy Press – Washington, D.C., USA, 2000. 10p.