



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL

LABORATORIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS/UFCG
RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

SIVÉLEN SILVA FIGUEIREDO
MAT:20521312

ORIENTADOR:

JOSÉ AFONSO GONÇALVES DE MACÊDO

Campina Grande – Paraíba
Novembro de 2008



Biblioteca Setorial do CDSA. Maio de 2021.

Sumé - PB



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL

CARACTERIZAÇÃO DA RODOVIA BR-230/PB
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS/UFCG

Relatório de estágio supervisionado exigido para conclusão do curso de engenharia civil e obtenção do título de engenheiro (a) Civil na Universidade Federal de Campina Grande.

Campina Grande – Paraíba
Novembro de 2008



CARACTERIZAÇÃO DA RODOVIA BR-230/PB
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS/UFCG

Suêlen Silva Figueiredo

Aluna: Suêlen Silva Figueiredo

Orientador: José Afonso Gonçalves de Macêdo

Campina Grande – Paraíba
Novembro de 2008

Sumário

CAPÍTULO I	7
<i>DESCRIÇÃO DA RODOVIA ESTUDADA E METODOLOGIA APLICADA</i>	7
1.1 – Introdução	7
1.2 – Características da Região da Rodovia	7
1.2.1 – Localização	7
1.2.2 – Geologia	8
1.2.3 – Pedologia	9
1.2.4 – Relevo	10
1.2.5 – Clima e Precipitação	11
1.2.6 – Vegetação	11
1.3 – Características da Rodovia Estudada	11
1.3.1 – Localização do Trecho	12
1.3.2 – Características Climáticas e Pluviométricas	13
1.3.3 – Características Geométricas	13
1.3.4 – Características de Terraplenagem	13
1.3.5 – Características dos Materiais Empregados na Pavimentação	14
1.4 – Ensaio Realizados no Trecho Estudado Durante a Presente Pesquisa	17
1.4.1 – Ensaio de Campo	17
1.6 – Retroanálise e Definição dos Parâmetros Representativos	32
1.6.1 – Retroanálise	32
1.6.2 – Definição dos Parâmetros da Bacia Deflectométrica	32
1.6.3 – Proposta de Solução para Restauração do Pavimento	33
CAPÍTULO II	34
<i>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</i>	34
2.1 – Introdução	34
2.2 – Ensaio de Campo	34
2.2.1 – Levantamentos Deflectométricos com o <i>Falling Weight Deflectometer</i>	34
2.2.2 – Levantamento Deflectométrico com a Viga Benkelman	39
2.2.3 – Comparação entre a viga Benkelman e o FWD	41
2.3 – Avaliação Funcional	43
2.3.1 – Levantamento dos Defeitos de Superfície	43
2.4 – Avaliação Estrutural Não-Destrutiva Através de Retroanálise	50
2.4.1 – Análise pelo Programa RETROANA MR (kgf/cm ²)	51
2.4.2 – Análise pelos Programas EVERCAL5 e ELMOD4 MR (kgf/cm ²)	63
2.4.3 – Análise Comparativa entre os Diferentes Programas Utilizados	76
2.5 – Resultados dos Ensaio de Laboratório	80
2.5.1 – Ensaio de Caracterização e Resistência	80
2.5.2 – Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	84

2.5.3 – Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas.....	86
2.6 – Avaliação Estrutural Destrutiva com Base nos Ensaios de Laboratório89	
2.6.1 – Análise dos Ensaios Realizados com Materiais Coletados do Pavimento Existente ESTACA.....	91
2.6.2 – Resultados dos Ensaios Realizados com Materiais Coletados em Jazida.....	92
2.8 – Métodos de Dimensionamento de Reforço e Estudo Paramétrico.....	105
2.8.1 – Dimensionamento da Camada de Reforço.....	105
2.8.2 – Estudo Paramétrico.....	108
<i>CAPÍTULO III</i>	120
<i>CONCLUSÕES</i>	120
<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	123

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Localização do Estado da Paraíba em relação ao Brasil	8
Figura 1.2 - Mapa de Localização do trecho estudado.....	12
Figura 1.3 - Curvas granulométricas de projeto da mistura da faixa B do CBUQ para a pista	15
Figura 1.4 - Curvas granulométricas de projeto da mistura da faixa C do CBUQ do trecho em estudo	15
Figura 1.5 - Ilustração do sentido da quilometragem e do tráfego da rodovia BR-230/PB – lote III.....	19
Figura 1.6 - Localização esquemática dos pontos de ensaio das bacias Deflectométricas	21
Figura 1.7 - Localização esquemática dos pontos de ensaio das deflexões com a viga Benkelman	21
Figura 1.8 - Esquema dos locais de sondagem.....	22
Figura 1.9 - Ilustração Esquemática dos Segmentos Homogêneos	31
Figura 2.1 - Perfil de deflexões máximas nas faixas direita e esquerda – FWD	35
Figura 2.2 - Deflexões da Viga Benkelman em campo dos trechos analisados e admissíveis pelo PRO11 e PRO269.....	41
Figura 2.3 - Reta de igualdade de deflexões e correlação entre as deflexões máximas obtidas por ponto com viga Benkelman e o FWD – Faixa Direita.....	42
Figura 2.4 - Histograma de deflexões máximas para ambas as faixas de tráfego	43
Figura 2.5 - Relação entre o IGG e a deflexão máxima obtida com o FWD para o trecho estudado nesta pesquisa.....	47
Figura 2.6 - Fotos de defeitos de superfície na faixa esquerda estacas 4129, 4179, 4310 e 5381 do trecho estudado nesta pesquisa.....	49
Figura 2.7 - Estrutura considerada na retroanálise com o Retroana	51
Figura 2.8 - Módulos de resiliência obtidos a partir do programa RETROANA – Faixa Direita (a) estaca 4000 a 4346; (b) da 4354 a 4698	52
Figura 2.9 - Módulos de resiliência obtidos a partir do programa RETROANA – Faixa Esquerda (a) estaca 4000 a 4348 (b) 4356 a 4696	53
Figura 2.10 - Histograma dos módulos de resiliência do revestimento para ambas as faixas de tráfego do trecho analisado neste estudo	54
Figura 2.11 - Histograma dos módulos de resiliência do subleito para ambas as faixas de tráfego do trecho analisado neste estudo.....	55
Figura 2.12 - Módulos médios de resiliência das camadas de revestimento, base+sub-base e subleito por segmento homogêneo – Faixa Direita	58
Figura 2.13 - Correlações entre os parâmetros da bacia e os módulos de resiliência retroanalisados – Faixa Direita	60
Figura 2.14 - Relação entre o IGG e os módulos retroanalisados	61
Figura 2.15 - Contribuição percentual das camadas do pavimento e subleito na deflexão total – Faixa Esquerda.....	62
Figura 2.16 - Estrutura considerada na retroanálise com os programas EVERCAL5 e ELMOD4.....	63
Figura 2.17 - Módulos de resiliência obtidos a partir do programa EVERCALC5 – Faixa Direita (estaca 4804 a 5432)	64
Figura 2.18 - Módulos de resiliência obtidos a partir do programa EVERCALC5 – Faixa Esquerda (estaca 4806 a 5434).....	65
Figura 2.19 - Histogramas dos módulos de resiliência das camadas de base e subleito para ambas as faixas de tráfego	67

Figura 2.20 - Módulos de resiliência médios das camadas de revestimento, base, sub-base e subleito por segmento homogêneo – Faixa Esquerda	70
Figura 2.21 - Histogramas dos módulos de resiliência para ambas as faixas de Tráfego	71
Figura 2.22 - Módulos de resiliência obtidos a partir do programa ELMOD4 – Faixa Direita (estaca 4804 a 5432).....	72
Figura 2.23 - Módulos de resiliência obtidos a partir do programa ELMOD4 – Faixa Esquerda (estaca 4806 a 5434).....	73
Figura 2.24 - Módulos médios de resiliência das camadas de revestimento, base, sub-base e subleito por segmento homogêneo – Faixa Esquerda	76
Figura 2.25 - Comparativo entre os módulos do subleito obtidos pelos diferentes programas com o modelo da AASHTO (1993).....	77
Figura 2.26 - Profundidades para correção da Temperatura	77
Figura 2.27 - Comparação entre bacias recalculadas com o ELSYM5 com os módulos médios do segmento homogêneo 19- Faixa Esquerda.....	79
Figura 2.28 - Comparação entre bacias recalculadas com o ELSYM5 com os módulos pontuais da estaca 4104 - Faixa Esquerda.....	79
Figura 2.29 - Foto do ensaio de resistência à tração por compressão diametral realizado no LEP/UFCG	85
Figura 2.30 - Representação gráfica do modelo composto de resiliência para os materiais das camadas do furo 4 (LE).....	89
Figura 2.31 - Bacias deflectométricas obtidas a partir do FEPAVE2, EVERCALC5, RETROANA E ELMOD4.....	92
Figura 2.32 - Resultado dos ensaios de módulo resiliente baseados no modelo composto para o material de base em várias condições de moldagem	94
Figura 2.33 - Resultado dos ensaios de módulo resiliente baseados no modelo composto para o material do subleito em várias condições de moldagem.....	95
Figura 2.34 - Distribuição percentual do tráfego pela contagem de 2004 e pela projeção segundo o estudo de tráfego do projeto.....	101
Figura 2.35 - Estrutura considerada na simulação com o programa FEPAVE2	109
Figura 2.36 - Seção transversal ilustrativa da solução paramétrica estudada.....	117

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Características de projeto do CBUQ na Faixa B camada de ligação.....	16
Tabela 1.2 - Características de projeto do CBUQ na Faixa C camada de rolamento.....	16
Tabela 1.3 - Resultados dos ensaios de qualidade de material betuminoso.....	17
Tabela 1.4 - Localização dos pontos de ensaio (DNER, 1996).....	20
Tabela 1.5 - Métodos de ensaios laboratoriais utilizados nesta pesquisa.....	23
Tabela 1.6 - Ensaios de laboratório realizados por local de sondagem.....	24
Tabela 1.7 - Volume médio diário.....	25
Tabela 1.8 - Análise e projeção do tráfego.....	26
Tabela 1.9 - Tráfego médio diário corrigido.....	26
Tabela 1.10 - Fatores de Veículo com base na Lei da Balança.....	27
Tabela 1.11 - Projeção do número N de projeto.....	28
Tabela 1.12 - Resumo do número de repetições do eixo padrão.....	28
Tabela 1.13 - Segmentos homogêneos.....	30
Tabela 1.14 - Parâmetros de Avaliação da Bacia de Deflexões (FABRÍCIO et. al.,1988)	33
Tabela 1.15 - Parâmetros de Área (AASHTO, 1993).....	33
Tabela 1.16 - Parâmetros de Área (PIERCE, 1999).....	33
Tabela 2.1 - Resumo das bacias deflectométricas – Faixa Direita.....	36
Tabela 2.2 - Resumo estatístico das bacias deflectométricas – Faixa Esquerda.....	37
Tabela 2.3 - Parâmetros da bacia deflectométrica – Faixa Direita.....	38
Tabela 2.4 - Parâmetros da bacia deflectométrica – Faixa Esquerda.....	38
Tabela 2.5 - Resumo Estatístico da Deflexão Máxima com a Viga Benkelman e Raio Médio – Faixa Direita.....	39
Tabela 2.6 - Resumo Estatístico da Deflexão Máxima com a Viga Benkelman e Raio Médio – Faixa Esquerda.....	40
Tabela 2.7 - Tabelas de conceitos de IGG.....	45
Tabela 2.8 - Resumo do Levantamento dos defeitos de superfície – Faixa Direita.....	46
Tabela 2.9 - Resumo do Levantamento dos defeitos de superfície – Faixa Esquerda.....	48
Tabela 2.10 - Faixa de módulos de resiliência a ser adotado pelo programa RETROANA.....	51
Tabela 2.11 - Resumo da retroanálise por segmento homogêneo com o RETROANA – Faixa Direita.....	56
Tabela 2.12 - Resumo da retroanálise por segmento homogêneo com o RETROANA – Faixa Esquerda.....	57
Tabela 2.13 - Faixa aceitável de coeficiente de variação utilizada em projeto de pavimentos novos ou de reforço (LTPP, 2002).....	59
Tabela 2.14 - Faixa de módulos de resiliência – EVERCAL5.....	63
Tabela 2.15 - Resumo da retroanálise por segmento homogêneo com o EVERCALC5 – Faixa Direita.....	68
Tabela 2.16 - Resumo da retroanálise por segmento homogêneo com o EVERCALC5 – Faixa Esquerda.....	69
Tabela 2.17 - Resumo da retroanálise por segmento homogêneo com O ELMOD4 – Faixa Direita.....	74
Tabela 2.18 - Resumo da retroanálise por segmento homogêneo com o ELMOD4 – Faixa Esquerda.....	75
Tabela 2.19 - Módulos médio corrigidos por segmento homogêneo.....	78
Tabela 2.20 - Boletim de sondagem.....	81

Tabela 2.21 - Resultado dos ensaios convencionais de caracterização e resistência.....	82
Tabela 2.22 - Estimativado coeficiente de condutividade hidráulica da camada de BGS	84
Tabela 2.23 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova de campo do trecho analisado.....	85
Tabela 2.24 - Resultado dos ensaios de módulo resiliente baseados nos modelos granular ($MR=K_1\sigma_3^{k_2}$) e argiloso ($MR=K_1\sigma_d^{k_2}$).....	86
Tabela 2.25 - Resultado dos ensaios de módulo resiliente baseados no modelo composto	88
Tabela 2.26 - Resultado da contribuição percentual na deflexão total e faixa de módulos ambos calculados com o FEPAVE2.....	90
Tabela 2.27 - Coeficientes da equação obtidos no ajuste da bacia.....	91
Tabela 2.28 - Teores de umidade média e massa específica aparente seca obtidos no ensaio de compactação.....	93
Tabela 2.29 - Resultado dos ensaios de módulo resiliente baseados no modelo composto	93
Tabela 2.30 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral de concreto asfáltico moldado em laboratório.....	96
Tabela 2.31 - Resultados de módulo de resiliente por compressão diametral e modelos de fadiga para corpos de prova moldados em laboratório.....	97
Tabela 2.32 - Resultados dos parâmetros de deformabilidade obtidos a partir da simulação com o FEPAVE2.....	98
Tabela 2.33 - Resultados da análise de confiabilidade.....	99
Tabela 2.34 - Contribuição percentual das camadas na deflexão total e faixa de módulos obtidas com o FEPAVE2.....	99
Tabela 2.35 - Volume médio diário medido em julho 2004.....	99
Tabela 2.36 - Volume médio diário anual (www.dnit.gov.br).....	100
Tabela 2.37 - Volume médio diário corrigido sazonalmente para o trecho estudado desta pesquisa.....	100
Tabela 2.38 - Projeção do tráfego por tipo de veículos.....	102
Tabela 2.39 - Fatores de veículos da BR-101/PE (DNIT/PE, 2000).....	103
Tabela 2.40 - Fatores de veículos para os tipos comerciais 2C2 e 2C3.....	104
Tabela 2.41 - Determinação do número N para um período de projeto de 10 anos.....	104
Tabela 2.42 - Espessuras de reforço exigidas.....	105
Tabela 2.43 - Valores Futuros das intervenções do tipo “conviver com o problema”.....	107
Tabela 2.44 - VPL das intervenções do tipo “conviver com o problema”.....	107
Tabela 2.45 - Alternativas de restauração do pavimento.....	108
Tabela 2.46 - Característica mecânicas da mistura SMA (modificado MOURÃO, 2003)	108
Tabela 2.47 - Modelos utilizados para a estimativa do módulo da camada de BGTC.....	110
Tabela 2.48 - Critérios admissíveis de dimensionamento.....	111
Tabela 2.49 - Resultados obtidos a partir da simulação com o FEPAVE2.....	112
Tabela 2.50 - Módulos de resiliência das camadas e desvio padrão.....	113
Tabela 2.51 - Rotina utilizada para a aplicação do método de Rosenblueth.....	114
Tabela 2.52 - Parâmetros resposta obtidos com aplicação do método de Rosenblueth.....	115
Tabela 2.53 - Níveis de confiabilidade recomendados pela AASHTO (MEDINA, 1997)	117

CAPÍTULO I

DESCRIÇÃO DA RODOVIA ESTUDADA E METODOLOGIA APLICADA

1.1 – Introdução

Neste capítulo apresentar-se-á a descrição da rodovia estudada, bem como, toda a metodologia aplicada na caracterização funcional e estrutural realizada na pista duplicada da Rodovia BR-230, no Estado da Paraíba, com 30,6 km de extensão, lote III.

1.2 – Características da Região da Rodovia

As informações sobre localização, geologia, pedologia, relevo, clima, precipitação e vegetação contidas neste capítulo foram extraídas do Atlas Geográfico do Estado da Paraíba, Edição 1985 e SOUZA (2000).

1.2.1 – Localização

O Estado da Paraíba localiza-se na porção oriental do Nordeste do Brasil, entre os meridianos de $34^{\circ}45'54''$ e $38^{\circ}45'45''$ de longitude oeste e entre os paralelos de $6^{\circ}02'12''$ e $8^{\circ}19'18''$ de latitude sul, conforme mostrado na figura 1.1. Sua forma alongada no sentido leste-oeste é marcada por duas saliências (a da região de Catolé do Rocha, a noroeste, e a do Platô dos Cariris, na porção centro-sul) e por duas vastas reentrâncias formando uma cintura nas proximidades do meridiano de Patos, representadas, ao norte, pelas bacias dos rios Seridó e Espinharas, afluindo no rio Piranhas em território do Rio Grande do Norte e, ao sul, em Pernambuco, pelo alto Vale do Rio Pajeú. Apresenta no sentido norte-sul uma distância linear de 253 km e de 443 km no sentido leste-oeste. Limita-se ao norte com o Estado do Rio Grande do Norte; a leste com o Oceano Atlântico; a oeste com o Estado do Ceará e, ao sul, com Pernambuco.

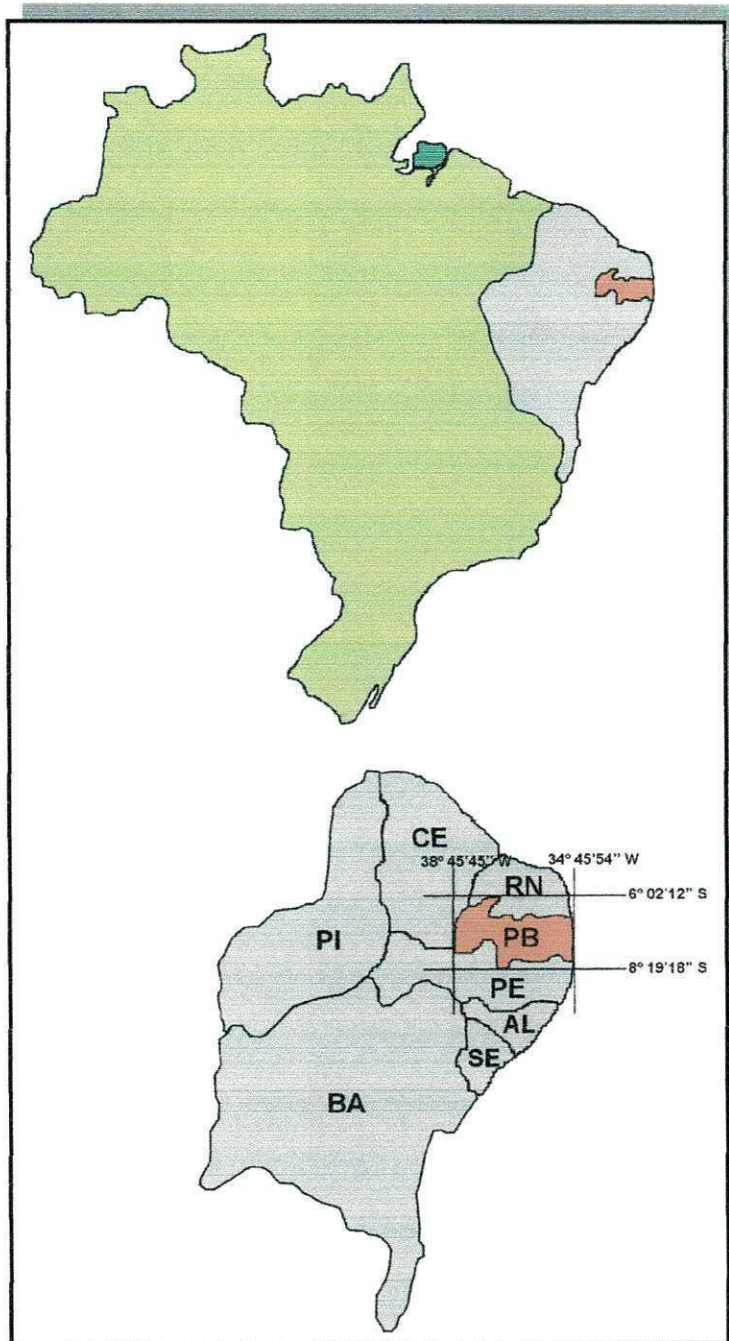


Figura 1.1 - Localização do Estado da Paraíba em relação ao Brasil

1.2.2 – Geologia

1.2.2.1 – Litologia

A litologia paraibana possui uma predominância do complexo cristalino sobre os terrenos sedimentares, que encontram-se no litoral constituindo

afloramentos calcários ou relevos planos, poucos elevados (os tabuleiros), além de planícies marinhas e flúvio-marinhas. No interior, são identificadas chapadas sedimentares, além da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe.

1.2.2.2 – Estratigrafia

As rochas mais antigas predominam no complexo cristalino formando o complexo gnássico-migmático-granitódico de idade Arqueozóica, que é afetado por intrusões de rochas magmáticas: gabros, granitos, basaltos, etc., do Proterozóico.

Do Fanerozóico, encontram-se no extremo oeste do Estado duas ocorrências Paleozóicas, representadas por arenitos conglomeráticos de cores claras ou, às vezes, avermelhadas.

Do Cenozóico, a representação consiste em arenitos variegados, na maioria pouco consolidados, constituintes do Grupo Barreiras, além de areias que constituem as planícies marinhas formadoras das praias ou os mangues encontrados nas desembocaduras dos principais rios que deságuam no oceano, ou, ainda, aquelas areias que são encontradas preenchendo os leitos dos rios.

1.2.2.3 – Estrutura

Na Paraíba, é marcante a ocorrência de estruturas falhadas onde se salienta o grande lineamento que atravessa longitudinalmente o Estado, conhecido como lineamento de Patos.

Estruturas dobradas em anticlinais e sinclinais são comuns, e, às vezes, influenciam o relevo.

1.2.3 – Pedologia

Os solos sob o ponto de vista pedológico refletem dois fatores importantes: climáticos e edáficos (natureza da rocha-mãe).

É assim que os tabuleiros costeiros e sub-costeiros formados a partir dos sedimentos heterogêneos do Grupo Barreiras apresentam solos do tipo Podzol, quando as camadas rochosas são arenosas, enquanto que as camadas argilosas normalmente ostentam solos lateríticos (latossolos) diversos, lixiviados e solos podzólicos.

Já no setor representado pela depressão sublitorânea e submetido a uma pluviosidade menor, a grande variedade de rochas cristalinas engendram solos podzólicos, mais ricos em nutrientes, associados a solos com hidromorfia temporária (planossolos) e a solos poucos espessos, do tipo bruno. No restante do território paraibano recoberto por caatingas a semi-aridez interfere na pedogênese que é lenta por falta de um fornecimento abundante de matéria orgânica (detritos vegetais) ou interrompida durante a estação seca prolongada por falta de água. Além disso, a atividade erosiva dos agentes mecânicos externos é forte, o que faz com que os solos dominantes sejam poucos evoluídos (litossolos e regossolos) normalmente associados a solos brunos, a vertissolos e a solos salgados (solos halomorficos).

Nos glaciais e pediplanos predominam, geralmente, solos brunos não-cálcicos, rasos e pedregosos. Nos baixios são encontrados solos argilosos que racham na época da seca e se encharcam durante a estação chuvosa: os vertissolos. Frequentes ainda são as importantes manchas de solos halomorficos em áreas planas ou embaciadas elaboradas sobre rochas alcalinas. Os gnaisses e xistos normalmente dão origem a solos argilosos, compactos e pedregosos fortemente sujeito a erosão (litossolos e solos Brunos litólicos). Já os granitos grosseiros dão origem a solos mais arenosos, um pouco mais profundos.

1.2.4 – Relevo

A Paraíba está dividida em três regiões distintas que se sucedem do litoral para o interior: Baixada Litorânea, Planalto da Borborema e Planalto do Rio Piranhas. A Baixada Litorânea estende-se ao longo da costa, apresentando uma largura média de 80 a 90 km. A oeste atinge 150 m de altura, caindo suavemente para leste, até o nível do mar. O Planalto da Borborema situa-se a

oeste da Baixada Litorânea, ocupando toda a parte central do Estado. É a região mais elevada da Paraíba, com altitudes médias entre 500 e 600 m. *Sobre essa superfície levemente ondulada erguem-se morros isolados.*

1.2.5 – Clima e Precipitação

Os tipos de clima observados no Estado variam de acordo com o relevo. O clima tropical úmido, com chuvas de outono-inverno e estação seca no verão é registrado na Baixada Litorânea e na encosta leste da Borborema. No litoral, o índice de chuvas chega a 1700mm anuais e a temperatura média é de 24° C. Em direção ao interior, a quantidade de chuvas diminui progressivamente, *descendo a 800 mm na encosta leste da Borborema. No topo do planalto, volta a subir, ultrapassando os 1400 mm.*

Na parte oeste do Estado, no planalto do Rio Piranhas, predomina o clima tropical único com chuvas de verão e estação seca no inverno. A quantidade de chuvas atinge de 600 a 800 mm anuais. As temperaturas médias anuais são as mais elevadas da Paraíba (26°C). Como na porção leste da Borborema, a distribuição de chuvas é irregular, provocando secas prolongadas.

1.2.6 – Vegetação

Os tipos de vegetação, como o relevo e o clima, sucedem-se em faixas no sentido leste-oeste, *sem, no entanto, corresponde exatamente aos tipos climáticos e às unidades de relevo.* Na baixada Litorânea e nos trechos mais úmidos da Borborema (Brejo) predomina a floresta tropical, composta de grandes árvores.

A porção oeste da Borborema e o planalto do Rio Piranhas são dominados pela *caatinga, característica do sertão e que cobre cerca de 65% do território paraibano.*

1.3 – Características da Rodovia Estudada

A rodovia estudada teve o trecho situado entre o acesso à cidade de Ingá - Campina Grande (km 117,3 – km 147,9) duplicado no ano de 2000 e

inaugurado em outubro de 2001. Os serviços de duplicação foram realizados concomitantemente aos da restauração da rodovia existente. A concepção de projeto para a estrutura do pavimento da rodovia duplicada foi de pavimento flexível, onde o tráfego médio diário estimado no ano de 1999 foi de aproximadamente 3903 veículos diários.

1.3.1 – Localização do Trecho

O trecho estudado possui as seguintes características:

Rodovia	: BR-230/PB
Trecho	: Cabedelo – Divisa PB/CE
Lote	: III
Subtrecho	: Entr. BR-408/PB-090/PB095
	: Entr. BR-104 (A)/PB-408/B/PB-095 (Campina Grande)
Segmento	: km 117,3 – km 147,9
Extensão	: 30,6 km
PNV	: 210 e 220

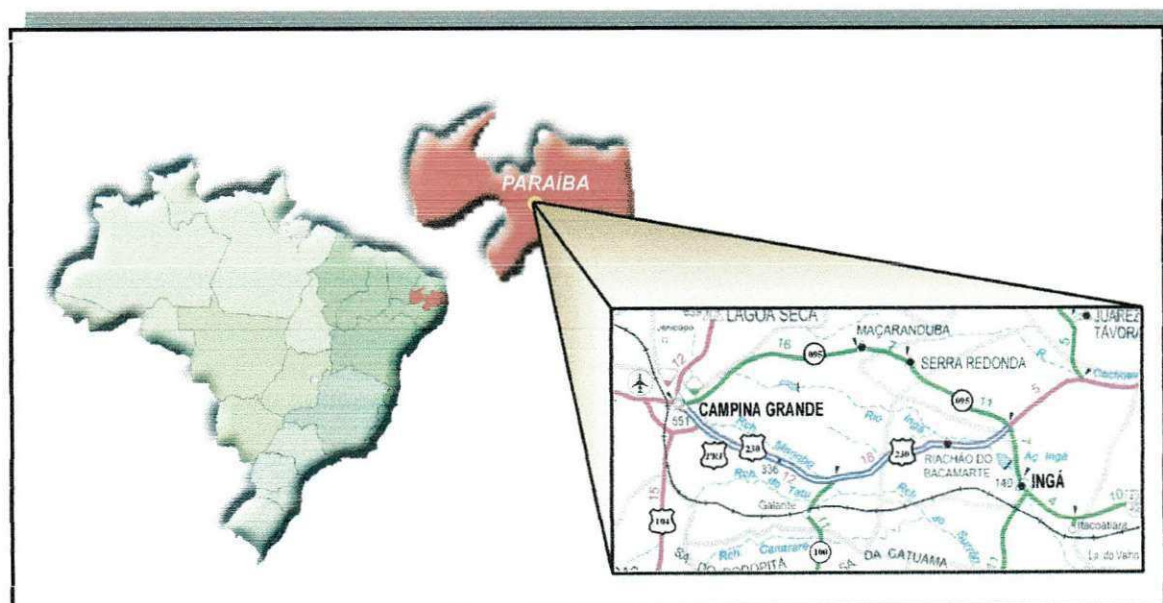


Figura 1.2 - Mapa de Localização do trecho estudado

1.3.2 – Características Climáticas e Pluviométricas

A classificação climática do trecho em análise segundo Wladimir Koppen e caracterizado como *As: clima quente e úmido com chuvas de outono – inverno e período seco no verão.*

A umidade relativa apresenta-se sempre elevada, com valores acima de 74%, principalmente no período de Abril a Agosto.

O relevo é ondulado a partir da região de Ingá, passando a montanhoso após a localidade de Riachão do Bacamarte até as proximidades da cidade de Campina Grande.

1.3.3 – Características Geométricas

O trecho inicia-se no entroncamento para a cidade de Ingá no km 117,3 da rodovia BR-230/PB. A rodovia se desenvolve inicialmente por uma região de topografia ondulada apresentando em função dessa situação um traçado bem definido e reto até as proximidades da localidade de Riachão do Bacamarte. A partir daí a região passa de uma topografia ondulada para montanhosa e o traçado é caracterizado pela incidência de curvas e rampas com maiores declividades em relação ao primeiro trecho.

O lado a ser duplicado foi escolhido a partir da análise minuciosa em campo e escritório dos desenhos da topografia visualizando-se as seções transversais do levantamento topográfico.

1.3.4 – Características de Terraplenagem

O projeto de terraplenagem foi elaborado tomando-se por base os elementos do projeto geométrico, a qualidade dos materiais dos cortes a escavar e sua classificação em 1ª, 2ª e 3ª categoria, bem como a definição dos materiais que irão compor a camada superior de terraplenagem.

Os taludes de cortes e aterros adotados forma:

- Corte em solo : 1,5 (V): 1,5 (V);
- Corte em rocha : 5,0 (V): 1,0 (H);
- Aterros : 1,0 (V): 1,5 (H).

1.3.5 – Características dos Materiais Empregados na Pavimentação

Para a camada de sub-base foram utilizados materiais provenientes das Saibreiras: Alegre, Galante, Soares, Pedro e Campos. Todos apresentaram características físicas e mecânicas obtidas em ensaios laboratoriais conforme especificações do DNIT para tal fim.

A camada de base é constituída de brita graduada simples obtida por processo de preparo em usina de agregado com materiais advindos da Pedreira Amorim com características graníticas.

O concreto asfáltico é constituído de duas camadas, uma de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) na faixa B do DNIT (camada de ligação) e outra de CBUQ na faixa C (camada de rolamento). A composição do concreto asfáltico é resultado das misturas de areia fina do rio Paraíba, agregado britado, filer e cimento asfáltico.

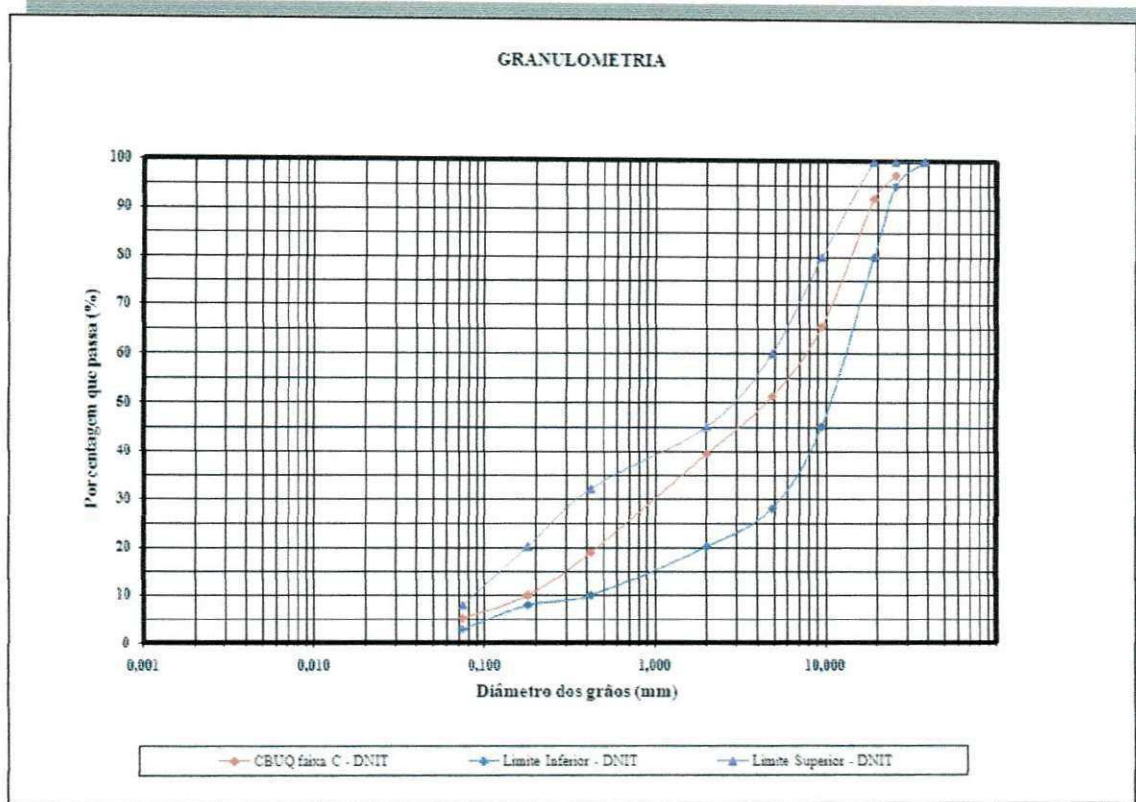


Figura 1.3 - Curvas granulométricas de projeto da mistura da faixa B do CBUQ para a pista

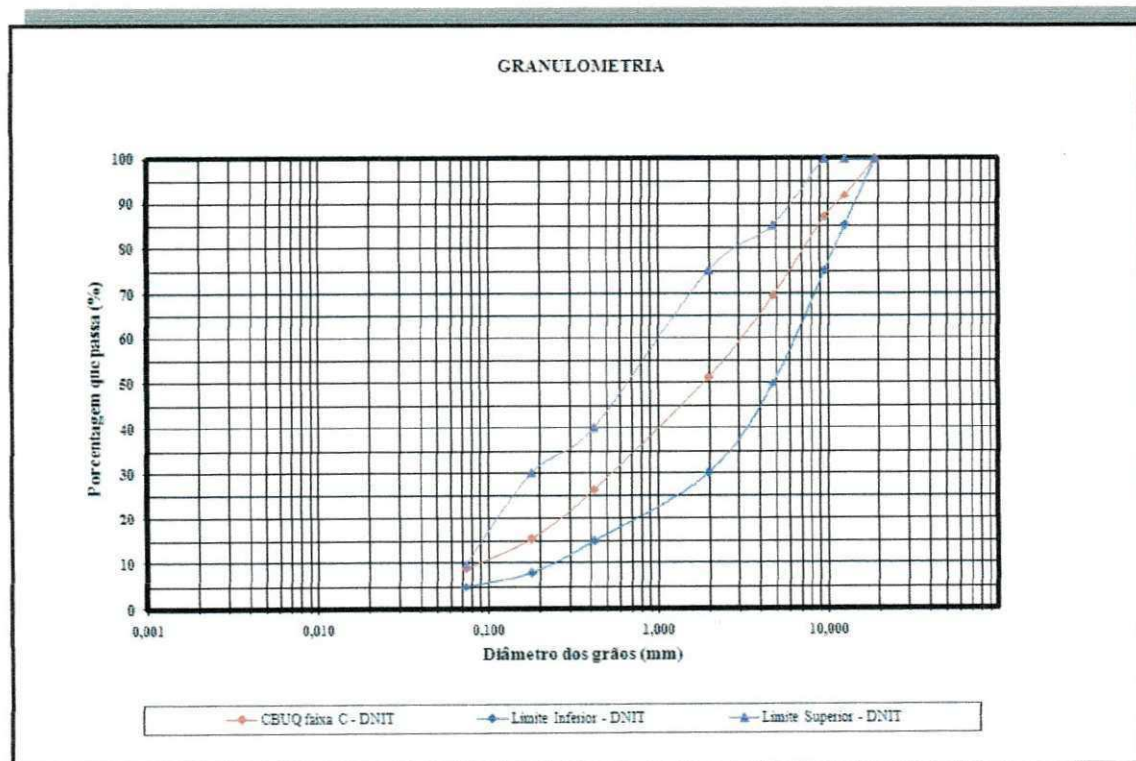


Figura 1.4 - Curvas granulométricas de projeto da mistura da faixa C do CBUQ do trecho em estudo

Tabela 1.1 – Características de projeto do CBUQ na Faixa B camada de ligação

IDENTIFICAÇÃO	CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICAÇÃO
Densidade Aparente (g/dm ³)	2.462	-
Densidade Teórica (g/dm ³)	2.600	-
Vazios (%)	5,2	4 – 6
Relação Betume Vazios (%)	68	65 – 72
Vazios Agregado Mineral (%)	16,5	-
Estabilidade Marshall (kgf)	1.070	Mínimo 350 kgf
Fluência ()	11,7	8 – 18
Teor Ótimo de CAP (%)	4,7 (± 3)	4,5 – 7,5
Variação Permitida	4,5 – 5,0	-
Resultado de Adesividade satisfatório com 0,2% de DOPE		

Tabela 1.2 – Características de projeto do CBUQ na Faixa C camada de rolamento

IDENTIFICAÇÃO	CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICAÇÃO
Densidade Aparente (g/dm ³)	2.466	-
Densidade Teórica (g/dm ³)	2.561	-
Vazios (%)	3,7	4 – 6
Relação Betume Vazios (%)	78,1	65 – 72
Vazios Agregado Mineral (%)	16,9	-
Estabilidade Marshall (kgf)	1.190	Mínimo 350 kgf
Fluência ()	14,8	8 – 18
Teor Ótimo de CAP (%)	5,5 (± 3)	4,5 – 7,5
Variação Permitida	5,2 – 5,8	-

Os resultados dos ensaios de qualidade de material betuminoso (asfalto tipo CAP 50/60) estão apresentados na tabela 1.3.

Tabela 1.3 – Resultados dos ensaios de qualidade de material betuminoso

Ensaio	Resultados Médios	Especificação
Viscosidade Saybolt Furol a 135 °C (seg)	197	120 mínimo
Ponto de Fulgor °C	279	235 mínimo
Ponto de Amolecimento anel e Bola Tab °C	53	30-175
Penetração (25 °C, 100g, 5seg) 0,1mm	55	50 mínimo
Densidade	1.030	
Espuma	Não teve	O produto ao deve produzir espuma quando aquecido a 175 °C

1.4 – Ensaio Realizados no Trecho Estudado Durante a Presente Pesquisa

Foram realizados furos de sondagem para a verificação das espessuras constituintes do pavimento, extração rotativa de corpos-de-prova do revestimento das camadas de rolamento e ligação, bem como, amostras de solo para realização de ensaios laboratoriais de caracterização e triaxiais sob cargas repetidas.

1.4.1 – Ensaio de Campo

Para a realização desta pesquisa o trecho estudado foi estaqueado baseando-se no Projeto Geométrico constante no Volume 2 – Projeto de Execução (1999).

O sentido do tráfego na pista duplicada possui o fluxo de veículos contrário ao estaqueamento (Campina Grande – Ingá), desta forma, os levantamentos

realizados com o FWD (Falling Weight Deflectometer), viga Benkelman, avaliação objetiva da superfície do pavimento e o Levantamento Visual Contínuo, obviamente, seguiram o sentido do tráfego. Porém, todo o desenvolvimento desta pesquisa, adotou o sentido crescente da quilometragem para uma melhor adequação com o Projeto Final de Engenharia para a *Duplicação e Restauração*, conforme figura 1.5. Foram realizados levantamentos das condições atuais do pavimento em estudo, baseando-se nos seguintes procedimentos:

- *Avaliação objetiva da superfície do pavimento pelo procedimento DNIT 006/2003 – PRO e cálculo do IGG;*
- *Determinação das deflexões do pavimento pelo Falling Weight Deflectometer – FWD pelo procedimento DNER PRO-273;*
- *Determinação das deflexões do pavimento pela viga Benkelman pelo método de ensaio DNER ME-024;*

- *Coleta de amostras para a realização de ensaios de caracterização, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência de solos e britas e determinação da densidade e umidade “in situ”;*
- *Pesquisa volumétrica e classificatória do tráfego.*

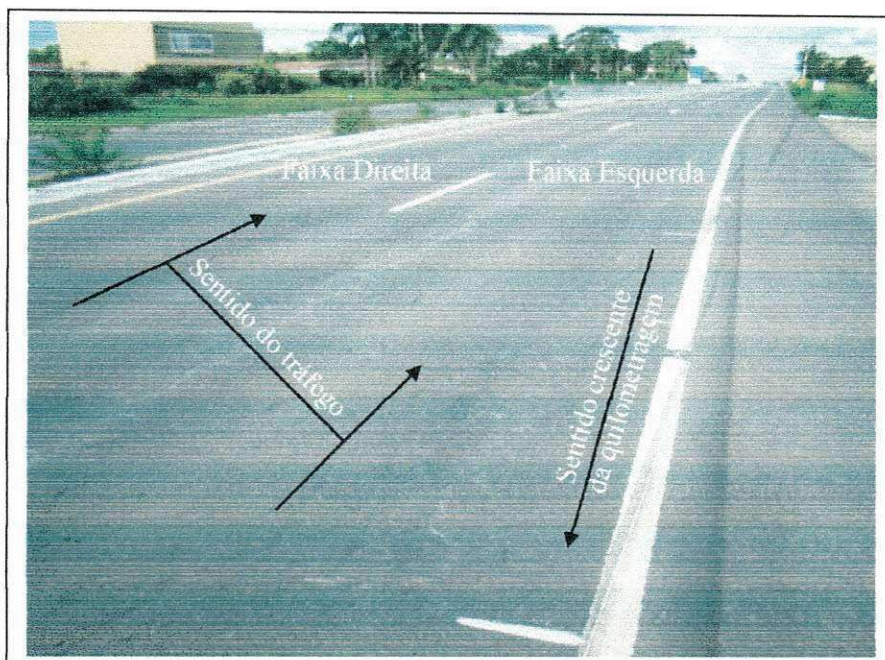


Figura 1.5—Ilustração do sentido da quilometragem e do tráfego da rodovia BR-230/PB – lote III

1.4.1.1 – Avaliação Objetiva do Pavimento - DNIT 006/2003-PRO

A avaliação das características funcionais do pavimento da pista duplicada baseou-se nos levantamentos das degradações superficiais e das deformações em perfil, aplicando a técnica da avaliação objetiva do estado da superfície do pavimento elaborando um inventário das degradações superficiais e geométricas existentes, seguindo a metodologia proposta pelo Prof^o Armando Martins Pereira, normatizada no procedimento DNIT 006/2003-PRO (DNIT, 1994b).

A amostragem é efetuada em cada uma das estações de ensaio, considerando-se uma superfície de avaliação delimitada por uma seção transversal situada 3m a ré da estação, por outra situada 3m avante, e pelo eixo da pista de rolamento. Desta forma, cada estação de ensaio corresponde uma área de cerca de 6m por 3,6m, ou 21,6 m².

A norma especifica que as estações de ensaios para pistas simples devam ser a cada 20 metros alternados em relação ao eixo da pista de rolamento (40 m

em 40m em cada faixa de tráfego) obtendo uma representatividade amostral de 15%/km. Nas rodovias em pista dupla, deve ser a cada 20 metros, na faixa de tráfego mais solicitada resultando em uma representatividade amostral de 30%/km.

1.4.1.2 – Levantamento Deflectométrico com o *Falling Weight Deflectometer*

O levantamento deflectométrico foi realizado, com o emprego do "Falling Weight Deflectometer - FWD", modelo 8002 FWD equipado com um sistema processador e PC/Impressor 9000.

A metodologia de ensaio foi baseada no DNER PRO-273/96.

O nível de carregamento utilizado foi em torno de 40 kN, correspondente ao semi-eixo padrão rodoviário.

Tabela 1.4 – Localização dos pontos de ensaio (DNER, 1996)

Largura da faixa de tráfego (m)	Distância ao bordo do revestimento (m)
2,7	0,45
3,0	0,60
3,3	0,75
3,5 ou mais	0,90

Na figura 1.6, consta de forma esquemática como foram obtidas as bacias deflectométricas do pavimento estudado.

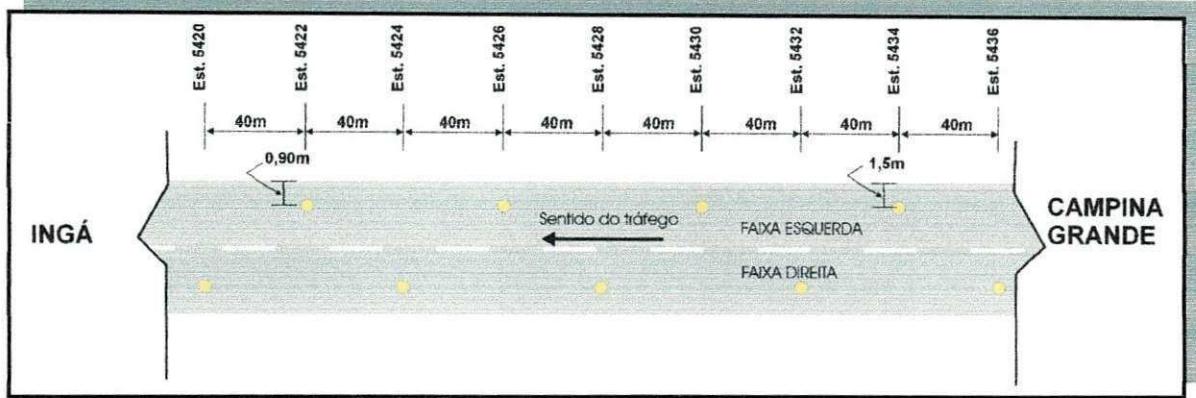


Figura 1.6 – Localização esquemática dos pontos de ensaio das bacias Deflectométricas

1.4.1.3 – Levantamento Deflectométrico com a Viga Benkelman

O levantamento deflectométrico foi realizado, com o emprego da viga Benkelman pertencente ao DER-PB (Departamento de Estradas de Rodagem da Paraíba).

As estações de ensaio coincidiram com os locais onde foram realizados os ensaios com o FWD, na tentativa de se estabelecer uma correlação entre as deflexões máximas obtidas pelos dois equipamentos.

Na figura 1.7, mostra-se de forma esquemática como foram obtidas as deflexões máximas.

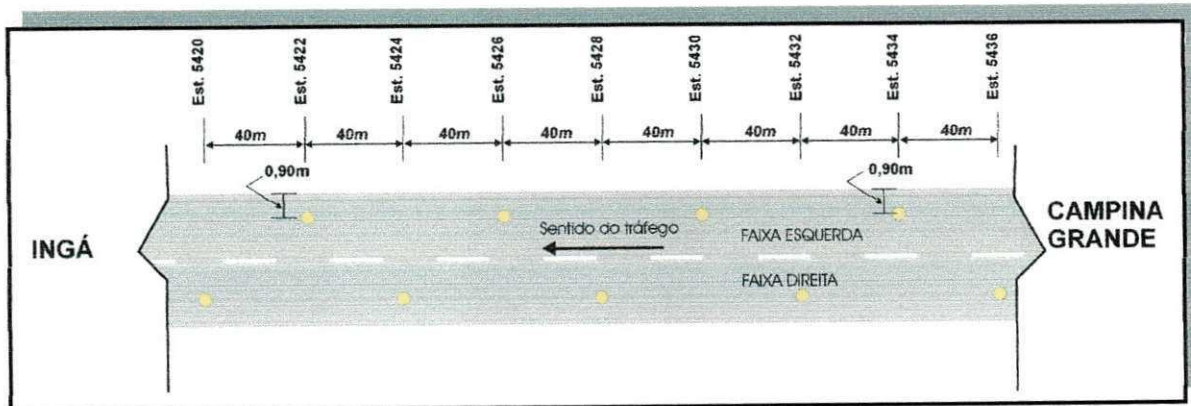


Figura 1.7 – Localização esquemática dos pontos de ensaio das deflexões com a viga Benkelman

1.4.1.4 – Coleta de Amostras e Ensaios de Laboratório

Foram realizadas prospecções em quatro locais, dois na faixa direita e dois na faixa esquerda, a fim de coletar amostras das camadas do pavimento e subleito.

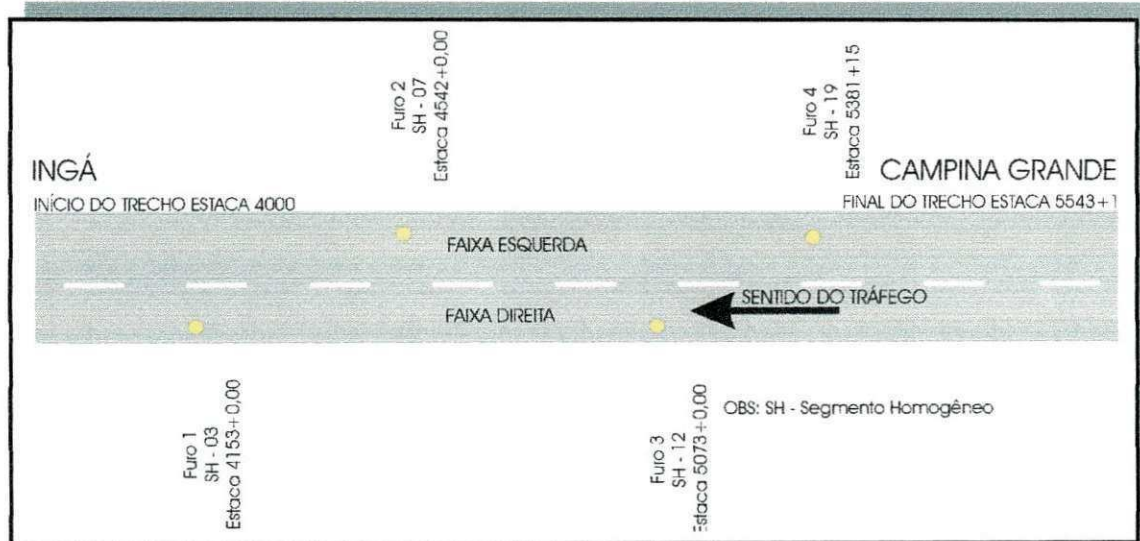


Figura 1.8 – Esquema dos locais de sondagem

O critério utilizado para a escolha dos locais de sondagem foi baseado nas condições de superfície e estrutural do pavimento. Dois furos foram realizados em cada faixa de tráfego, com objetivo de comparar as faixas sob condições diferentes de sollicitação.

Na tabela 1.5 consta a lista dos ensaios laboratoriais realizados com as amostras coletadas nos locais de sondagem.

Tabela 1.5 – Métodos de ensaios laboratoriais utilizados nesta pesquisa

Ensaio	Método
Determinação da Massa Específica dos Sólidos	DNER ME 84/94
Análise Granulométrica por Peneiramento e Sedimentação	DNER ME 51/94
Determinação do Limite de Liquidez (LL)	DNER ME 44/71
Determinação do Limite de Plasticidade (LP)	DNER ME 82/94
Ensaio de Compactação	DNER ME 47/64
Índice de Suporte Califórnia	DNER ME 50/94
Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral	DNER ME 138/94
* Determinação do Módulo de Resiliência de Solos e Britas	DNER ME 131/94
*Nota: Ensaio realizado no Laboratório de Solos da COPPE/UFRJ, os demais foram realizados na UFCG.	

Nas estacas 4153 lado direito e 5381+15,8 lado esquerdo foram realizados extrações dos corpos-de-prova das camadas de rolamento e ligação para serem realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

Os pontos de sondagem estão localizados nos segmentos homogêneos 03 e 19, respectivamente. Buscou-se comparar dois segmentos homogêneos com condições superficiais, estruturais e de tráfego distintas. Na tabela 1.6 consta a lista dos ensaios realizados em cada local de sondagem. Infelizmente não foi realizado o ensaio de compactação para a camada de base do furo 4.

Tabela 1.6 – Ensaio de laboratório realizados por local de sondagem

SH	Estaca	Furo	Lado D/E	Ensaio								
				LL	LP	GP	GS	C	ISC	RT	MR	
03	4153	1	D	X	X	X	X	X	X	X	X	X
07	4542	2	E	X	X	X	X	X	X			
12	5073	3	D	X	X	X	X	X	X			
19	5381+15	4	E	X	X	X	X	-	-	X	X	

NOTA: LL - Limite de Liquidez
 LP - Limite de Plasticidade
 GP - Granulometria por Peneiramento
 GS - Granulometria por Sedimentação
 C - Compactação
 ISC - Índice de Suporte Califórnia
 RT - Resistência a Tração por Compressão Diametral
 MR - Módulo de Resiliência de Solos e Britas.

No ano de 2001 foram enviadas para amostras do concreto asfáltico das camadas de rolamento CBUQ faixa C, camada de ligação CBUQ faixa B, amostras do material de jazida a ser utilizada como sub-base, amostras de BGS (brita graduada simples) e amostras coletadas do subleito existente. Os ensaios triaxiais de cargas repetidas foram realizados com diferentes teores de umidade para os materiais de base, sub-base e subleito. Os ensaios realizados foram:

- Ensaio de módulo resiliente por compressão diametral;
- Ensaio de fadiga por compressão diametral;
- Ensaio triaxial diâmico;
- Ensaio de resistência a tração por compressão diametral

1.4.1.5 – Pesquisa Volumétrica Classificatória

O estudo de tráfego realizado na rodovia BR-230/PB, segmento Ingá-Campina Grande (km 117,3 – km 147,9), teve como finalidade detectar propriedades e características do fluxo de veículos da rodovia.

Pesquisas Fluxogramétricas

Os dados históricos de tráfego mais relevantes na BR-230/PB, constam do “Censo de Tráfego Rodoviário do DNER”, que indicam os seguintes postos para a rodovia desde o km 35,6 (Entr. PB-048) até o km 147,9 (Entr. PB-095):

- Posto de Cobertura C-115, Entr. PB-048 – Entr. PB-055;
- Posto de Cobertura C-116, Entr. PB-055 – Entr. PB-079;
- Posto de Cobertura C-117, Entr. PB-079 – Entr. PB-095.

Tabela 1.7 – Volume médio diário

TIPOS	AUTO	ÔNIBUS	2sC	2C	3C	nSi	vr	TOTAL	VHM
VEÍCULOS	4103	157	639	641	868	314	17	6739	477
%	65,5	2,5	10,2	10,2	13,8	5,0	0,3	100	7,1

Para obtenção do crescimento do tráfego para o tempo de projeto de 15 anos, a projetista baseou-se nos dados históricos coletados e pesquisa de campo ao longo da série 1970/1998, e utilizou-se do método estatístico da regressão mínimos quadrados para gerar equações que ajustassem o crescimento anual, avaliando correlações linear, logaritma, exponencial e potencial, donde as correlações que melhor se ajustaram aos dados em estudo indicaram as seguintes taxas médias anuais de crescimento.

Tabela 1.8 – Análise e projeção do tráfego

TIPOS	AUTO E 2CS	ÔNIBUS	CAM. 2C	CAM. 3C	nSi	TOTAL
EXPONENCIAL	2,8%	1,4%	1,6%	2,4%	2,9%	2,5%
LINEAR	3,2%	1,6%	1,8%	2,8%	3,6%	3,0%

Os resultados obtidos pelas regressões indicaram uma compatibilidade de crescimento com a economia regional, da ordem de 3% ao ano para os principais indicadores econômicos, porém com maior intensidade dos veículos com reboques e semi-reboque que, realmente tem crescido, acompanhando a demanda de cargas na rodovia estudada.

Tabela 1.9 – Tráfego médio diário corrigido

ANO	AUTO E 2CS	ÔNIBUS	CAM. 2C	CAM. 3C	nSi	TOTAL
1999	3968	314	635	1013	255	3185
2013	5744	385	794	1404	382	8708

Pesquisas de Pesagem de Eixos

Segundo o Projeto Final de Engenharia para a Restauração e Duplicação para suprir a falta de dados necessários a determinação dos números "N", tomaram-se os valores indicados pela "lei da balança", para as diversas categorias de veículos, e de acordo com as metodologias preconizadas pela GEIPOT e USACE, cujos valores indicados para os fatores de veículos seriam os indicados na tabela 1.10.

Tabela 1.10 – Fatores de Veículo com base na Lei da Balança

MÉTODO	ÔNIBUS	C. MÉD. (2C)	C. PES.(3C)	S. REB. (nSi)
AASHTO	2,54	2,54	1,79	4,07
USACE	4,15	4,15	9,65	13,79

Determinação do Número “N”

Com os fatores de veículos indicados, somado as projeções do tráfego, calcularam-se os “Números de Repetições do Eixo Simples Padrão N”, tanto na metodologia do “USACE”, conhecida como o método do Engº Murilo Lopes de Souza, quanto pelo método das deflexões recuperáveis da “AASHTO”, pela expressão:

$$N_{\text{anual}} = 365 \times k \times \sum (V_{m_i} \times F_{v_i}) \tag{1.1}$$

Em que:

- k = fator de carregamento para a faixa de projeto (para pistas simples: 0,50 = 50% do tráfego dos dois sentidos alocado na faixa de projeto; para pistas duplas: 80% do tráfego = 0,40 do tráfego nos dois sentidos);
- Vm = volume médio diário de cada categoria de veículo comercial;
- Fvi = fator de veículo médio de cada categoria de veículo comercial.

Tabela 1.11 – Projeção do número N de projeto

ANO	AUTOS	ÔNIBUS	CAMINHÃO		REB. E S.REB.	TOTAL	AASHTO			USACE		
			2C	3C	2S2		FVm	ANUAL	ACUMUL.	FVm	ANUAL	ACUMUL.
1987	2445	254	499	677	147	4022	2,36	5,4E+05	5,4E+05	7,41	1,7E+06	1,7E+06
1988	2572	259	511	705	156	4203	2,36	5,6E+05	1,1E+06	7,45	1,8E+06	1,8E+06
1989	2699	264	522	733	165	4383	2,36	5,8E+05	1,7E+06	7,49	1,8E+06	1,8E+06
1990	2826	269	533	761	174	4563	2,36	6,0E+05	2,3E+06	7,53	1,9E+06	1,9E+06
1991	2952	274	545	789	183	4743	2,37	6,2E+05	2,9E+06	7,56	2,0E+06	2,0E+06
1992	3079	279	556	817	192	4923	2,37	6,4E+05	3,5E+06	7,59	2,0E+06	2,0E+06
1993	3206	284	567	845	201	5103	2,37	6,6E+05	4,2E+06	7,62	2,1E+06	2,1E+06
1994	3333	289	579	873	210	5284	2,37	6,7E+05	4,9E+06	7,65	2,2E+06	4,3E+06
1995	3460	294	590	901	219	5464	2,37	6,9E+05	5,6E+06	7,68	2,2E+06	6,5E+06
1996	3587	299	601	929	228	5644	2,37	7,1E+05	6,3E+06	7,70	2,3E+06	8,8E+06
1997	3714	304	613	957	237	5825	2,37	7,3E+05	7,0E+06	7,73	2,4E+06	1,1E+07
1998	3841	309	624	985	246	6005	2,37	7,5E+05	7,8E+06	7,75	2,4E+06	1,4E+07
1999	3968	314	635	1013	255	6185	2,37	7,7E+05	7,7E+05	7,77	2,5E+06	2,5E+06
2000	4094	319	646	1040	264	6363	2,37	7,9E+05	1,6E+06	7,79	2,6E+06	5,1E+06
2001	4221	324	658	1068	274	6545	2,38	8,1E+05	2,4E+06	7,81	2,7E+06	7,7E+06
2002	4348	329	669	1096	283	6725	2,38	8,2E+05	3,2E+06	7,83	2,7E+06	1,0E+07
2003	4475	334	680	1124	292	6905	2,38	8,4E+05	4,0E+06	7,85	2,8E+06	1,3E+07
2004	4602	339	692	1152	301	7086	2,38	8,6E+05	4,9E+06	7,87	2,9E+06	1,6E+07
2005	4729	344	703	1180	310	7266	2,38	8,8E+05	5,8E+06	7,89	2,9E+06	1,9E+07
2006	4856	349	714	1208	319	7446	2,38	9,0E+05	6,7E+06	7,90	3,0E+06	2,2E+07
2007	4983	354	726	1236	328	7627	2,38	9,2E+05	7,6E+06	7,92	3,1E+06	2,5E+07
2008	5110	359	737	1264	337	7807	2,38	9,4E+05	8,5E+06	7,93	3,1E+06	2,8E+07
2009	5237	364	748	1292	346	7987	2,38	9,6E+05	9,5E+06	7,95	3,2E+06	3,1E+07
2010	5363	369	760	1320	355	8167	2,38	9,7E+05	1,0E+07	7,96	3,3E+06	3,5E+07
2011	5490	374	771	1348	364	8347	2,38	9,9E+05	1,1E+07	7,97	3,3E+06	3,8E+07
2012	5617	379	782	1376	373	8527	2,38	1,0E+06	1,2E+07	7,99	3,4E+06	4,1E+07
2013	5744	384	794	1404	382	8708	3,38	1,0E+06	1,3E+07	8,00	3,5E+06	4,5E+07
AASHTO	2,54	2,54	2,54	1,79	4,07		Manual = 365x0,5x0,8xFVmx(ônibus+2C+3C+nSi)anual					
CE	4,15	4,15	4,15	9,65	13,79							

O fator climático (FR) foi considerado como sendo igual a 1,0.

Na tabela 1.12, consta resumidamente o número de solicitações do eixo padrão para um período de 15 anos de vida útil conforme os métodos da AASHTO e do USACE.

Tabela 1.12 – Resumo do número de repetições do eixo padrão

MÉTODO	METODOLOGIA	SÉRIE	SÉRIE	SÉRIE
		1987-1998	1999-2008	2009-2013
PISTA DUPLA	AASHTO	7,8x10 ⁶	8,5x10 ⁶	1,3x10 ⁷
	USACE	1,4x10 ⁷	2,8x10 ⁷	4,5x10 ⁷

1.5 – Divisão de Segmentos Homogêneos

As condições funcionais e estruturais do pavimento estudado, caracterizado pelo levantamento dos defeitos de superfície e pelo levantamento das bacias

deflectométricas, respectivamente pode-se definir segmentos homogêneos. Os segmentos cujas características são semelhantes foram agrupados, utilizando o método denominado "Método das Diferenças Acumuladas" (*Analysis Unit Delineation by Accumulative Differences*) preconizado pela AASHTO (1993).

Nesta pesquisa, para a divisão dos segmentos homogêneos, utilizou-se o programa HOMOGEN.exe que baseia-se no método anteriormente referido, considerando as deflexões D_0 (no centro da placa de carga do FWD) caracterizando a superestrutura do pavimento e D_{150} (afastada de 1,5m do centro da placa de carga do FWD) caracterizando a infraestrutura do pavimento, como parâmetros definidores de segmentos com mesmas características.

Os segmentos homogêneos definidos segundo o "Método das Diferenças Acumuladas" constam na tabela 1.13 e na figura 1.8 consta uma ilustração esquemática dos mesmos.

Tabela 1.13 – Segmentos homogêneos

Segmento Homogêneo	Estaca		Extensão (m)
	Inicial	Final	
SH 01	4000	4120	2.400
SH 02	4120	4152	640
SH 03	4152	4240	1.760
SH 04	4240	4344	2.080
SH 05	4344	4368	480
SH 06	4368	4492	2.480
SH 07	4492	4564	1.440
SH 08	4564	4648	1.680
SH 09	4648	4698	1.000
SH 10	4800	4986	3.720
SH 11	4986	5034	960
SH 12	5034	5098	1.280
SH 13	5098	5142	880
SH 14	5142	5166	480
SH 15	5166	5202	720
SH 16	5202	5286	1.680
SH 17	5286	5330	880
SH 18	5330	5362	640
SH 19	5362	5410	960
SH 20	5410	5434	480

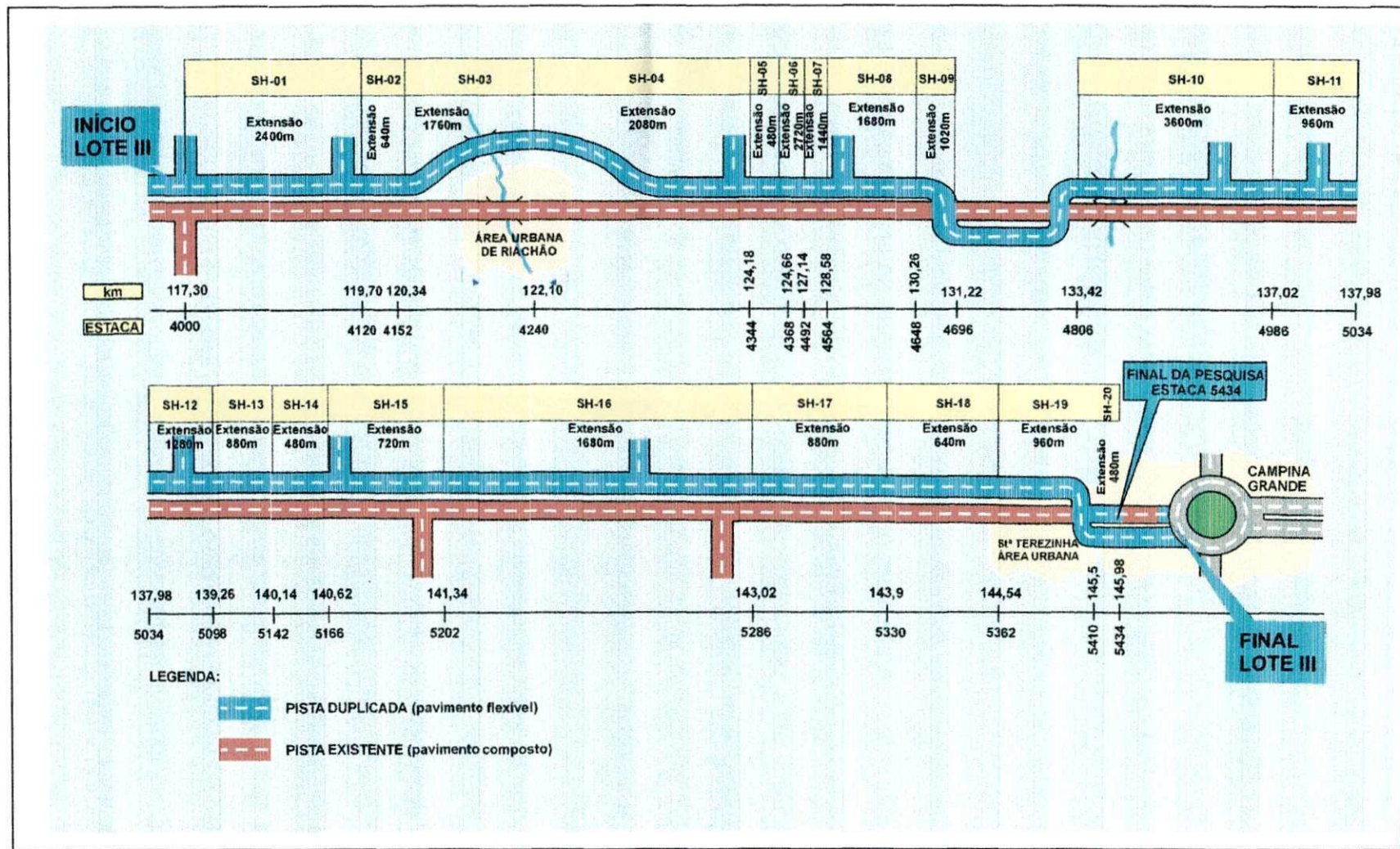


Figura 1.9 – Ilustração Esquemática dos Segmentos Homogêneos

1.6 – Retroanálise e Definição dos Parâmetros Representativos

1.6.1 – Retroanálise

Para a retroanálise dos módulos de resiliência foram utilizados os programas EVERCAL 5, ELMOD4 e RETROANA.

Em algumas estações de ensaio foram obtidos valores modulares não condizentes com as características elásticas das camadas do pavimento e subleito, mesmo atribuindo faixas modulares para estas camadas. Isto pode ter ocorrido devido a não consideração de uma camada rígida nos segmentos em corte, estações com elevado nível de trincamento do tipo FC-3 (Jacaré com erosão) e presença de dispositivos de drenagem. Desta forma, eliminou-se os valores espúrios de módulos obtidos nestes locais que resultaram em elevados erros entre as bacias medidas e calculadas pelos programas RETROANA e EVERCALC5 e ELMOD4.

Através do diagnóstico dos problemas de cada STH propõem-se algumas soluções de reforço para a rodovia estudada que serão apresentadas no capítulo II.

1.6.2 – Definição dos Parâmetros da Bacia Deflectométrica

Foram definidos parâmetros funcionais e estruturais representativos de cada segmento homogêneo, que caracterizam, cada qual, o seu respectivo segmento homogêneo. Estes parâmetros foram obtidos com base nos ensaios de campo e laboratório retromencionados.

Tabela 1.14 – Parâmetros de Avaliação da Bacia de Deflexões (FABRÍCIO et al., 1988)

PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DA BACIA				
Parâmetro	Unid.	Símbolo	Fórmula	Valores Aceitáveis
Índice de Curvatura Superficial	mm ⁻²	ICS	ICS = D ₀ -D ₃₀	ICS < 25 mm ⁻²
Índice de Curvatura da Base	mm ⁻²	ICB	ICB = D ₆₀ -D ₉₀	Quanto < melhor
Índice de Destruição da Base	mm ⁻²	IDB	IDB = D ₃₀ -D ₆₀	IDB < 40 mm ⁻²

Tabela 1.15 – Parâmetros de Área (AASHTO, 1993)

TIPO DE REVESTIMENTO	ÁREA (mm)
PCCP	610 – 840
Concreto Asfáltico, esp. ≥ 10 cm	530 – 760
Concreto Asfáltico, esp. < 10 cm	410 – 530
Tratamento Superficial	380 – 430

Tabela 1.16 – Parâmetros de Área (PIERCE, 1999)

ÁREA	DEFLEXÃO MÁXIMA (D ₀)	CONCLUSÕES
Baixa	Baixa	Pavimento “fraco” e Subleito “forte”
Baixa	Alta	Pavimento “fraco” e Subleito “forte”
Alta	Baixa	Pavimento “fraco” e Subleito “forte”
Alta	Alta	Pavimento “fraco” e Subleito “forte”

1.6.3 – Proposta de Solução para Restauração do Pavimento

Foi desenvolvida análise do trecho através de dois dos métodos atualmente mais utilizados para o dimensionamento de reforço de pavimentos. Que são: o DNER PRO-11/79 – Método B e o DNER PRO-269/94.

CAPÍTULO II

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

2.1 – Introdução

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos Ensaios de Campo, Avaliação Funcional, Avaliação Estrutural Não-Destrutiva através da retroanálise dos módulos de resiliência e Avaliação Estrutural Destrutiva com base nos resultados dos Ensaios de Laboratório, e por fim, serão apresentadas sugestões para a reabilitação da Rodovia BR-230/PB (Lote III).

2.2 – Ensaios de Campo

Nas figuras, estão sendo apresentados os resultados do levantamento de defeitos de superfície e dos levantamentos deflectométricos realizados com o FWD e a viga Benkelman, para as faixas direita e esquerda, respectivamente.

2.2.1 – Levantamentos Deflectométricos com o *Falling Weight Deflectometer*

É apresentado o perfil de deflexões máximas obtidas com o FWD para as faixas direita e esquerda, onde se percebe que o nível deflectométrico da faixa esquerda, no geral, é significativamente superior ao da faixa direita. Isto se deve, ao maior número de veículos pesados circulantes nesta faixa.

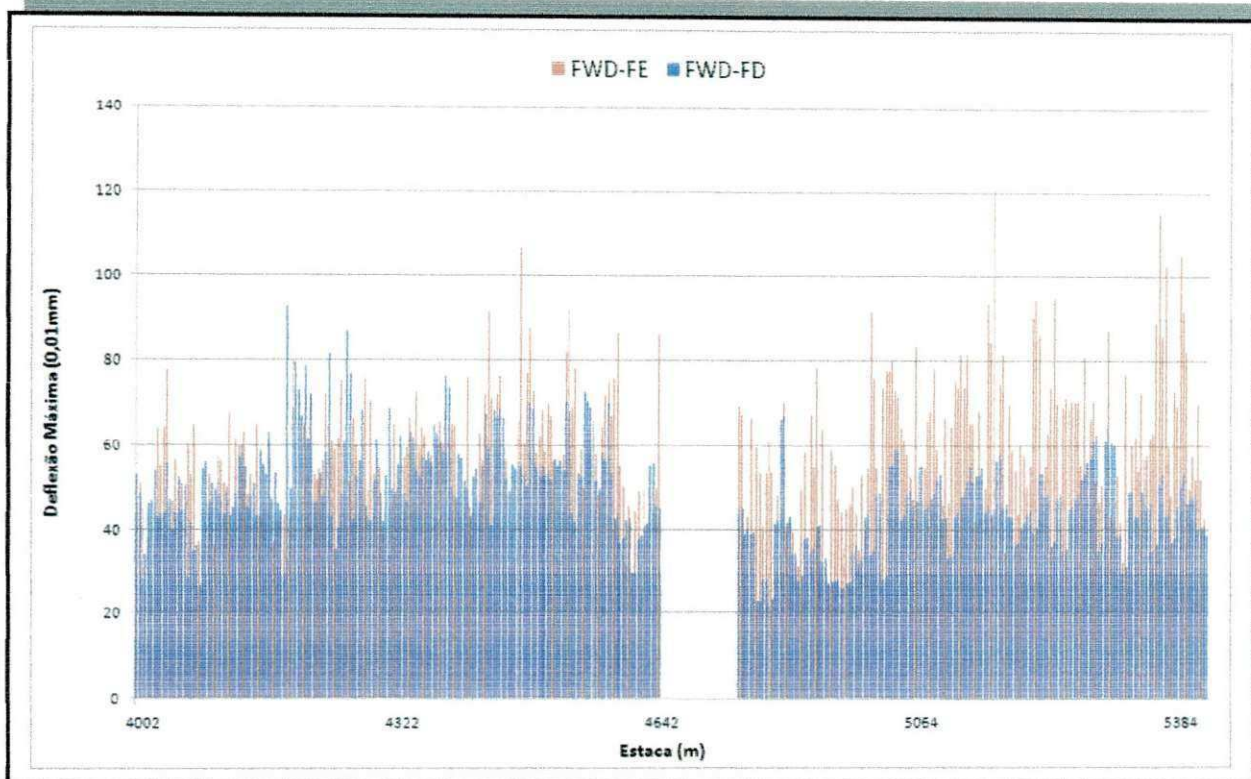


Figura 2.1 – Perfil de deflexões máximas nas faixas direita e esquerda – FWD

O trecho analisado apresentou uma deflexão máxima média de 49×10^{-2} mm, mínima de 22×10^{-2} mm e máxima de 93×10^{-2} mm para a faixa direita. Já a faixa esquerda apresentou média de 58×10^{-2} mm, mínima de 23×10^{-2} mm e máxima de 121×10^{-2} mm.

Tabela 2.3 – Parâmetros da bacia deflectométrica – Faixa Direita

PARÂMETROS DA BACIA DEFLECTOMÉTRICA																		
SEGMENTO HOMOGÊNEO			CARGA (Kn)	BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS								TEMP.		PARÂMETROS				
Nº	ESTACA			EXTENSÃO (m)	DISTÂNCIAS RADIAIS (cm)								SUP. (°C)	AR (°C)	ICS D0-D30	IDB D30-D60	ICB D60-D90	ÁREA (mm)
	INICIAL	FINAL			r=0	r=20	r=30	r=45	r=60	r=90	r=150							
1	4000	4120	2400	40	45	31	23	13	9	4	2	34	26	22	14	5	375	
2	4120	4152	640	40	51	36	27	16	11	5	3	34	26	23	16	6	396	
3	4152	4240	1760	40	48	35	27	15	10	4	2	47	35	22	17	6	392	
4	4240	4344	2080	40	56	40	31	18	12	5	2	48	38	25	18	7	395	
5	4344	4368	480	40	56	42	33	20	14	6	2	48	39	23	19	8	416	
6	4368	4492	2480	40	57	42	34	21	14	6	2	48	38	23	19	8	420	
7	4492	4564	1440	40	56	40	31	18	12	4	2	50	38	25	19	7	391	
8	4564	4648	1680	40	57	43	33	20	13	5	2	47	35	24	20	8	407	
9	4648	4698	1000	40	42	33	27	18	13	6	3	36	29	15	14	7	456	
10	4800	4986	3720	40	49	36	27	16	11	4	2	40	32	22	17	6	396	
11	4986	5034	960	40	47	36	29	19	13	6	3	34	27	18	16	7	437	
12	5034	5098	1280	40	46	36	29	19	14	6	2	34	26	17	15	7	445	
13	5098	5142	880	40	50	37	29	19	13	6	2	32	26	20	16	7	425	
14	5142	5166	480	40	49	38	31	21	15	7	3	32	27	18	16	8	453	
15	5166	5202	720	40	41	32	25	17	12	6	3	38	27	15	13	6	449	
16	5202	5286	1680	40	48	37	30	20	14	7	3	34	27	18	16	8	448	
17	5286	5330	880	40	47	36	29	19	14	6	2	34	26	18	15	8	439	
18	5330	5362	640	40	44	33	26	17	12	6	3	36	26	18	14	6	432	
19	5362	5410	960	40	46	37	30	20	15	6	2	30	26	16	15	8	463	
20	5410	5434	480	40	40	33	27	19	15	7	3	32	26	13	13	7	489	

Com base nas bacias médias por segmento homogêneo, pode-se avaliar através dos parâmetros: ICS, IDB, ICB e ÁREA, o comportamento da superestrutura (revestimento+base+sub-base) e da infra-estrutura (subleito) da rodovia.

Tabela 2.4– Parâmetros da bacia deflectométrica – Faixa Esquerda

PARÂMETROS DA BACIA DEFLECTOMÉTRICA																		
SEGMENTO HOMOGÊNEO			CARGA (Kn)	BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS								TEMP.		PARÂMETROS				
Nº	ESTACA			EXTENSÃO (m)	DISTÂNCIAS RADIAIS (cm)								SUP. (°C)	AR (°C)	ICS D0-D30	IDB D30-D60	ICB D60-D90	ÁREA (mm)
	INICIAL	FINAL			r=0	r=20	r=30	r=45	r=60	r=90	r=150							
1	4000	4120	2400	40	46	33	25	14	9	4	2	50	36	22	15	5	380	
2	4120	4152	640	40	55	40	30	17	11	5	3	51	34	25	19	6	384	
3	4152	4240	1760	40	48	35	27	15	10	4	2	47	35	21	17	6	393	
4	4240	4344	2080	40	56	41	31	17	11	4	2	44	34	25	20	7	387	
5	4344	4368	480	40	54	41	33	21	14	6	2	41	33	21	19	8	429	
6	4368	4492	2480	40	61	47	37	22	15	6	2	43	32	24	22	9	421	
7	4492	4564	1440	39	62	46	35	21	14	5	2	38	31	27	22	8	399	
8	4564	4648	1680	40	63	47	35	19	13	5	2	38	31	29	22	8	385	
9	4648	4698	1000	40	43	30	23	13	9	4	2	40	30	20	14	5	384	
10	4800	4986	3720	40	49	36	28	16	11	4	2	40	32	22	17	6	395	
11	4986	5034	960	40	69	53	40	23	15	6	2	38	31	29	25	9	402	
12	5034	5098	1280	40	59	44	34	21	14	6	2	37	30	25	20	8	409	
13	5098	5142	880	40	67	51	40	24	16	6	2	37	30	27	24	10	414	
14	5142	5166	480	40	79	59	44	24	15	6	3	37	30	35	29	9	386	
15	5166	5202	720	40	57	44	34	21	14	6	3	37	30	23	20	8	422	
16	5202	5286	1680	40	69	52	39	22	15	6	3	37	30	30	25	9	396	
17	5286	5330	880	40	52	40	32	20	14	6	2	38	30	20	18	8	433	
18	5330	5362	640	40	61	47	36	22	16	7	3	37	30	25	20	9	423	
19	5362	5410	960	40	80	62	47	28	18	8	3	37	29	33	29	11	410	
20	5410	5434	480	39	58	47	39	26	19	9	3	36	28	19	19	10	476	

Para a faixa esquerda no que concerne ao parâmetro “ÁREA”, os segmentos com menor e maior valor foram os mesmos da faixa direita SH - 1 e SH - 20 com 380mm 476mm, respectivamente. Apresentaram também, valores

menores do que a faixa típica da AASHTO (1993). Quanto ao critério da tabela 1.16 (Capítulo IV), destaca-se o SH-19 com deflexão máxima alta e área baixa, indicando que tanto o pavimento quanto o subleito encontram-se pouco resistentes. Para os demais segmentos, idem as considerações feitas para faixa direita.

2.2.2 – Levantamento Deflectométrico com a Viga Benkelman

Com a finalidade de obter as deflexões características máximas de cada segmento homogêneo, aplicou-se o tratamento estatístico preconizado no método DNER PRO-11/79. Nas tabelas 2.5 e 2.6 são apresentados os resumos estatísticos das deflexões máximas e o raio médio.

Tabela 2.5 – Resumo Estatístico da Deflexão Máxima com a Viga Benkelman e Raio Médio – Faixa Direita

DEFLEXÕES CARACTERÍSTICAS E RAO MÉDIO - FAIXA DIREITA														
Nº	ESTACA		EXTENSÃO (m)	n	DEFLEXÕES CARACTERÍSTICAS								RAIO MÉDIO	
	INICIAL	FINAL			$D_{MÉDIA}$ (10^2 mm)	σ	z	$D_M + z\sigma$	$D_M - z\sigma$	D_C	$D_{MÍNIMA}$	$D_{MÁXIMA}$	CV	R_M
1	4000	4120	2400	30	57	11,9	3,0	92,65	20,95	69	40	84	21	171
2	4120	4152	640	8	57	5,8	2,5	71,08	41,92	62	48	68	10	156
3	4152	4240	1760	22	65	15,5	3,0	111,37	18,08	80	40	100	24	130
4	4240	4344	2080	26	73	16,4	3,0	121,76	23,47	89	40	108	23	111
5	4344	4368	480	6	70	11,5	2,0	93,05	46,95	82	60	88	16	130
6	4368	4492	2480	30	77	9,9	3,0	107,06	47,47	87	56	100	13	104
7	4492	4564	1440	18	66	14,3	2,5	102,07	30,38	81	40	88	22	133
8	4564	4648	1680	21	63	10,1	3,0	92,87	32,47	73	48	80	16	140
9	4648	4698	1000	13	66	11,6	2,5	95,48	37,44	78	48	84	17	109
10	4800	4986	3720	45	51	11,8	3,0	86,30	15,74	63	28	84	23	198
11	4986	5034	960	12	63	12,9	2,5	94,95	30,38	76	40	88	21	143
12	5034	5098	1280	16	59	6,3	2,5	74,55	42,95	65	48	68	11	176
13	5098	5142	880	11	71	10,7	2,5	97,78	44,04	82	56	88	15	143
14	5142	5166	480	6	69	9,0	2,5	91,84	46,82	78	60	84	13	87
15	5166	5202	720	9	62	11,0	2,5	89,21	0,00	73	48	76	18	153
16	5202	5286	1680	21	73	13,3	3,0	112,42	32,72	86	48	100	18	135
17	5286	5330	880	11	74	22,7	2,5	130,63	0,00	97	40	120	31	117
18	5330	5362	640	8	54	8,0	2,5	73,46	33,54	61	48	72	15	195
19	5362	5410	960	12	67	11,0	2,5	94,91	39,75	78	52	84	16	105
20	5410	5434	480	6	56	9,5	2,5	79,66	32,34	65	40	68	17	130

LEGENDA:

- n - Número de amostras
- $D_{MÉDIA}$ - Deflexão Máxima Média
- Z - Coeficiente de Confiança, estimado em função do número de medição do parâmetro (n)
- D_C - Deflexão Característica
- CV - Coeficiente de Variação

Tabela 2.6 – Resumo Estatístico da Deflexão Máxima com a Viga Benkelman e Raio Médio – Faixa Esquerda

DEFLEXÕES CARACTERÍSTICAS E RAO MÉDIO - FAIXA ESQUERDA														
Nº	SEGMENTO HOMOGÊNEO		EXTENSÃO (m)	n	DEFLEXÕES CARACTERÍSTICAS								RAIO MÉDIO	
	ESTACA INICIAL	ESTACA FINAL			D _{MÉDIA} (10 ⁻² mm)	σ	z	D _M + zσ	D _M - zσ	D _c	D _{MÍNIMA}	D _{MÁXIMA}	CV	R _M
1	4000	4120	2400	30	71	13,7	3,0	112,12	30,02	85	40	100	19	101
2	4120	4152	640	8	87	13,1	2,5	119,84	54,16	100	64	112	15	65
3	4152	4240	1760	21	71	15,3	3,0	116,57	24,76	86	48	100	22	104
4	4240	4344	2080	26	76	20,6	3,0	137,55	14,14	96	52	108	27	148
5	4344	4368	480	6	81	19,8	2,0	120,32	41,01	100	68	120	25	98
6	4368	4492	2480	31	84	20,4	3,0	145,64	23,13	105	40	128	24	84
7	4492	4564	1440	17	83	13,1	2,5	115,76	50,36	96	60	100	16	117
8	4564	4648	1680	21	112	18,4	3,0	167,62	57,14	131	60	128	16	73
9	4648	4698	1000	13	69	11,0	2,5	98,36	41,49	80	56	88	16	143
10	4800	4986	3720	44	75	19,6	3,0	133,87	16,31	95	48	120	26	102
11	4986	5034	960	12	93	17,3	2,5	136,68	49,99	111	68	120	19	69
12	5034	5098	1280	16	99	17,1	2,5	141,45	56,05	116	80	140	17	88
13	5098	5142	880	11	101	19,0	2,5	148,65	53,53	120	64	128	19	77
14	5142	5166	480	6	130	31,6	2,5	208,93	51,07	162	88	168	24	41
15	5166	5202	720	9	92	20,5	2,5	142,90	0,00	112	60	120	22	71
16	5202	5286	1680	21	114	26,6	3,0	194,02	34,17	141	80	160	23	54
17	5286	5330	880	11	91	30,2	2,5	165,95	0,00	121	60	160	33	75
18	5330	5362	640	8	89	14,5	2,5	125,15	52,85	103	76	120	16	87
19	5362	5410	960	12	112	24,4	2,5	173,30	51,36	137	64	148	22	82
20	5410	5434	480	7	90	14,8	2,5	127,19	53,38	105	68	112	16	60

LEGENDA:
n - Número de amostras
D_{MÉDIA} - Deflexão Máxima Média
Z - Coeficiente de Confiança, estimado em função do número de medição do parâmetro (n)
D_c - Deflexão Característica
CV - Coeficiente de Variação

Na figura 2.3, constam as retas referentes às deflexões admissíveis segundo os modelos utilizados para o dimensionamento do reforço de pavimentos, o DNER PRO-11/79 (Método B) e o DNER PRO-269/94 (TECNAPAV), e também, as deflexões medidas, onde observa-se que as deflexões medidas com a viga Benkelman, deflexão base dos referidos modelos, apresentam-se na grande maioria bem maiores do que as admissíveis para o número "N" de projeto de $4,5 \times 10^7$ solicitações do eixo-padrão.

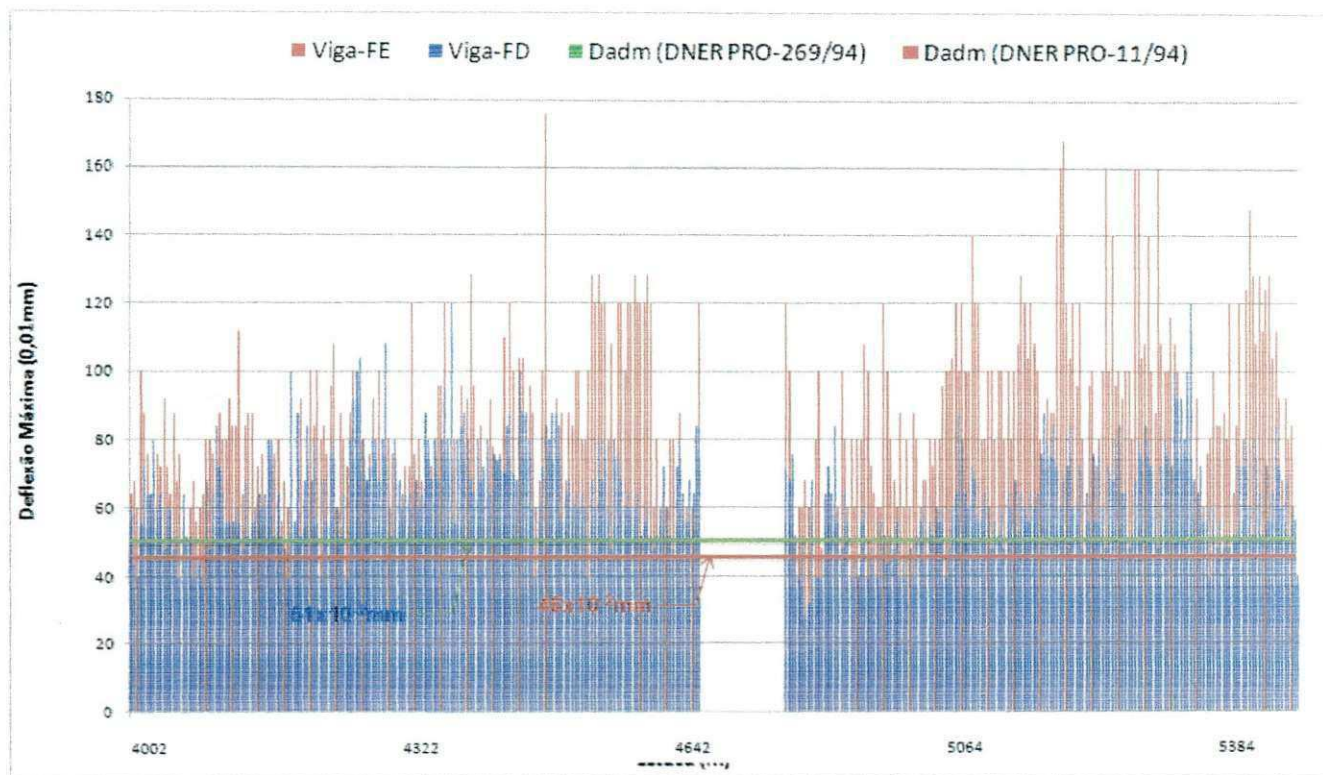


Figura 2.2 – Deflexões da Viga Benkelman em campo dos trechos analisados e admissíveis pelo PRO11 e PRO269

2.2.3 – Comparação entre a viga Benkleman e o FWD

Verifica-se na figura 2.4 uma maior quantidade de pontos acima da reta de igualdade indicando deflexões maiores obtidas com a viga Benkelman em relação ao FWD para as faixas direita e esquerda. A faixa esquerda tem um maior número de pontos acima da reta de igualdade e maior dispersão dos valores medidos de deflexões, o que pode ser atribuído à maior quantidade de defeitos nesta faixa, o que se reflete em uma maior heterogeneidade de deflexões medidas.

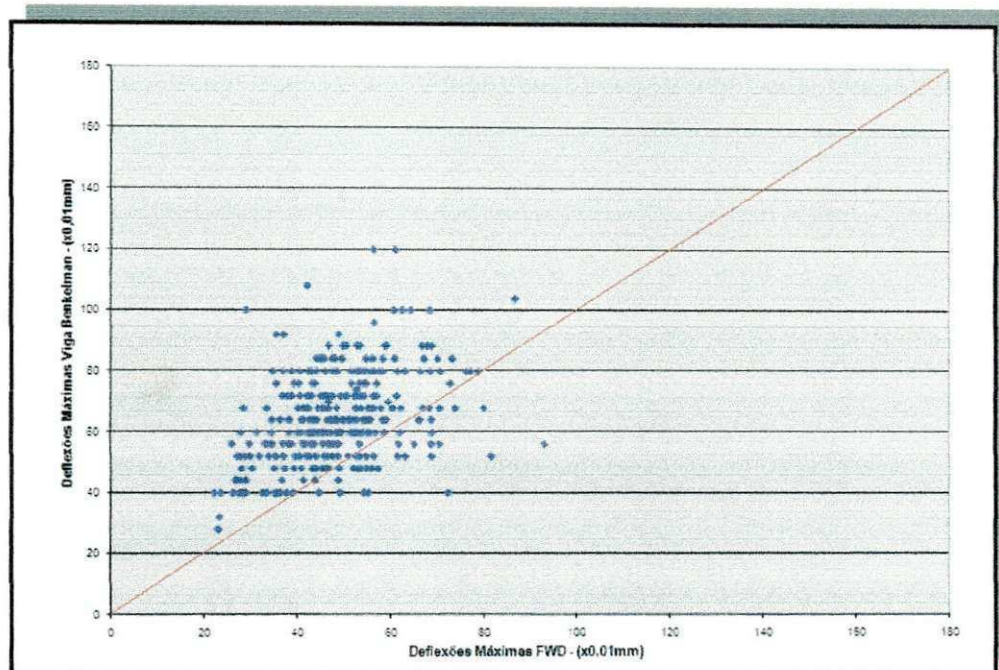


Figura 2.3 – Reta de igualdade de deflexões e correlação entre as deflexões máximas obtidas por ponto com viga Benkelman e o FWD – Faixa Direita

As deflexões medidas com a viga Benkelman resultaram em valores de deflexões máximas bem maiores do que as obtidas com o FWD. A explicação deste fato se deve segundo os autores HOFFMAN e THOMPSON (1982) à mobilização de efeitos visco-elásticos que predominam durante o ensaio com a viga Benkelman, em função da baixa velocidade do “caminhão de prova” durante a realização do ensaio, o que resulta em módulos de resiliência retroanalizados menores do que aqueles mobilizados pelo ensaio com o FWD para o mesmo nível de carga.

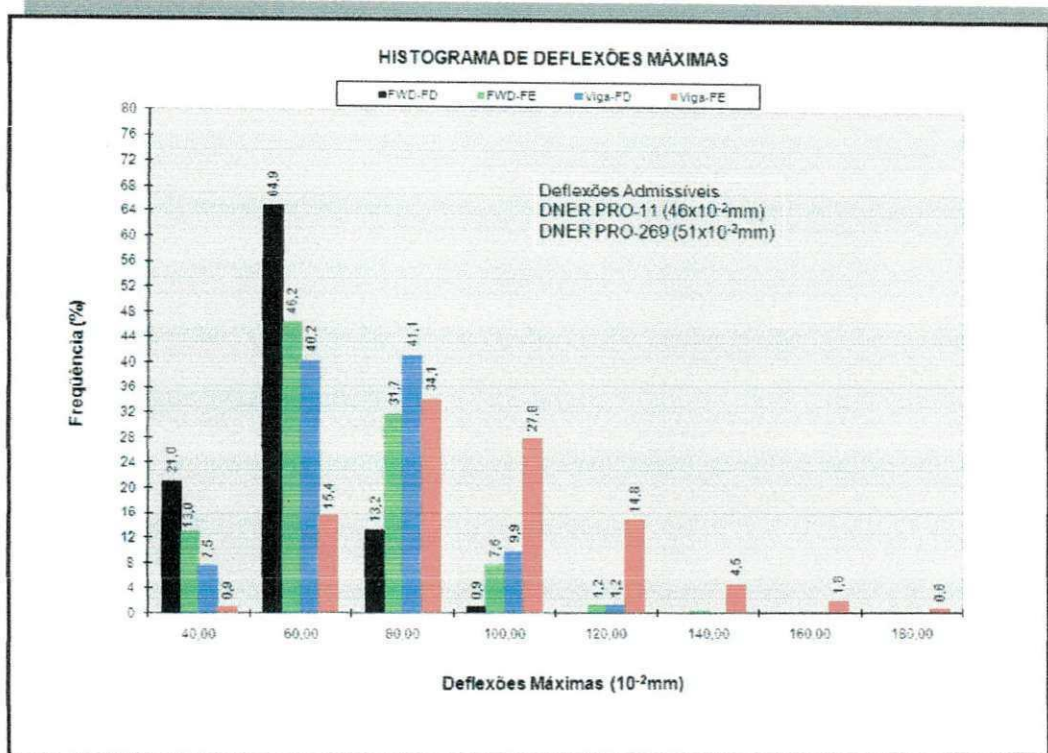


Figura 2.4 – Histograma de deflexões máximas para ambas as faixas de tráfego

2.3 – Avaliação Funcional

A seguir serão apresentados os resultados da avaliação funcional através da identificação dos defeitos das mais distintas manifestações de degradação ocorrentes na superfície dos trechos estudados nesta pesquisa.

2.3.1 – Levantamento dos Defeitos de Superfície

O pavimento não apresenta deformações plásticas significativas com afundamento médio em trilha de roda de 2,75 mm para o SH-19 (faixa esquerda) o de maior IGG.

Segundo BALBO (1997), o bombeamento de finos são manchas superficiais coloridas nas bordas de fissuras (geralmente de classe 2 ou 3). Sua possível gênese é a infiltração de água em revestimentos muito fissurados resultando

no bombeamento de finos de camadas de solos inferiores para as bases e superfície dos revestimentos através das fissuras presentes. Trata-se de um indicador de problemas de baixa capacidade de suporte de bases existentes. Já DOMINGUES (1993) ressalta que o trincamento couro de jacaré tem sua gênese ligada às seguintes causas:

- colapso do revestimento asfáltico devido à repetida ação das cargas do tráfego;
- sub-dimensionamento ou má qualidade da estrutura ou de uma das camadas do pavimento;
- envelhecimento (fim da vida do pavimento);
- asfalto duro e quebradiço (extraordinariamente).
- solo com baixa capacidade de suporte;

Quanto ao bombeamento de finos sua provável gênese está relacionada com a existência de vazios sob a superfície do pavimento, submetidos à alta pressão de água devido a passagem dos veículos, resultando na deterioração progressiva e perda de suporte do pavimento (DNER, 1998).

Tabela 2.7 – Tabelas de conceitos de IGG

DNIT 006/2003 - PRO	
Conceitos	Limites
Ótimo	$0 < IGG < 20$
Bom	$20 < IGG < 40$
Regular	$40 < IGG < 80$
Ruim	$80 < IGG < 160$
Péssimo	$IGG > 160$

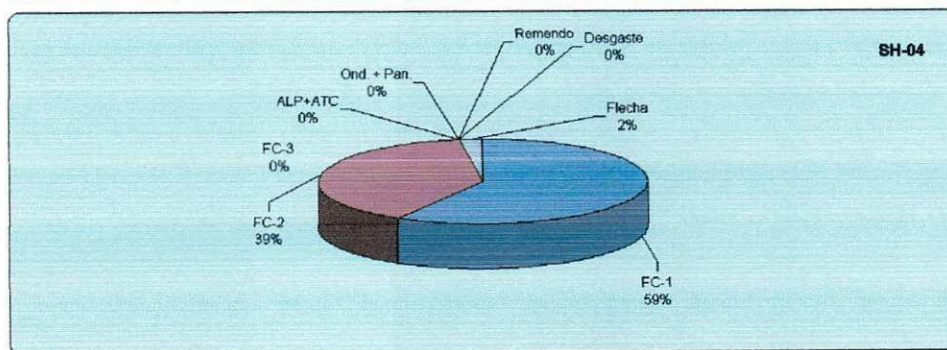
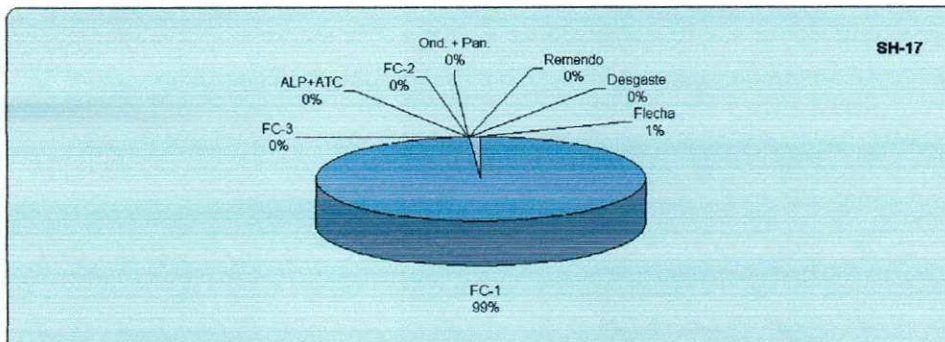
DNER PRO-08/94	
Conceitos	Limites
Bom	0 a 20
Regular	20 a 80
Mau	80 a 150
Péssimo	≥ 150

Na tabelas 2.8 podemos observar a distribuição e os tipos de defeitos por segmento homogêneos para a faixa direita.

Tabela 2.8 – Resumo do Levantamento dos defeitos de superfície – Faixa Direita

RESUMO DO LEVANTAMENTO DE DEFEITOS DE SUPERFÍCIE-FAIXA DIREITA														
SEGMENTO HOMOGÊNEO	ESTACA		EXTENSÃO (m)	INCIDÊNCIA DOS DEFEITOS NA SUPERFÍCIE - DNIT 008/2003 - PRO								IGG	CONCEITO	
	INICIAL	FINAL		FC-1	FC-2	FC-3	FC-2 + FC-3	ALP+ ATP	Ond. + Pan.	Remendo	Desgaste			Flecha
1	4000	4120	2400	26,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,19	6,0	ÓTIMO
2	4120	4152	640	43,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	9,0	ÓTIMO
3	4152	4240	1760	25,6	2,3	0,0	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,20	7,0	ÓTIMO
4	4240	4344	2080	24,0	16,0	0,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,88	23,0	BOM
5	4344	4368	480	58,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,13	12,0	ÓTIMO
6	4368	4492	2480	74,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,20	15,0	ÓTIMO
7	4492	4564	1440	12,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,86	5,0	ÓTIMO
8	4564	4648	1680	60,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,20	13,0	ÓTIMO
9	4648	4698	1000	65,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,19	14,0	ÓTIMO
10	4800	4986	3720	61,3	3,2	0,0	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,19	14,0	ÓTIMO
11	4986	5034	960	56,5	17,4	0,0	17,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,39	22,0	BOM
12	5034	5098	1280	61,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,06	13,0	ÓTIMO
13	5098	5142	880	59,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,05	12,0	ÓTIMO
14	5142	5166	480	66,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,04	14,0	ÓTIMO
15	5166	5202	720	94,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,42	21,0	BOM
16	5202	5286	1680	64,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	13,0	ÓTIMO
17	5286	5330	880	18,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,23	4,0	ÓTIMO
18	5330	5362	640	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,09	13,0	ÓTIMO
19	5362	5410	960	66,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,31	14,0	ÓTIMO
20	5410	5434	480	30,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,62	6,0	ÓTIMO

DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DOS DEFEITOS DOS SEGMENTOS HOMOGÊNEOS COM MENOR E MAIOR IGG



Na faixa direita os segmentos com menor e maior IGG são os segmentos SH-7 e SH-4, respectivamente. No segmento SH-7 com melhores condições superficiais, o trincamento FC-1 apresenta um percentual de 99% e flecha com

1% apenas dos defeitos de superfície. Já o segmento SH-4, apresenta defeitos do tipo FC-1 com 59% e FC-2 com 39%.

Na figura 2.6 é apresentada a relação entre a deflexão máxima (FWD) com o índice de degradação IGG, onde se observa uma pequena tendência do aumento defeitos (IGG) com o aumento da deflexão máxima (D_0).

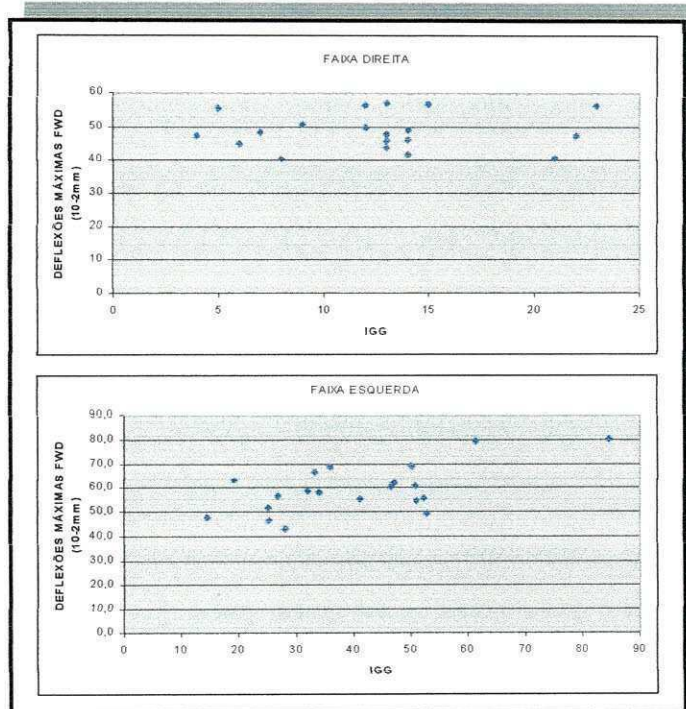
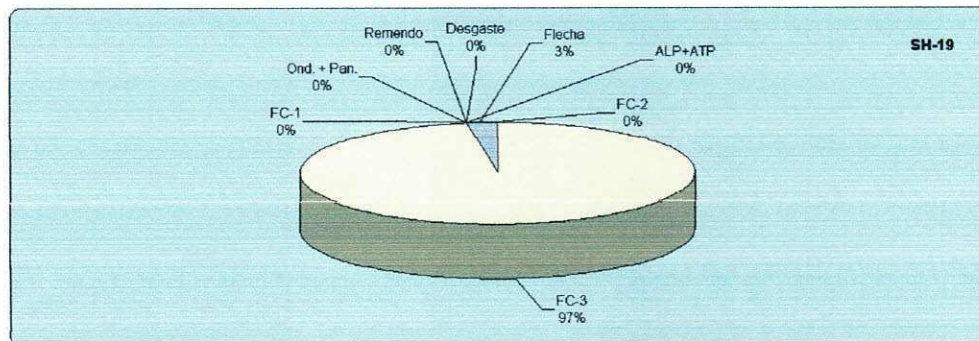
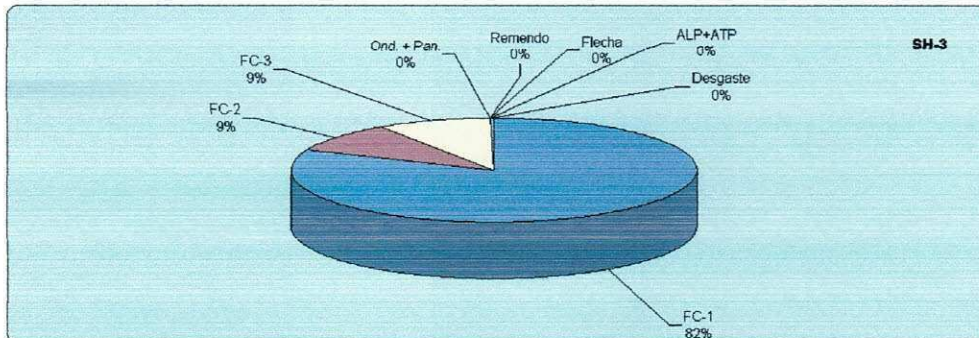


Figura 2.5– Relação entre o IGG e a deflexão máxima obtida com o FWD para o trecho estudado nesta pesquisa

Tabela 2.9 – Resumo do Levantamento dos defeitos de superfície – Faixa Esquerda

RESUMO DO LEVANTAMENTO DE DEFEITOS DE SUPERFÍCIE-FAIXA ESQUERDA														
SEGMENTO HOMOGÊNEO	ESTACA		EXTENSÃO (m)	INCIDÊNCIA DOS DEFEITOS NA SUPERFÍCIE - DNIT 006/2003 - PRO								IGG	CONCEITO	
	INICIAL	FINAL		FC-1	FC-2	FC-3	FC-2 + FC-3	ALP, ATP	Ond. + Pan.	Remendo	Desgaste			Flecha
1	4000	4108	2180	55,0	10,0	6,7	16,7	0,0	0,0	0,0	8,3	0,88	25	BOM
2	4108	4140	640	31,3	37,5	18,8	56,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,84	41	REGULAR
3	4140	4228	1760	41,9	4,7	4,7	9,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,20	14	ÓTIMO
4	4228	4332	2080	32,7	44,2	23,1	67,3	1,9	0,0	0,0	0,0	1,45	52	REGULAR
5	4332	4356	480	8,3	66,7	16,7	83,3	0,0	0,0	0,0	0,0	1,25	51	REGULAR
6	4356	4492	2720	34,7	55,1	18,4	73,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,11	51	REGULAR
7	4492	4564	1440	25,0	50,0	19,4	69,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,00	47	REGULAR
8	4564	4648	1680	42,5	12,5	2,5	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,27	19	ÓTIMO
9	4648	4699	1020	68,0	20,0	4,0	24,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,60	28	BOM
10	4800	4986	3720	25,5	44,7	29,8	74,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,76	53	REGULAR
11	4986	5034	960	29,2	37,5	12,5	50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,10	36	BOM
12	5034	5098	1280	53,1	28,1	6,3	34,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,31	82	BOM
13	5098	5142	880	18,2	27,3	18,2	45,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,02	33	BOM
14	5142	5166	480	16,7	33,3	50,0	83,3	0,0	0,0	0,0	0,0	1,08	61	REGULAR
15	5166	5202	720	72,2	22,2	0,0	22,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,72	27	BOM
16	5202	5286	1680	38,1	26,2	33,3	59,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,82	50	REGULAR
17	5286	5330	880	23,8	19,1	4,8	23,8	4,8	0,0	0,0	0,0	1,80	25	BOM
18	5330	5362	640	29,4	23,5	23,5	47,1	5,9	0,0	0,0	0,0	1,91	47	REGULAR
19	5362	5410	960	0,0	0,0	100,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,75	85	RUIM
20	5410	5434	480	75,0	33,3	0,0	33,3	0,0	0,0	0,0	0,0	1,46	34	BOM

DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DOS DEFEITOS DOS SEGMENTOS HOMOGÊNEOS COM MENOR E MAIOR IGG



Na faixa esquerda os segmentos com menor e maior IGG são os segmentos SH-3 e SH-19, respectivamente. No segmento SH-3 apresentando melhores condições de superfície, o trincamento FC-1 apresenta um percentual de 82%,

FC-2 com 43%, FC-3 com 11% e flecha com apenas 2% dos defeitos de superfície. Já o segmento 19 apresenta o defeito do tipo FC-3 com 89%, FC-1 com 4%, FC-2 com 4% e flecha com 3%.

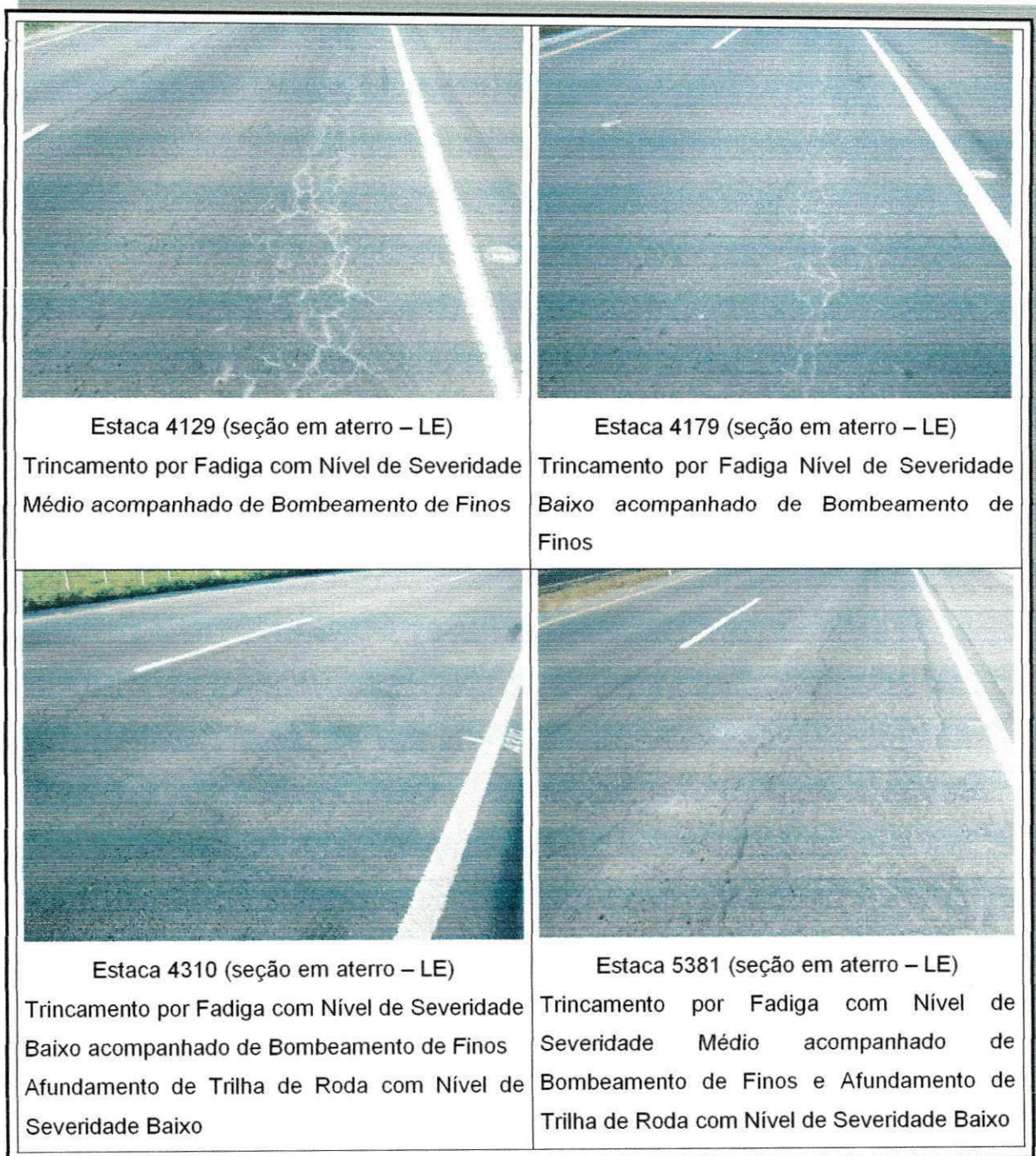


Figura 2.6 – Fotos de defeitos de superfície na faixa esquerda estacas 4129, 4179, 4310 e 5381 do trecho estudado nesta pesquisa

O pavimento sob o ponto de vista do usuário apresenta-se, em geral, com boas condições de rolamento e conforto. Entretanto, sob o ponto de vista “clínico” de

um profissional de pavimentos os defeitos levantados revelaram um comprometimento estrutural com tendência, obviamente, da rápida progressão dos defeitos aumentando a área afetada e severidade, até o ponto da desagregação total das bordas das trincas e, posteriormente ocorrência de arrancamento das placas e formação de painéis.

2.4 – Avaliação Estrutural Não-Destrutiva Através de Retroanálise

A avaliação estrutural não-destrutiva foi realizada baseando-se no processo de retroanálise dos módulos de resiliência das camadas do sistema pavimento-subleito. Os módulos assim obtidos refletem o estado de tensão em que se encontra a estrutura permitindo assim avaliar estruturalmente as camadas constituintes do pavimento e diagnosticar o desempenho apresentado.

WILLIAM (1999) comparou os seguintes programas: MODCOMP 3, MODULUS 5, EVERCALC4 E ELMOD 4, para estrutura de pavimentos flexíveis, rígidos e compostos (concreto asfáltico sobre placa de concreto), constatando diferenças bastante significativas resultantes de cada um dos programas utilizados.

Primeiramente fez-se uma análise considerando a estrutura com três camadas (revestimento, base+sub-base e subleito) pelo programa RETROANA. Em seguida, foram utilizados os programas EVERCALC5 e ELMOD4 considerando a estrutura com quatro camadas (revestimento, base, sub-base e subleito), com objetivo de verificar os módulos das camadas de base e sub-base separadamente. E por fim, foram recalculadas as bacias deflectométrica através do programa ELSYM5 para os módulos retroanalizados considerando estruturas com 3 e 4 camadas com intuito de verificar o ajuste entre as bacias medidas e calculada.

2.4.1 – Análise pelo Programa RETROANA

Para a retroanálise com o programa RETROANA utilizou-se a estrutura da figura 2.8 para todos os seguimentos homogêneos e as faixas de módulos conforme tabela 2.10.

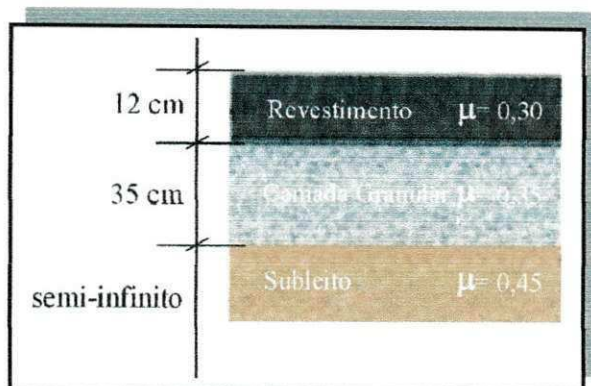


Figura 2.7 – Estrutura considerada na retroanálise com o Retroana

Tabela 2.10 – Faixa de módulos de resiliência a ser adotado pelo programa.

RETROANA

CAMADA	MR (kgf/cm ²)	
	MÍNIMO	MÁXIMO
Revestimento	10.000	70.000
Camada Granular	300	5.500

Utilizando-se as bacias deflectométricas do FWD, foram obtidos os módulos de resiliência das camadas do pavimento através do programa RETROANA.

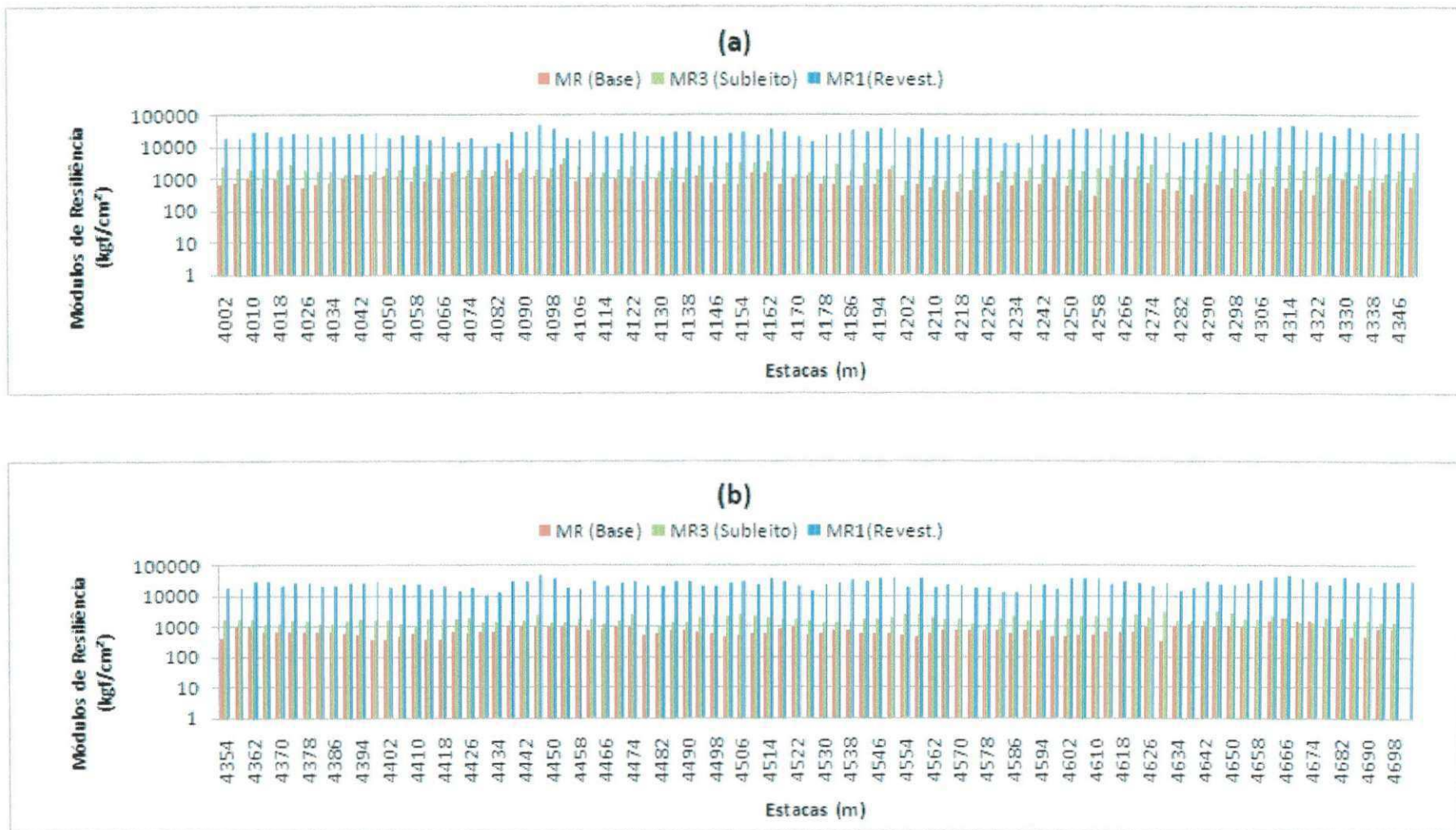


Figura 2.8 – Módulos de resiliência obtidos a partir do programa RETROANA – Faixa Direita (a) estaca 4000 a 4346; (b) da 4354 a 4698

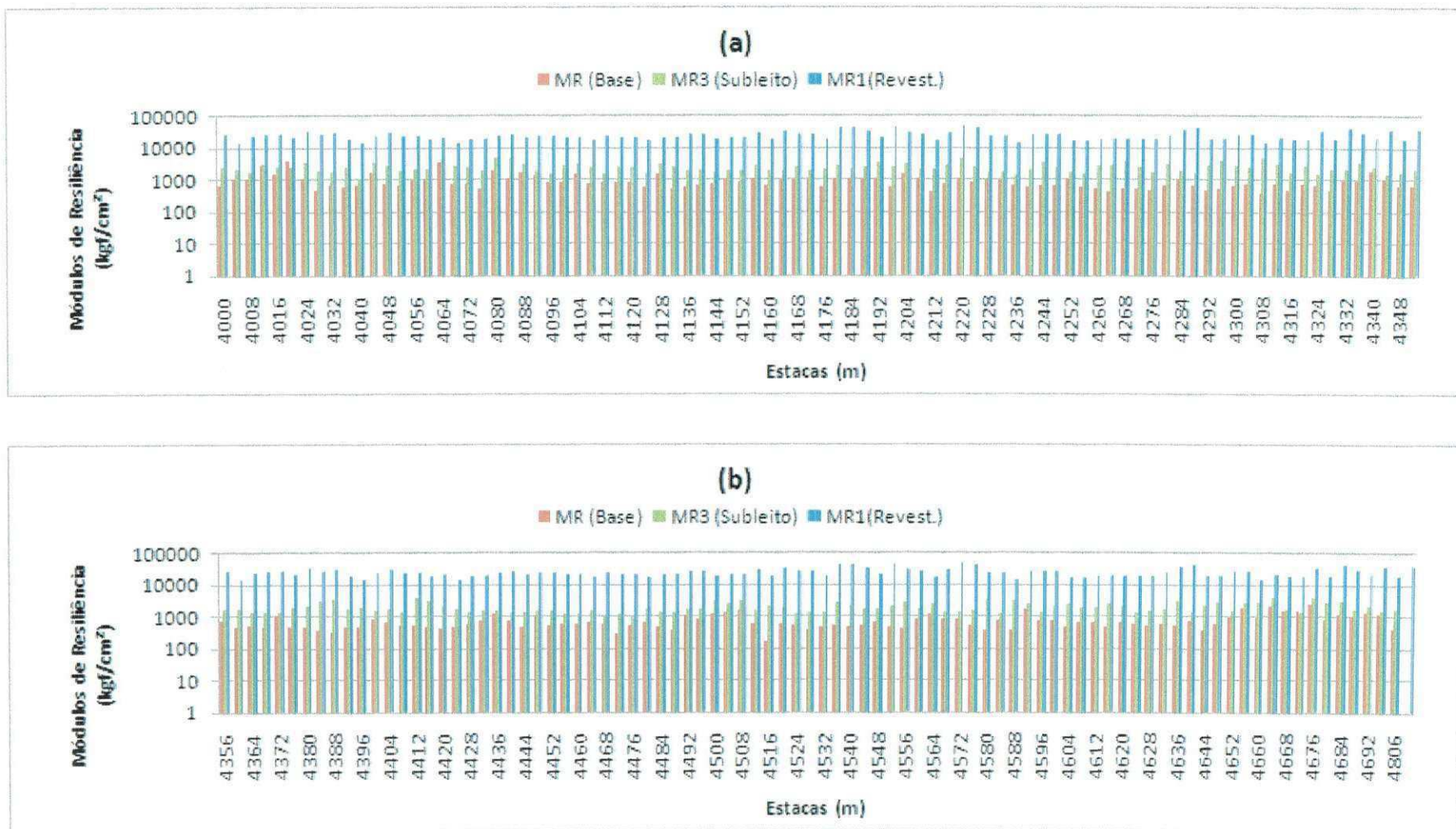


Figura 2.9 – Módulos de resiliência obtidos a partir do programa RETROANA – Faixa Esquerda (a) estaca 4000 a 4348 (b) 4356 a 4696

No Brasil, região tropical, os módulos do subleito com características argilosas geralmente são superiores aos da camada granular. Segundo MOTTA e MAHLER (1982), os materiais granulares, que geralmente compõem a camada de base dos pavimentos flexíveis, quando sob um revestimento pouco flexível, estão sujeitos a baixos níveis de pressão confinante (σ_3) que correspondem a baixos valores de módulos resilientes, o que provoca grandes deformações nestas camadas. Isto ocorre tanto em profundidade quanto radialmente, ou seja, quanto mais afastado das cargas menores as tensões atuantes, menores os módulos. Já os materiais argilosos, em geral constituintes dos subleitos, tem suas características resilientes variando com a tensão-desvio (σ_d) atuante, ou seja, para tensões-desvio baixas os módulos são elevados decrescendo à medida que σ_d cresce, primeiro rapidamente e depois mais lentamente. Como resultado deste comportamento diferenciado, um material argiloso que se encontra no subleito e, portanto está solicitado por uma tensão vertical menor, pode apresentar módulos muito superiores aos da base.

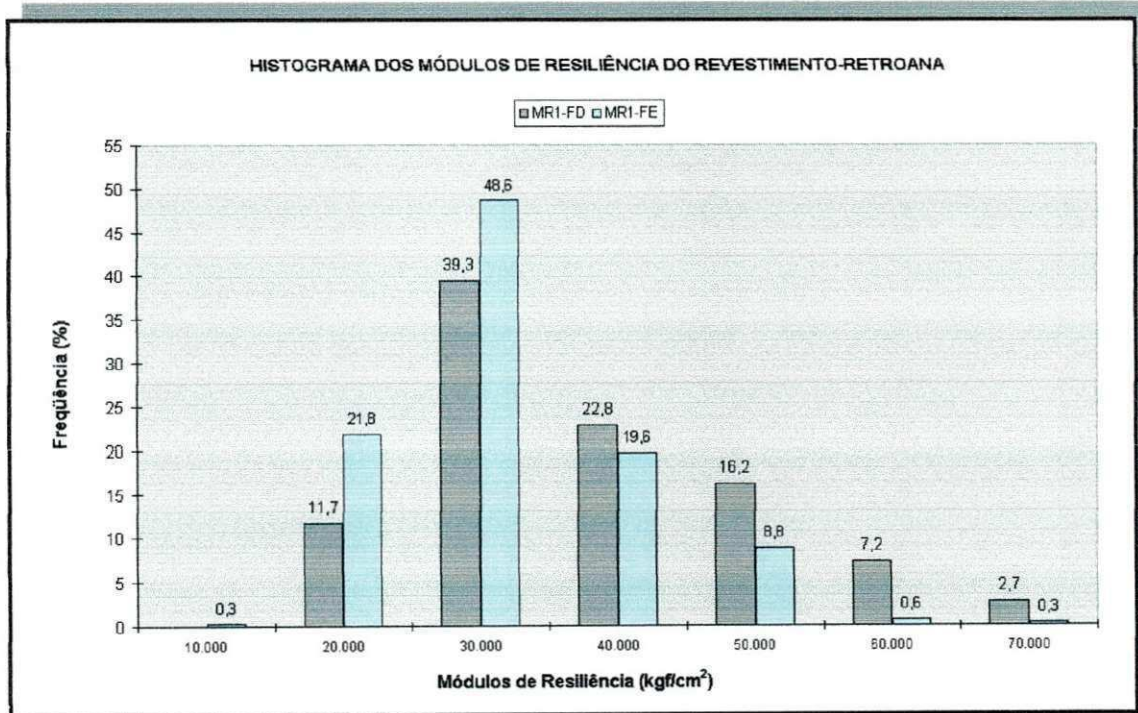


Figura 2.10 – Histograma dos módulos de resiliência do revestimento para ambas as faixas de tráfego do trecho analisado neste estudo

No item 1.3.4.2 estão apresentados os resultados da retroanálise considerando a estrutura composta de quatro camadas, sendo possível avaliar o comportamento em termos de valores modulares das camadas de base e sub-base separadamente. Desta forma, a consideração sobre os baixos valores de módulos encontrados para a camada granular será discutida no item retromencionado.

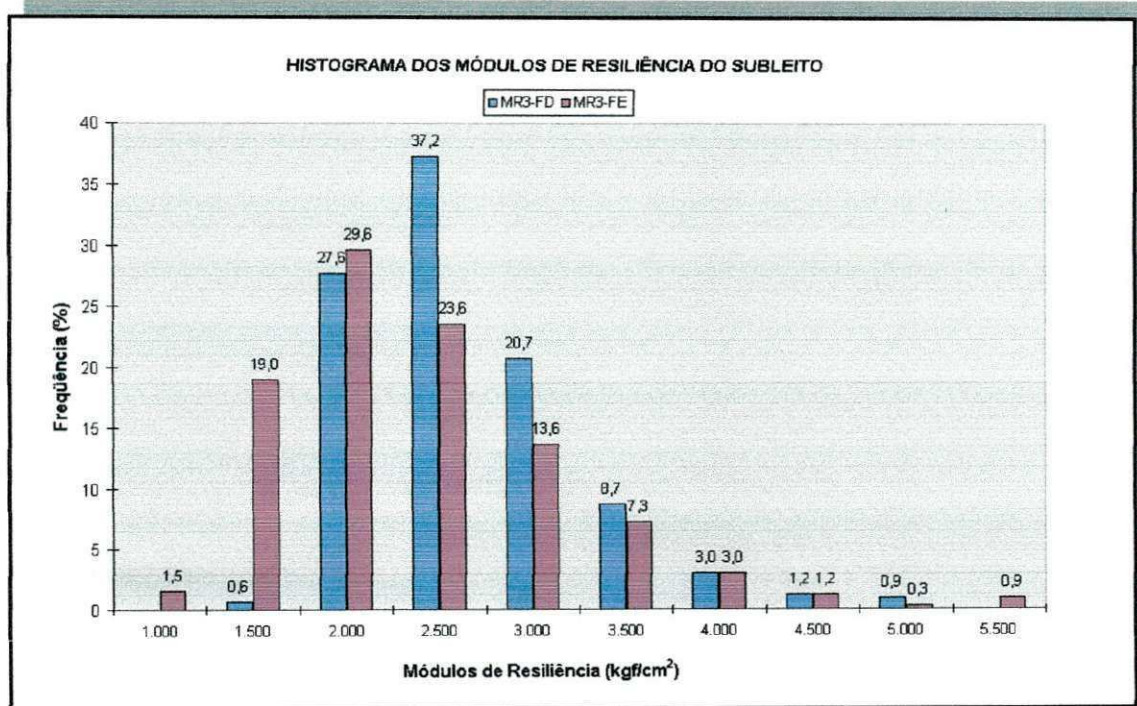


Figura 2.11 – Histograma dos módulos de resiliência do subleito para ambas as faixas de tráfego do trecho analisado neste estudo

Como descrito no Capítulo I utilizou-se a sub-rotina Homogen.exe do programa RETROANA para a divisão dos segmentos com características homogêneas, o qual utiliza o “Método das Diferenças Acumuladas” (*Analysis Unit Delineation by Accumulative Differences*) preconizado pela AASHTO (1986).

Tabela 2.11 – Resumo da retroanálise por segmento homogêneo com o RETROANA – Faixa Direita

RESUMO DA RETROANÁLISE - PROGRAMA RETROANA-FAIXA DIREITA													
SH	RE	Carga	MR1	MR2	MR3	Erro	SH	RE	Carga	MR1	MR2	MR3	Erro
		(kN)	(kgf/cm ²)			(%)			(kN)	(kgf/cm ²)			(%)
1	Média	40	24.194	1.188	2.124	5	11	Média	40	34.916	1.105	1.639	6
	desvp	0,50	8.068	693	615	2		desvp	0,52	14.203	360	395	2
	n	30	30	30	30	30		n	12	12	12	12	12
	CV (%)	1,2	33,3	58,3	28,9	36,7		CV (%)	1,3	40,7	32,6	24,1	32,6
	Mínimo	39	10.858	515	1.438	2		Mínimo	39	27.960	799	1.022	3
	Máximo	41	49.726	4.070	4.795	7		Máximo	41	65.300	1.663	2.206	9
2	Média	40	24.533	898	2.455	4	12	Média	40	35.202	1.094	1.609	5
	desvp	0,30	4.456	175	400	1		desvp	0,19	9.292	294	326	1
	n	8	8	8	8	8		n	16	16	16	16	16
	CV (%)	0,8	18,2	19,5	16,3	28,2		CV (%)	0,5	33,2	26,0	18,5	15,0
	Mínimo	40	20.247	721	1.758	3		MIN.	40	27.960	707	1.047	3
	Máximo	41	49.726	4.070	4.795	7		MÁX.	40	57.376	1.837	2.206	7
3	Média	40	25.465	790	2.056	6	13	Média	40	26.731	1.067	1.594	6
	desvp	0,70	8.313	455	809	2		desvp	0,34	1.983	118	420	1
	n	22	22	22	22	22		n	11	11	11	11	11
	CV (%)	1,7	32,6	57,6	39,4	36,0		CV (%)	0,8	7,4	11,0	26,3	10,2
	Mínimo	38	13.856	300	857	3		MIN.	40	25.095	862	1.133	4
	Máximo	41	40.803	2.068	3.811	10		MÁX.	41	29.423	1.233	2.373	6
4	Média	40	29.353	681	2.124	6	14	Média	40	41.959	867	1.497	3
	desvp	0,42	8.779	268	627	2		desvp	0,27	12.332	209	187	2
	n	26	26	26	26	26		n	6	6	6	6	6
	CV (%)	1,1	29,9	39,3	29,5	38,6		CV (%)	0,7	29,4	24,2	12,5	44,9
	Mínimo	39	14.222	300	1.203	3		MIN.	40	29.423	690	1.279	2
	Máximo	41	49.557	1.288	3.951	13		MÁX.	40	53.198	1.233	1.685	6
5	Média	40	27.372	746	1.712	5	15	Média	40	41.775	1.288	1.652	4
	desvp	0,34	3.151	225	225	1		desvp	0,36	9.585	198	110	1
	n	6	6	6	6	6		n	9	9	9	9	9
	CV (%)	0,9	11,5	30,2	13,1	28,8		CV (%)	0,9	22,9	15,4	6,6	30,2
	Mínimo	39	24.495	436	1.289	3		MIN.	39	29.248	985	1.451	2
	Máximo	40	30.248	1.003	1.955	7		MÁX.	40	53.198	1.503	1.802	5
6	Média	40	25.871	717	1.561	5	16	Média	40	34.503	1.123	1.476	4
	desvp	0,45	6.530	214	341	1		desvp	0,41	8.571	382	297	1
	n	31	31	31	31	31		n	21	21	21	21	21
	CV (%)	1,1	25,2	29,9	21,9	29,5		CV (%)	1,0	24,8	34,0	20,2	26,2
	Mínimo	39	14.960	357	1.124	3		MIN.	39	23.539	691	1.008	3
	Máximo	41	40.458	1.068	2.506	9		MÁX.	41	48.159	2.005	2.070	7
7	Média	40	26.283	643	1.986	5	17	Média	40	40.973	1.014	1.703	4
	desvp	0,39	5.407	130	400	2		desvp	0,69	14.967	384	371	1
	n	18	18	18	18	18		n	11	11	11	11	11
	CV (%)	1,0	20,6	20,2	20,1	33,9		CV (%)	1,7	36,5	37,9	21,8	30,6
	Mínimo	39	15.453	478	1.449	3		MIN.	39	22.797	569	1.184	3
	Máximo	40	34.079	968	2.620	9		MÁX.	41	70.000	1.629	2.303	7
8	Média	40	25.329	761	1.907	5	18	Média	40	35.958	1.196	1.772	4
	desvp	0,4	11.087	232	507	2		desvp	0,48	4.977	433	337	1
	n	21	21	21	21	21		n	8	8	8	8	8
	CV (%)	1,0	43,8	30,4	26,6	32,2		CV (%)	1,2	13,8	36,2	19,0	18,6
	Mínimo	39	15.138	329	1.206	3		MIN.	39	31.112	745	1.396	2
	Máximo	41	53.589	1.272	3.212	9		MÁX.	41	40.779	1.979	2.329	4
9	Média	40	45.044	1.142	1.761	4	19	Média	40	39.632	998	1.489	6
	desvp	0,49	6.860	446	395	1		desvp	0,79	6.758	147	355	2
	n	13	13	13	13	13		n	12	12	12	12	12
	CV (%)	1,2	15,2	39,0	22,4	37,8		CV (%)	2,0	17,1	14,7	23,9	34,0
	Mínimo	39	34.336	496	1.367	2		MIN.	38	32.389	781	1.002	3
	Máximo	41	56.199	2.000	2.693	7		MÁX.	42	50.527	1.280	1.924	10
10	Média	40	41.465	1.531	2.509	4	20	Média	40	52.970	1.259	1.418	4
	desvp	0,41	11.977	611	703	1		desvp	0,25	12.967	362	167	2
	n	46	46	46	46	46		n	6	6	6	6	6
	CV (%)	1,0	28,9	39,9	28,0	34,8		CV (%)	0,6	24,5	28,8	11,8	42,3
	Mínimo	39	19.655	480	1.655	1		MIN.	40	32.389	905	1.202	3
	Máximo	42	70.000	2.913	4.619	7		MÁX.	40	61.163	1.964	1.695	7

Legenda:

Desvp - Desvio Padrão	CV (%) - Coeficiente de variação
n - Número de Estações	MR1 - Módulo de Resiliência do Revestimento
SH - Segmento Homogêneo	MR2 - Módulo de Resiliência do Material Granular
RE - Resumo Estatístico	MR3 - Módulo de Resiliência do Subleito
	ERRO - Erro Médio Absoluto

Tabela 2.12 – Resumo da retroanálise por segmento homogêneo com o
RETROANA – Faixa Esquerda

RESUMO DA RETROANÁLISE - PROGRAMA RETROANA-FAIXA ESQUERDA													
SH	RE	Carga	MR1	MR2	MR3	Erro	SH	RE	Carga	MR1	MR2	MR3	Erro
		(kN)	(kgf/cm ²)			(%)			(kN)	(kgf/cm ²)			(%)
1	Média	40	22.955	1.265	2.676	4	11	Média	40	22.307	528	2.067	4
	desvp	0,72	4.733	866	1.001	2		desvp	0,38	4.671	176	675	1
	n	30	30	30	30	30		n	12	12	12	12	12
	CV (%)	1,8	20,6	68,5	37,4	41,2		CV (%)	1,0	20,9	33,3	32,7	32,9
	Mínimo	39	14.581	508	1.068	2		Mínimo	39	13.822	300	1.182	3
	Máximo	42	33.070	4.078	5.221	7		Máximo	40	29.641	940	3.221	7
2	Média	40	21.758	842	2.241	3	12	Média	40	28.218	686	2.027	5
	desvp	0,64	3.477	339	531	1		desvp	0,48	4.096	267	738	2
	n	8	8	8	8	8		n	16	16	16	16	16
	CV (%)	1,6	16,0	40,3	23,7	38,6		CV (%)	1,2	16,8	51,5	21,6	54,4
	Mínimo	39	16.727	550	1.579	1		MIN.	39	23.229	371	1.187	3
	Máximo	41	26.638	1.552	3.216	5		MAX.	41	33.254	1.372	3.447	10
3	Média	40	30.470	930	2.446	4	13	Média	40	27.064	539	1.799	4
	desvp	0,58	10.519	249	671	1		desvp	0,38	4.418	202	381	2
	n	21	21	21	21	21		n	11	11	11	11	11
	CV (%)	1,5	34,5	26,8	27,5	33,0		CV (%)	1,0	16,3	37,4	21,2	39,5
	Mínimo	39	15.545	427	1.419	2		MIN.	39	23.994	319	1.226	3
	Máximo	41	50.053	1.570	4.326	7		MAX.	41	36.656	966	2.370	8
4	Média	40	24.289	717	2.696	6	14	Média	40	22.194	559	1.837	6
	desvp	0,48	7.682	329	884	2		desvp	1,35	10.639	247	681	6
	n	26	26	26	26	26		n	6	6	6	6	6
	CV (%)	1,2	31,6	45,9	32,8	39,7		CV (%)	3,4	47,9	44,2	37,1	94,6
	Mínimo	39	14.957	400	1.482	2		MIN.	37	10.000	300	1.035	2
	Máximo	41	41.481	2.053	5.136	11		MAX.	41	41.327	961	3.056	17
5	Média	40	33.261	721	1.718	4	15	Média	40	29.498	809	1.769	4
	desvp	0,45	7.484	195	235	2		desvp	0,57	8.997	469	305	2
	n	6	6	6	6	6		n	9	9	9	9	9
	CV (%)	1,1	22,5	27,0	13,7	50,0		CV (%)	1,4	30,5	57,9	17,3	44,2
	Mínimo	39	18.818	495	1.414	2		MIN.	39	19.545	348	1.499	1
	Máximo	41	38.346	1.046	2.136	7		MAX.	41	48.310	1.858	2.498	7
6	Média	40	30.083	600	1.816	5	16	Média	40	24.918	575	2.056	6
	desvp	0,71	11.609	216	715	2		desvp	0,50	8.074	280	640	3
	n	31	31	31	31	31		n	21	21	21	21	21
	CV (%)	1,8	38,6	36,0	39,4	38,4		CV (%)	1,2	32,4	48,7	31,1	60,8
	Mínimo	38	14.206	300	1.028	2		MIN.	39	12.000	300	1.211	2
	Máximo	41	70.000	1.187	3.864	10		MAX.	41	41.868	1.582	3.914	14
7	Média	39	25.142	719	2.094	5	17	Média	40	35.390	911	1.710	5
	desvp	0,65	7.410	376	607	2		desvp	0,90	9.711	453	225	1
	n	18	18	18	18	18		n	11	11	11	11	11
	CV (%)	1,6	29,5	52,2	29,0	34,7		CV (%)	2,3	27,4	49,8	13,2	26,0
	Mínimo	38	17.602	158	1.182	2		MIN.	38	19.425	364	1.331	3
	Máximo	40	45.906	1.537	3.212	9		MAX.	42	46.145	2.000	2.139	7
8	Média	40	24.406	693	2.086	5	18	Média	40	24.350	793	1.610	5
	desvp	0,63	10.253	306	660	2		desvp	1,12	4.203	265	696	1
	n	21	21	21	21	21		n	8	8	8	8	8
	CV (%)	1,6	42,0	44,1	31,6	29,0		CV (%)	2,8	17,3	33,4	43,3	24,0
	Mínimo	39	10.144	360	1.248	3		MIN.	39	14.813	579	886	3
	Máximo	41	47.401	1.679	3.563	8		MAX.	43	29.729	1.361	3.155	7
9	Média	40	23.579	1.413	2.573	5	19	Média	40	22.445	533	1.507	6
	desvp	0,82	5.884	583	942	3		desvp	0,85	4.759	252	452	3
	n	13	13	13	13	13		n	12	12	12	12	12
	CV (%)	2,1	25,0	41,3	36,6	51,4		CV (%)	2,1	21,2	47,2	30,0	54,5
	Mínimo	38	14.311	633	1.472	2		MIN.	38	17.351	300	823	3
	Máximo	41	38.035	2.607	4.268	12		MAX.	41	30.788	1.052	2.168	13
10	Média	40	28.281	1.033	2.337	5	20	Média	39	38.489	786	1.147	4
	desvp	0,67	7.159	519	506	2		desvp	0,50	8.749	318	209	1
	n	44	44	44	44	44		n	7	7	7	7	7
	CV (%)	1,7	25,3	50,3	21,6	37,1		CV (%)	1,3	22,7	40,4	18,2	17,0
	Mínimo	38	13.273	374	1.497	2		MIN.	39	25.733	360	860	3
	Máximo	41	45.514	2.461	3.558	10		MAX.	40	46.364	1.330	1.444	5

Legenda:

- Desvp - Desvio Padrão
- n - Número de Estações
- SH - Segmento Homogêneo
- RE - Resumo Estatístico
- CV (%) - Coeficiente de variação
- MR1 - Módulo de Resiliência do Revestimento
- MR2 - Módulo de Resiliência do Material Granular
- MR3 - Módulo de Resiliência do Subleito
- ERRO - Erro Médio Absoluto

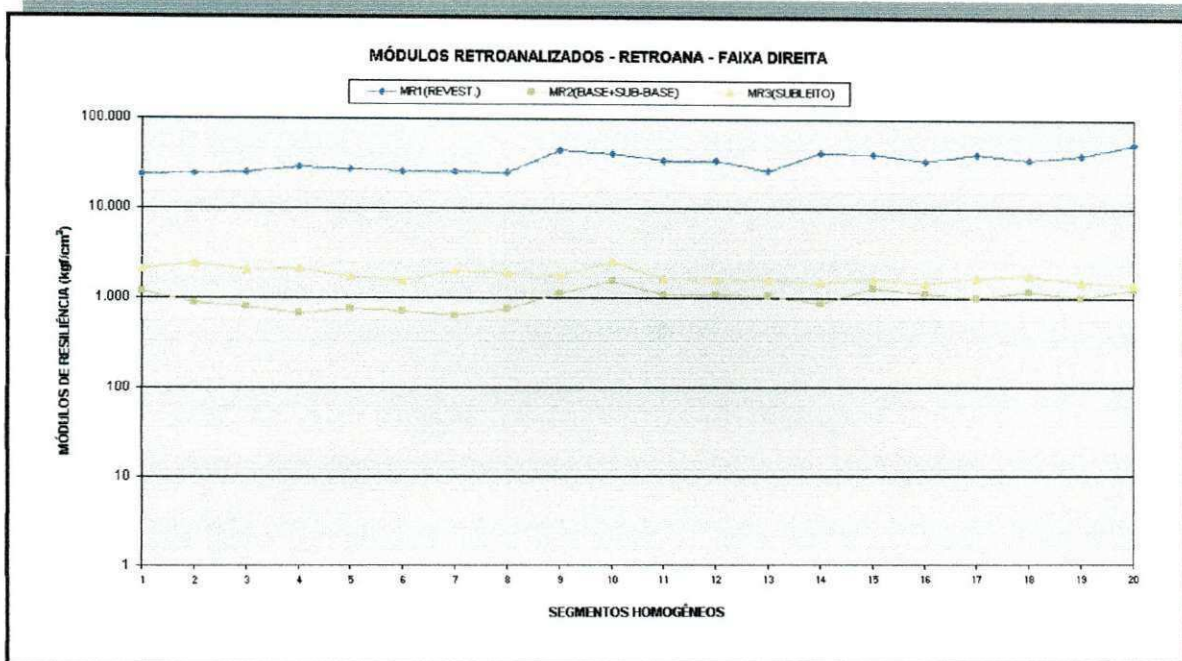


Figura 2.12 – Módulos médios de resiliência das camadas de revestimento, base+sub-base e subleito por segmento homogêneo – Faixa Direita

A variação dos módulos retroanalizados das camadas do pavimento ao longo do trecho é função da forma e magnitude das bacias de deflexões, as quais são reações do pavimento a uma série de provas de carga reais “in situ” com um carregamento padronizado. Essas reações dependem fundamentalmente de diversos fatores como as espessuras das camadas, as condições de compactação, o teor de umidade, a natureza dos materiais etc, (ALBERNAZ, 1997).

Tabela 2.13 – Faixa aceitável de coeficiente de variação utilizada em projeto de pavimentos novos ou de reforço (LTPP, 2002)

CAMADA	PARA UM GRAU DE 95% DE CONFIANÇA			COEFICIENTES DE VARIAÇÃO RECOMENDADOS		
	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO
Concreto Asfáltico	39,4	38,5	40,3	39	14	72
Base Granular	49,7	48,7	50,7	50	17	92
Sub-base Granular	73,8	70,4	77,1	74	16	150
Subleito	35,3	34,2	36,4	35	6	92
Base tratada*	68,5	66,3	70,7	68	24	116
Sub-base tratada*	90,7	85,7	95,7	91	30	158

* Não é especificado o tipo de tratamento

As correlações obtidas apresentaram baixos coeficientes de determinação o que indicou uma relação “pobre” entre os parâmetros.

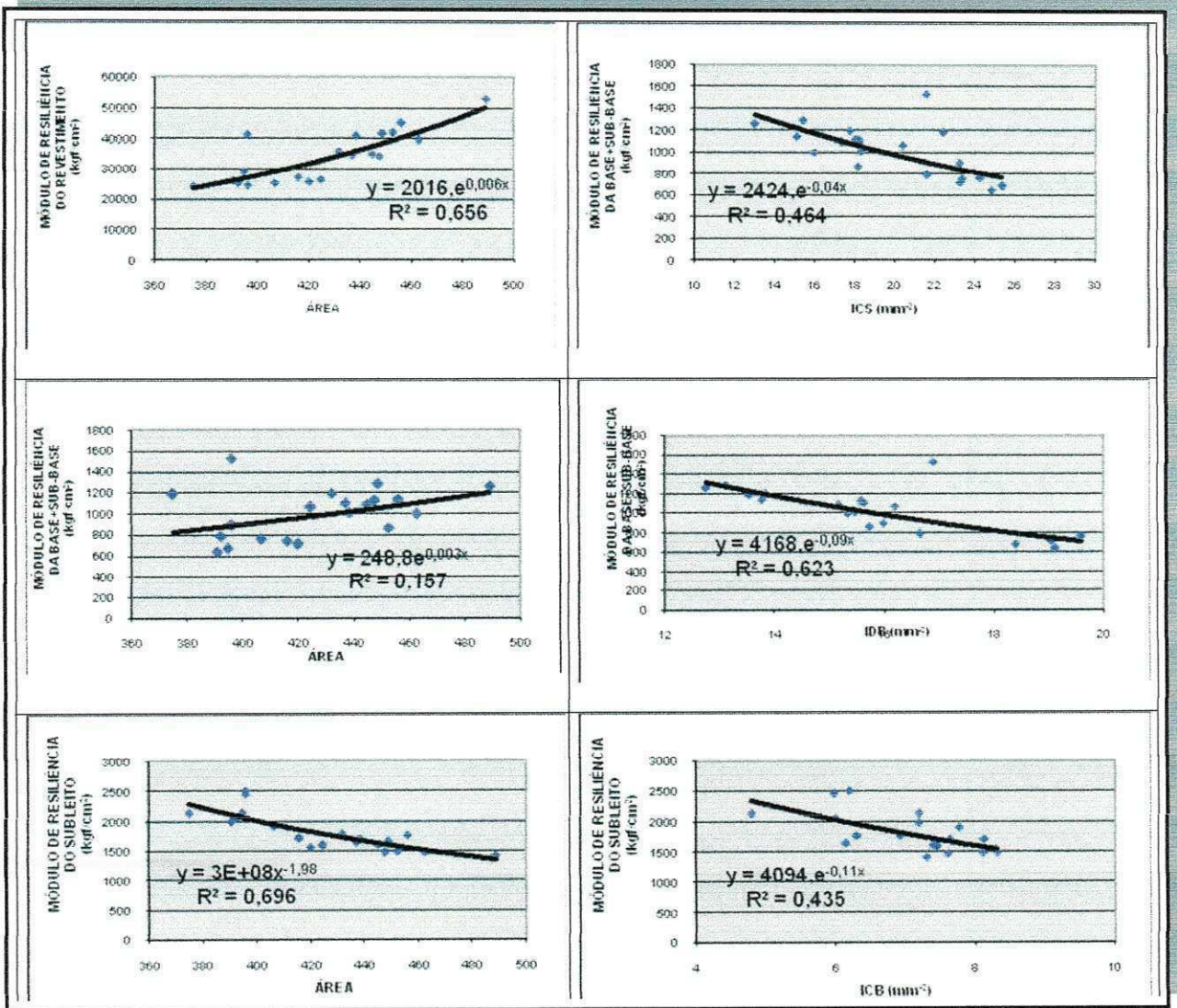


Figura 2.13 – Correlações entre os parâmetros da bacia e os módulos de resiliência retroanalizados – Faixa Direita

$$\begin{aligned}
 \downarrow A &= \frac{150 \times (D_0 + 2 \times D_{30} + 2 \times D_{60} + D_{90})}{D_0} = \frac{(2 \times D_{30} + 2 \times D_{60} + D_{90})}{\uparrow D_0} \\
 \uparrow A &= \frac{150 \times (D_0 + 2 \times D_{30} + 2 \times D_{60} + D_{90})}{D_0} = \frac{(2 \times D_{30} + 2 \times D_{60} + \uparrow D_{90})}{D_0}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

A deflexão máxima (D_0) medida na superfície do pavimento é representativa da contribuição de todas as camadas, como ela é inversamente proporcional a ÁREA, então quanto menor a deflexão, maior a área e maiores os módulos. Já para o subleito a ÁREA é diretamente proporcional a deflexão (D_{90}), que é mais

representativa da contribuição do subleito, logo quanto maior a deflexão, maior a área e menor o módulo do subleito.

Outra análise interessante é a tentativa de buscar o inter-relacionamento dos defeitos de superfície com os valores modulares retroanalizados do revestimento, base+sub-base e subleito.

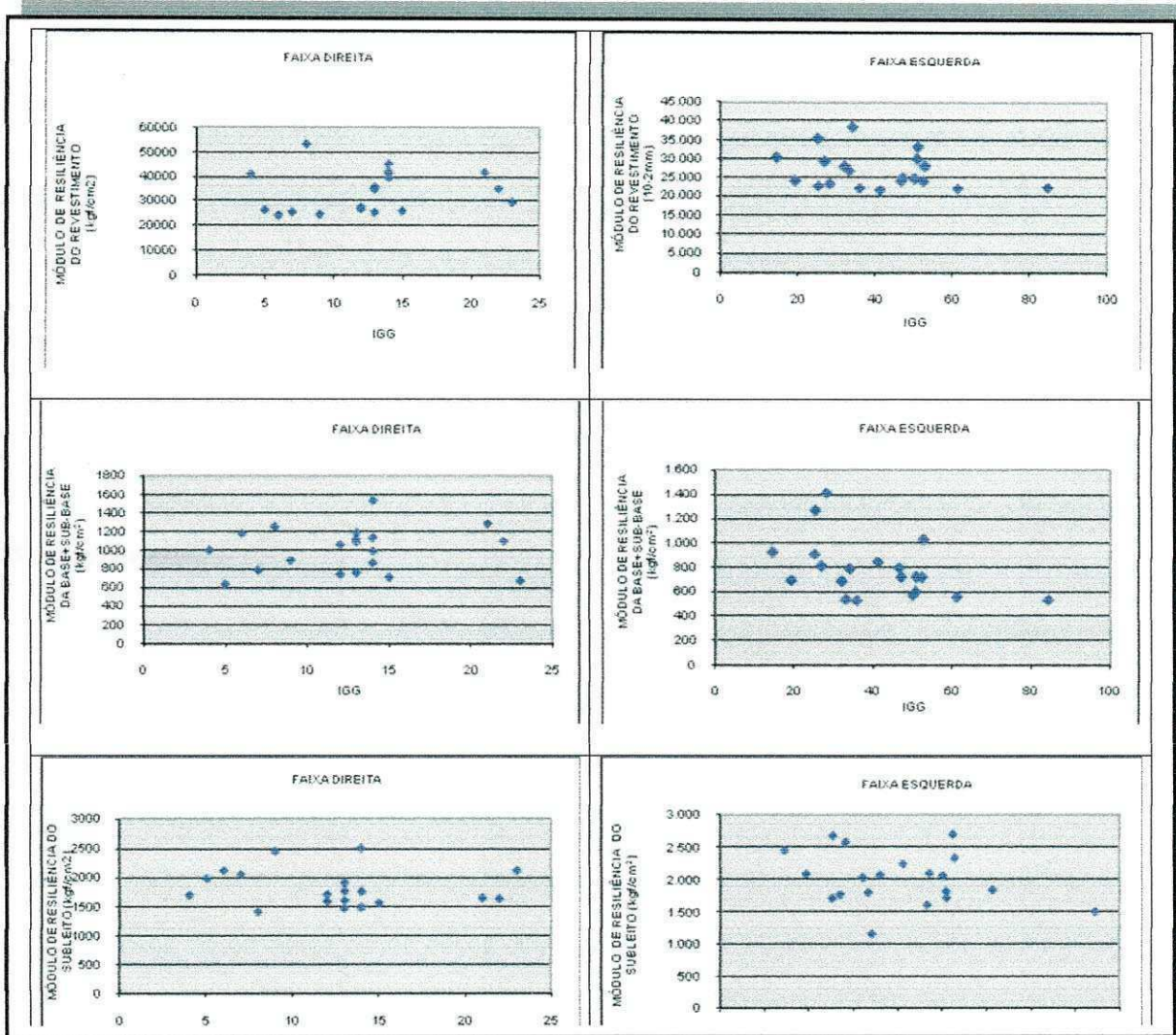


Figura 2.14 – Relação entre o IGG e os módulos retroanalizados

Objetivando verificar as camadas críticas da estrutura, ou seja, a contribuição percentual de cada camada na deflexão total medida na superfície, empregou-se o programa ELSYM5 (Elástica Layered System) simulando o carregamento do FWD com carga de 40kN e raio da área carregada de 15 cm, utilizando-se os módulos médios retroanalizados para todos os segmentos homogêneos.

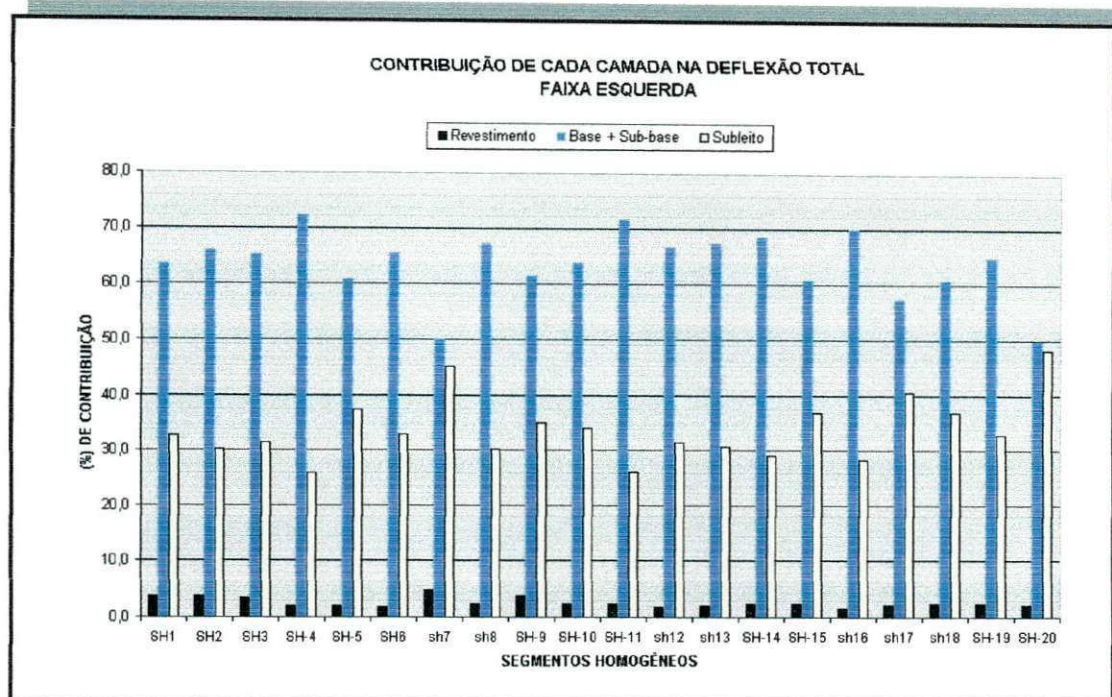


Figura 2.15 – Contribuição percentual das camadas do pavimento e subleito na deflexão total – Faixa Esquerda

Verifica-se nas figuras que a camada de revestimento asfáltico contribui muito pouco na deflexão total, o que pode ser atribuído a maior rigidez desta camada em relação as demais. No entanto, a excessiva resiliência da camada de base+sub-base somada ao subleito contribui com mais de 96% na referida deflexão.

O subleito da faixa esquerda apresenta apenas três segmentos homogêneos contribuindo com mais de 40% na deflexão total. Isto indica um melhor desempenho desta faixa em relação à faixa direita que contempla doze segmentos contribuindo com mais de 40% na deflexão máxima.

2.4.2 – Análise pelos Programas EVERCAL5 e ELMOD4

Neste item será abordada a retroanálise dos módulos de resiliência considerando a estrutura da figura 2.17 utilizando os programas EVERCAL5 e ELMOD4. A consideração de uma estrutura composta de quatro camadas permite avaliar os módulos de resiliência da base e sub-base separadamente.

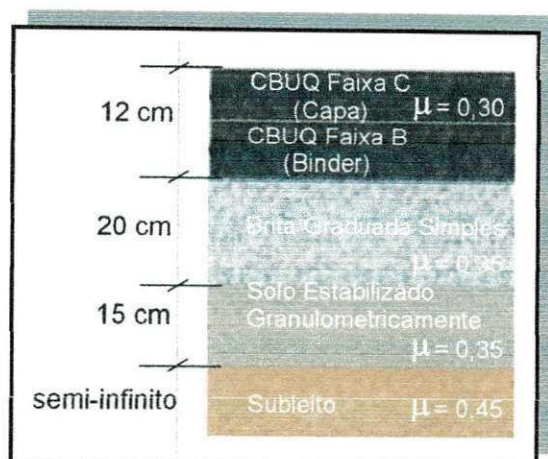


Figura 2.16 – Estrutura considerada na retroanálise com os programas EVERCAL5 e ELMOD4

Tabela 2.14 – Faixa de módulos de resiliência – EVERCAL5

CAMADA	MR (kgf/cm ²)		
	MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO
Revestimento	10.000	25.000	70.000
Base	100	500	5.000
Sub-base	100	500	5.000
Subleito	100	500	5.000

Os módulos de resiliência retroanalizados são representativos das condições “in situ” dos materiais no momento do ensaio. Nos pavimentos flexíveis, a temperatura afeta a rigidez dos revestimentos asfálticos, variando a distribuição de cargas oriundas do tráfego para as camadas subjacentes, desta forma, os módulos do revestimento asfáltico devem ser convertidos para uma temperatura de referência de 25°C. A princípio não foi considerada correção de temperatura, pois o modelo embutido no programa EVERCAL5 só se aplica a temperaturas de até 40 °C (104 °F). Como os sensores de temperatura do FWD registraram em algumas estações temperatura da ordem de 50 °C (122 °F), utilizou-se outra metodologia para realizar tal correção.

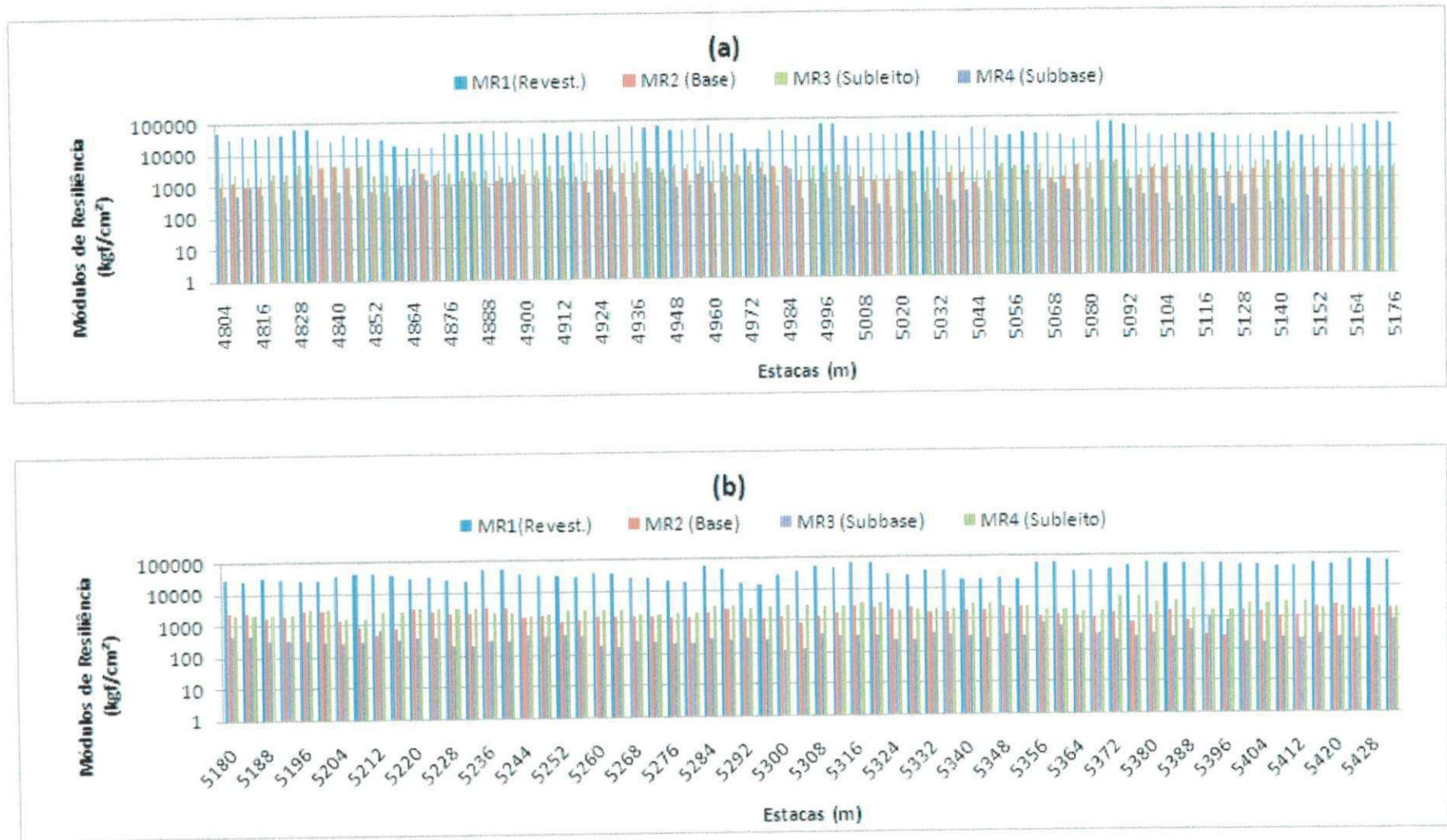


Figura 2.17 – Módulos de resiliência obtidos a partir do programa EVERCALC5 – Faixa Direita (estaca 4804 a 5432)

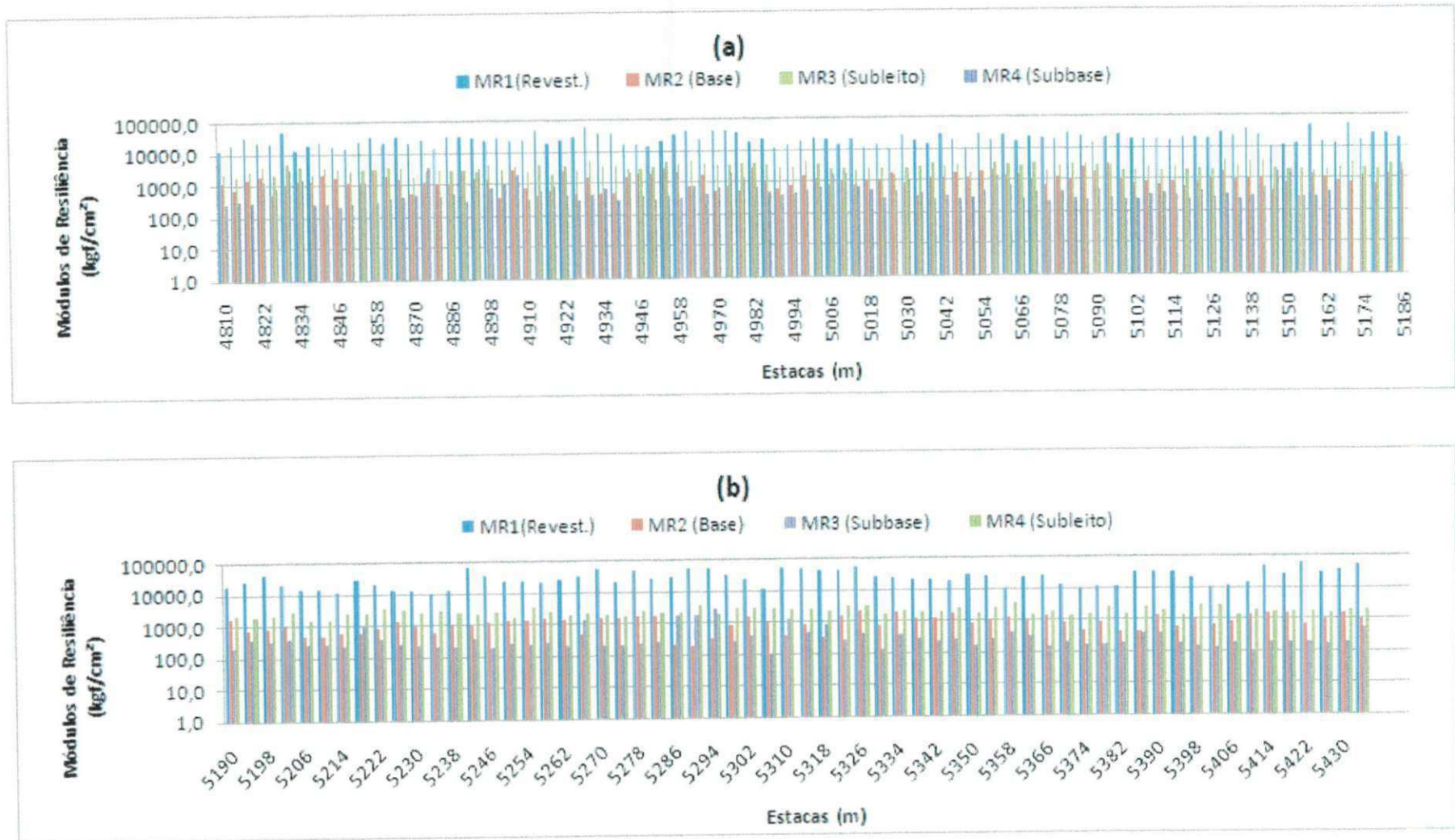


Figura 2.18 – Módulos de resiliência obtidos a partir do programa EVERCALC5 – Faixa Esquerda (estaca 4806 a 5434)

A camada de base constituída de brita graduada simples apresentou para a faixa direita 74,2% dos módulos menores ou iguais a 2.000 kgf/cm². Já a faixa esquerda, apresentou 90,6% dos módulos menores ou iguais a 2.000 kgf/cm². Os baixos valores modulares encontrados para a camada de BGS podem ser atribuídos segundo CARDOSO (1995) as seguintes hipóteses:

- para determinadas condições, os módulos da BGS realmente podem ser baixos;
- dependendo da configuração do carregamento e de sua estrutura, a camada de base pode estar submetida a esforços de tração, sendo que estes materiais não trabalham a tração, o que promove a ocorrência de rupturas localizadas e que, portanto, alteram os valores modulares, diminuindo o seu valor;
- as camadas de base e sub-base se encontram com elevado grau de deformabilidade elástica;
- a deficiência desta camada é fruto de teores de umidade excessivos ou baixo grau de compactação.

Em geral, para a camada de sub-base, os valores modulares retroanalizados foram menores do que os da base. Isto se deve, em parte, ao decréscimo das tensões de confinamento com a profundidade que acarretam conseqüentemente menores valores nominais de módulo, e também, ao próprio processo de retroanálise para quatro camadas, onde o ajuste entre a bacia medida e calculada na maioria dos programas, começam pelo módulo do subleito, já que o mesmo no processo não sofre influência das outras camadas. Em seguida, o programa busca os módulos do revestimento, base e por fim sub-base, onde os módulos da mesma são obtidos com pouca precisão tendo em vista os altos valores de coeficientes de variação permitidos pelo LTPP (2002).

Já os elevados valores modulares do subleito indicam o motivo da pequena incidência de defeitos do tipo afundamento em trilha de roda e ondulações em

ambas as faixas de tráfego. Os módulos retroanalizados tiveram 50,2% em torno de 3.000 kgf/cm² e 25,2% em torno de 4.000 kgf/cm² para a faixa direita. A faixa esquerda apresentou 45,6% dos valores modulares em torno de 3.000 kgf/cm² e 30,2% em torno de 4.000 kgf/cm². E ainda, 12,0% e 10,3% dos módulos em torno de 5.000 kgf/cm², para as faixas direita e esquerda, respectivamente.

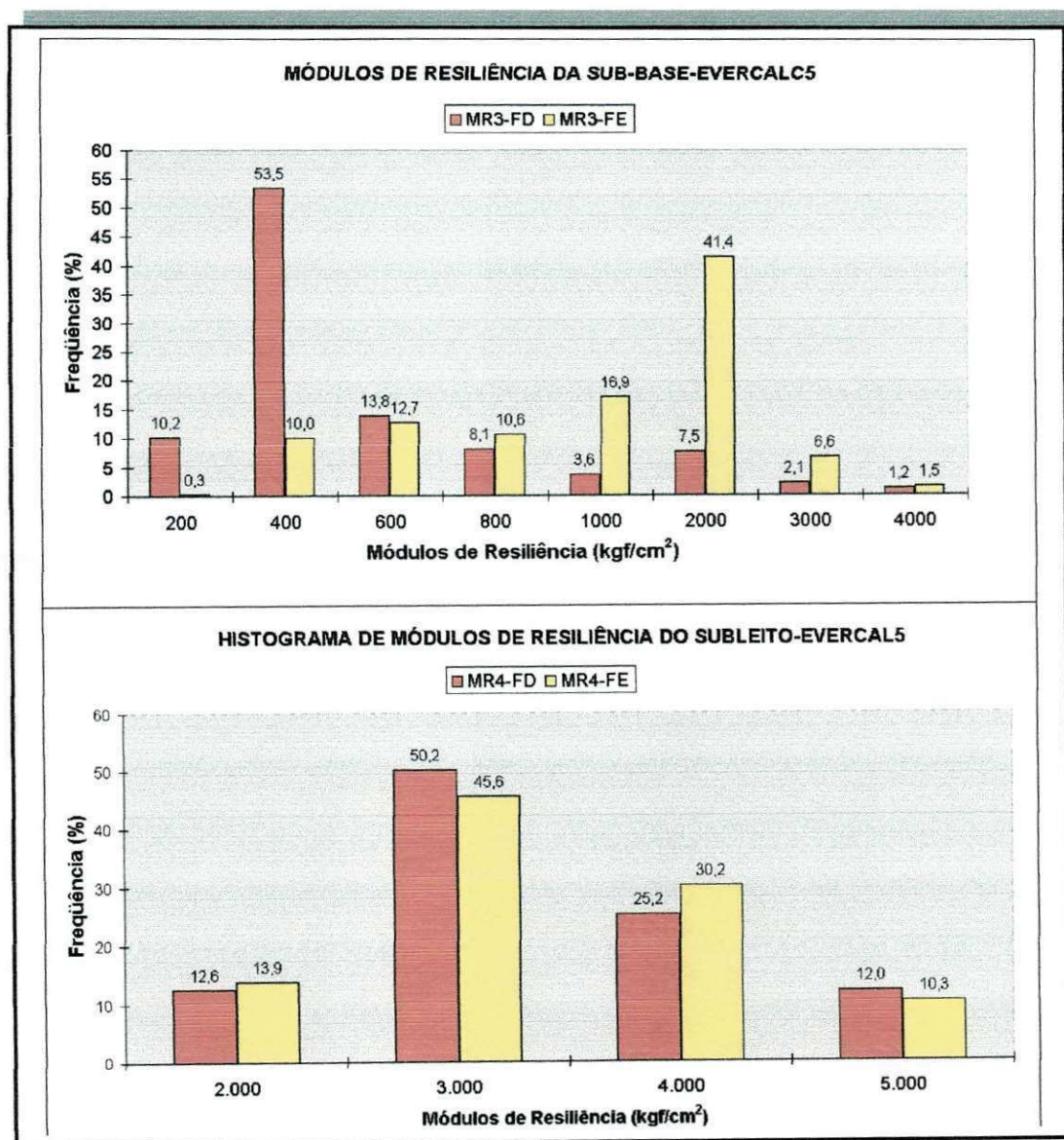


Figura 2.19 – Histogramas dos módulos de resiliência das camadas de base e subleito para ambas as faixas de tráfego

Tabela 2.15 – Resumo da retroanálise por segmento homogêneo com o EVERCALC5 – Faixa Direita

RESUMO DA RETROANÁLISE - PROGRAMA EVERCALC5 - FAIXA DIREITA															
SH	RE	Carga	MR1	MR2	MR3	MR4	RMS	SH	RE	Carga	MR1	MR2	MR3	MR4	RMS
		(N)	(kgf/cm ²)				(%)			(N)	(kgf/cm ²)				(%)
1	Média	40	16.796	1.213	1.088	3.188	4	11	Média	40	38.483	1.395	485	2.607	2
	desvp	0,50	3.246	779	793	959	3		desvp	0,51	15.068	615	416	649	0
	n	30	30	30	30	30	30		n	12	12	12	12	12	12
	CV	1,2	19,3	64,2	72,9	30,1	76,6		CV	1,3	39,2	44,1	85,7	24,9	14,8
	Minimo	39	15.000	441	344	1.997	1		Minimo	39	27.475	412	190	1.576	2
	Máximo	41	28.146	4.006	3.503	5.000	18		Máximo	41	70.000	2.351	1.710	3.328	3
2	Média	40	16.364	871	1.183	2.397	3	12	Média	40	37.680	1.916	267	2.860	2
	desvp	0,30	2.063	451	905	372	1		desvp	0,19	16.117	847	84	624	1
	n	8	8	8	8	8	8		n	16	16	16	16	16	
	CV	0,8	12,6	51,7	76,5	15,5	37,0		CV	0,5	42,8	44,2	31,7	21,8	25,3
	Minimo	40	15.000	392	350	2.092	2		MIN.	40	19.893	852	161	1.891	1
	Máximo	41	20.170	1.671	2.810	3.009	4		MAX.	40	70.000	3.643	415	4.052	3
3	Média	40	22.403	1.024	847	2.687	3	13	Média	40	25.222	1.989	247	2.796	2
	desvp	0,43	7.766	670	904	751	1		desvp	0,33	2.870	269	46	532	0
	n	22	22	22	22	22	22		n	11	11	11	11	11	
	CV	1,1	34,7	65,4	106,7	27,9	35,8		CV	0,8	11,4	13,5	18,7	19,0	19,0
	Minimo	39	10.632	359	133	1.342	2		MIN.	40	20.698	1.648	205	2.036	1
	Máximo	41	37.631	3.505	3.392	3.917	6		MAX.	41	28.952	2.445	335	3.651	2
4	Média	40	24.191	1.451	318	3.331	3	14	Média	40	33.949	1.995	216	2.453	2
	desvp	0,38	9.275	476	158	787	1		desvp	0,27	11.311	113	40	353	0
	n	26	26	26	26	26	26		n	6	6	6	6	6	
	CV	1,0	38,3	32,8	49,6	23,6	45,0		CV	0,7	33,3	5,7	18,4	14,4	6,1
	Minimo	39	10.000	576	110	1.906	2		MIN.	40	20.497	1.785	178	2.173	2
	Máximo	40	44.221	2.554	792	5.000	7		MAX.	40	48.891	2.084	270	3.108	2
5	Média	40	21.952	1.552	298	2.565	2	15	Média	40	37.624	2.213	365	2.469	2
	desvp	0,75	2.699	295	82	507	0		desvp	0,36	13.138	483	80	403	0
	n	6	6	6	6	6	6		n	9	9	9	9	9	
	CV	1,9	12,3	19,0	27,4	19,8	8,5		CV	0,9	34,9	21,8	21,9	16,3	9,3
	Minimo	39	18.493	1.210	234	1.902	2		MIN.	39	25.688	1.491	244	2.124	1
	Máximo	41	25.692	2.082	416	3.376	2		MAX.	40	62.835	2.866	469	3.226	2
6	Média	40	22.481	1.485	262	2.657	2	16	Média	40	35.865	1.788	313	2.350	2
	desvp	0,38	6.316	472	72	982	0		desvp	0,41	10.815	806	120	525	0
	n	31	31	31	31	31	31		n	21	21	21	21	21	
	CV	1,0	28,1	31,8	27,7	36,9	20,3		CV	1,0	30,2	45,1	38,3	22,3	17,4
	Minimo	39	10.931	915	141	1.548	2		MIN.	39	19.586	467	168	1.598	1
	Máximo	41	35.278	2.875	409	4.935	3		MAX.	41	59.239	3.378	708	3.148	2
7	Média	40	18.461	1.697	278	3.099	2	17	Média	39,94	40.215	1.862	264	2.910	2
	desvp	0,42	5.303	530	67	714	0		desvp	0,69	18.856	640	83	549	0
	n	18	18	18	18	18	18		n	11	11	11	11	11	
	CV	1,1	28,7	31,2	24,0	23,1	21,4		CV	1,7	46,9	34,4	31,4	18,9	17,6
	Minimo	39	11.157	882	204	1.883	2		MIN.	39	14.717	915	118	2.019	2
	Máximo	40	30.509	2.768	441	4.100	4		MAX.	41	68.676	2.790	368	3.647	2
8	Média	40	22.027	1.373	518	2.724	3	18	Média	40	35.097	1.937	420	2.487	2
	desvp	0,70	13.716	618	488	970	1		desvp	0,48	19.140	486	189	550	0
	n	21	21	21	21	21	21		n	8	8	8	8	8	
	CV	1,7	62,3	45,0	94,2	35,6	23,6		CV	1,2	54,5	25,1	44,9	22,1	19,9
	Minimo	38	10.000	452	166	1.605	1		MIN.	39	18.256	1.225	274	1.946	1
	Máximo	41	49.053	3.068	2.387	5.000	4		MAX.	41	65.719	2.647	791	3.379	2
9	Média	40	53.212	1.005	1.003	2.592	2	19	Média	40	48.860	1.128	397	2.878	2
	desvp	0,49	12.388	576	1.080	852	1		desvp	0,80	8.535	496	292	1.208	0
	n	13	13	13	13	13	13		n	12	12	12	12	12	
	CV	1,2	23,3	57,3	107,6	32,9	36,1		CV	2,0	17,5	44,0	73,6	42,0	24,1
	Minimo	39	36.414	299	274	1.665	1		MIN.	38	34.527	272	164	1.683	1
	Máximo	41	68.649	1.911	3.800	5.000	4		MAX.	42	60.637	1.753	1.097	5.000	3
10	Média	40	42.805	2.123	763	3.570	3	20	Média	40	58.143	1.964	334	2.289	1
	desvp	0,40	15.566	1.008	580	1.006	2		desvp	0,25	11.225	501	251	494	0
	n	46	46	46	46	46	46		n	6	6	6	6	6	
	CV	1,0	36,4	47,5	76,1	28,2	79,1		CV	0,6	19,3	25,5	75,3	21,6	18,4
	Minimo	39	11.652	707	252	2.042	1		MIN.	40	42.791	1.135	208	1.969	1
	Máximo	42	70.000	4.585	2.541	5.000	12		MAX.	40	70.000	2.669	843	3.263	2

Legenda:

Desvp - Desvio Padrão
n - Número de Estações
SH - Segmento Homogêneo
RE - Resumo Estatístico

MR1 - Módulo de Resiliência do Revestimento
MR2 - Módulo de Resiliência do Material Granular
MR3 - Módulo de Resiliência do Subleito
RMS - Raiz Média Quadrática

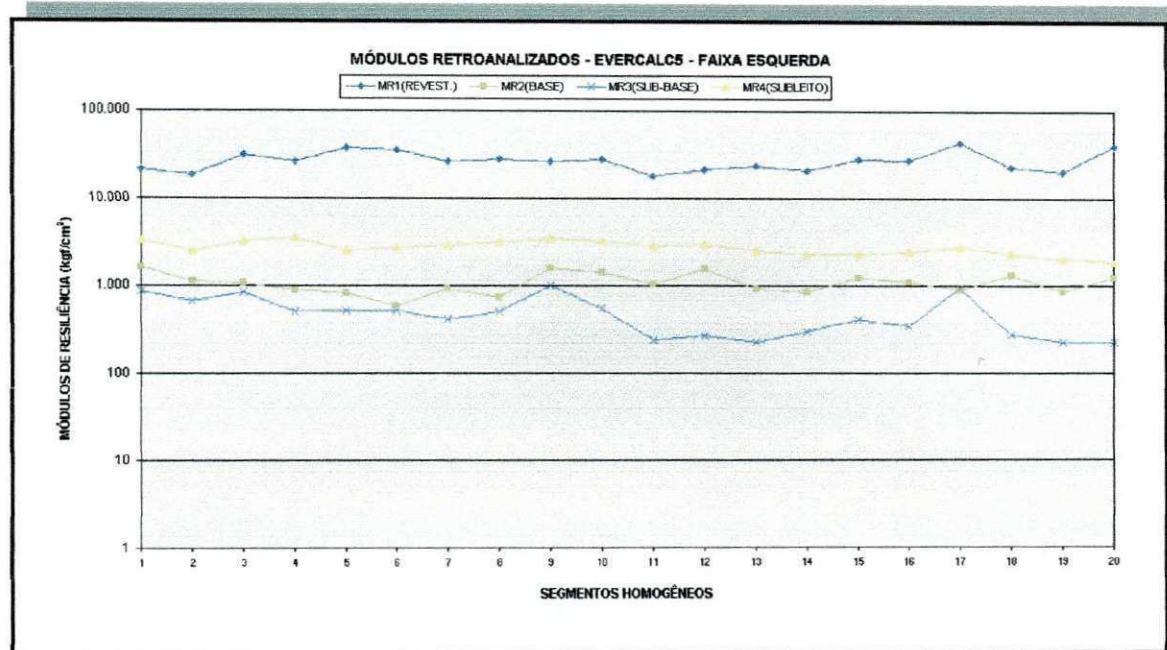


Figura 2.20 – Módulos de resiliência médios das camadas de revestimento, base, sub-base e subleito por segmento homogêneo – Faixa Esquerda

Verifica-se que as camadas de base e sub-base são as camadas críticas da estrutura, ambas contribuem em média com 69% e 71% na deflexão total, para as faixas direita e esquerda, respectivamente. O subleito contribui em média 28% para a faixa direita e 26% para a faixa esquerda. Já a contribuição do revestimento é praticamente insignificante sendo menor ou igual a 5% para ambas as faixas.

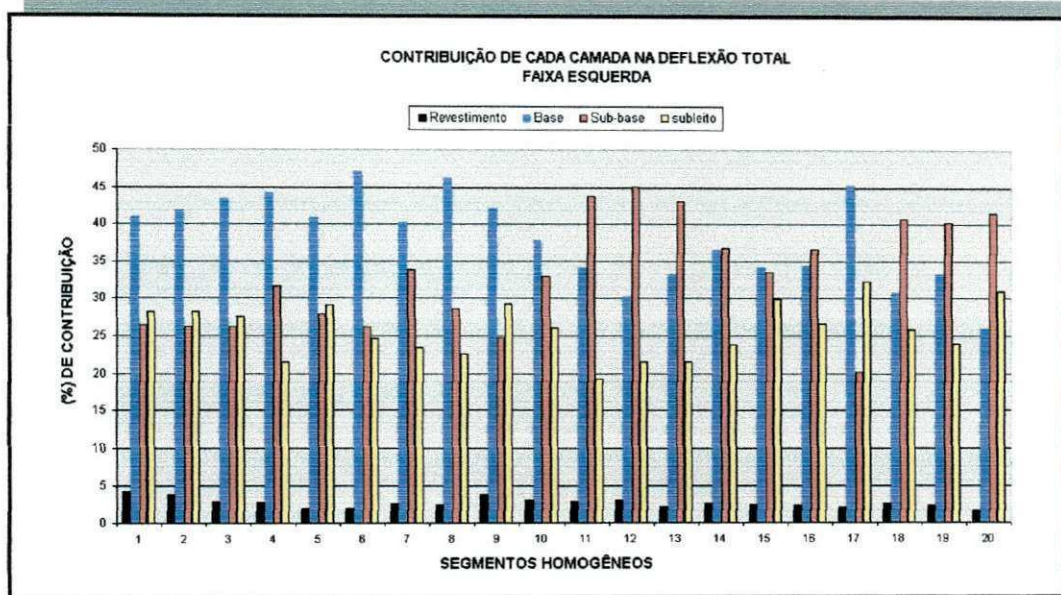


Figura 2.21 – Histogramas dos módulos de resiliência para ambas as faixas de Tráfego

Apresenta-se o histograma dos módulos de resiliência obtidos com o Elmod4. O revestimento para faixa direita apresentou 74,5% de módulos menores ou iguais a 30.000 kgf/cm² e 25,5% maiores. Já a faixa esquerda, teve 83,7% dos módulos menores ou iguais a 30.000 kgf/cm² e maiores apenas 16,3%.

A sub-base por sua vez, apresentou 93% dos módulos no intervalo 200 kgf/cm² e 2.000 kgf/cm² para a faixa direita e 93,4% para a faixa esquerda.

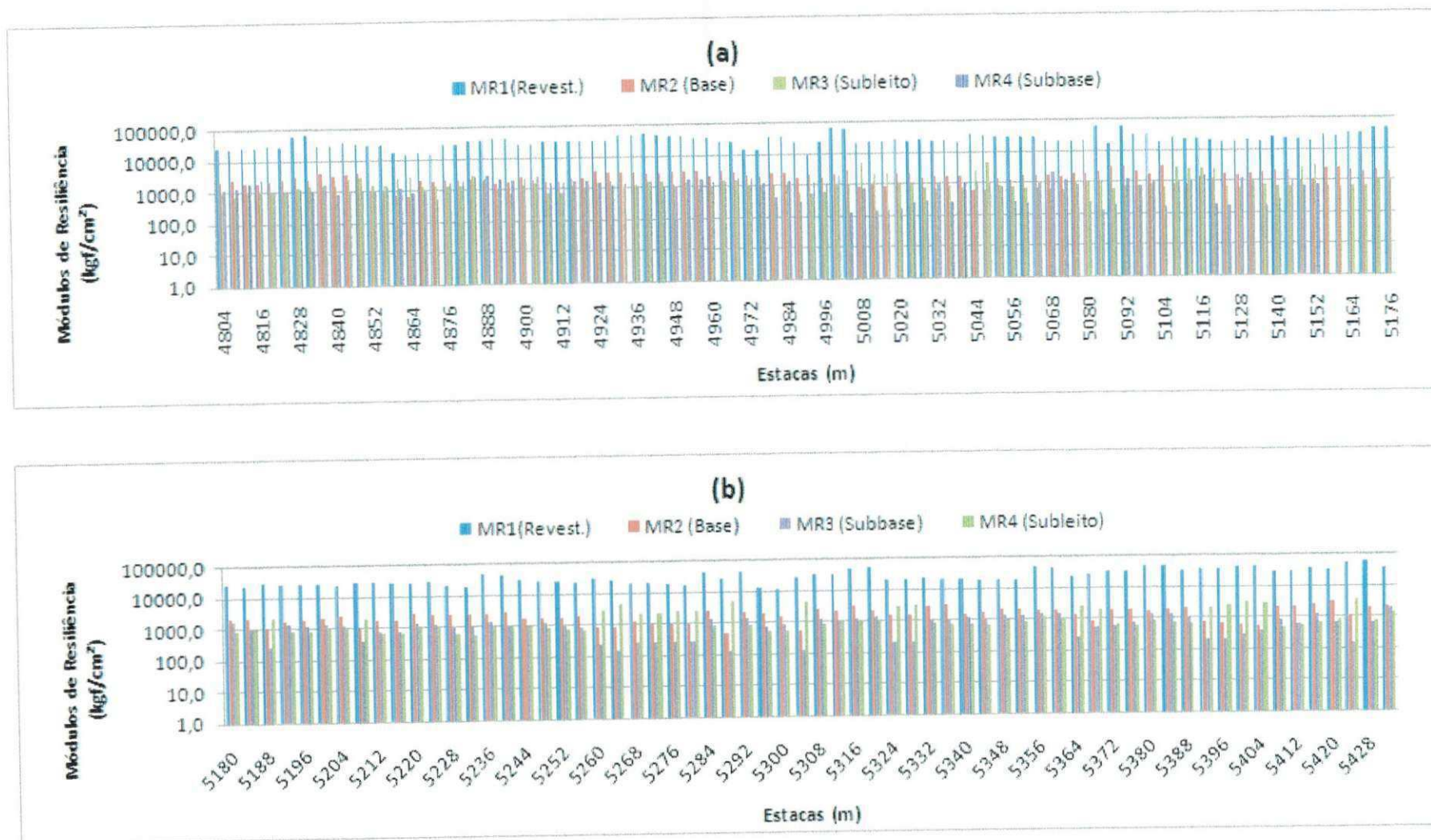


Figura 2.22 – Módulos de resiliência obtidos a partir do programa ELMOD4 – Faixa Direita (estaca 4804 a 5432)

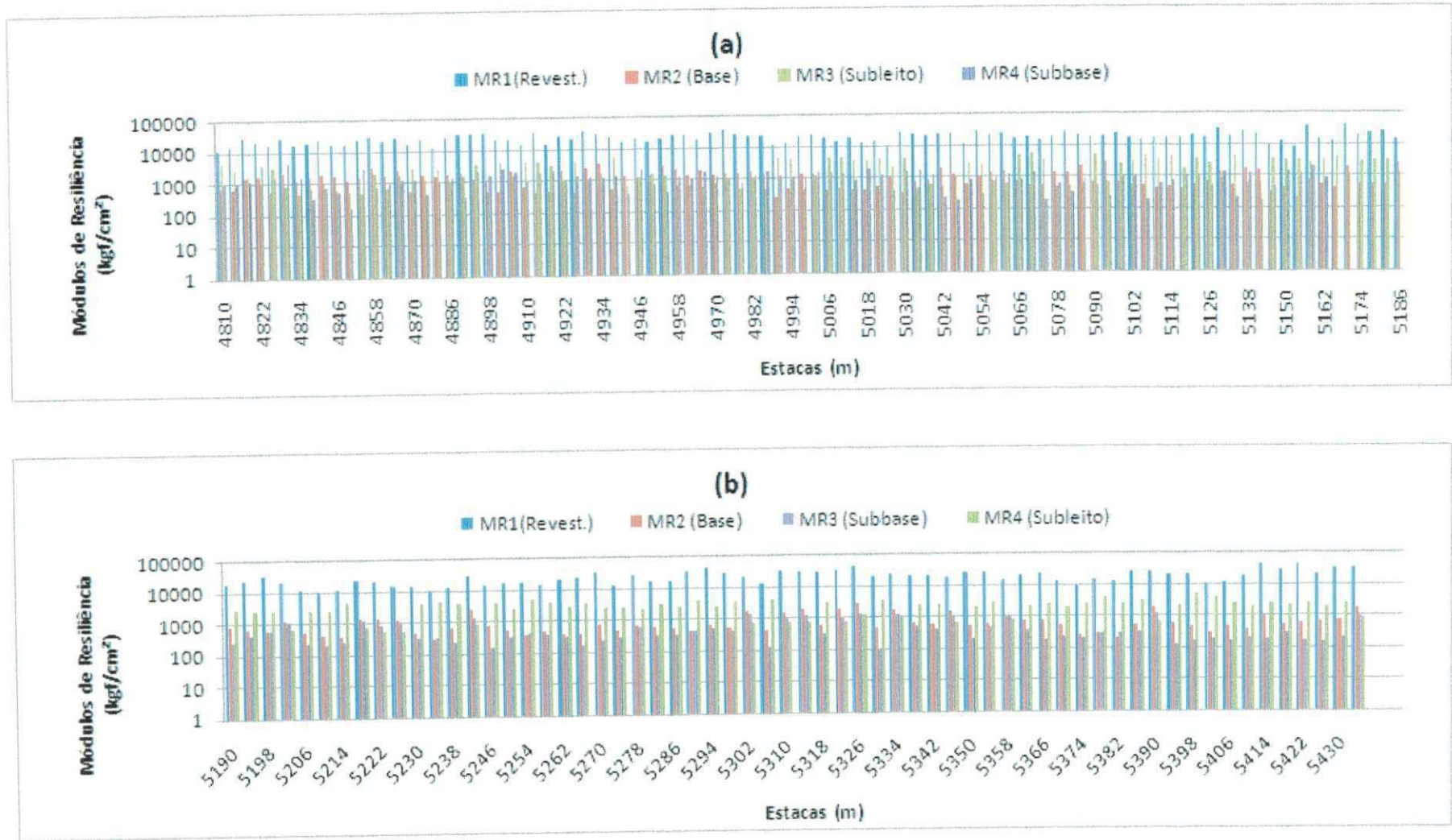


Figura 2.23 – Módulos de resiliência obtidos a partir do programa ELMOD4 – Faixa Esquerda (estaca 4806 a 5434)

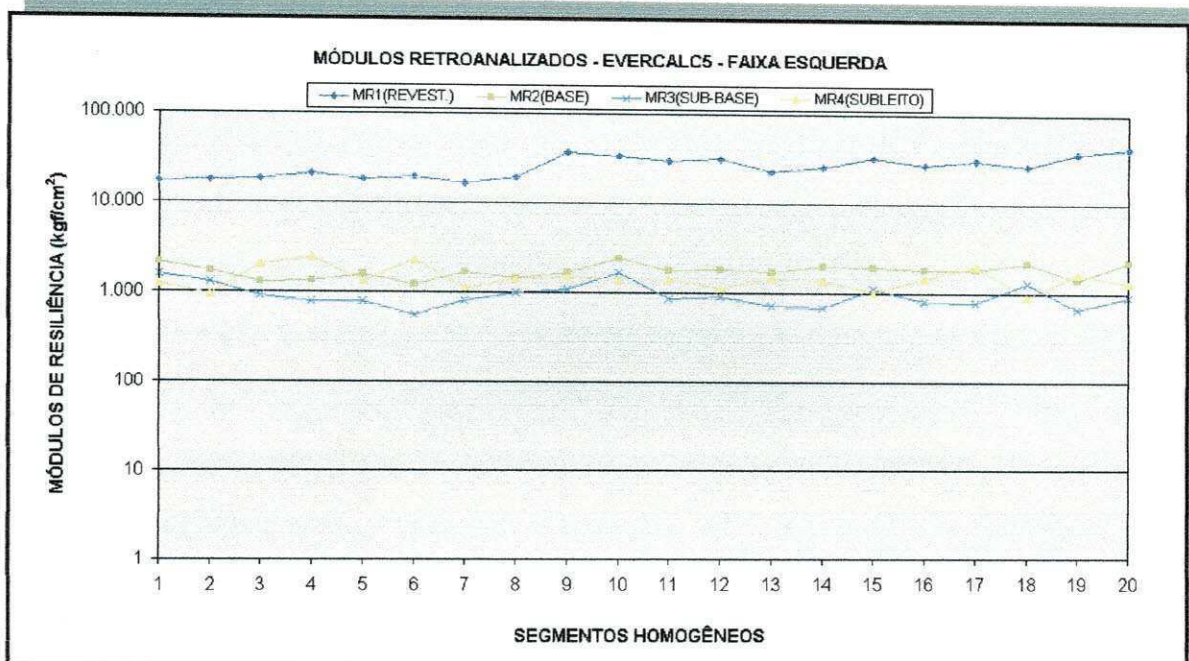


Figura 2.24 – Módulos médios de resiliência das camadas de revestimento, base, sub-base e subleito por segmento homogêneo – Faixa Esquerda

2.4.3 – Análise Comparativa entre os Diferentes Programas Utilizados

Como já exposto, nesta pesquisa foram utilizados os programas RETROANA, EVERCAL5 e ELMOD4, os resultados obtidos em cada um são decorrentes ao tipo de metodologia adotada pelos mesmos, não cabendo nesta pesquisa compará-los e discuti-los em profundidade. No entanto, é válida a comparação dos módulos retroanalizados do subleito pelo fato dos mesmos poderem ser obtidos sem terem a influência das outras camadas no processo de retroanálise, quando se usa, por exemplo, a equação proposta pela AASHTO (1993) ver equação 3.2. Para este comparativo considerou-se os seguintes parâmetros:

- a média da carga aplicada em cada segmento homogêneo;
- foi considerado o fator de correção de carga igual a 0,2792 para subleito com coeficiente de Poisson de 0,45;
- a distância considerada foi de 150cm;

- a deflexão medida pelo geofone mais afastado do ponto de aplicação da carga, que era de 150cm.

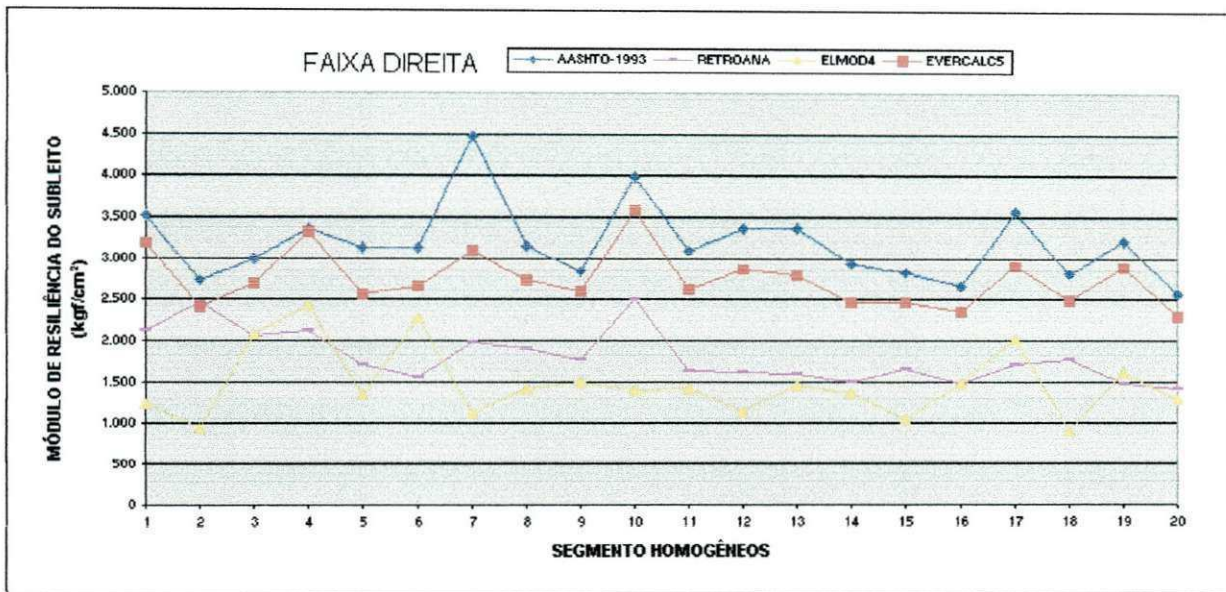


Figura 2.25 – Comparativo entre os módulos do subleito obtidos pelos diferentes programas com o modelo da AASHTO (1993)

A fim de comparar o ajuste entre a bacia medida e a calculada pelos diferentes programas foram escolhidas bacias médias aleatoriamente e com o ELSYM5 foram recalculadas as bacias teóricas simulando a configuração de carregamento do FWD utilizando os módulos de resiliência obtidos com cada um dos programas.

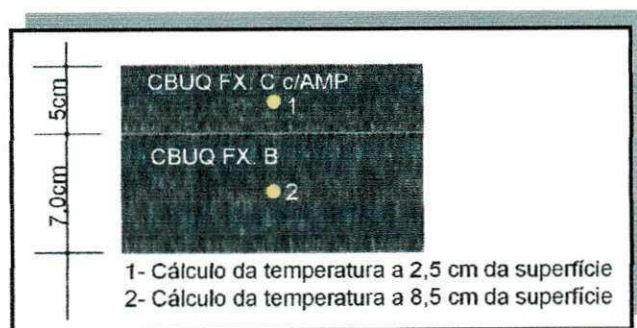


Figura 2.26 – Profundidades para correção da Temperatura

A correção foi feita tomando-se a média da temperatura de referência no centro das camadas de rolamento (capa) e ligação (binder) de acordo com a equação

experimental que relaciona a temperatura pontual com a profundidade do revestimento proposta por RODRIGUES (1991).

$$T(x) = T_{sup} + (T_{sup} - T_{ar}) \cdot [1 - \exp(0,06855 - 0,002633 \cdot x) \cdot x]$$

Sendo:

T(x) – Temperatura na profundidade x do revestimento, em °C;

T_{sup} – Temperatura da superfície do revestimento, em °C;

T_{ar} – Temperatura do ar, em °C;

x – Profundidade no revestimento onde se deseja conhecer a temperatura, em cm.

Portanto, os módulos corrigidos médios por segmento homogêneo estão apresentados na tabela 2.19, onde se pode observar que os módulos médios corrigidos pelo EVERCALC5 resultaram em valores modulares maiores do que o obtido pelos outros programas. Isto pode ser atribuído, ao fato do mesmo ter obtido módulos maiores para o subleito, o qual serve de múltiplo nas equações de regressão para a determinar o módulo do revestimento.

Tabela 2.19 – Módulos médio corrigidos por segmento homogêneo

SH	FAIXA DIREITA			FAIXA ESQUERDA		
	CAPA (kgf/cm ²)	BINDER (kgf/cm ²)	MEDIA (kgf/cm ²)	CAPA (kgf/cm ²)	BINDER (kgf/cm ²)	MEDIA (kgf/cm ²)
1	24.902	22.563	23.732	68.064	57.255	62.660
2	24.260	21.981	23.121	61.716	50.066	55.891
3	53.696	48.570	51.133	86.901	75.309	81.105
4	71.504	63.502	67.503	62.502	55.311	58.907
5	65.999	59.090	62.544	75.654	68.448	72.051
6	66.583	59.324	62.953	78.061	68.586	73.323
7	58.891	51.297	55.094	47.882	43.782	45.832
8	62.653	53.819	58.236	50.494	46.163	48.329
9	86.878	80.407	83.643	51.570	45.664	48.617
10	66.360	61.510	63.935	53.854	48.769	51.312
11	58.012	53.246	55.629	32.961	30.086	31.523
12	55.954	50.674	53.314	36.992	34.092	35.542
13	34.909	32.248	33.579	41.022	37.532	39.277
14	47.268	44.005	45.637	36.264	33.230	34.747
15	67.972	59.398	63.685	48.593	44.281	46.437
16	53.865	49.222	51.543	45.838	42.015	43.927
17	58.868	53.433	56.151	74.853	68.102	71.478
18	56.398	49.801	53.100	38.919	35.755	37.337
19	62.232	58.826	60.529	34.492	31.467	32.980
20	80.062	74.245	77.153	65.289	59.061	62.175

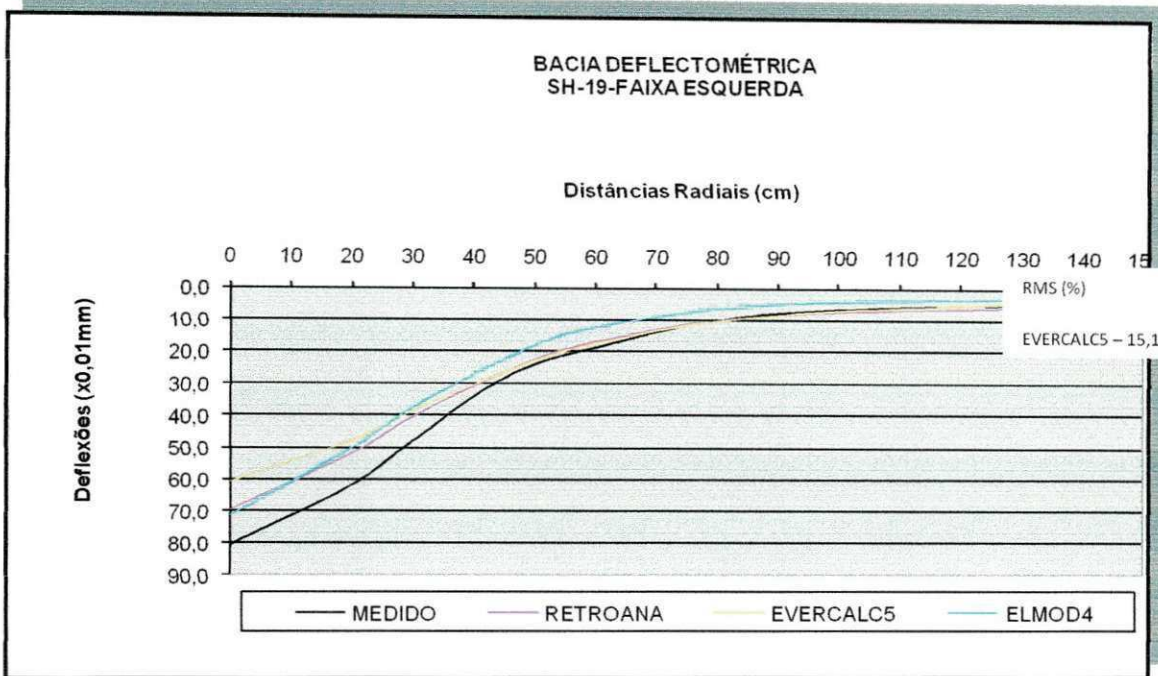


Figura 2.27 – Comparação entre bacias recalculadas com o ELSYM5 com os módulos médios do segmento homogêneo 19- Faixa Esquerda

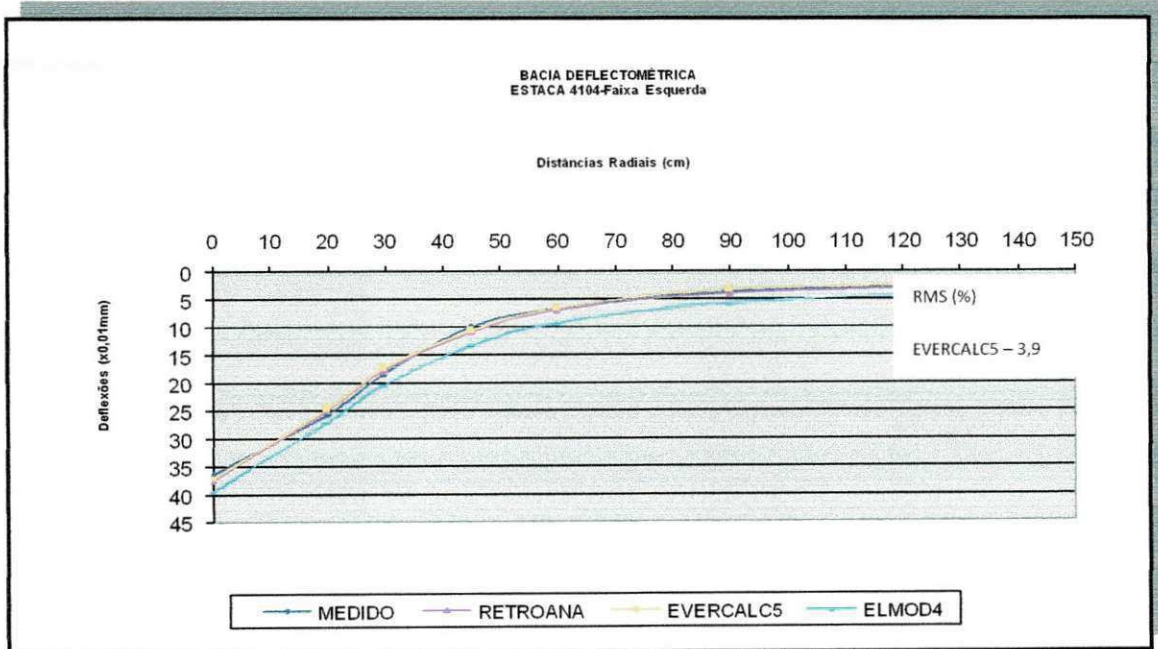


Figura 2.28 – Comparação entre bacias recalculadas com o ELSYM5 com os módulos pontuais da estaca 4104 - Faixa Esquerda

2.5 – Resultados dos Ensaios de Laboratório

Foram realizados ensaios laboratoriais a fim de subsidiar a avaliação estrutural destrutiva das camadas constituintes da estrutura. Apenas para os furos 1 (faixa direita) e 4 (faixa esquerda) foram realizados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e triaxial de cargas repetidas na tentativa de comparar situações diferentes de solicitações, já que a faixa esquerda está submetida ao tráfego pesado de caminhões e articulados.

2.5.1 – Ensaios de Caracterização e Resistência

Nas tabelas 2.20 e 2.21 constam o boletim de sondagem e os resultados dos ensaios convencionais de caracterização e resistência, respectivamente.

Tabela 2.20 – Boletim de sondagem

CARACTERIZAÇÃO DA RODOVIA BR-230/PB

Furo Nº	Lado E-x-D	Aterro	E	Profundidade (cm)		Registro	CLASSIFICAÇÃO
		(A)		S	DE		
Corte	T	(C)	A				
SEC.MIS.	C	(SM)	A				
1	D	A	4153+0	0	5		C.B.U.Q.
				5	12		BINDER
				12	32		BRITA GRADUADA
				32	47	1311	areia siltosa argilosa vermelha clara com pedra
				47	67	1312	areia siltosa argilosa cinza clara com brita
				67	100	1312	silte argiloso arenoso cinza escuro
				100	-	1314	silte argiloso arenoso cinza escuro
2	E	A	4542+0	0	5		C.B.U.Q.
				5	12		BINDER
				12	32		BRITA GRADUADA
				32	47	1307	areia siltosa argilosa cinza clara com pedra
				47	67	1307	areia siltosa argilosa cinza escura com pedra
				67	100	1309	silte argiloso arenoso amarelo claro
				100	-	1310	silte argiloso arenoso amarelo claro
3	D	A	5073+0	0	5		C.B.U.Q.
				5	12		BINDER
				12	31		BRITA GRADUADA
				31	47	1303	areia siltosa argilosa cinza escuro
				47	70	1304	areia siltosa argilosa amarela escura
				70	100	1305	argila siltosa arenosa amarela clara com pedra
				100	-	1306	argila siltosa arenosa amarela clara com pedra
4	E	A	5381+15	0	5		C.B.U.Q.
				5	12		BINDER
				12	32	1300	BRITA GRADUADA
				32	50	1301	areia siltosa argilosa amarela clara
				50	100	1302	areia siltosa argilosa cinza clara
				100	-		areia siltosa argilosa cinza clara

Tabela 2.21 – Resultado dos ensaios convencionais de caracterização e resistência

FURO	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	
ESTACA Nº	4153	4153	4153	4153	4542	4542	4542	4542	5073	5073	5073	5073	5181+15	5181+15	5181+15	
LADO	D	D	D	D	E	E	E	E	D	D	D	D	E	E	E	
CAMADA	B	SB	MS	SL	B	SB	MS	SL	B	SB	MS	SL	B	SB	SL	
PROFUNDIDADE (cm)	de	12	32	47	67	12	32	47	67	12	31	47	67	12	32	50
	a	32	47	67	100	32	47	67	87	31	47	67	90	32	50	100
GRANULOMETRIA PENEIRAS (% PASSANDO)	2"	100	100	100		100				100				100		
	1"	84	98	96	100	84	100	100	100	84	100	100	100	85	100	
	3/8"	56	91	86	96	49	91	86	98	56	97	92	99	64	99	100
	Nº 4	41	68	79	93	26	69	60	92	47	87	77	94	50	96	98
	Nº 10	30	54	71	87	18	49	41	78	34	71	60	86	38	87	88
	Nº 40	17	32	54	65	9	30	24	55	19	49	40	72	22	61	65
	Nº 200	6	11	26	31	4	13	11	28	7	18	16	37	8	24	23
Faixa DNER	A	25	24	24	A	D	F.F.	F.F.	A	F.F.	D	F.F.	B	F.F.	F.F.	
LL	NL	NP	NP	NP	NL	NL	25	22	NL	NL	25	27	NL	26	NL	
IP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	
E.A.																
IG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CLASSIF. H.R.B.	A.1.a	A.1.b	A.2.4	A.2.4	A.1.a	A.2.4	A.1.a	A.2.4	A.1.a	A.1.b	A.1.b	A.4	A.1.a	A.2.4	A.2.4	
AASHO NORMAL 12 GOLPES	DENS. MÁXIMA		2,041	2,015			2,13	2,042			2,06	1,95			1,925	
	UMID. ÓTIMA		8,7	8,9			6,6	8,6			6,8	11,2			8	
	I.S.C.		16	6			20,4	5,3			18,5	6,3			4	
	EXPANSÃO			2,8	0,97			1,43	1,15			0,21	0,84			1,9
AASHO INTERM. 26 GOLPES	DENS. MÁXIMA		2,08				2,177				2,115				2,054	
	UMID. ÓTIMA		11				6,8				7,6				8,5	
	I.S.C.		8,7				37				18,5				12,5	
	EXPANSÃO		0,85				0,08				0,1				0,8	
AASHO INTERM. 56 GOLPES	DENS. MÁXIMA					2,325				2,275				2,26		
	UMID. ÓTIMA					4,9				6				4,7		
	I.S.C.					106				103				94		
	EXPANSÃO					0				0				0,1		
DADOS DE CAMPO	M.E.S (g/cm ³)	2,268	2,009	1,969	1,954	2,229	2,058	1,979	1,898	2,209	2,04	2,002	1,9	2,208	2,004	1,909
	UMIDADE (%)	7	8,1	8,8	10,2	7,6	7,25	8	8,9	7,8	9,2	9,8	1,9	7,8	8,8	10,1
	GRAU COMPAC. (%)		97	96	97	96	95	93	93	97	96	97	97	98	98	99
M.E.S (g/cm ³)	2,70	2,67	2,68	2,68	2,72	2,66	2,67	2,68	2,74	2,64	2,65	2,68	2,73	2,66	2,64	
UMIDADE DE SATURAÇÃO (%)	7,1	12,3	13,5	13,9	8,1	11,0	13,1	15,4	8,8	11,1	12,2	15,3	8,7	12,3	14,5	
GRAU DE SATURAÇÃO (%)	99,2	65,7	65,3	73,6	93,8	65,9	61,2	57,9	88,9	82,6	80,2	12,4	90,1	71,5	69,6	

LEGENDA: D- Lado direito; E- Lado esquerdo; B-Base; SB- Sub-base; MS- Material selecionado; SL- Sub-jeito;
M.E.S - Massa específica real dos grãos do solo.

Os solos do subleito dos furos 1,2 e 4 são constituídos de materiais areno-siltoso-argiloso segundo a classificação da HRB (Highway Research Board) apresentando valores de CBR menores do que o considerado em projeto. Já o solo do subleito do furo 3 apresenta características siltosas. Com relação ao

grau de compactação apenas o furo três está abaixo do especificado em norma para o subleito.

Outro fator que pode ser levantado além dos citados por CARDOSO (1995) para os baixos valores modulares da camada de BGS é o grau de saturação. Segundo estudo desenvolvido por CASAGRANDE (2003) sobre a influência do teor de finos na condutividade hidráulica e deformabilidade elástica de britas a geração de poro-pressão não pressupõe a saturação de 100% do corpo de prova, pois é provável que, com 88% de saturação, já seja gerado o excesso. Isto causa redução de pressão efetiva e o aumento da deformabilidade do material. ISSA (1999 apud CASAGRANDE, 2003) constatou que o k (coeficiente de condutividade hidráulica) de britas depende significativamente da percentagem de material passante na peneira nº 4 (4,76 mm). Apenas para se ter uma idéia do coeficiente de condutividade hidráulica da camada de BGS utilizou-se os modelos propostos por Casagrande (2003) considerando amostras integrais, isto é, sem o escalpo de fração superior a 19 mm, pelo fato de ser mais representativa da condição de campo em relação a amostras parciais. Os modelos propostos pelo autor citado são:

- Para percentagens de finos (% passando na peneira nº 4) compreendidas entre 10% e 27%, temos:

$$k \text{ (cm/s)} = - 6 \times 10^{-5} X^3 + 0,0088X^2 - 0,479X + 6,2519, R^2 = 1$$

(5.3)

- Para percentagens de finos (% passando na peneira nº 4) compreendidas entre 12% e 53%, temos:

$$k \text{ (cm/s)} = 8 \times 10^9 X^{-7,20}, R^2 = 0,84$$

(5.4)

Tabela 2.22 – Estimativado coeficiente de condutividade hidráulica da camada de BGS

Estaca/Furo	4153/1	4542/2	5073/3	5181+15/4
Teor de umidade de campo (%)	7	7,6	7,8	7,8
Grau de saturação (%)	99,2	93,8	88,9	90,1
Grau de compactação (%)	-	96	97	98
% passando na peneira nº 4	41	26	47	50
K (cm/s)x10 ⁻³	19,6	540,7	7,31	4,68

Segundo BAUMGARDNER (1992), ASHRAF & LINDLY (1996), RADOLPH (1996) e ISSA (1999) apud CASAGRANDE et. al. (2002), o coeficiente de condutividade hidráulica variando entre 0,35 e 7,34 cm/s produz uma drenagem adequada. Analisando os resultados apresentados na tabela 2.18, apenas o furo 3 apresenta valor entre a faixa sugerida pelos autores retromencionados. No entanto, é importante salientar que os modelos utilizados foram obtidos a partir de correlações resultantes de ensaios de laboratoriais, sendo necessário a realização de ensaios "in situ" para obtenção de valores mais representativos.

2.5.2 – Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio de resistência à tração compressão diametral foi realizado apenas para os furos das estaca 4153 (furo 1) e 5381+15 (furo 4), foram extraídos 6 corpos de prova para cada furo sendo 3 da camada de binder e 3 da camada de rolamento. Todos os corpos de prova apresentaram valores para a resistência a tração superiores ao mínimo estabelecido pela norma DNIT 031/2004, de 6,0kgf/cm². Na tabela 2.23, apresenta-se os resultados obtidos.

Tabela 2.23 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova de campo do trecho analisado

Estaca/Furo	4153/1		5381+15/4	
	Capa	binder	Capa	binder
	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)
CP1	8,6	6,6	9,8	12,6
CP2	9,7	6,7	10,2	7,4
CP3	8,8	7,1	8,1	10,3
CP4	8,5	7,6	8,6	10,9
CP5	9,0	6,5	9,9	7,6
CP6	6,4	7,8	12,9	12,0
Média	8,5	7,1	9,9	10,1

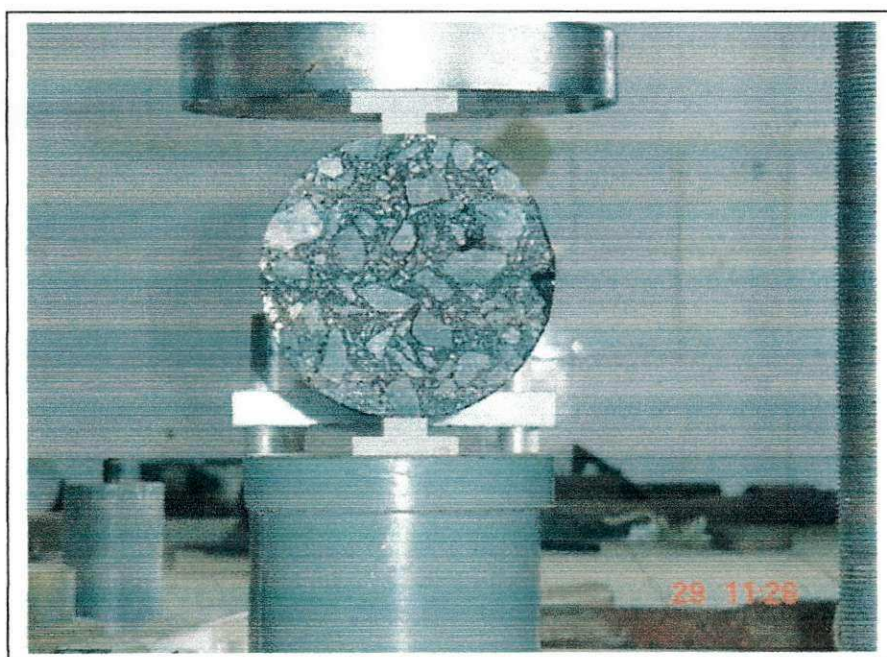


Figura 2.29 – Foto do ensaio de resistência à tração por compressão diametral realizado no LEP/UFCG

O furo 4 apresentou uma resistência à tração média para a capa e o binder superior ao valor encontrado para o furo 1. Analisando pontualmente o levantamento de defeitos de superfície a estaca 5381+15 (furo 4) está

compreendida entre as estacas 5182 e 5183 que apresentam trincamento do tipo couro de jacaré classe 2, já a estaca 4153 (futo1) apresenta apenas fissuras. Sendo assim, pode-se inferir que a estrutura da estaca 5381+15 por ser mais rígida apresenta uma superfície mais trincada devido a maior diferença de rigidez entre a camada de binder e a base (BGS) em comparação com o furo 4 com uma relação modular entre estas camadas menor.

2.5.3 – Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas

Realizaram-se ensaios triaxiais de carga repetida no laboratório da COPPE/UFRJ com o apoio da professora Laura Maria Goretti da Motta. Na tabela 2.24, constam os módulos resilientes obtidos expressos pelos modelos tradicionais tendo sido moldados os corpos-de-prova nas condições de umidade e massa específica aparente seca.

Tabela 2.24 – Resultado dos ensaios de módulo resiliente baseados nos modelos granular ($MR=K_1\sigma_3^{k_2}$) e argiloso ($MR=K_1\sigma_d^{k_2}$)

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULOS BASEADOS NO MODELO TRADICION.									
AMOSTRAS	CAMADA	MR = $k_1\sigma_3^{k_2}$ (MPa)			MR = $k_1\sigma_d^{k_2}$ (MPa)			CARAC	
		k ₁	k ₂	R ²	k ₁	k ₂	R ²	LABORATÓRIO	
								γ_s (g/cm ³)	h.média (%)
FURO1 Estaca 4153	BASE	684	0,29	0,49	1303	0,45	0,90	-	-
	SUB-BASE	113	-0,37	0,43	143	-0,21	0,09	2,08	11
	REFORÇO	129	-0,31	0,44	165	-0,15	0,08	2,041	8,7
	SUBLEITO	107	-0,47	0,83	108	-0,36	0,36	2,015	8,9
FURO4 Estaca 5381+15	BASE	258	-0,03	0,01	264	0,05	0,02	2,26	4,7
	SUB-BASE	358	-0,44	0,70	292	-0,28	0,22	2,054	8,5
	SUBLEITO	248	-0,26	0,34	231	-0,69	0,02	1,925	8

Nota: módulos resilientes em MPa

Observa-se na tabela 2.24, que os coeficientes de determinação são baixos, denotando para o caso em questão, um ajuste do ponto de vista estatístico pouco significativo ao se utilizar os modelos tradicionais. Para contornar tal situação, MACEDO (1996) propôs o modelo composto (equação 2.18) sendo o módulo de resiliência função da tensão confinante e da tensão desvio simultaneamente por ser estatisticamente mais representativo em comparação aos tradicionais. O modelo composto pode ser expresso em função da

deformação resiliente através de regressão não-linear tendo a seguinte formulação:

Sendo:

σ_d – tensão desvio aplicada

σ_3 – pressão confinante aplicada

a,b,c – coeficientes obtidos por regressão a partir dos dados experimentais.

Como o módulo de resiliência é definido por:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$$

Temos que,

$$M_R = \frac{\sigma_d}{a \sigma_3^b \sigma_d^c} = \frac{1}{a} \sigma_3^{-b} \sigma_d \sigma_d^c = \frac{1}{a} \sigma_3^{-b} \sigma_d^{(1+c)}$$

fazendo as seguintes substituições:

$$\frac{1}{a} = k_1, \quad k_2 = -b \quad e \quad 1+c = k_3$$

Logo, tem-se o modelo composto:

$$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$$

Utilizou-se o programa SGPLUS para obtenção dos parâmetros a,b e c por regressão não-linear, fazendo as devidas substituições. Tem-se na tabela 2.25 os resultados dos módulos resilientes baseados no modelo composto supracitado.

Tabela 2.25 – Resultado dos ensaios de módulo resiliente baseados no modelo composto

AMOSTRAS		a	b	c	R ²	K ₁ =1/a	K ₂ =-b	K ₃ =1-c
FURO1/LD Estaca 4153	BASE	0,0002	-0,4969	0,9829	0,98	5000	0,4969	0,0171
	SUB-BASE	0,0004	-0,3361	1,1778	0,97	2500	0,3361	-0,1778
	REFORÇO	0,0004	-0,4793	1,1937	0,95	2500	0,4793	-0,1937
	SUBLEITO	0,0003	-0,2587	1,3632	0,99	3333	0,2587	-0,3632
FURO4/LE Estaca 5381+15	BASE	0,0004	-0,1659	0,8733	0,96	2500	0,1659	0,1267
	SUB-BASE	0,0003	-0,3556	1,3371	0,98	3333	0,3556	-0,3371
	SUBLEITO	0,0004	-0,4016	1,1326	0,89	2500	0,4016	-0,1326

Nota: módulos resilientes em kgf/cm²

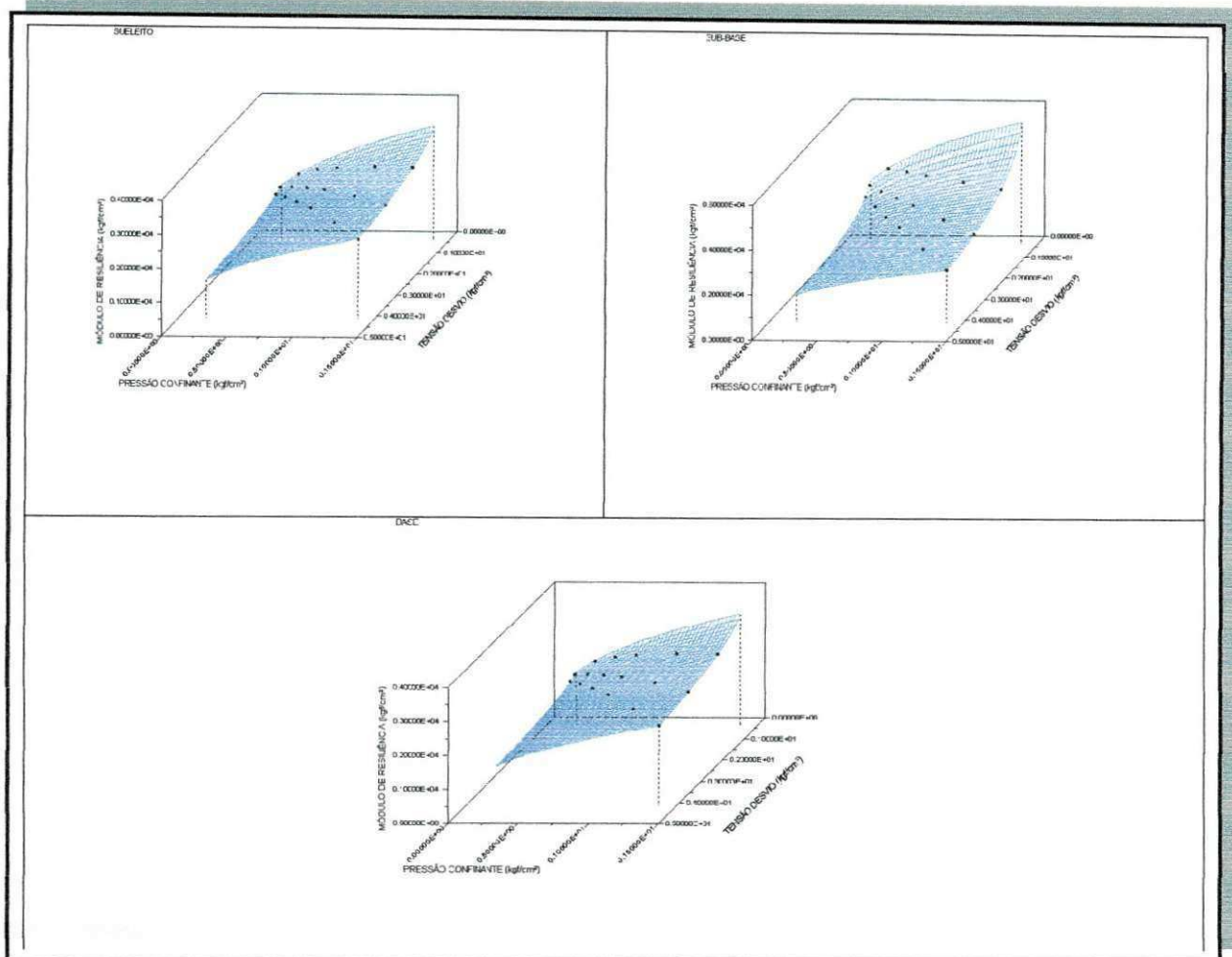


Figura 2.30 – Representação gráfica do modelo composto de resiliência para os materiais das camadas do furo 4 (LE)

2.6 – Avaliação Estrutural Destrutiva com Base nos Ensaios de Laboratório

Neste item mostra-se a avaliação estrutural utilizando-se o programa de elementos finitos FEPAVE2. Primeiramente, analisa-se o resultado dos ensaios dos materiais coletado "in situ", e em seguida, o resultado dos materiais de jazida obtida nos ensaios realizados. Para os resultados dos ensaios dos materiais coletados "in situ" determinou-se a faixa modular das camadas de base, sub-base, reforço e subleito, como também a contribuição percentual de cada camada na deflexão total na superfície para a configuração do FWD. Já para os resultados dos ensaios realizados com materiais coletados em jazida, utilizou-se a configuração de carregamento da viga Benkelman, efetuando os

cálculos de deslocamento (deflexão), diferença de tensões, deformação específica de tração e tensão vertical no topo do subleito e contribuição percentual da deflexão total.

2.6.1 – Análise dos Ensaios Realizados com Materiais Coletados do Pavimento Existente

Para a análise dos materiais coletados em pista foi utilizado o modelo composto derivado da deformação resiliente das camadas de base, sub-base, material selecionado e subleito. Como não foi realizado ensaio de cargas repetidas para as misturas asfálticas, tomou-se para o módulo de resiliência da estaca 4154 o valor obtido para a estaca 4153 (furo 1) através de retroanálise pelo EVERCALC5 e para a esta 5381+15 o módulo retroanalísado da estaca 5382.

Tabela 2.26 – Resultado da contribuição percentual na deflexão total e faixa de módulos ambos calculados com o FEPAVE2

ESTACA	% DE CONTRIBUIÇÃO NA DEFLEXÃO TOTAL					TENSÃO VERTICAL NO SUBLEITO
	REVEST.	BASE	SUB-BASE	REF.	SUBL.	
4153/4154	3,7	35,8	17,3	16,2	27	0,18
5381+15/5382	2,9	22,4	9,4	-	65,3	0,20
ESTACA	FAIXA DE MÓDULOS					DEFLEXÃO MÁXIMA FEPAVE2
	REVEST.	BASE	SUB-BASE	REF.	SUBL.	
	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	kgf/cm ²	(kgf/cm ²)	(10 ⁻² mm)
4153/4154	21194	484-1472	687-1022	372-888	1797 - 2272	43,3
5381+15/5382	19715	927-998	932-1098	-	488-508	59,7
ESTACA	MÓDULOS OBTIDOS POR RETROANÁLISE					DEFLEXÃO TOTAL MEDIDA
	REVEST.	BASE	SUB-BASE	REF.	SUBL.	
	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	kgf/cm ²	(kgf/cm ²)	(10 ⁻² mm)
4153/4154	21194	918,5	684	-	2249	48,5
5381+15/5382	19715	433	192	-	1597	103

Foram calculadas as bacias de deflexões a partir do FEPAVE2 utilizando-se dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório. Para a determinação das deflexões nos pontos de ensaio do FWD, foi utilizada a equação e

determinaram-se os coeficientes a e b por regressão não linear a partir do programa LAB FIT – Ajuste de Curvas.

$$D(r) = \frac{D_{máx}}{(1 + (a.r^b))}$$

Sendo:

D_r é a deflexão no ponto referente à distância radial r;

r é a distância radial;

D_0 é a deflexão máxima, que ocorre no centro da área carregada ($r_x = 0\text{cm}$);

a e b são os coeficientes da equação obtidos no ajuste da bacia.

Tabela 2.27 – Coeficientes da equação obtidos no ajuste da bacia

ESTACA	a	b	R ²
4153/4154	1,21.10 ⁻³	1,8045	0,99
5381+15/5382	3,20.10 ⁻⁴	1,95	0,96

A fim de comparar as bacias obtidas pelos diferentes procedimentos, ou seja, através dos módulos resultantes da retroanálise com os módulos de laboratório, foram calculadas as bacias teóricas com o ELSYM5 utilizando-se os módulos retroanalizados pelos programas EVERCALC5, RETROANA e ELMOD4. Para a bacia da estaca 4153/4154 o RMS obtido pelo programa EVERCALC5 foi o menor indicando um melhor ajuste entre as bacias medida e teórica. Já para a estaca 5381+15/5382 o programa ELMOD4 obteve um bom ajuste para as camadas do pavimento e ruim para o subleito o que resultou em um RMS de 23,9%, já os programas EVERCAL5 e RETROANA não tiveram um bom ajuste para as camadas do pavimento, porém se ajustaram muito bem a camada da infra-estrutura o que resultou em RMS de 14,5 e 17,4, respectivamente.

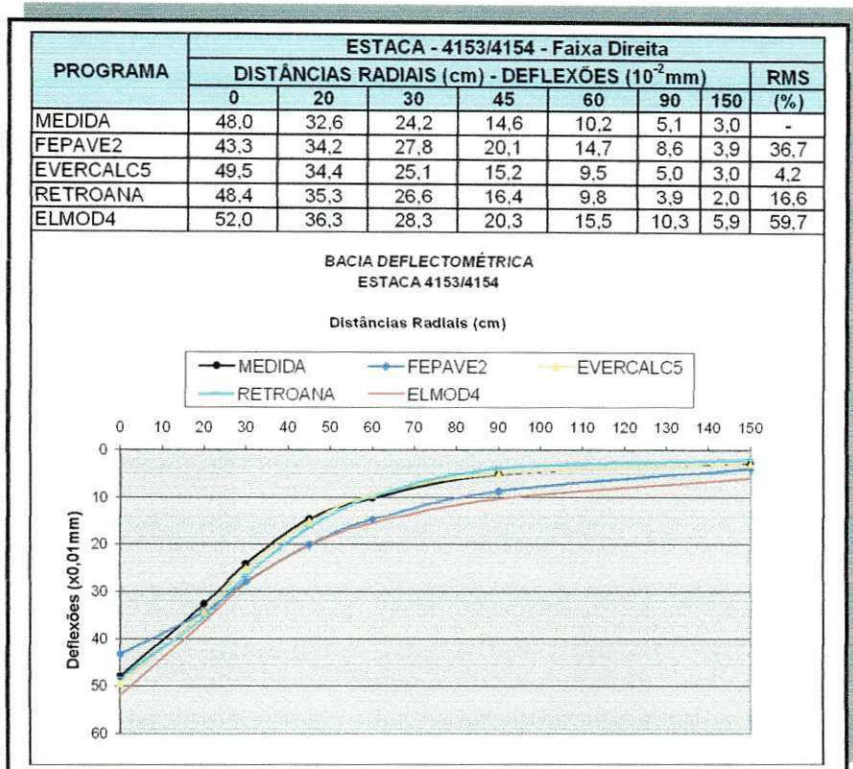


Figura 2.31 – Bacias deflectométricas obtidas a partir do FEPAVE2, EVERCALC5, RETROANA E ELMOD4

2.6.2 – Resultados dos Ensaios Realizados com Materiais Coletados em Jazida

2.6.2.1 – Ensaios de Módulo de Resiliência de Solos e Britas

Com os materiais coletados em jazidas foram realizados ensaios triaxiais para diferentes teores de umidade, ou seja, para cada ponto da curva no ensaio de compactação foram moldados corpos-de-prova para a realização de ensaios de módulo de resiliência para as camadas de base, sub-base, reforço e subleito. Os ensaios de resiliência foram realizados para os pares sublinhados em cinza de teor de umidade x massa específica aparente seca conforme tabela 2.28.

Tabela 2.28 – Teores de umidade média e massa específica aparente seca obtidos no ensaio de compactação

CAMADA	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	1º PONTO		2º PONTO		3º PONTO		4º PONTO		5º PONTO		6º PONTO	
		h.média	γ_s	h.média	γ_s	h.média	γ_s	h.média	γ_s	h.média	γ_s	h.média	γ_s
		(%)	(g/cm ³)	(%)	(g/cm ³)	(%)	(g/cm ³)	(%)	(g/cm ³)	(%)	(g/cm ³)	(%)	(g/cm ³)
Base	Proctor Modificado	1,53	2,237	2,91	2,269	4,26	2,308	6,16	2,314	6,82	2,269	5,44	2,323
Sub-base	Proctor Intermediário	4,05	2,060	5,68	2,086	7,90	2,086	9,37	2,037	11,36	1,966	6,06	2,110
Reforço	Proctor Intermediário	3,70	1,953	5,56	1,991	7,36	2,017	9,46	1,967	11,54	1,905		
Subleito	Proctor Normal	3,74	1,872	5,94	1,891	7,69	1,918	9,63	1,851	11,31	1,760		

São apresentadas a formatação tridimensional para os modelos compostos de módulo de resiliência dos materiais de base, sub-base e reforço coletados em jazida e para o subleito existente.

Tabela 2.29 – Resultado dos ensaios de módulo resiliente baseados no modelo composto

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULOS BASEADOS NO MODELO COMPOSTO								
AMOSTRA	PONTO	k_1	k_2	k_3	R^2	$K_1=1/k_1$	$K_2=-k_2$	$K_3=1-k_3$
Base	2º	$1,45 \cdot 10^{-4}$	-0,5302	1,1606	0,97	6911	0,5302	-0,1606
Base	3º	$2,60 \cdot 10^{-4}$	-0,4391	0,8679	0,94	3846	0,4391	0,1321
Base	4º	$2,42 \cdot 10^{-4}$	-0,1889	0,8895	0,91	4127	0,1889	0,1105
Base	5º	$2,15 \cdot 10^{-4}$	-0,4548	0,9568	0,97	4655	0,4548	0,0432
Sub-base	2º	$2,60 \cdot 10^{-4}$	-0,5189	1,0940	0,98	3849	0,5189	-0,0940
Sub-base	3º	$2,96 \cdot 10^{-4}$	-0,4511	1,0730	0,99	3382	0,4511	-0,0730
Sub-base	4º	$2,57 \cdot 10^{-4}$	-0,5399	1,1066	0,99	3893	0,5399	-0,1066
Sub-base	5º	$4,62 \cdot 10^{-4}$	-0,0630	0,5182	0,98	2165	0,0630	0,4818
Reforço do subleito	2º	$2,90 \cdot 10^{-4}$	-0,4892	0,9620	0,99	3448	0,4892	0,0380
Reforço do subleito	3º	$1,97 \cdot 10^{-4}$	-0,6316	1,2506	0,95	5076	0,6316	-0,2506
Reforço do subleito	4º	$3,90 \cdot 10^{-4}$	-0,4989	1,0000	0,99	2564	0,4989	0,0000
Subleito	2º	$3,30 \cdot 10^{-4}$	-0,5227	1,0617	0,99	3030	0,5227	-0,0617
Subleito	3º	$2,80 \cdot 10^{-4}$	-0,4515	1,0735	0,99	3571	0,4515	-0,0735
Subleito	4º	$4,04 \cdot 10^{-4}$	-0,4738	0,9714	0,99	2475	0,4738	0,0286

Nota: módulos resilientes em kgf/cm²

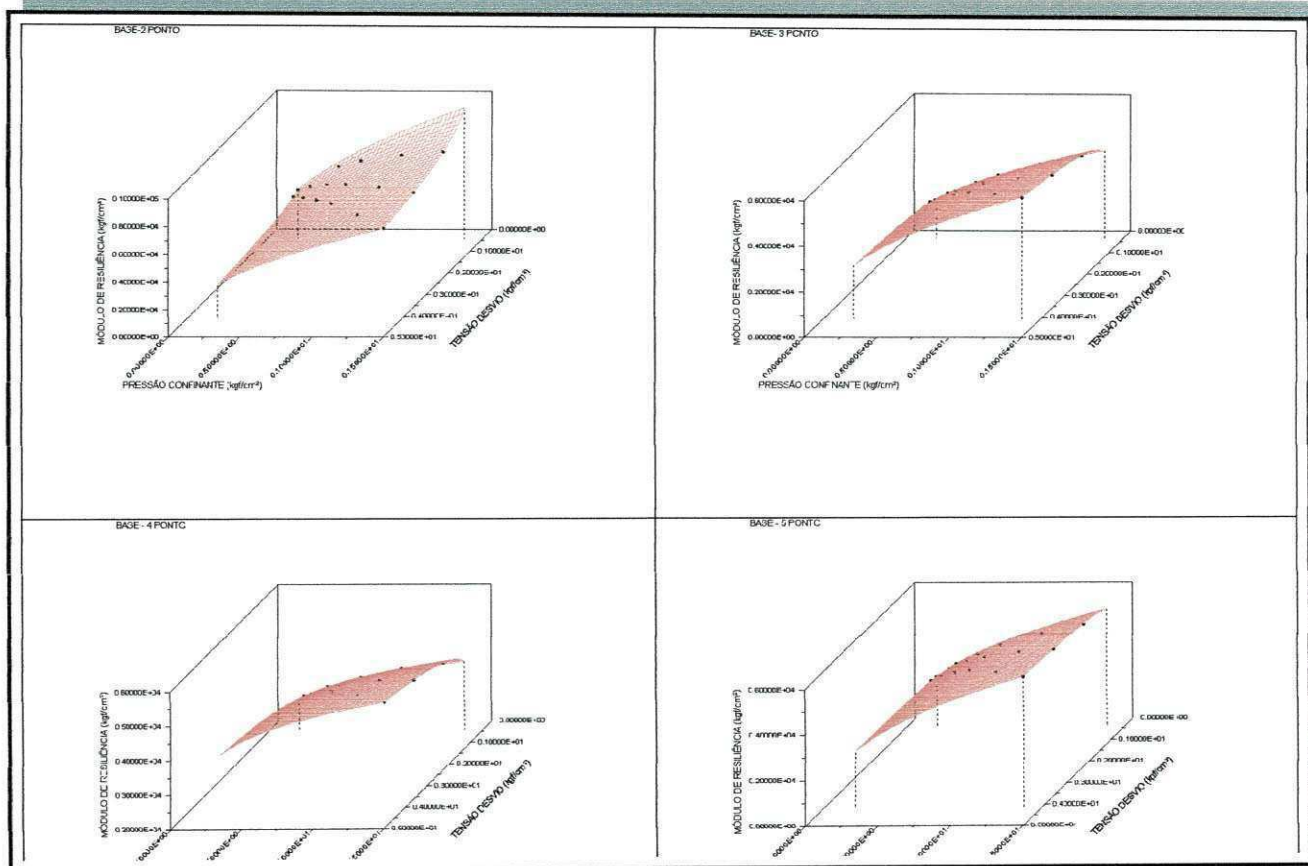


Figura 2.32 – Resultado dos ensaios de módulo resiliente baseados no modelo composto para o material de base em várias condições de moldagem

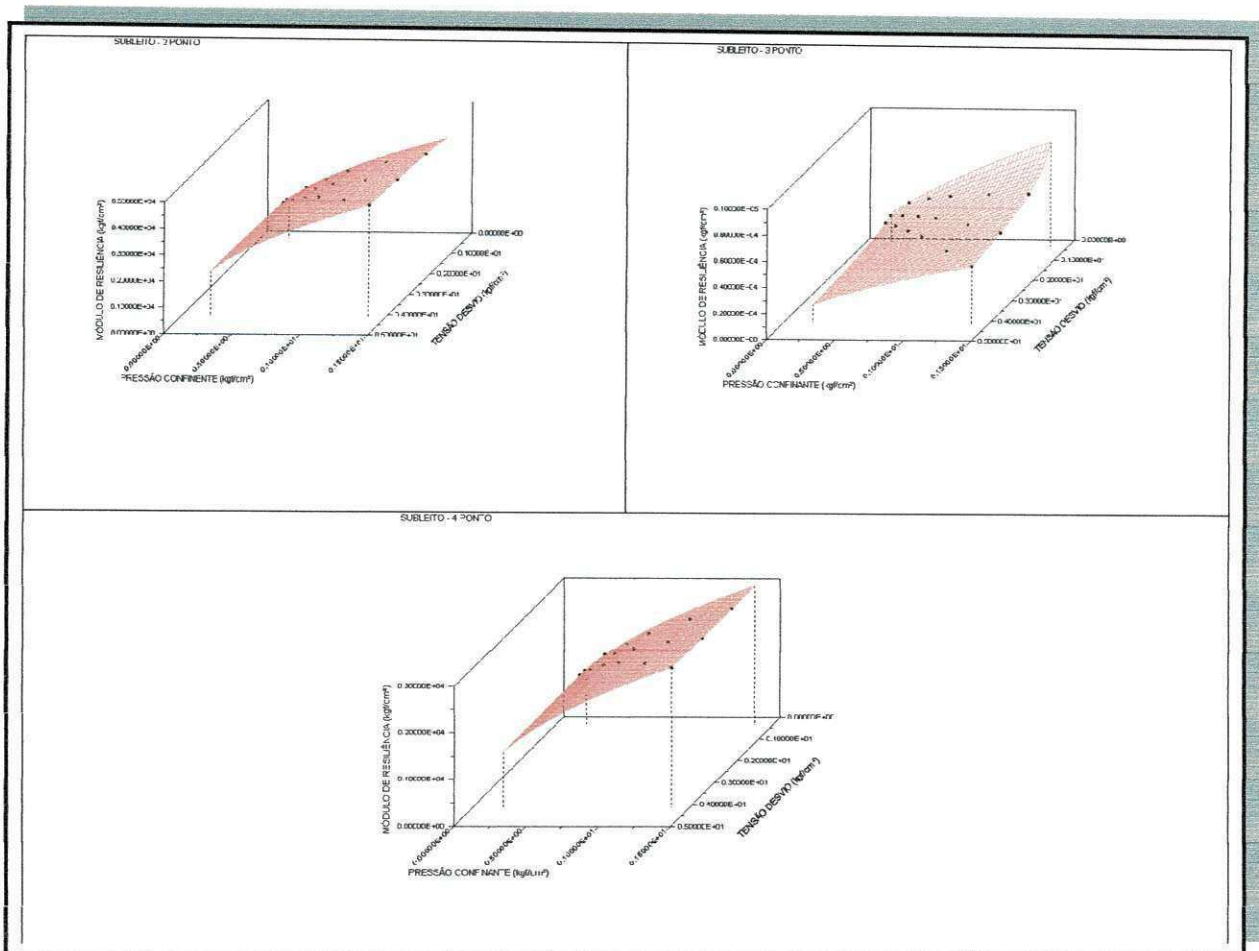


Figura 2.33 – Resultado dos ensaios de módulo resiliente baseados no modelo composto para o material do subleito em várias condições de moldagem

2.6.2.2 – Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os resultados dos ensaios de resistência a tração com corpos-de-prova de concreto asfáltico moldados em laboratório nas faixas B e C com os mesmos materiais da obra estão apresentados resumidamente na tabela 2.30.

Tabela 2.30 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral de concreto asfáltico moldado em laboratório

Número do Corpo-de-Prova	CBUQ Faixa C Média	Número do Corpo-de-Prova	CBUQ Faixa B Média
	(kgf/cm ²)		(kgf/cm ²)
4037	7,8	4014	7,0
4038		4015	
4039		4016	
4043		4020	
4044		4021	
4045		4022	
4040	8,0	4017	7,2
4041		4018	
4042		4019	

Este ganho de resistência pode ser atribuído ao envelhecimento do ligante, que ganha resistência com o passar do tempo devido à perda de seus elementos voláteis.

2.6.2.3 – Ensaios de Módulo de Resiliência e Fadiga

Foram moldados em laboratório corpos-de-prova de concreto asfáltico nas faixas B e C com os mesmos materiais da obra para serem realizados ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral e fadiga para as misturas asfálticas nas faixas B e C, cujos resultados estão sumarizados na tabela 2.31.

Tabela 2.31 – Resultados de módulo de resiliente por compressão diametral e modelos de fadiga para corpos de prova moldados em laboratório

CONCRETO ASFÁLTICO	M _R MÉDIO (kgf/cm ²)	MODELO DE FADIGA	
CBUQ faixa C	3567	$N = 2003,9 \times \Delta\sigma^{-2,6752}$	$N = 6 \times 10^{-12} \times \varepsilon_t^{-3,4965}$
CBUQ faixa B	3807	$N = 1584,1 \times \Delta\sigma^{-2,6752}$	$N = 1 \times 10^{-8} \times \varepsilon_t^{-2,6752}$

2.6.2.4 – Análise Mecânica com o FEPAVE2

Com base nos resultados para os materiais coletados em jazida e para as misturas asfálticas nas faixas B e C, procedeu-se uma análise mecânica a partir do FEPAVE2 para o cálculo dos parâmetros de deformabilidade do sistema pavimento-subleito. A configuração utilizada para a análise foi de uma carga com pressão de contato de 5,6 kgf/cm² e raio de 10,8 cm e malha automática. Todos parâmetros de deformabilidade foram calculados diretamente na malha de elementos finitos.

Segundo MEDINA (1997), a confiabilidade pode ser definida como sendo a probabilidade de um sistema, equipamento ou estrutura desempenhar satisfatoriamente a função a que se destina com a expectativa de duração estabelecida. Neste sentido, buscou-se aplicar a confiabilidade considerando os intervalos de confiança a seguir apresentados:

- 50% para a média;
- 85% para a média + 1,04 x desvio padrão;
- 95% para a média + 1,65 x desvio padrão;
- 99,9% para a média + 3,09 x desvio padrão.

É importante salientar que para os modelos de fadiga de deformação específica de tração foi considerado um fator campo-laboratório de $f_0 = 10^5$ e para a diferença de tensões $f_0 = 10^4$ conforme os estudos realizados por PINTO (1991).

No que concerne ao critério de confiabilidade, constata-se que para a deflexão máxima na superfície a estrutura simulada no FEPAVE2 atenderia apenas a um número N de 1×10^7 , ou seja, quatro anos de serviço conforme a projeção mostrada na tabela 4.11, com 99,9% de confiabilidade. Para a deformação específica de tração e diferença de tensões na camada de rolamento a estrutura atenderia ao número de projeto com uma confiabilidade de 99,9%. Em contrapartida, a camada de ligação (Binder), quanto à diferença de tensões não atenderia ao número N preconizado em projeto ($4,5 \times 10^7$) – tabela 5.33. Como as manifestações de trincamento na superfície surgiram a partir do 3º ano de serviço, pode-se afirmar que as trincas tenham se propagado da camada de ligação para a camada de rolamento. Desse modo, a afirmação de que a camada de revestimento atenderia com 99,9% de confiabilidade não está correta porque ela sofre a influência da camada inferior. A condição de trincamento precoce do pavimento está de acordo com o previsto na análise mecânica. Quanto ao subleito, as tensões atuantes no topo do mesmo para as estruturas simuladas são bastante diminutas em comparação com a tensão admissível, prevendo-se o atendimento ao tráfego de projeto com 99,9% de confiabilidade, o que também foi comprovado até o momento no trecho, visto que as medições até o terceiro ano de tráfego mostram a pequena incidência de trilha de roda interna e externa apresentando em média de 2,7mm para ambas as faixas, direita e esquerda.

Tabela 2.32 – Resultados dos parâmetros de deformabilidade obtidos a partir da simulação com o FEPAVE2

Módulo da BGS	Na Superfície	Na camda de Rolamento			Na camda de Binder			No Subleito	Limites Admissíveis para N de projeto - $4,5 \times 10^7$					
		Do	ϵ_R	$\Delta\sigma$	σ_R	ϵ_R	$\Delta\sigma$		σ_R	Rolamento		Binder		$\sigma_{subleito}$
										Do	ϵ_{adm}	$\Delta\sigma_{adm}$	ϵ_{adm}	
(10^{-2} mm)	(cm/cm)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(cm/cm)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(10^{-2} mm)	(cm/cm)	(kgf/cm ²)	(cm/cm)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	
2º Ponto	54	$1,7 \cdot 10^{-6}$	2,7	1,4	$1,96 \cdot 10^{-4}$	7,0	-6,5	0,076	52	$1,07 \cdot 10^{-4}$	7,9	$1,04 \cdot 10^{-4}$	6,8	0,47
3º Ponto	59	$1,2 \cdot 10^{-6}$	2,8	1,3	$2,14 \cdot 10^{-4}$	7,9	-7,6	0,080						
4º Ponto	49	$2,9 \cdot 10^{-6}$	2,7	1,5	$1,74 \cdot 10^{-4}$	6,3	-5,7	0,074						
5º Ponto	56	$1,4 \cdot 10^{-6}$	2,8	1,3	$2,10 \cdot 10^{-4}$	7,3	-6,9	0,078						

Tabela 2.33 – Resultados da análise de confiabilidade

Parâmetros Obtidos	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Nível de Confiança (%)				Limites de solicitações do Eixo-padrão			
				50	85	95	99,9	1x10 ⁶	5x10 ⁶	1x10 ⁷	4,5x10 ⁷
Do (10-2mm)	55	4,20	7,7	55	59	61	67	105	77	68	51
a _t (cm/cm)	1,81.10 ⁻⁶	7,71.10 ⁻⁷	42,7	1,81.10 ⁻⁶	2,61.10 ⁻⁶	3,08.10 ⁻⁶	4,19.10 ⁻⁶	3,19.10 ⁻⁴	2,02.10 ⁻⁴	1,65.10 ⁻⁴	1,07.10 ⁻⁴
Δσ (kgf/cm ²)	2,5	0,56	22,9	2,5	3,0	3,4	4,2	23,6	14,9	12,2	7,9
a _s (cm/cm)	1,99.10 ⁻⁴	1,81.10 ⁻⁵	9,1	1,99.10 ⁻⁴	2,17.10 ⁻⁴	2,28.10 ⁻⁴	2,54.10 ⁻⁴	4,32.10 ⁻⁴	2,37.10 ⁻⁴	1,82.10 ⁻⁴	1,04.10 ⁻⁴
Δσ (kgf/cm ²)	7,10	0,66	9,3	7,1	7,8	8,2	9,1	28,1	15,4	11,9	6,8
σ _{sub.} (kgf/cm ²)	0,08	0,002582	3,4	0,077	0,080	0,081	0,085	0,58	0,53	0,51	0,47

Tabela 2.34 – Contribuição percentual das camadas na deflexão total e faixa de módulos obtidas com o FEPAVE2

ESTACA	% DE CONTRIBUIÇÃO NA DEFLEXÃO TOTAL						DEFLEXÃO TOTAL (10 ⁻² mm)	FAIXA DE MÓDULOS					
	CAPA	BINDER	BASE	SUB-BASE	REF.	SUBL.		CAPA	BINDER	BASE (kgf/cm ²)	SUB-BASE (kgf/cm ²)	REF. (kgf/cm ²)	SUBL. (kgf/cm ²)
	2º Ponto	0,4	0,4	11,1	19,3	17,4	51,5	54,0	35.670	38.010	770-778	386-433	417-504
3º Ponto	0,3	0,3	17,3	20,7	12,6	48,6	58,8	35.670	38.010	411-618	386-488	386-462	503
4º Ponto	0,8	0,0	10,3	18,5	16,9	53,5	48,6	35.670	38.010	1441-1559	386-392	417-469	503
5º Ponto	0,4	0,4	16,0	18,4	14,5	50,4	56,4	35.670	38.010	551-549	386-463	386-438	503

2.7 – Resultados da Pesquisa Volumétrica Classificatória

Neste item mostra-se uma nova projeção do número N, através das pesquisas volumétricas classificatórias, efetivadas no posto de cobertura (C-117), situado entre o acesso à cidade de Ingá e Campina Grande, durante 72 horas, no período compreendido entre os dias 7, 8 e 9 de julho (quarta, quinta e sexta-feira), do ano de 2004. No anexo D, constam os resultados da pesquisa realizada, que indicaram os resultados médios apresentados na tabela 2.35.

Tabela 2.35 – Volume médio diário medido em julho 2004

TIPOS	AUTO	ÔNIBUS	2C	3C	Nsi	OUTROS	TOTAL	V.H.M	V.H.P
VMD	2449	134	282	328	143	221	3557	274	7,7%
%	68,9	3,8	7,9	9,2	4,0	6,2	100		

Tabela 2.36 – Volume médio diário anual (www.dnit.gov.br)

COORDENAÇÃO			PNV			ANO		VMD ANUAL		km	
13ª			230BPB0220			1998		5919		143,8	
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
6384	5948	5355	5651	5442	6084	5795	5677	6171	6805	-	-

$C_1 = \text{VMD}_{\text{ANUAL}} / \text{VMD}_{\text{JULHO}} = 5919/5795 = 1,021$

A definição dos volumes médios diários devidamente corrigidos, representando a média anual de 2004 estão apresentados na tabela 2.37.

Tabela 2.37 – Volume médio diário corrigido sazonalmente para o trecho estudado desta pesquisa

TIPOS	AUTO	ÔNIBUS	2C	3C	Nsi	OUTROS	TOTAL
VMD	2449	134	282	328	143	221	3557
C ₁	1,021						
VMD CORRIGIDO	2501	137	289	335	146	226	3634

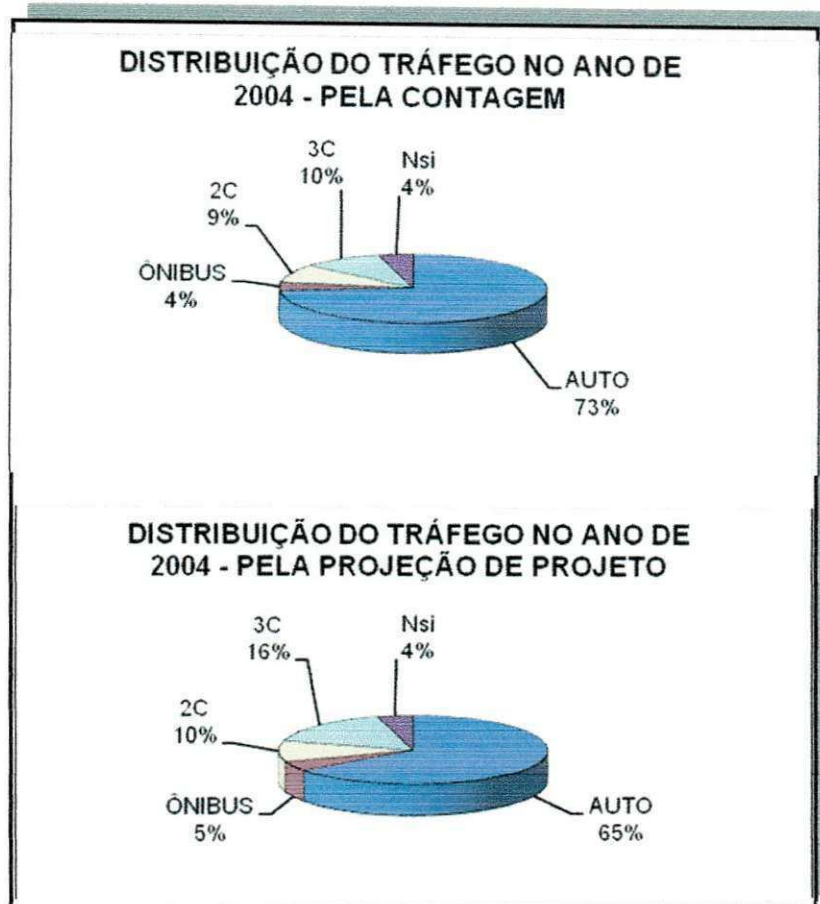


Figura 2.34 – Distribuição percentual do tráfego pela contagem de 2004 e pela projeção segundo o estudo de tráfego do projeto

Observa-se na figura 2.35, que em termos de volume, a distribuição do tráfego referente à projeção se mostrou bastante coerente com a contagem realizada nesta pesquisa, diferenciando-se apenas no percentual de veículo do tipo 3C e automóveis.

Tabela 1.2 – Taxas de crescimento anual linear e exponencial (DER/PB, 1999)

TIPOS	AUTO E 2CS	ÔNIBUS	CAM. 2C	CAM. 3C	nSi	TOTAL
EXPONENCIAL	2,8%	1,4%	1,6%	2,4%	2,9%	2,5%
LINEAR	3,2%	1,6%	1,8%	2,8%	3,6%	3,0%

Tabela 2.38 – Projeção do tráfego por tipo de veículos

ANO	AUTOS	ÔNIBUS	CAMINHÃO		REBOQUES E SEMI-REBOQUES						VMD	FROTA COMERC.
			2C	3C	2S2	2S3	3S2	3S3	2C2	2C3		
2004	2501	137	287	335	16	96	2	14	5	14	3406	905
2005	2581	139	292	344	16	99	2	15	5	14	3507	926
2006	2664	141	297	354	17	103	2	16	5	15	3614	950
2007	2749	143	302	364	18	107	2	17	5	16	3723	974
2008	2837	145	307	374	19	111	2	18	5	17	3835	998
2009	2928	147	313	384	20	115	2	19	5	18	3951	1023
2010	3022	149	319	395	21	119	2	20	5	19	4071	1049
2011	3119	151	325	406	22	123	2	21	5	20	4194	1075
2012	3219	153	331	417	23	127	2	22	5	21	4320	1101
2013	3322	155	337	429	24	132	2	23	5	22	4451	1129
2014	3428	157	343	441	25	137	2	24	5	23	4585	1157
2015	3538	160	349	453	26	142	2	25	5	24	4724	1186
TAXA DE CRESCIMENTO LINEAR	3,2% a.a.	1,6% a.a.	1,8% a.a.	2,8% a.a.	3,6% a.a.	3,6% a.a.	3,6% a.a.	3,6% a.a.	3,6% a.a.	3,6% a.a.		

Neste estudo não foram realizadas pesquisas de pesagem de eixos, o que impossibilitou determinar realmente as cargas por eixo que solicitam o pavimento, uma vez que, no dimensionamento tomaram-se os valores dos fatores de veículos indicados pela “lei da balança”.

A carga por eixo, independentemente dos fatores ambientais, do comportamento estrutural dos pavimentos e da ação combinada de outros fatores de tráfego, é a que mais afeta a deterioração dos pavimentos. Pode, muitas vezes, não ser o único fator significativo, mas tem que ser considerada, sempre, quando se tratar dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho dos pavimentos (FERNANDES JR., 1994).

Foram realizadas pesquisas de pesagem de eixos na rodovia BR-101/PE, com balança móvel do DER/PE no segmento: Recife – Cabo de Santo Agostinho, resultando nos fatores de veículos indicados na tabela 2.39. Para a nova projeção do número N, foram adotados os fatores de veículos obtidos na pesquisa citada por ser mais representativa do que os fatores constantes na “Lei da Balança”.

Tabela 2.39 – Fatores de veículos da BR-101/PE (DNIT/PE, 2000)

TIPO DE CAMINHÃO	USACE	AASHTO
2O	2,49	0,37
3O	1,96	0,89
2C	2,08	1,33
3C	11,36	1,64
2S1	7,14	2,31
2S2	4,48	1,96
2S3	6,84	2,52
3S1	12,14	3,92
3S2	25,65	8,22
3S3	22,02	3,73
2C-2-2	27,47	11,81

Segundo SOARES e MOTTA (1998), a determinação do fator de veículo considerando os “eixos individuais” ou o “conjunto de eixos” leva a valores bem diferentes, isto se deve, a falta de clareza nas recomendações na literatura nacional. Sendo assim, os autores advertem, que o fator de eixo deve ser determinado considerando-se o “conjunto de eixos” e não “eixos individuais”. Com base neste critério, foram determinados os fatores de veículos para os tipos comerciais 2C2 e 2C3.

Tabela 2.40 – Fatores de veículos para os tipos comerciais 2C2 e 2C3

DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE VEÍCULOS DE 2C2 E 2C3										
2C2	tf	2C2+7,5%	PARTICIPAÇÃO (%)	FC USACE	FC AASHTO	FCxPARTIC. USACE	FCxPARTIC. AASHTO	CONJUNTO DE EIXOS	FV USACE	FV AASHTO
EIXOS	6	6,45	17	0,372	0,447	6,19	7,46	4	17,48	8,28
	10	10,75	28	5,171	2,394	143,63	66,51			
	10	10,75	28	5,171	2,394	143,63	66,51			
	10	10,75	28	5,171	2,394	143,63	66,51			
TOTAL	36	38,7				4,37	2,07			
2C3	tf	2C3+7,5%	PARTICIPAÇÃO (%)	FC USACE	FC AASHTO	FCxPARTIC. USACE	FCxPARTIC. AASHTO	CONJUNTO DE EIXOS	FV USACE	FV AASHTO
EIXOS	6	6,45	14	0,372	0,447	5,18	6,24	4	29,93	8,21
	10	10,75	23	5,171	2,394	120,25	55,68			
	10	10,75	23	5,171	2,394	120,25	55,68			
	17	18,28	40	12,710	2,216	502,49	87,60			
TOTAL	43	46,23				7,48	2,05			

Segundo PINTO e PREUSSLER (2002), a relação entre o N_{USACE} e N_{AASHTO} é em torno de 4, ou seja, $N_{USACE} = 4xN_{AASHTO}$. Isto se deve, ao fato, do critério de deslocamento vertical na interface pavimento/subleito (USACE) ser mais rigoroso que o da variação de serventia (AASHTO). Observa-se na tabela 2.42, que o número N determinado pela metodologia da AASHTO é cerca de 8 vezes menor que o obtido pela metodologia do USACE. Isto pode ser atribuído aos baixos fatores de veículos obtidos na pesquisa de pesagem de eixos da BR-101/PE (ver tabela 2.37).

Tabela 2.41 – Determinação do número N para um período de projeto de 10 anos

ANO	AUTOS	ÔNIBUS	CAMINHÃO		REBOQUES E SEMI-REBOQUES						VMD	FORTA COMERCIAL	AASHTO			USACE		
			2C	3C	292	293	392	393	2C2	2C3			FVm	ANUAL	ACUMUL.	FVm	ANUAL	ACUMUL.
2006	2664	141	297	354	17	103	2	16	5	15	3614	950	1,64	3.7.10 ⁵	3.7.10 ⁵	7,06	6.9.10 ⁶	6.9.10 ⁶
2007	2749	143	302	364	18	107	2	17	5	16	3723	974	1,65	3.9.10 ⁵	7.6.10 ⁵	7,11	7.2.10 ⁶	7.2.10 ⁶
2008	2837	145	307	374	19	111	2	18	5	17	3835	998	1,66	4.0.10 ⁵	1.2.10 ⁶	7,15	7.5.10 ⁶	7.5.10 ⁶
2009	2928	147	313	384	20	115	2	19	5	18	3951	1023	1,67	4.2.10 ⁵	1.6.10 ⁶	7,19	7.7.10 ⁶	7.7.10 ⁶
2010	3022	149	319	395	21	119	2	20	5	19	4071	1049	1,67	4.3.10 ⁵	2.0.10 ⁶	7,22	8.0.10 ⁶	8.0.10 ⁶
2011	3119	151	325	406	22	123	2	21	5	20	4194	1075	1,68	4.4.10 ⁵	2.5.10 ⁶	7,26	8.3.10 ⁶	8.3.10 ⁶
2012	3219	153	331	417	23	127	2	22	5	21	4320	1101	1,69	4.6.10 ⁵	2.3.10 ⁶	7,29	8.6.10 ⁶	8.6.10 ⁶
2013	3322	155	337	429	24	132	2	23	5	22	4451	1129	1,69	4.7.10 ⁵	3.4.10 ⁶	7,33	8.9.10 ⁶	1.7.10 ⁷
2014	3428	157	343	441	25	137	2	24	5	23	4585	1157	1,70	4.9.10 ⁵	3.9.10 ⁶	7,36	9.2.10 ⁶	2.7.10 ⁷
2015	3538	160	349	453	26	142	2	25	5	24	4724	1186	1,71	5.0.10 ⁵	4.4.10 ⁶	7,39	9.5.10 ⁶	3.6.10 ⁷
AASHTO	-	0,4	1,3	1,6	2,0	2,5	8,2	3,7	8,3	8,2	-	-	Annual = 365x0,5x0,8x FVmx(ônibus+2C+3C+nS)anual					
USACE	-	2,5	2,1	11,4	4,5	6,8	25,7	22,0	17,5	29,9	-	-						

O fator climático (FR) foi considerado como sendo igual a 1,0.

2.8 – Métodos de Dimensionamento de Reforço e Estudo Paramétrico

Neste item, apenas a nível especulativo, será analisado com base nos parâmetros resultantes dos levantamentos e a nova projeção do número N, que espessura de reforço é exigida pelos dois principais métodos de dimensionamento do atual DNIT, o DNER PRO-11/79 (procedimento B)(DNER, 1979) e o DNER PRO-269/94 (DNER, 1994e). Será realizado também, um estudo paramétrico, a fim de indicar uma solução que restabeleça a condição estrutural da estrutura, apresentando uma estimativa de custo por quilômetro de rodovia.

2.8.1 – Dimensionamento da Camada de Reforço

Com base nos estudos realizados serão verificadas quais espessuras são exigidas segundo os dois métodos de dimensionamento de camada de reforço citados no item anterior. Para este estudo, foram considerados apenas os segmentos homogêneos 03, 07, 12 e 19, pelo fato de cada segmento contemplar um furo de sondagem.

Tabela 2.42 – Espessuras de reforço exigidas

ST	DNER PRO-269/94	DNER PRO-11(MÉTODO B)/79
03	6	9
07	8	12
12	3	5
19	17	18

Considerou-se que todas as premissas estabelecidas quanto aos requisitos exigidos em projeto para os tipos de materiais, indicados em termos de resistência e deformabilidade, bem como para o controle de execução dos serviços estejam em conformidade com a norma. Logo podemos tecer as

seguintes indagações com relação as soluções indicadas na tabela 2.43. São elas:

- Na condição estrutural em que se encontra o pavimento a adoção de uma das soluções acima atenderia ao período de projeto pré-estabelecido?;
- Apesar da faixa direita se apresentar menos trincada, deveríamos considerar diferentes soluções?
- Adotar por exemplo geogrelhas ou camadas ante-reflexão de trincas minimizaria o efeito reflexivo das trincas ou as impediria?
- A fresagem de parte do revestimento com adoção de novas espessuras de concreto asfáltico atenderia a vida útil de 10 anos?
- Nas condições estruturais exteriorizadas através do trincamento de superfície e discutidas até então, a adoção de uma camada para a estrutura não exigiria que a mesma fosse dotada de elevada resistência a tração na flexão?
- Que tipo de solução atenderia ao binômio técnico-econômico diante das condições em que se apresenta a estrutura da rodovia BR-230/PB?

Para um comparativo de qual solução é a mais economicamente viável determinamos o VPL das soluções propostas utilizando os valores apresentados no apêndice G. Para determinação do VPL utilizou-se a equação (GARNETT NETO, 2001):

$$V_{PL} = F \cdot \frac{1}{(1+i)^f}$$

Sendo;

V_{PL} – valor presente líquido (R\$)

F – valor futuro (R\$)

i – taxa de juros (6%)

t – período considerado (anos)

Tabela 2.43 – Valores Futuros das intervenções do tipo “conviver com o problema”

	Valor do Serviço (R\$/km)	Valor Futuro de Cada Intervenção (R\$/km)		
		3 anos	6 anos	9 anos
TSD com polímero	118500	141135,40	168094,51	200203,26
Micro revestimento com aplicação de polímero	173000	206045,77	245403,81	292279,86

Tabela 2.44 – VPL das intervenções do tipo “conviver com o problema”

	Valor Presente Líquido de Cada Intervenção (R\$/km)			VPL Total (R\$/km)
	3 anos	6 anos	9 anos	
TSD com polímero	100457,4	85161,9125	72195,30138	257814,601
Micro revestimento com aplicação de polímero	146659,3	124329,206	105399,0476	376387,561

Os valores para as intervenções de reforço estrutural, adiante justificadas, são ilustrados na tabela 2.46, sendo este seu VPL, uma vez que seriam realizados na época de seu levantamento com o objetivo de atingir a vida útil de 10 anos sem intervenções.

Figura 2.45 – Alternativas de restauração do pavimento

SOLUÇÃO	ESPESSURA (cm)	R\$/km
1 - SMA	4,0	581.364,20
2 - Asfalto Borracha	5,0	613.834,83
3 - CBUQ Reciclado a Quente em Usina	10,0	631.521,38

Vemos então que os custos mobilizados para o primeiro tipo de solução são bem menores comparados com a segunda, a qual requereria um custo por quilômetro considerável.

2.8.2 – Estudo Paramétrico

Neste item, é proposta uma solução baseando-se no restabelecimento estrutural do pavimento, através da reciclagem de toda a plataforma das camadas de revestimento e base com incorporação de cimento em peso. Primeiramente, deverá ser removido todo revestimento existente, em seguida, realiza-se a reciclagem da base de brita graduada simples adicionando a percentagem estipulada em laboratório de cimento em peso. Sobre a camada reciclada será executado um TSD com polímero e como capa uma camada de SMA, cujas características estão apresentadas na tabela 2.44, sendo o fator campo-laboratório utilizado para os modelos de fadiga de 10^4 .

Tabela 2.46 – Característica mecânicas da mistura SMA (modificado MOURÃO, 2003)

CARACTERÍSTICAS DA MISTURA DE SMA											
Mistura	Tipo de Ligante	Penetração do CAP	CAP (%)	Teor de Fibra (%)	Densidade Aparente	Vazios (%)	RBV (%)	MR 25°C (kgf/cm ²)	Desvio Padrão	RT 25°C (kgf/cm ²)	Desvio Padrão
1A	CAP 50/60	49	6,5	0,3	2,44	2,8	84,7	22300	2453	7,6	0,76
MÓDELOS DE FADIGA A TENSÃO CONTROLADA											
$N = 12495 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{4,15}$						$N = 5,0510^{-13} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{4,15}$					

A reciclagem da base com incorporação de cimento configura uma base semi-rígida análoga à BGTC (brita graduada tratada com cimento). Preconiza-se a resistência mínima a compressão simples aos 28 dias de 9 MPa. Deverão ser

realizados ensaios de dosagem com diferentes teores de cimento (3%, 4% e 5%), a fim de obter o teor de cimento que possibilite à mistura atender à resistência pré-estabelecida. A camada deverá ser reciclada e compactada na umidade ótima com energia do Proctor modificado. A incorporação do cimento será concomitantemente à passagem da recicladora.

Mostram-se análises paramétricas utilizando os programas FEPAVE2 e ELSYM5. Primeiramente, efetivou-se uma análise não-linear com o programa FEPAVE2, para a estrutura da figura. Não foi considerada na simulação a camada de TSD, apesar de alguns autores atribuírem valores de módulo resiliente para o TSD, como é o caso de MALYSZ et.al. (2004), que realizaram análise paramétrica com o ELSYM5 para uma estrutura cujo módulo de resiliência atribuído para o TSD foi 5.000 kgf/cm^2 e NETO et. al. (2005), que atribuíram 2.000 kgf/cm^2 de módulo de resiliência.

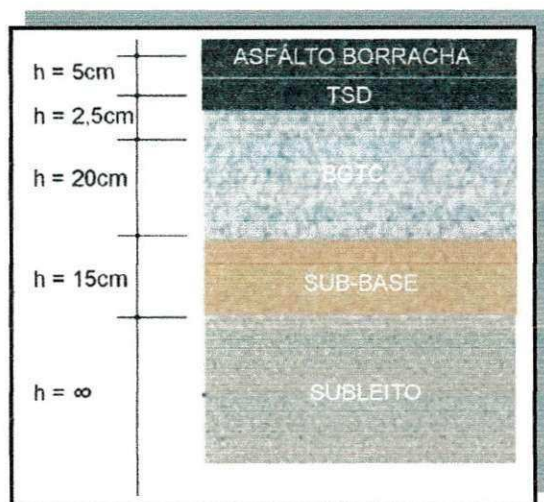


Figura 2.35 – Estrutura considerada na simulação com o programa FEPAVE2

Para a simulação com FEPAVE2 foram considerados os seguintes parâmetros:

- Para o revestimento de SMA considerou-se o módulo resiliência médio obtido por MOURÃO (2003) a diferentes temperaturas no ensaio de resistência a tração por compressão diametral;

- Para BGTC o módulo de elasticidade utilizado foi estimado a partir da resistência a compressão simples requerida aos 7, 28 e 56 dias, utilizando o modelo apresentado na tabela 2.45;
- Para as camadas de sub-base e subleito foram utilizados os módulos de resiliência da tabela 2.24, referentes ao furo 1 (4153-LD) e 4 (5381+15-LE) obtidos em laboratório.

A análise realizada foi desenvolvida de forma determinística, ou seja, não foram consideradas variações nos parâmetros de dimensionamento. Foram simuladas duas situações, onde na primeira utilizaram-se os resultados do furo 1 (4153-FD) e na outra os resultados de furo 4 (5381+15-FE).

Tabela 2.47 – Modelos utilizados para a estimativa do módulo da camada de BGTC

MODELO DE BALBO (1997)		
IDADE DA BGTC	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	MÓDULO DE ELASTICIDADE
(dias)	RCS (MPa)	ME (MPa)
7	8	9964
28	13,25	17158
56	13,68	17613
Média do ME (MPa)		14912
Desvio Padrão (MPa)		4291
Coeficiente de Variação (%)		29
Observação: A brita graduada utilizada é de origem granítica, na faixa B da ABNT e compactada na energia do Proctor modificado e com umidade de compactação de 1,5% abaixo da umidade ótima da BGS. A relação entre a resistência e o módulo de elasticidade é dada por:		
$ME = -6828 + 2539 \times RCS - 55 \times RCS^2$		

A resistência à tração por compressão diametral da BGTC foi estimada com base na relação proposta por BALBO (1997) para amostras com 56 dias de idade.

$$RT = 0,712 + 0,115 \times RCS$$

Sendo:

Rt – resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

RCS – resistência à compressão simples, em MPa.

Logo, a resistência à tração por compressão diametral da BGTC utilizando-se a equação 5.9 para uma resistência à compressão simples de 9,0 MPa, resulta em $RT = 1,75 \text{ MPa}$.

Segundo TRICHÊS (1995), a fadiga de misturas cimentadas obtidas em laboratório são mais severas que as condições verificadas em campo, e uma possível explicação para tal diferença de comportamento é que os modelos de laboratório apenas indicam o momento em que as fissuras (trincas) começam a se formar, ou ainda, que no caso do laboratório, uma única trinca principal se propaga através da amostra levando-a à ruptura. O fator campo laboratório segundo os estudos realizados por DE BEER (1989) apud TRICHÊS (1995), para obter os valores de solicitações para a ruptura por fadiga em campo são cerca de 10^2 a 10^3 vezes maiores do que aqueles previstos em laboratório.

Na tabela 2.49, constam os critérios admissíveis para as camadas de SMA, BGTC e subleito. Para este cálculo o módulo de resiliência do subleito foi considerado 1.000 kgf/cm^2 , pois quando da retroanálise todos os módulos do subleito foram superiores a este valor.

Tabela 2.48 – Critérios admissíveis de dimensionamento

N	CRITÉRIOS ADMISSÍVEIS				
	D ₀	SMA		BGTC	SUBLEITO
		ϵt	$\Delta\sigma$	SR	σ_v
3,6.10 ⁷	(10 ⁻² mm)	10 ⁻⁴ (cm/cm)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)
	27	1,51	13,5	0,48	0,96

Observa-se na tabela 2.50, que todos os critérios admissíveis para o número de solicitações de $3,6 \times 10^7$, foram atendidos.

Tabela 2.49 – Resultados obtidos a partir da simulação com o FEPAVE2

FURO 1 (4152 - FD)				
D ₀	SMA		BGTC	SUBLEITO
	εt	Δσ	σt	σv
(10 ⁻² mm)	10 ⁻⁵ (cm/cm)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)
10,6	-2,1	2,50	-1,6	0,05
FURO 4 (5381+15 - FE)				
D ₀	SMA		BGTC	SUBLEITO
	εt	Δσ	σt	σv
(10 ⁻² mm)	10 ⁻⁵ (cm/cm)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)
15,0	-2,5	2,4	-2,4	0,04

Para simulação com o programa ELSYM5, foram utilizados os módulos de resiliência das camadas de sub-base e subleito obtidos na retroanálise. Simulou-se a aplicação do semi-eixo com duas rodas distanciadas de 30cm e pressão de 5,6 kgf/cm².

O método consiste no cálculo da média e variância dos 2^N valores da variável dependente, sendo que "N" corresponde ao número de variáveis independentes envolvidas na análise. Neste caso, as variáveis independentes são os módulos resilientes das camadas do pavimento e do subleito e as variáveis dependentes os parâmetros resposta de deformabilidade da estrutura. Neste método, as equações utilizadas são:

$$E[Y^M] = 1/2 \cdot (Y^M_{++} + Y^M_{--}), \text{ para } n=1$$

$$E[Y^M] = 1/4 \cdot (Y^M_{+++} + Y^M_{+-} + Y^M_{-+} + Y^M_{---}), \text{ para } n=2$$

$$E[Y^M] = 1/8 \cdot (Y^M_{++++} + Y^M_{++-} + \dots + Y^M_{----}), \text{ para } n=3$$

$$E[Y^M] = 1/2^N \cdot (Y^M_{+++++} + \dots + Y^M_{-----}), \text{ para } N \text{ variáveis, onde a média da variável dependente é igual a } E[Y] \text{ (M=1) e sua variância é igual a } V[Y] = E[Y^2]$$

– $(E[Y]^2)$). Os parâmetros +++, ---- representam as combinações (2^N) considerando o valor médio \pm o desvio padrão para a determinação dos valores médios.

Tabela 2.50 – Módulos de resiliência das camadas e desvio padrão

CAMADA	MR	DEVIO PADRÃO	MR+	MR-
	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)
SMA	22300	2453	24753	19847
BGTC	149115	42907	192022	106208
SUB-BASE	772	475	1247	297
SUBLEITO	2899	876	3776	2023

A tabela 2.51, exemplifica a rotina para a aplicação do método de Rosenblueth.

Tabela 2.51 – Rotina utilizada para a aplicação do método de Rosenblueth

CAMADAS				VALORES DOS MÓDULOS (kgf/cm ²)				CRITÉRIOS			
1	MREV+	MBGTC+	MSB+	MSL+	33130	101182	1261	3776	$\epsilon t++++$	D++++	$\sigma v++++$
2	MREV+	MBGTC+	MSB+	MSL-	33130	101182	1261	2023	$\epsilon t+++-$	D+++-	$\sigma v+++-$
3	MREV+	MBGTC+	MSB-	MSL+	33130	101182	462	3776	$\epsilon t+++$	D+++	$\sigma v+++$
4	MREV+	MBGTC+	MSB-	MSL-	33130	101182	462	2023	$\epsilon t++-$	D++-	$\sigma v++-$
5	MREV+	MBGTC-	MSB+	MSL+	33130	95502	1261	3776	$\epsilon t+-+$	D+-+	$\sigma v+-+$
6	MREV+	MBGTC-	MSB+	MSL-	33130	95502	1261	2023	$\epsilon t+--$	D+--	$\sigma v+--$
7	MREV+	MBGTC-	MSB-	MSL+	33130	95502	462	3776	$\epsilon t-++$	D-++	$\sigma v-++$
8	MREV+	MBGTC-	MSB-	MSL-	33130	95502	462	2023	$\epsilon t-+-$	D-+-	$\sigma v-+-$
9	MREV-	MBGTC+	MSB+	MSL+	25930	101182	1261	3776	$\epsilon t+++$	D+++	$\sigma v+++$
10	MREV-	MBGTC+	MSB+	MSL-	25930	101182	1261	2023	$\epsilon t++-$	D++-	$\sigma v++-$
11	MREV-	MBGTC+	MSB-	MSL+	25930	101182	462	3776	$\epsilon t+-+$	D+-+	$\sigma v+-+$
12	MREV-	MBGTC+	MSB-	MSL-	25930	101182	462	2023	$\epsilon t+--$	D+--	$\sigma v+--$
13	MREV-	MBGTC-	MSB+	MSL+	25930	95502	1261	3776	$\epsilon t-++$	D-++	$\sigma v-++$
14	MREV-	MBGTC-	MSB+	MSL-	25930	95502	1261	2023	$\epsilon t-+-$	D-+-	$\sigma v-+-$
15	MREV-	MBGTC-	MSB-	MSL+	25930	95502	462	3776	$\epsilon t---+$	D---+	$\sigma v---+$
16	MREV-	MBGTC-	MSB-	MSL-	25930	95502	462	2023	$\epsilon t----$	D----	$\sigma v----$

Tabela 2.52 – Parâmetros resposta obtidos com aplicação do método de Rosenblueth

DEFLEXÃO (0,01mm)		DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DE TRAÇÃO (cm/cm)				TENSÃO VERTICAL (kgf/cm ²)		
		ϵ_t (REVEST.)	ϵ_t (REVEST.)	σ_t (BGTC)	σ_t (BGTC)	σ_v (SUBLEITO)	σ_v (SUBLEITO)	
M = 1	M = 2	M = 1	M = 2	M = 1	M = 2	M = 1	M = 2	
86	$7,4 \cdot 10^1$	$2,1 \cdot 10^0$	$7,29 \cdot 10^0$	7,8	60,94	0,24	0,06	
12,2	$1,49 \cdot 10^2$	$3,00 \cdot 10^0$	$9,00 \cdot 10^0$	8,6	73,96	0,19	0,04	
11	$1,21 \cdot 10^2$	$3,20 \cdot 10^0$	$1,02 \cdot 10^1$	9,2	84,64	0,16	0,03	
14	$1,96 \cdot 10^2$	$3,30 \cdot 10^0$	$1,09 \cdot 10^1$	9,6	92,16	0,14	0,02	
10	$1,00 \cdot 10^2$	$3,80 \cdot 10^0$	$1,44 \cdot 10^1$	6,5	42,25	0,31	0,10	
14,5	$2,1 \cdot 10^2$	$4,30 \cdot 10^0$	$1,85 \cdot 10^1$	7,2	51,94	0,25	0,06	
13,9	$1,93 \cdot 10^2$	$4,60 \cdot 10^0$	$2,12 \cdot 10^1$	7,9	62,41	0,22	0,05	
17,5	$3,06 \cdot 10^2$	$3,80 \cdot 10^0$	$1,44 \cdot 10^1$	8,3	68,89	0,19	0,04	
8,7	$7,57 \cdot 10^1$	$2,80 \cdot 10^0$	$7,84 \cdot 10^0$	7,9	62,41	0,25	0,06	
12,3	$1,51 \cdot 10^2$	$3,10 \cdot 10^0$	$9,61 \cdot 10^0$	8,6	73,96	0,19	0,04	
11	$1,21 \cdot 10^2$	$3,30 \cdot 10^0$	$1,09 \cdot 10^1$	9,3	86,49	0,17	0,03	
14	$1,96 \cdot 10^2$	$3,40 \cdot 10^0$	$1,16 \cdot 10^1$	9,7	94,09	0,14	0,02	
10	$1,00 \cdot 10^2$	$4,00 \cdot 10^0$	$1,60 \cdot 10^1$	6,6	43,56	0,32	0,10	
14,7	$2,16 \cdot 10^2$	$4,50 \cdot 10^0$	$2,03 \cdot 10^1$	7,3	53,29	0,26	0,07	
14	$1,96 \cdot 10^2$	$4,80 \cdot 10^0$	$2,30 \cdot 10^1$	8,0	64,00	0,22	0,05	
17,7	$3,13 \cdot 10^2$	$5,10 \cdot 10^0$	$2,60 \cdot 10^1$	8,4	70,56	0,19	0,04	
Σ	$2,04 \cdot 10^2$	$2,72 \cdot 10^3$	$5,97 \cdot 10^1$	$2,31 \cdot 10^1$	$1,31 \cdot 10^2$	$1,09 \cdot 10^3$	3,44	0,78
E[ϵ_t]	12,8	-	$3,73 \cdot 10^0$	-	$8,18 \cdot 10^0$	-	0,22	-
E[ϵ_t^2]	-	169,93	-	$1,44 \cdot 10^1$	-	$6,78 \cdot 10^1$	-	0,05
V[ϵ_t]	7,21		$5,25 \cdot 10^1$		$9,02 \cdot 10^1$		$2,80 \cdot 10^{-3}$	
$\sigma[\epsilon_t]$	2,68		$7,24 \cdot 10^1$		$9,49 \cdot 10^1$		$5,00 \cdot 10^{-2}$	
CV[ϵ_t]	21,05		19,41		11,61		24,39	

A última etapa da análise consiste em determinar qual o nível de confiabilidade deste dimensionamento, ou seja, a probabilidade de sucesso do mesmo. Neste estudo, ele é traduzido pela probabilidade das variáveis dependentes apresentarem valores menores que os critérios admissíveis. A determinação destas probabilidades foi feita utilizando-se as tabelas de distribuição normal.

$$p(x \leq x_{\text{admissível}}) = \Phi \left[\frac{x_{\text{admissível}} - \mu_x}{\sigma_x} \right]$$

Sendo:

X – parâmetro em análise;

X_{admissível} – limite de aceitação;

μ_x – média do parâmetro analisado;

σ_x – desvio padrão do parâmetro analisado.

Para a deflexão no topo do revestimento, temos:

$$p(\omega \leq 27 \times 10^{-2}) = \Phi \left[\frac{27 \times 10^{-2} - 12,8 \times 10^{-2}}{2,68 \times 10^{-2}} \right] = \Phi[5,3]$$

Pela tabela de distribuição normal (SPIEGEL, 1977), temos que $p(D_0 \leq 27 \times 10^{-2}) = 100\%$

Para a camada de BGTC, temos:

$$p(\sigma_t \leq 13 \text{kgf/cm}^2) = \Phi \left[\frac{10,83 - 8,18}{0,95} \right] = \Phi[2,7884]$$

Pela tabela de distribuição normal (SPIEGEL, 1977), temos que $p(\sigma_t \leq 13 \text{kgf/cm}^2) = 99,7\%$

Para o subleito, temos:

$$p(\sigma_v \leq 0,96 \text{ kgf/cm}^2) = \Phi \left[\frac{0,96 - 0,22}{0,05} \right] = \Phi [14,8]$$

Pela tabela de distribuição normal (SPIEGEL, 1977), temos que $p(\sigma_v \leq 0,9613 \text{ kgf/cm}^2) = 100\%$.

Tabela 2.53 – Níveis de confiabilidade recomendados pela AASHTO (MEDINA, 1997)

CLASSE FUNCIONAL	ZONA URBANA	ZONA RURAL
INTERESTADUAL	85 a 99,9	80 a 99,9
ARTÉRIA PRINCIPAL	80 a 99	75 a 99
COLETIVA	80 a 95	75 a 95
VICINAL	50 a 80	50 a 80

Como neste caso se trata de uma rodovia interestadual, localizada em zona rural, a confiabilidade deve estar entre 80 a 99,9%. Uma vez que, os níveis de confiabilidade obtidos foram superiores a 80%, em todos os critérios analisados, pode-se concluir que a estrutura atenderá de forma adequada.

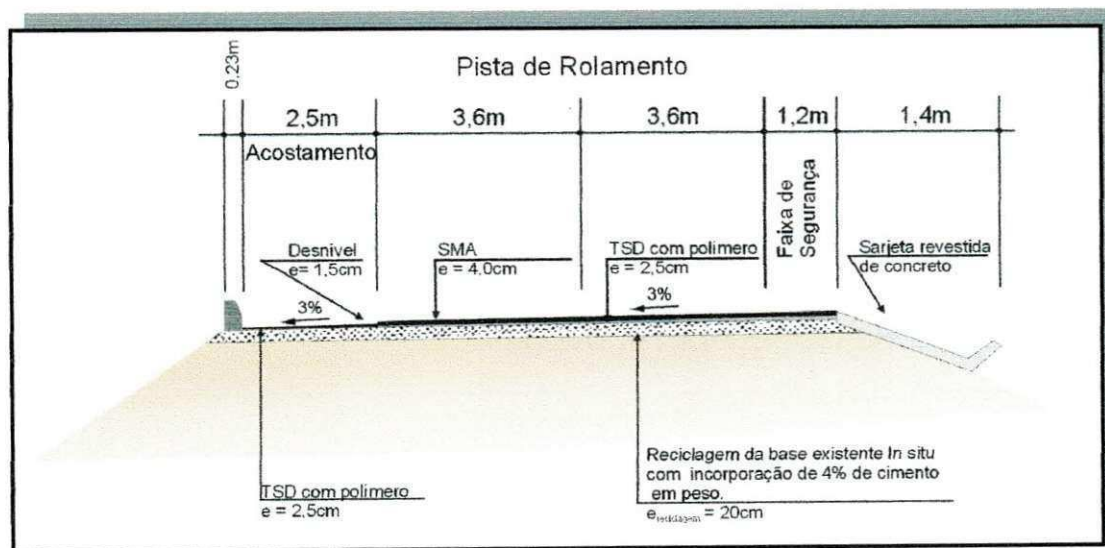


Figura 2.36 – Seção transversal ilustrativa da solução paramétrica estudada

Na tabela 2.45, são apresentados os custos por quilômetro de algumas alternativas de restauração do pavimento. As soluções apresentadas na tabela 2.45, apenas divergem quanto ao tipo de revestimento adotado, pois em todos foi levado em consideração que a base será composta de BGTC. Nos custos apresentados na solução 1 e 2 já estão inclusos o transporte e a aquisição de materiais betuminosos e considerando um BDI de 32,68%.

Segundo CASTRO (2003), a reciclagem a quente em larga escala envolve a utilização de material com uma dispersão de características muito elevada quando comparada ao processamento de mistura a quente convencional nova em usina. Assim sendo, os projetos de reciclagem a quente em usina exigem cuidadosa avaliação do pavimento, rigorosa caracterização dos materiais em laboratório e rígido controle do processo de produção para que se garanta a qualidade do material reciclado. No que diz respeito à técnica de reciclagem dos materiais fresados em usinas fixas, duas opções se apresentam: a utilização de usinas gravimétricas ou "Drum Mixer", ambas também de aplicação usual em obras de pavimentação e restauração de rodovias.

É importante salientar que, esta análise é apenas de um estudo paramétrico, devendo ser realizados ensaios laboratoriais, a fim de obter parâmetros mais realistas para a camada da base reciclada em termos de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral, como também, modelos de fadiga. É imprescindível a realização de um adequado controle de qualidade dos serviços executados para garantir um desempenho satisfatório da estrutura. Segundo TRICHÊS (2004), somente a partir da década de 1990 do que algumas especificações construtivas, então editadas, começaram a contemplar o controle deflectométrico das camadas durante o processo construtivo, como um dos parâmetros a serem verificados para a aceitação e liberação do serviço executado. O autor salienta ainda que, tal preocupação teve respaldo na constatação de que muitas rodovias brasileiras, embora não externem problemas de ruptura plástica, têm apresentado um trincamento precoce do revestimento, o qual tem sido associado ao elevado nível deflectométrico da estrutura.

Portanto, fica registrado que alguma medida deva ser tomada, antes que os defeitos se tornem ainda mais severos e só reste uma solução do tipo intervenção de restauração da rodovia.

CAPÍTULO III

CONCLUSÕES

- Com base nos resultados obtidos pode-se inferir a seguinte premissa: que a incompatibilidade de rigidez da base com o revestimento frente ao número de solicitações na qual a estrutura esteve submetida foi um dos fatores que culminaram no trincamento prematuro do revestimento.
- As medidas de deflexões com a viga Benkelman foram, em geral, maiores do as obtidas com o FWD. A faixa direita apresentou uma menor dispersão nas deflexões medidas, tendo em vista, a menor quantidade de defeitos existentes nesta faixa.
- Os levantamentos dos defeitos de superfície indicaram que todos os segmentos homogêneos para ambas as faixas de tráfego, excetuando o SH-19(FE), apresentam conceito variado de regular a ótimo.
- A relação entre os parâmetros da bacia (Área, ICS, ICB e IDB) e os módulos de retroanalizados mostram uma pobre relação entre os parâmetros, devendo os parâmetros das bacias ser utilizados apenas como fator “especulativo” das condições estruturais do pavimento/subleito, não devendo ser utilizado em nível de projeto.
- A retroanálise dos módulos de resiliência mostrou que a camada de base constituída de brita graduada simples apresentou módulos bastante baixos corroborando com os valores normalmente encontrados para este tipo de material em outras estruturas de pavimentos flexíveis nacionais.

- Verificou-se que as camadas de base e sub-base são demasiadamente resilientes contribuindo em média com mais de 65% na deflexão total seguida do subleito com mais de 25% para ambas as faixas de tráfego.
- Os módulos do subleito obtidos pelo EVERCALC5 foram os que mais se aproximaram do modelo proposto pela AASHTO (1993) para a obtenção rápida e precisa do módulo do subleito.
- Os melhores ajustes entre a bacia medida e recalculada com o programa ELSYM5 foram obtidos com os módulos da retroanálise feita com os programas EVERCALC5 e RETROANA.
- Os resultados da simulação realizada com o FEPAVE2 a partir dos resultados dos ensaios realizados com o material de jazida permite concluir que: o pequeno coeficiente de variação nos parâmetros resposta de deformabilidade para a camada de binder é um indicativo de que a variação no teor de umidade da camada de BGS não é o fator preponderante no comportamento estrutural do pavimento, e sim, a diferença de rigidez desta em relação a camada de binder, bem como, nos valores de módulos encontrados na retroanálise para as camadas supracitadas. No que concerne ao critério de confiabilidade constatou-se que a camada de ligação quanto à deformação específica de tração atenderia o nível de confiança de 95% para um número N de $9,9 \times 10^6$. Porém, para a diferença de tensões atenderia a um número N de até 2×10^7 . Isto devido ao material constituinte da base que compromete o funcionamento estrutural do pavimento.
- A pesquisa volumétrica classificatória realizada em 2004, comparada com a projeção do projeto para o mesmo ano, mostrou-se bastante coerente, com exceção do percentual de caminhão pesado que foi praticamente duas vezes menor que o projetado.
- As espessuras de reforço requeridas pelos métodos DNER PRO-11 e DNER PRO-269, talvez não atenderia a uma vida útil de 10 anos, em

face, as condições estruturais em que se encontram as camadas de base e sub-base.

- Foram discutidas soluções com base na "convivência com o problema" e com base no restabelecimento estrutural, através de um estudo paramétrico realizado com os programas FEPAVE2 e ELSYM5, foi proposta uma solução de reciclagem da base existente com incorporação de cimento em peso, porcentagem determinada em laboratório, que proporcione atender aos critérios admissíveis para o novo número N projetado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER/ME 24. **Determinação das deflexões no pavimento pela viga benkelman; Método de ensaio**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT/ME 055. **Pavimento rígido – Prova de carga estática para determinação do coeficiente de recalque de subleito e sub-base em projeto e avaliação de pavimentos; Método de Ensaio**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004. 6p.

DNER-ES 303/97 - Base estabilizada granulometricamente.

DNER-ME 035/98. Agregados. Determinação da abrasão. Los Angeles..

DNER-ME 083/98. Agregados. Análise granulométrica.

DNER-ME 131/94. Solos. Determinação do módulo de Resiliencia.

DNER-ME 162/94 - Solos. Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas.

MACÊDO, J. A. G., 1996. Interpretação de Ensaios Deflectométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis- A Experiência com FWD no Brasil., Tese de D.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

OLIVEIRA, J. C. **Estudo do comportamento de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis.** Dissertação de Doutorado em Geotecnia da Universidade de Brasília (em conclusão). Brasília, 2007.

SOUZA JUNIOR, J.D. – O efeito da energia de compactação em propriedades dos solos utilizados na pavimentação do estado do ceará, Tese de M.Sc, Programa de Mestrado em Engenharia de Transporte/UFCE, 2005.