

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**USO DO MEDINA EM SOLUÇÕES BÁSICAS DE
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO DISTRITO FEDERAL**

ANDRÉ RODRIGUES

**ORIENTADOR: PROF. MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD
COORIENTADOR: PROF. RAFAEL CERQUEIRA DA SILVA, DSc.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

**PUBLICAÇÃO: G.DM-386/2023
BRASÍLIA-DF: JANEIRO 2023**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**USO DO MEDINA EM SOLUÇÕES BÁSICAS DE
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO DISTRITO FEDERAL**

ANDRÉ RODRIGUES

DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre.

APROVADA POR:

MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD. (UnB)
(ORIENTADOR)

RAFAEL CERQUEIRA DA SILVA, DSc (UnB)
(COORIENTADOR)

MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

MARCOS ANTONIO FRITZEN, DSc. (COPPE/UFRJ)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 27 DE JANEIRO DE 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

RODRIGUES, ANDRÉ.

Uso do MeDiNa em soluções básicas de pavimentos asfálticos no Distrito Federal. [Distrito Federal] 2023

xiv, 189 p., 210X297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2023)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Palavras chaves:

- | | |
|--------------------------|--------------------------------|
| 1. Pavimentação | 2. Método Mecanístico-Empírico |
| 3. Dimensionamento | 4. Distrito Federal |
| 5. Controle de Qualidade | 6. MeDiNa |
| I. ENC/FT/UnB | II. Mestre |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RODRIGUES, A. (2023) Uso do MeDiNa em soluções básicas de pavimentos asfálticos no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 189 p.

CESSÃO DE CRÉDITOS

NOME DO AUTOR: André Rodrigues

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Uso do MeDiNa em soluções básicas de pavimentos asfálticos no Distrito Federal.

GRAU/ANO: Mestre/2023

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

André Rodrigues

Universidade de Brasília, Secretaria da Coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Prédio SG-12, Universidade de Brasília. CEP 70910-900 – Brasília, DF – Brasil

andrerodrigues2@yahoo.com.br

“A vida é muito curta e ansiosa para aqueles que esquecem o passado, negligenciam o presente e temem o futuro.”

Sêneca

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Antônio Cesar Rodrigues e Maria Lucy Albino Rodrigues

A minha esposa Ana Carolina Sapucaia Vinhas

Ao meu filho Luiz Felipe Vinhas Rodrigues

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelas oportunidades e ensinamentos ofertados.

A Ana Carolina, minha esposa, que me incentivou durante toda a execução do trabalho e acreditou em mim.

Ao Professor Marcio Muniz, agradeço a oportunidade de ser seu orientando, paciência, confiança e respeito.

Ao Professor Rafael Cerqueira pelas boas conversas, pela ajuda em momentos de dificuldades, pela disponibilização de material de consulta e pesquisa, e por acreditar no meu trabalho.

Aos Professores André Brasil, Gregório Araújo e Michelle Dal Toé, pelos incentivos e apoio durante o curso.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília pela oportunidade de realização desta pesquisa, e aos professores pelos conhecimentos transmitidos.

Aos meus amigos e colegas que participaram, de alguma forma, desta minha caminhada, em especial, a Mateus Bezerra, Lucas Leandro e Gisandra Faria.

Por fim, muito obrigado as pessoas que não citei, mas que, contribuíram com esta pesquisa.

Uso do MeDiNa em soluções básicas de pavimentos asfálticos no Distrito Federal

André Rodrigues

RESUMO

O programa computacional MeDiNa permite a verificação e o dimensionamento mecanístico empírico de estruturas de pavimentos asfálticos por meio da aplicação da teoria das múltiplas camadas elásticas. Dentre as suas funcionalidades está a obtenção de parâmetros de deformabilidade dos materiais das camadas, que permitem avaliar o comportamento de pavimentos existentes por meio de retroanálise de bacias deflectométricas. Diante disso, o objetivo do presente estudo foi avaliar inicialmente a consistência dos módulos de resiliência obtidos pelo programa, bem como a aderência da simulação da vida útil do pavimento às condições observadas em campo. Para tanto, utilizou-se conjunto dados de coletados em 8 (oito) Unidades de Amostragem (segmentos homogêneos com 1 km de extensão) distintas do DNIT, localizadas na região próxima ao Distrito Federal, incluindo o tráfego característico, o Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI), o percentual de área trincada do pavimento, informações de espessura e caracterização física de suas camadas obtidas por meio de poços de inspeção, assim como dados de bacias deflectométricas medidos por equipamento FWD. Após a verificação da hipótese de que a Função de Transferência do programa oferece condições de uso para a região, uma segunda etapa fora estabelecida. Essa etapa consiste em apresentar diretrizes, baseadas em níveis de precisão, para o melhor aproveitamento do MeDiNa em projetos de pavimentação asfáltica, bem como na sua utilização para controle de qualidade estrutural desses pavimentos, já que a ferramenta possui modelo de previsão de vida útil baseada em critérios de ruptura por fadiga e deformações permanentes, que refletem em trincamento no revestimento asfáltico e afundamento de trilha de roda.

Use of MediNa in basic asphalt pavement solutions in the Federal District

ABSTRACT

The computational program MeDiNa allows the verification and empirical mechanistic design of asphalt pavement structures through the application of the theory of multiple elastic layers. Among its functionalities is obtaining parameters of deformability of layer materials, which allow evaluating the behavior of existing pavements by means of retroanalysis of deflection basins. Therefore, the objective of the present study was to initially evaluate the consistency of the resilience modules obtained by the program, as well as the adherence of the simulation of the pavement service life to the conditions observed in the field. For that, a set of data collected in 8 (eight) Sampling Units (homogeneous segments with 1 km in length) different from the DNIT, located in the region close to the Federal District, including the characteristic traffic, the Longitudinal Irregularity Index (IRI), the percentage of cracked area of the pavement, thickness information and physical characterization of its layers obtained through inspection wells, as well as data from deflection basins measured by FWD equipment. After verifying the hypothesis that the Transfer Function of the program offers conditions of use for the region, a second stage was established. This stage consists of presenting guidelines, based on precision levels, for the best use of MeDiNa in asphalt paving projects, as well as its use for structural quality control of these pavements, since the tool has a useful life forecast model based on criteria of rupture due to fatigue and permanent deformations, which reflect in cracking in the asphalt coating and sinking of the wheel track.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Identificação do problema	2
1.2	Justificativa	5
1.3	Objetivos	9
1.4	Metodologia	10
1.5	Organização do trabalho	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	Comportamento e desempenho esperado das estruturas dos pavimentos asfálticos	17
3.2	Tensão e Deformação	19
3.3	Deformações Recuperáveis	21
3.4	Deformações Permanentes	22
3.5	Módulo de Resiliência	25
3.6	Deflexão	28
3.7	Bacias Deflectométricas	29
3.8	Segmento Homogêneo	36
3.9	Tráfego	37
3.10	Avaliação de pavimentos asfálticos	39
3.11	Métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos adotados no Brasil	46
3.12	Retroanálise	48
3.13	Programas de Análise de Tensões e Deformações	53
4	APRESENTAÇÃO DO MODELO DE CÁLCULO ADOTADO	57
4.1	Hipóteses adotadas	58
4.2	Calibração e validação – Função de Transferência	61
4.3	Módulo de Resiliência	65
4.4	Deformação Permanente	66
4.5	Dano de Fadiga	67
4.6	Flow Number	68
4.7	Fator de fadiga da mistura	69
4.8	Classes de fadiga da mistura	70
5	OBJETO DE ESTUDO	72
5.1	Características das rodovias estudadas	73
5.2	Ensaio realizados nos trechos estudados	76
5.3	Retroanálise e validação do uso de parâmetros representativos por meio de análise probabilística	86

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	90
6.1 Obtenção de parâmetros representativos	91
6.2 Verificação do modelo numérico	100
6.2.1 Avaliação da contribuição relativa de cada camada do pavimento na deflexão total .	107
6.2.2 Considerações sobre materiais empregados nas estruturas avaliadas	112
7 PROPOSTA DE DIRETRIZES PARA USO DO MEDINA NO DF – ESTUDO DE CASO ..	124
7.1 Uso do MeDiNa em dimensionamento de pavimentos para região do Distrito Federal e entorno	124
7.2 Uso do MeDiNa com ferramenta de auxílio ao controle de qualidade estrutural de pavimentos	125
7.3 Estudo de Caso	126
8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	136
8.1 Sugestões para pesquisas futuras	139
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140
APÊNDICE A	146
APÊNDICE B	154
ANEXOS	161
Anexo I – Parâmetros da Unidade de Amostragem 34	161
Anexo II – Parâmetros da Unidade de Amostragem 36	166
Anexo III – Parâmetros da Unidade de Amostragem 39	171
Anexo IV – Parâmetros da Unidade de Amostragem 40	176
Anexo V – Parâmetros da Unidade de Amostragem 41	181
Anexo VI – Parâmetros da Unidade de Amostragem 42	186
Anexo VII – Parâmetros da Unidade de Amostragem 43	191
Anexo VIII – Parâmetros da Unidade de Amostragem 44	196

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1- Faixa do parâmetro AREA	35
Tabela 3.2 - Limite legal de carga por eixo	38
Tabela 3.3 – Comparação entre equipamentos FWD utilizados no Brasil	43
Tabela 3.4 - Características dos programas de retroanálise	50
Tabela 4.1– Condição de aderência	61
Tabela 4.2 – Condição de comportamento do MR	66
Tabela 4.3 - Limites das classes de desempenho das misturas asfálticas quanto à deformação permanente	68
Tabela 5.1– Parâmetros levantados em campo das Unidades de Amostragem utilizadas no presente estudo	76
Tabela 5.2– Comparação evolutiva – irregularidade longitudinal	77
Tabela 5.3 – Comparação evolutiva – área total de trincas.....	78
Tabela 5.4 – Comparação evolutiva – área total de trincas largas (FC-2 e FC3).....	79
Tabela 5.5 – Comparação evolutiva – afundamento na trilha de roda	79
Tabela 5.6 – Valores das medições de deflexões	81
Tabela 5.7 – Localização dos pontos de ensaio	82
Tabela 5.8– Dados climáticos dos 40 dias que antecederam levantamentos deflectométricos	82
Tabela 5.9 - Comparação evolutiva – tráfego	85
Tabela 5.10 – Teste de normalidade dos parâmetros analisados - excluindo os outliers	88
Tabela 5.11– Teste de correlação de Pearson (amostra de 2013).....	88
Tabela 6.1– Valores médios das bacias deflectométricas e dos coeficientes de variação da amostra.....	91
Tabela 6.2 – Valores de parâmetros de bacia deflectométrica, com respectivos coeficientes de variação da amostra	93
Tabela 6.3 – Valores de referência para materiais empregados na estrutura do pavimento das UA avaliadas	96
Tabela 6.4 – Valores dos módulos de resiliência, com respectivas raízes do valor quadrático médio da amostra	96
Tabela 6.5 – Parâmetros médios das UA analisadas	97
Tabela 6.6– Classificação da condição estrutural de acordo com os PBDs e módulos retroanalisados	99
Tabela 6.7– Valores médios das bacias deflectométricas calculadas para 2013	101
Tabela 6.8 – Parâmetros de desempenho dos pavimentos - calculados e medidos (2013-2017)	101
Tabela 6.9 – Intervenções realizadas nas UA avaliadas	103
Tabela 6.10 – Parâmetros dos materiais usados para revestimento asfáltico	104
Tabela 6.11 – Módulos de resiliência para base e subleito	112
Tabela 6.12 – Parâmetros de referência de materiais para base e subleito oriundos de pesquisa bibliográfica	113
Tabela 6.13– Parâmetros de desempenho dos pavimentos - calculados e medidos (2017) a partir de parâmetros oriundos de pesquisa bibliográfica e retroanálise	114
Tabela 6.14– Valores médios das bacias deflectométricas calculadas para 2013	117
Tabela 6.15 – Cálculo do erro absoluto médio das simulações de desempenho do pavimento a partir de módulos de resiliência obtidos por retroanálise	118
Tabela 6.16 – Cálculo do erro absoluto médio da simulação de desempenho do pavimento a partir de valores de módulos de resiliência obtidos em pesquisa bibliográfica	119
Tabela 6.17 – Cálculo do erro relativo médio da simulação de desempenho do pavimento a partir de módulos de resiliência obtidos por retroanálise	120
Tabela 6.18 – Cálculo do erro relativo médio da simulação de desempenho do pavimento a partir de valores de módulos de resiliência obtidos em pesquisa bibliográfica.....	121
Tabela 7.1 – Resumo dos resultados da avaliação estrutural e funcional do segmento analisado	127
Tabela 7.2 – Parâmetros dos materiais usados para subleito e base	130
Tabela 7.3– Parâmetros dos materiais usados para revestimento asfáltico (MeDiNa).....	131
Tabela 7.4 – Relação custo-benefício de soluções de reforço estudadas (SICRO, 2021)	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Esforços em camadas do pavimento	18
Figura 3.2 - Esquema representativo das tensões, deformações e deslocamentos na estrutura do pavimento, em pontos críticos	20
Figura 3.3 – Deformação plástica acumulada em relação ao número de ciclos aplicações de carga ...	23
Figura 3.4 – Taxa de Acréscimo de deformação plástica em relação a deformação plástica acumulada	24
Figura 3.5 - Representação de Módulo de Resiliência de camadas estabilizadas com cimento	28
Figura 3.6 – Representação gráfica de bacia deflectométrica gerada a partir da passagem da roda de um veículo no pavimento	29
Figura 3.7 – Exemplos de bacia deflectométrica com mesma deflexão máxima e de comportamentos distintos	30
Figura 3.8– Formas assumidas pelas bacias deflectométricas em função da caracterização das camadas do pavimento	32
Figura 3.9 - Representação de bacia deflectométrica medida por FWD	43
Figura 4.1 - Parâmetros de entrada para construção/reconstrução do pavimento no MeDiNa	59
Figura 4.2 - Parâmetros de entrada para restauração/recuperação do pavimento no MeDiNa.....	60
Figura 4.3 – Curva Sigmoide	63
Figura 4.4 – Atualização da Função de Transferência proposta por Fritzen (2016)	64
Figura 4.5 – Curva de erro da Função de Transferência proposta por Fritzen (2016)	64
Figura 4.6 – Pontos de cálculo para deformação permanente	67
Figura 4.7– Curva de deformação de tração de misturas asfálticas em relação a número de repetições de eixo padrão	70
Figura 4.8 – Curvas de classes de fadiga de misturas asfálticas	71
Figura 5.1 - Solos do Distrito Federal	72
Figura 5.2 – Distribuição Geográfica das Unidades de Amostragem utilizadas no presente estudo ...	74
Figura 5.3 – Fotografias das Unidades de Amostragem utilizadas no presente estudo	75
Figura 5.4 – Execução do Levantamento de Irregularidade	77
Figura 5.5 – Execução do Levantamento Visual Detalhado	78
Figura 5.6 – Medição do Afundamento na Trilha de Roda	79
Figura 5.7 – Execução do Levantamento Deflectométrico	80
Figura 5.8 – Execução da Contagem Manual do Tráfego	83
Figura 5.9 – Execução da Contagem Automática do Tráfego	84
Figura 6.1- Correlação entre as bacias deflectométricas calculadas e medidas para o ano de 2013 ...	100
Figura 6.2 - Parâmetros de desempenho dos pavimentos - calculados e medidos (2013-2017)	102
Figura 6.3 – Área trincada pelo MeDiNA, método das áreas, monitoramento (real).....	106
Figura 6.4 – Formas das Bacias de Deflexão Calculadas.....	108
Figura 6.5 – Formas das Bacias de Deflexão Calculadas UA 36 e 41	108
Figura 6.6 – Formas das Bacias de Deflexão Calculadas UA 39,40, 43 e 44	109
Figura 6.7 – Formas das Bacias de Deflexão Calculadas UA 41, 42, 43 e 44	110
Figura 6.8 – Formas das Bacias de Deflexão Calculadas UA 39, 40 e 41	111
Figura 6.9 – Parâmetros de desempenho dos pavimentos - calculados e medidos (2017) a partir de parâmetros oriundos de pesquisa bibliográfica e retroanálise.....	115
Figura 6.10 - Correlação entre as bacias deflectométricas calculadas e medidas para o ano de 2013	117
Figura 7.1- Estrutura do pavimento do segmento avaliado.....	127
Figura 7.2– Nova Estrutura das faixas 1 e 2 do segmento avaliado.....	129
Figura 7.3– Nova Estrutura da faixa 3 do segmento avaliado.....	129

LISTA DE SÍMBOLOS NOMECLATURA E ABREVIACÕES

AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
ABPv	Associação Brasileira de Pavimentação
<i>apud.</i>	Citado por
AT_{MA}	Área trincada calculada pelo método das áreas;
AT_{MC}	Área trincada calculada pelo método das células (calculada pelo MeDiNa);
ATR	Afundamento na trilha de roda
BCI	Índice de curvatura da base
BDI	Índice de danos à base
C1, C2	Constantes de calibração
$P_{\text{DadosOrigem}}$	Coefficiente de precisão atribuído aos dados de origem de parâmetros dos materiais
$P_{\text{simulação}}$	Coefficiente de precisão atribuído ao projeto simulado
C_{TipoVia}	Coefficiente de confiabilidade atribuído ao tipo de via
CAP	Concreto Asfáltico de Petróleo
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional de Transporte
cm	Centímetro
CV	Coefficiente de variação
CV_{MedioAT}	Coefficiente de variação médio da área trincada calculada e medida;
CV_{MedioATR}	Coefficiente de variação médio do afundamento na trilha de roda calculado e medido;
CV_{MedioDo}	Coefficiente de variação médio da deflexão máxima calculada e medida;
D_{adm}	Deflexão Admissível
D_c	Deflexão Característica
$d_{\text{calc.i}}$	Deflexão calculada no sensor i;
DER/DF	Departamento de Estradas de Rodagem do DF
DF	Distrito Federal
$d_{\text{med.i}}$	Deflexão medida em campo no sensor i.
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DN	Índice de penetração
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
D_0	Deflexão máxima recuperável
D_i	Deflexão recuperável à distância i do ponto de aplicação da carga
D_p	Deflexão característica de projeto
E_0	Módulo elástico inicial
E	Módulo elástico sob o invariante de tensão
<i>et al.</i>	E outros
FC	Fator de correlação.
fS	Fator de deslocamento atribuído
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
GO	Goiás
HDM	<i>Highway Design and Management</i>
Hr	Espessura da camada de revestimento
Hb	Espessura da camada de base
Hsb	Espessura da camada de sub-base
IGG	Índice de Gravidade Global
IGGE	Índice de Gravidade Global Expedito
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviária
IRI	<i>International Roughness Index</i>

LVC	Levantamento Visual Contínuo
km/h	Quilômetro por hora
$k1, k2, k3$	Constantes determinadas experimentalmente
kPa	Quilo Pascal
$K0$	Coefficiente de empuxo no repouso
mm	Milímetro
m	Metro
MPa	Mega Pascal
MR	Módulo de resiliência
Mr_{rev}	Módulo de resiliência da camada de revestimento
Mr_{base}	Módulo de resiliência da camada de base
Mr_{sub}	Módulo de resiliência da camada de subleito
n	Número de pontos de deflexão na bacia ou número de sensores do FDW;
N	Número de repetições do eixo padrão
N'	Número N ajustado;
N_{fad}	Número de repetições de carga necessárias à ruptura do corpo de prova
NOVACAP	Companhia Urbanizadora da Nova Capital
RC	Raio de curvatura
RCD	Agregado de resíduo de construção e demolição
RF	Razão entre a tensão de tração aplicada (σt) e a resistência à tração à ruptura estática do material (σr)
RMS	<i>Root Mean Square</i> (raiz do valor quadrático)
SCI	Índice de curvatura da superfície
SP	São Paulo
UA	Unidade de Amostragem
UnB	Universidade de Brasília
USACE	<i>United States Army Corps of Enginners</i>
VMD	Volume Médio Diário
VMDa	Volume Médio Diário Anual
VMDc	Volume Médio Diário Comercial
%	Porcento
σ	Tensão atuante
$\sigma 0$	Tensão inicial
$\sigma 1$	Tensão no subleito
σt	Tensão de tração na fibra inferior do revestimento
$\sigma 3$	Tensão confinante
σd	Tensão de desvio variável
p_0	Tensão de referência (tensão atmosférica)
ε_p	Deformação permanente
ε	Deformação resiliente axial (vertical)
ε_t	Deformação resiliente de tração;
θ	Soma das tensões principais
ν	Coefficiente de Poisson
$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$	Parâmetros de regressão do modelo de deformação permanente

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

O Tema da dissertação de Mestrado é parte da linha de pesquisa “Geotecnia Experimental”, desenvolvida pelo Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Geotecnia da UnB, com ênfase no estudo de misturas asfálticas. O presente estudo tem como objetivo apresentar propostas de roteiros para tratar de dois aspectos fundamentais da Engenharia Rodoviária Regional à luz da mecânica dos pavimentos.

O primeiro aspecto diz respeito ao dimensionamento de pavimentos asfálticos baseado em critérios mecanístico-empíricos, tendo como instrumento de análise o novo método de dimensionamento nacional (MeDiNa), para projetos de dimensionamento de pavimentos novos, bem como projetos de restauração e reabilitação de pavimentos existentes no Distrito Federal, facilitando a definição, o orçamento e o planejamento da manutenção da malha viária. Em relação a soluções de reforços, o roteiro estabelece procedimentos complementares à norma DNER 011-PRO para a avaliação da integridade de pavimentos existentes. No que tange à proposição de soluções de reforço ou de pavimentos novos, o roteiro complementa o conceito do nível de confiabilidade apresentado pelo MeDiNa, baseado apenas no tipo de via, com a adoção do conceito de nível de precisão a depender do modo de obtenção dos parâmetros de entrada, tais como: ensaios laboratoriais, retroanálise e uso de referência bibliográfica. Nesse ponto, estabelece-se o processo de dimensionamento de pavimentos, assim como limites de aplicabilidade das simulações para as diferentes fases de projeto (anteprojeto, projeto básico e projeto executivo) a depender o fator de precisão dos parâmetros de entrada utilizados.

O segundo aspecto refere-se ao controle tecnológico em obras de pavimentação. Nesse ponto serão apresentadas diretrizes, com base em métodos não destrutivos, que permitam estabelecer um controle de qualidade estrutural do pavimento durante a fase de execução e recebimento das obras. Trata-se de proposta que visa complementar os controles de execução já comumente empregados nas obras rodoviárias, sendo baseada em módulos de resiliência das camadas de um pavimento obtidas por meio de retroanálise de bacias deflectométricas, medidas a partir do uso da viga Benkelman, do FWD ou do LWD. Nesse roteiro são apresentados procedimentos para obtenção dos módulos a partir dos levantamentos de campo, incluindo a definição do tamanho da amostra, os cuidados a serem adotados quanto às possíveis distorções

nas medições e limitações na retroanálise, assim como a definição dos limites de dispersão dos resultados (desvio padrão) das amostras de campo a partir do nível de confiabilidade exigido pelo projeto.

Para tanto, fez-se necessário avaliar a aplicabilidade do modelo de cálculo adotado pelo MeDiNa às condições locais, sendo utilizadas, como dados de referência, as observações de campo, coletadas no período de 2013 a 2017, de 8 (oito) das 50 (cinquenta) unidades de amostragem utilizadas pelo DNIT para a calibração e aferição do seu modelo HDM-4 para a gestão de rede das rodovias federais.

1.1 Identificação do problema

A perda de serventia dos pavimentos asfálticos está associada às ações climáticas, variações diárias de temperatura e, principalmente, ao carregamento cíclico do tráfego, cujo acúmulo de deformações conduz à fadiga e deformações permanentes. Como reflexo, destacam-se os defeitos superficiais, trincamento e afundamento na trilha de roda, que evoluem progressivamente, sendo estes comumente utilizados como critérios de vida útil.

Para o dimensionamento de pavimentos asfálticos de maior resistência, durabilidade e qualidade, que ofereçam segurança e conforto aos usuários e que sejam de execução viável diante da realidade orçamentária das agências rodoviárias, torna-se imprescindível a existência dentro dessas instituições de um sistema de gerência de pavimentos, balizado por um banco de dados contendo parâmetros estruturais, funcionais e de tráfego da malha rodoviária sob a sua administração.

Percebe-se então que a precisão de um modelo de previsão de comportamento e vida útil de pavimentos asfálticos adotado por sistemas de gerenciamento de pavimentos depende da confiabilidade e completude dos dados disponíveis, bem como dos métodos de execução de levantamentos previstos. Nesse aspecto, torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de metodologias mais econômicas e eficientes, especialmente para a obtenção das características estruturais desses tipos de pavimentos.

Diversos estudos têm surgido nas últimas décadas com o objetivo de avaliar o emprego de ensaios não destrutivos de caracterização da condição estrutural das camadas ou da estrutura completa de um pavimento, destacando-se o emprego de equipamentos baseados em métodos de propagação de ondas, refração sísmica e levantamento deflectométrico.

Diferentemente das técnicas destrutivas, que envolvem a extração de amostras do pavimento por meio de sondagem e a determinação das propriedades estruturais a partir de

ensaios em laboratório, as técnicas não-destrutivas, têm potencial para determinação das propriedades *in-loco* sem a necessidade de intervenções no pavimento em serviço. Logo, essas técnicas são capazes de medir a resposta real do pavimento ao carregamento aplicado, sem submeter os materiais aos distúrbios causados pela retirada de amostras e dispensando a preparação de corpos de prova que tentam reproduzir as características do material na estrutura real do pavimento.

No caso das técnicas não-destrutivas é possível medir a bacia de deflexão formada pela aplicação de uma carga localizada sobre o pavimento. Conhecendo os deslocamentos desta bacia, o valor da carga aplicada, condições climáticas e as espessuras das camadas, é possível estimar a rigidez das camadas, expressa pelo módulo de resiliência, a partir de modelagem computacional.

Outra vantagem é que os parâmetros assim obtidos, diante da facilidade de coleta de dados, possibilitam uma maior representatividade do comportamento médio dos materiais para em segmento de extensão considerável.

Não é de se estranhar que nos últimos anos os projetos de pavimento tenham experimentado grandes avanços pela incorporação de abordagem mecanística baseada em parâmetros físicos, devendo avançar inclusive no controle de execução da obra (controle de qualidade estrutural do pavimento).

No presente momento, muito se tem discutido no mercado e na academia sobre a utilização do programa computacional MeDiNa em âmbito nacional, que além de considerar o comportamento resiliente dos materiais, também analisa os efeitos do tráfego e do clima na vida de serviço e as respostas estrutural e funcional do pavimento. O MeDiNa foi desenvolvido por meio do Projeto UFRJ/DNIT TED nº682/2014, tendo a sua última atualização sido realizada no ano de 2020. O programa computacional realiza a verificação do dimensionamento de estrutura de pavimentos a partir de uma abordagem mecanística-empírica, sendo acompanhado por outras duas ferramentas computacionais: o AEMC, o qual realiza cálculos de tensões e deformações de estruturas multicamadas, e o BackMeDiNa, o qual realiza retroanálise de bacias deflectométricas.

A questão é que para o desenvolvimento do MeDiNa foi imprescindível a existência de uma função de transferência, capaz de definir uma calibração para a previsão de dano por fadiga em campo a partir de ensaios laboratoriais de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral de cargas repetidas de misturas asfálticas. Essa função foi definida a partir de 6 (seis) misturas asfálticas distintas distribuídas em 45 (quarenta e cinco) segmentos experimentais localizados no campus da UFRJ, na cidade do Rio de Janeiro, com diferentes tipologias de

camadas estruturais e de condições de tráfego, no âmbito do chamado Projeto Fundão. Posteriormente, tal função foi checada em outros 12 (doze) segmentos experimentais localizados nos estados do RJ, CE, SP e RS, selecionados por possuírem: curva de fadiga e módulo de resiliência da mistura asfáltica determinados em laboratório, conhecimento dos parâmetros estruturais, do estudo de tráfego e avaliação da área trincada do pavimento para diferentes períodos. Tal validação se demonstrou importante pois contemplou situações de trechos novos e não somente de reforços como as estabelecidas no Projeto Fundão. Como resultado, foi percebido que a área trincada observada em relação à área trincada prevista apresentou boa correlação, sendo incorporados os resultados de tais segmentos em nova calibração da Função de Transferência do MeDiNa.

Segundo Fritzen (2016), após a validação da função de transferência em segmentos experimentais nacionais, também foi avaliado o comportamento dos segmentos experimentais nacionais com o uso de curvas de fadiga diferentes das de projeto de cada segmento, utilizando-se agora as oriundas do Projeto Fundão mais próximas das características de cada trecho, e também a curva genérica de Franco (2007), a fim de verificar a possibilidade do uso de curvas de fadiga diferentes do projeto para o dimensionamento de pavimentos asfálticos na fase de anteprojeto. Nessa condição, o pesquisador indica a possibilidade de uso somente para os casos de anteprojetos.

Por outro lado, o DNIT, ciente da abrangência da malha rodoviária federal frente aos segmentos utilizados para a calibração do MeDiNa, estabeleceu em 2020 o Pro-MeDiNa, que é um programa de Monitoramento dos Segmentos Experimentais, visando avaliar o comportamento do pavimento e aperfeiçoar ainda mais a calibração do software, seja por meio de ajustes da Função de Transferência já definida ou proposições de outras funções para aplicação em nível regional. No âmbito desse programa o DNIT firmou parceria com a UnB, e está monitorando segmentos experimentais para avaliação do comportamento do pavimento das rodovias nos estados do Piauí (BR-316), Rio Grande do Sul (BR-116), Bahia (BR-116 e BR-235) e Maranhão (BR-135). Além dessas rodovias, estão sendo construídos outros trechos experimentais em todo o território nacional, de forma que apresentem desempenhos diferenciados, permitindo a obtenção de parâmetros para a calibração de funções de transferência no MeDiNa. Cada trecho experimental será subdividido em pequenos segmentos, de até 100 metros, com soluções diferentes entre si, as quais são definidas em conjunto com pesquisadores da UnB, em parceria com a USP e a UFSM (Santos, 2022).

Em específico ao Distrito Federal serão construídos trechos experimentais com instrumentos para medir as tensões verticais e horizontais e deformações nas diferentes

camadas, bem como a coleta de informações que influenciam esses valores, tais como pluviometria, umidades das camadas subjacentes ao revestimento asfáltico e temperatura do revestimento. Estes trechos serão solicitados pelo eixo de um simulador de tráfego, que também conta com sistemas que simulam chuvas e variações de temperatura. Com perspectivas positivas quanto ao uso do MeDiNa, o DER/DF também está implantando trechos experimentais no Distrito Federal, tendo como premissa o Guia Pro-MeDiNa, que estabelece diretrizes para os monitoramentos periódicos e ensaios de campo e laboratoriais necessários para ajustes ou proposições de Função de Transferência.

Do exposto, verifica-se que embora haja avanços no desenvolvimento de um método de dimensionamento mecanístico-empírico de âmbito nacional pelo DNIT, ainda não se identifica uma calibração específica ou validação da Função de Transferência existente para a região do Distrito Federal e entorno. Logo, diante desse cenário, cria-se espaço para a discussão sobre as possibilidades de uso do MeDiNa, no seu atual estágio de desenvolvimento, por projetistas que atuam nessa localidade. Para tanto, faz-se necessário avaliar a concordância das simulações do programa em nível regional, a partir da utilização de informações de ensaios e monitoramento de pavimentos já existentes, assim como definir, diante da origem dos parâmetros dos materiais adotados, quais seriam os limites aceitáveis de precisão para a utilização anteprojeto, projeto básico e projeto executivo.

No presente estudo é avaliada a consistência dos módulos de resiliência obtidos por retroanálise com o uso do BackMedina, bem como a concordância dos resultados oriundos desses as condições estruturais e funcionais observadas em 8 (oito) unidades de amostragem (segmentos homogêneos) próximas do Distrito Federal, monitoradas pelo DNIT no período de 2013 a 2017. Esses segmentos fazem parte das 50 (cinquenta) unidades de amostragem adotadas pela autarquia federal para calibração em âmbito nacional do *software* HDM-4, utilizado para o planejamento e a gestão dos pavimentos inseridos na malha rodoviária federal.

1.2 Justificativa

As ações de adequação, construção e manutenção da malha viária do Distrito Federal têm por objetivo promover a integração do entorno à capital, reduzir os custos de transporte e proporcionar maior segurança e conforto aos usuários. Devido às características próprias de divisão política-administrativa no qual se insere o Distrito Federal, o DER-DF assume atividades de construção e de manutenção das rodovias com características federais (rodovias coincidentes com rodovias federais e aquelas delegadas pela União), de rodovias com

características estaduais (distritais), como também daquelas com características vicinais, que são destinadas ao tráfego local. No caso do Distrito Federal, as rodovias vicinais são as que fazem a ligação entre os núcleos populacionais e/ou de produtores rurais às rodovias da malha viária distrital.

O DER-DF (2020) descreve a situação física da Rede Rodoviária Distrital em planejada (77,7 km), não pavimentada (809,0 km) e pavimentada (1.033,0 km). Para administrá-la, estão previstos no PPA 2020-2023 (Distrito Federal, 2020) investimentos da ordem de R\$ 628.505.446 milhões em aplicação direta na construção, adequação e manutenção de rodovias.

Devido ao grande patrimônio público representado pelas estradas, bem como a importância socioeconômica delas para o desenvolvimento sustentável regional, cabe à engenharia rodoviária o grande desafio de inovar com tecnologias, materiais e formas de gerência que garantam a manutenção e o fornecimento de uma maior extensão de rodovias em boas condições para os usuários.

Segundo a NBR-7207 (1982), o pavimento tem como função propiciar uma trafegabilidade confortável e segura, sendo formado por uma estrutura composta de materiais capazes de suportar os esforços decorrentes da ação de tráfego a um mínimo custo, ou seja, buscando sempre que possível, o aproveitamento de desempenho em termos de custos operacionais e de construção.

Ao se dar condição para uma via de melhor qualidade de rolamento, automaticamente proporciona-se aos usuários uma expressiva redução nos custos operacionais, haja vista que os custos de operação e de manutenção dos veículos estão associados às condições de superfície do pavimento. Outro aspecto a se observar é a redução dos acidentes de trânsito, que embora possuam matizes que os tornam, muitas vezes, de difícil ponderação, acabam emanando reflexos para a sociedade como um todo.

O planejamento de como será executado o ciclo de manutenção e crescimento da malha rodoviária implantada leva em conta o contexto orçamentário dos órgãos da Administração Pública responsáveis por gerir esse patrimônio. A análise de viabilidade financeira de construção de novos segmentos rodoviários, além de considerar as demandas socioeconômicas, deve contemplar a gestão da malha como um todo para que não falem recursos voltados à manutenção rotineira dos pavimentos já existentes, de modo que a construção de um novo pavimento não implique na reconstrução de vários antigos.

Dentre as iniciativas adotadas por agências rodoviárias para diagnosticar as condições funcionais e estruturais de uma malha rodoviária existente, no intuito de planejar a distribuição orçamentária de recursos a serem aplicados, destaca-se a criação pelo Departamento Nacional

de Infraestrutura de Transportes (DNIT) de um catálogo de soluções de conservação, reforço e reconstrução de pavimentos flexíveis a partir de parâmetros funcionais (IRI e área trincada), parâmetros estruturais (deflexão característica e admissível) e de parâmetros de tráfego (DNIT, 2015).

As soluções de conservação e reforço de pavimentos estabelecidas nesse catálogo foram elaboradas a partir da norma DNER PRO-011 (1979) “Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis - Procedimento “B” e com o Manual de Soluções Técnico-Gerenciais para Rodovias Federais. Também foram realizadas análises contemplando a norma DNER PRO-269 (1994) “Projeto de restauração de pavimentos flexíveis - TECNAPAV”, para verificação da sensibilidade a outro método de dimensionamento de reforço estrutural – em complementação a DNIT PRO-011 (1979), bem como o critério de correção de irregularidade da norma DNER PRO-159 (1985) “Projeto de restauração de pavimentos flexíveis e semirrígidos”. Já as soluções propostas para a reconstrução de pavimentos existentes estão fundamentadas em parâmetros de tráfego e na condição estrutural do subleito, de forma a se ter soluções de pavimentação que atendam ao estabelecido no método de dimensionamento de pavimentos novos do DNIT. O catálogo foi elaborado com soluções de uma vida útil estipulada em 10 (dez) anos (DNIT, 2015).

Embora o Catálogo de Soluções de Manutenção de Pavimentos Flexíveis do DNIT apresente-se como um excelente instrumento de auxílio a sistema de gestão de pavimentos, percebe-se as soluções de projeto nele previstas estão pautadas na equivalência de operações de diferentes eixos de veículos quanto ao poder destrutivo do subleito.

No que tange ao método de dimensionamento de pavimentos novos utilizado há décadas no país, conhecido como o método do DNER, estabelecido pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza, também se verifica limitações na análise do comportamento das camadas do pavimento. Nesse método empírico, determina-se a espessura total do pavimento capaz de proteger o subleito quanto à ruptura por cisalhamento ou por acúmulo de deformações permanentes. Com o aumento do chamado número N, que representa a magnitude e o volume de tráfego, crescem as deformações permanentes. Contudo, observa-se que a perda de funcionalidade dos pavimentos flexíveis brasileiros se dá, sobretudo, devido à contribuição do revestimento, o que não é considerado de forma específica no método em questão. A fadiga do revestimento em concreto asfáltico não é considerada por esse método, embora se constate na prática em muitos trechos que os pavimentos são submetidos a deformações resilientes excessivas, levando a um trincamento prematuro. O método do DNER está associado a uma série de especificações de características de materiais e a coeficientes estruturais a eles associados. Assim, não permite

que se tire proveito das significativas mudanças de avaliação da qualidade de um solo e da melhoria nos materiais de revestimento ao longo dos anos com o surgimento dos ligantes asfálticos modificados e novas tecnologias de dosagem (Soares et al., 2009).

Diante desse cenário, cria-se um ambiente propício à discussão da aplicação dos princípios da Mecânica dos Pavimentos em sistemas de gerenciamento de pavimentos. A interpretação do comportamento dos pavimentos de maneira mais ampla, representa uma ferramenta valiosa no sentido que estabelece uma base mais confiável para a concepção e projetos de pavimentos novos e restauração de pavimentos deteriorados. Isto pode levar a uma nova otimização nos recursos investidos em pavimentação desde que se aplique os princípios da Mecânica dos Pavimentos de maneira cuidadosa, considerando suas limitações e fundamentos.

O motivo disso é que em relação à teoria utilizada para a análise mecanística do pavimento como estrutura, é necessário estabelecer um procedimento analítico adequado ao problema que se deseja investigar com um menor tempo de processamento. Para a aplicação de método mecanístico como ferramenta de auxílio ao planejamento rodoviário, baseado em mecanismos de retroanálise a partir de levantamentos deflectométricos, prevalece na prática a utilização da teoria das múltiplas camadas elásticas (Burmister, 1945). No presente momento, abordagens de elementos finitos, considerando material de revestimento, viscoelasticidade e análise dinâmica, restringem-se à pesquisa.

Alinhados aos avanços recentes estão Bernucci et al. (2022), ao indicarem que não mais cabe discutir se métodos mecanísticos-empíricos são melhores do que métodos empírico, pois as filosofias dessas abordagens são significativamente distintas, não permitindo que sejam comparadas por meio da mesma lógica. A discussão que deve prosperar daqui para frente é em torno de qual(is) método(s), dentro das filosofias mais mecanicistas atuais, consegue-se capturar os principais fatores intervenientes no comportamento das estruturas de pavimentos, de maneira suficientemente simples para poder(em) ser aplicado(s) corriqueiramente.

No Brasil, permeia nessa discussão, o MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional) como nova ferramenta de dimensionamento de pavimentos pelo método mecanístico-empírico. Trata-se de programa computacional de permite uma vasta caracterização dos materiais empregados nas simulações sem deixar de possuir uma interface de fácil operação. O MeDiNa realiza, por meio da teoria das camadas elásticas, o dimensionamento de reforço da estrutura do pavimento com base na deformabilidade dos materiais, curva de fadiga do material do reforço e na previsão de trincamento, sendo os módulos de elasticidade das camadas obtidos

por retroanálise das bacias de deflexão (BackMeDiNa) ou outros métodos adequados baseados em ensaio de campo ou laboratório.

De fato, os métodos de dimensionamento mecânicos (analíticos ou numéricos) têm avançado na comparação de resultados observados com a utilização de modelos de dimensionamento empíricos e semiempíricos atualmente utilizados por órgãos rodoviários nacionais.

Do exposto, considerando as características das vias do Distrito Federal, o contexto orçamentário e crescimento da complexidade de sistemas de gerenciamento de pavimentos, faz-se importante desenvolver estudos que busquem facilitar estimativas dos valores de projetos de forma célere, com informações a depender do nível de precisão exigido e de fácil obtenção, que possibilitem a otimização do planejamento rodoviário regional.

1.3 Objetivos

O objetivo geral da presente pesquisa é estabelecer diretrizes para a utilização do MeDiNa, a partir da atual Função de Transferência disponibilizada pelo programa, como ferramenta de dimensionamento e controle de qualidade estrutural na construção e reforço de pavimentos asfálticos na região do Distrito Federal e entorno.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Levantamento de dados funcionais e deflectométricos de segmentos de rodovias monitorados na região próxima ao Distrito Federal e entorno;
- Análise da concordância das previsões dos danos e fadiga do MeDiNa em nível regional, incluindo a mensuração do nível de precisão observado nas simulações do modelo a partir da origem dos parâmetros de entrada;
- Proposição de diretrizes de dimensionamento de pavimentos asfálticos novos ou de reforços, a partir do MeDiNa, que possam ser aplicadas em rodovias do Distrito Federal e entorno com estruturas diferentes daquelas utilizadas em estudos de verificação do modelo;
- Proposição de diretrizes de controle de qualidade estrutural do pavimento a ser executado durante as obras de construção ou de reforço de pavimento para garantir as premissas de projeto;

- Demonstração, por meio de estudo de caso, da aplicabilidade das diretrizes de dimensionamento de pavimentos asfálticos e possibilidades de utilização de acordo com o nível de precisão alcançado em procedimentos licitatórios.

1.4 Metodologia

Tomando como base os conceitos apresentados por Severino (2013), classifica-se sob o ponto de vista dos objetivos, a presente pesquisa como exploratória, com uso de pesquisa bibliográfica, pesquisa documental e pesquisa experimental, assumindo a forma de estudo de caso. Busca-se com uso dessa abordagem, na fase inicial, uma maior familiaridade com o problema, para melhor compreender como se comportam os materiais que compõem as estruturas dos pavimentos do Distrito Federal selecionados para o trabalho. Já na fase final, tem-se como foco a modelagem de soluções de pavimentação para a região do Distrito Federal.

A seguir apresenta-se a metodologia de trabalho, na sequência idealizada para atingir os objetivos da pesquisa.

- Aquisição e organização de dados de Unidades de Amostragem do DNIT de rodovias no Distrito Federal e entorno necessários para utilização do MeDiNa, tais como estruturas de pavimentos e propriedades dos materiais constituintes, condições estrutural e funcional, e estudo de tráfego;
- Catalogação dos materiais que compõem as estruturas dos pavimentos selecionados, contendo os dados de suas propriedades e características mecânicas e hidráulicas, assim como pesquisa bibliográfica de materiais similares anteriormente estudados na região;
- Tratamento estatístico de ensaios realizados nas Unidades de Amostragem objeto de estudo para validação de uma amostra representativa a ser utilizado no MeDiNa;
- Avaliação da concordância das previsões dos danos e fadiga do MeDiNa, por meio de análises comparativas com os resultados de desempenho de Unidades de Amostragem (UA), registrados em um programa de monitoramento de pavimentos com características similares aos do Distrito Federal e entorno, cuja duração foi de 4 (quatro) anos;
- Definição da precisão das simulações realizadas pelo MeDiNa a partir de parâmetros de entrada originados de ensaios laboratoriais, ensaios de campo ou referências bibliográficas; e

- Estudo do estado da arte sobre as técnicas de controle de qualidade estrutural de obras de pavimentação, envolvendo reforços e pavimentos novos.

1.5 Organização do trabalho

A seguir serão descritos os conteúdos abordados nos oito capítulos deste trabalho.

- Capítulo 1 – Introdução: apresentação da motivação, do problema o qual a pesquisa pretende solucionar, a hipótese levantada e os objetivos dessa;
- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: resumo dos principais trabalhos relacionados a dimensionamento de pavimentos por meio do método mecanístico-empírico no Brasil;
- Capítulo 3 – Fundamentação teórica: abordagem descritiva dos principais conceitos associados ao dimensionamento por meio do método mecanístico-empírico;
- Capítulo 4 – Apresentação do modelo de cálculo adotado: descrição do princípio de funcionamento do MeDiNa, incluindo hipóteses e parâmetros utilizados para o dimensionamento de estruturas de pavimentos;
- Capítulo 5 – Objeto do estudo: descrição do ambiente de estudo e das análises estatísticas realizadas para a utilização dos dados obtidos em levantamentos de campo no MeDiNa;
- Capítulo 6 – Análise de resultados: apresentação das considerações e resultados de retroanálise de bacias de deflexão representativas a partir do BackMeDiNa e do MeDiNa.
- Capítulo 7 – Proposta de Diretrizes para uso do MeDiNa no DF (Estudo de Caso): apresentação de propostas de roteiros com a finalidade de auxiliar profissionais no dimensionamento e controle de qualidade estrutural na construção e reforço de pavimentos asfálticos na região do Distrito Federal e entorno, bem como a demonstração por meio de exemplo da aplicação dessas.
- Capítulo 8 – Conclusões e sugestões: breve descrição dos resultados obtidos, junto com as sugestões para realização de trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O mundo está em constante avanço tecnológico, e no caso da pavimentação de rodovias não poderia ser diferente. De sistemas mais rudimentares como o romano, que empregavam as mesmas espessuras de pavimento independente do solo de fundação, clima ou tráfego, migrou-se para projetos baseados em observações, no qual percebeu-se que alguns trechos tinham comportamento melhores do que outros, estabelecendo assim espessura de pavimento compatível com o solo de fundação e com o nível de esforço gerado pelas características do tráfego a que estaria sujeito. Decorreu-se, assim, o desenvolvimento de métodos de dimensionamento de pavimentos, fossem eles baseados em experiências prévias, mas com conceitos racionais de projeto ou através de análises mecânicas que levam em consideração a modelagem do comportamento de cada um dos materiais constituintes. Nos procedimentos de dimensionamento mais atuais, leva-se em conta o máximo afundamento na trilha de roda (ATR) admissível ao fim da vida de projeto, assim como irregularidade longitudinal, deflexão da camada de revestimento, trincamento por fadiga e trincamento térmico. Pode-se ainda levar em conta fatores como desagregação, rugosidade, atrito, entre outros (Brito et al., 2009).

O objetivo de um projeto de pavimento é selecionar uma estrutura economicamente viável (material, espessura de camada, processo construtivo) que forneça um nível satisfatório de serventia para o tráfego previsto durante um determinado período. Logo, observa-se uma tendência de pesquisadores brasileiros em avançar na comparação de resultados observados com a utilização de modelos de dimensionamento mecânico em relação aos empíricos e semiempíricos, atualmente utilizados por órgãos rodoviários nacionais.

Nos parágrafos seguintes são apresentadas algumas dessas pesquisas realizadas nos últimos 20 (vinte) anos, em ordem cronológica de publicação, as quais demonstram a importância da discussão do tema tratado no presente estudo para a evolução de métodos de dimensionamento de pavimentos adotados no país.

Bezerra Neto (2004) apresentou uma análise comparativa das estruturas de pavimentos dimensionados com base nos métodos empírico do DNER e mecânico, utilizando-se do programa FEPAVE. O pesquisador identificou que a diminuição do nível de confiabilidade adotado no modelo mecânico (99,8%, 95%, 85% e 75%) resulta em pavimentos com espessuras menores que a do método DNER. Também concluiu que somente para tráfegos

pesados e muito pesados ($N=10^7$ e 10^8), o método mecanístico apresenta pavimentos mais espessos que o do método DNER. Diante desses resultados, apresenta proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande/MS, apoiado no método empírico do DNER, empregando no caso de tráfego pesado ($N=10^7$) a análise mecanística sobre os pavimentos pré-estabelecidos com base no método empírico.

Cavalcante (2005) avaliou as características funcionais e estruturais da rodovia BR-230/PB, lote III, pista duplicada. A avaliação estrutural foi dividida em duas partes. A primeira consistiu na avaliação estrutural não-destrutiva com base no levantamento deflectométrico com a viga Benkelman e o FWD. A segunda se baseou em ensaios laboratoriais que permitiram determinar os parâmetros de deformabilidade para as camadas de revestimento em CBUQ, camada de base constituída de brita graduada simples, sub-base de saibro, reforço e do subleito. Por fim, promoveu estudo especulativo com base nas metodologias DNER PRO-011 (1994) e DNER PRO-269 (1994), comparando com estudo paramétrico utilizando os programas FEPAVE2 e ELSYM5.

Lopes (2013) propôs uma metodologia simplificada de avaliação da condição estrutural de pavimentos asfálticos com base granular. A pesquisadora utilizou as medições de bacias deflectométricas obtidas com FWD e, obtidos os parâmetros de deformabilidade por retroanálises, estimou a sua vida remanescente por meio de análise mecanicista. Nesse trabalho alerta para o fato de que, duas bacias de deflexão, podem possuir condições estruturais diferentes, mesmo expressas por um valor de deflexão máxima recuperável (D_0) igual. Na pesquisa são apresentados ábacos capazes de estimar a vida remanescente de um pavimento em função dos parâmetros deflectométricos obtidos de estudo paramétrico. Nesse estudo foram observadas deficiências em camadas diferentes do pavimento, apesar de terem tido mesmas propostas de soluções de restauração de suas estruturas pela análise com base em D_0 (DNER PRO-011, 1979) para o cálculo de reforço.

Fonseca (2013) avaliou as premissas adotadas no catálogo de soluções do CREMA 2ª ETAPA, e analisou algumas das soluções do dimensionamento pelo método mecanístico-empírico, por meio do programa SISPAV. O pesquisador verificou que as estruturas de reforços de pavimento estabelecidas no catálogo nem sempre atende à vida útil estimada de 10 (dez) anos quando avaliadas pela análise mecanístico empírica, a partir de hipóteses e critérios admitidos em projeto. A análise da vida útil do pavimento nos segmentos selecionados, por meio do uso do SISPAV, mostrou que o fator preponderante na ruptura do pavimento foi a ação acumulada do dano causado pela solicitação repetida dos eixos de carga, provocando fadiga no

revestimento, resultando no trincamento excessivo e prazos de vida útil menores do que os previstos.

Costa (2013) analisou se as bases recicladas de três rodovias atendiam aos requisitos necessários à sua aceitação segundo normas rodoviárias vigentes, avaliando se as soluções implantadas poderiam ser consideradas satisfatórias ou não e fornecer parâmetros para avaliação de pavimentos asfálticos. Para isso, uma das linhas desenvolvidas durante o estudo foi o levantamento de bacias deflectométricas com o uso da viga Benkelman e posterior cálculo dos módulos de resiliência por meio de retroanálise com auxílio do programa KENLAYER. Os resultados obtidos dos ensaios de campo foram analisados estatisticamente e foram obtidas correlações entre o módulo de resiliência (MR) e o índice de penetração (DN) das camadas do pavimento. A pesquisadora indicou que a falta de informação sobre o tráfego das vias impossibilitou determinar se as bases adotadas são adequadas para o carregamento que já existe ou para tráfego futuro. No entanto, em termos de DN e MR (retroanalisado), os valores obtidos são considerados satisfatórios, mesmo não sendo estatisticamente significativa a amostra analisada.

Resenes (2014) simulou, a partir da utilização dos “softwares” EVERCALC 5 e BISAR 3, a vida útil de soluções de restauração do programa CREMA 2ª Etapa, administrado pelo DNIT. Na pesquisa, constatou-se que as soluções do programa de restauração não resultaram na vida útil de 10 (dez) anos.

Nunes (2018) desenvolveu Matrizes de Soluções de Projetos de Manutenção Rodoviária e de Construção de Pavimentos Novos para aplicação em rodovias no Distrito Federal. A pesquisa consistiu na adaptação das estruturas dos catálogos de soluções desenvolvidos pelo DNER (PRO-011, 1979; PRO-159, 1985; e PRO-269, 1994), ao contexto de tráfego do Distrito Federal, cuja malha possui menores volumes de veículos comerciais. O pesquisador imaginou que o maior detalhamento das faixas de tráfego menos intensas enriqueceria a versatilidade de soluções para o cenário urbano, o que não foi constatado no fim do desenvolvimento do catálogo de manutenção, uma vez que as soluções resultantes para as duas faixas mais leves foram exatamente as mesmas. Com relação ao catálogo de construção de pavimentos novos, foram pré-dimensionadas soluções por meio da metodologia tradicional, para então redimensioná-las por uma análise mecânica, utilizando o programa ELSYM5 para o cálculo das deformações específicas críticas e aplicando o modelo de previsão de fadiga do “*Asphalt Institute*”. Para o pesquisador a análise mecânica evidenciou o subdimensionamento de algumas das soluções de construção/reconstrução e possibilitou a adequação delas.

Souza Júnior (2018) realizou simulações de vidas úteis de soluções de reforço e de reconstrução de pavimentos flexíveis e semirrígidos caso fossem utilizados os Catálogo de Soluções de Manutenção para Pavimentos Flexíveis do DNIT, normativos DNER PRO-11 (1979) e DNER PRO-269 (1994) por meio do programa MeDiNa. Utilizaram-se 13 trechos de uma rodovia federal com diferentes condições funcionais, estruturais, de tráfego e climáticas. Embora as soluções de Catálogo do DNIT prescrevam 10 (dez) anos de vida útil, o pesquisador verificou que em 78% dos casos analisados as soluções indicadas pelo Catálogo não atingiram a vida útil de projeto. Destes, 84% não alcançaram condições aceitáveis aos 4 (quatro) anos, havendo casos de ruptura em menos de 1 (um) ano. A pesquisa foi possível devido ao acesso a histórico de dados coletados pela concessionária responsável pela rodovia analisada, sendo esses: avaliação da condição de superfície e inventário do estado de superfície do pavimento; condição estrutural por meio de levantamento deflectométrico – FWD; índice da irregularidade longitudinal – IRI; contagem classificatória e direcional de tráfego; janelas de inspeção e ensaios.

Dalla Roza (2018) apresentou um estudo sobre 17 (dezesete) solos do estado do Mato Grosso para o uso em camadas de pavimentos asfálticos. Doze amostras de solos de textura fina e cinco lateritas foram caracterizadas, física e mecanicamente. A caracterização mecânica foi realizada com os ensaios de módulo de resiliência e de deformação permanente. Com os resultados desses ensaios, a pesquisadora propôs um catálogo de sugestões de combinações de materiais que podem ser usados para pavimentos novos a partir de dimensionamentos utilizando o software MeDiNa. Evidenciou-se na pesquisa que os solos finos e as lateritas, considerados inadequados pelas metodologias tradicionais, apresentam comportamento satisfatório para camadas de base, sub-base de pavimentos urbanos e rodovias vicinais, desde que sejam realizadas estabilizações a fim de controlar a expansão destes solos quando necessário.

Barroso (2018) utilizou o software MeDiNa para comparar o desempenho das misturas asfálticas de duas estruturas de pavimento comumente utilizadas no estado de Goiás. A pesquisadora concluiu a partir da modelagem mecanística-empírica que a combinação do tipo de ligante e as curvas granulométricas não estariam adequadas para aplicação nas rodovias do estado devido ao excesso de deformação permanente das misturas, tendo em vista as características de tráfego e clima da região.

Freitas (2019) realizou ensaios de laboratório e campo durante a execução de dois trechos experimentais localizados nas obras de duplicação da rodovia GO-070. Os ensaios abordaram os seguintes aspectos: caracterização, compactação, expansão, CBR e módulo de resiliência dos materiais de subleito, sub-base e base; análise da influência da sucção no

subleito, considerando a não saturação do solo, com a aferição da curva característica solo-água e proposição de modelos de comportamento do módulo de resiliência com a variação do teor de umidade para o subleito; controle de compactação, levantamento do tráfego real e avaliação do comportamento estrutural do pavimento logo após a construção. Dentre os objetivos da pesquisa estaria a incorporação dos resultados obtidos no banco de dados do MeDiNa.

Pitangui (2019) realizou uma análise comparativa de 16 (dezesesseis) projetos de pavimentos flexíveis dimensionados pelo método do DNER com o novo método mecanístico-empírico do DNIT, o MeDiNa. A pesquisadora, conclui que os resultados apresentados pelo MeDiNa, de um modo geral, indicam um dano de fadiga, dado pela porcentagem de área trincada estimada para o fim do período de projeto considerado, muito alto, indicando em muitos casos a ruptura total do pavimento antes do fim do período. Já quanto à deformação permanente, dado pelo cálculo do afundamento na trilha de roda, os valores obtidos pelo programa são consideravelmente pequenos.

Encerra-se a presente abordagem, esclarecendo que no método mecanístico-empírico, tendo como exemplo o MeDiNa, faz-se uso de recursos computacionais, a partir de modelos constitutivos e considera-se o pavimento constituído de multicamadas (geralmente elásticas) para fazer a modelagem do comportamento da estrutura. Nesse método, calcula-se as tensões, deformações e deslocamentos gerados pelas cargas do tráfego, sendo os valores obtidos correlacionados com o desempenho do pavimento, incluindo a previsão de problemas associados ao seu desgaste funcional. Entende-se que as possibilidades observadas no método mecanístico-empírico, quanto à utilização de materiais e aos efeitos das condições ambientais e de tráfego diferentes daquelas para as quais os métodos empíricos foram desenvolvidos, alinham-se à permanente busca de profissionais atuantes na área rodoviária de uma maior representatividade do comportamento de um pavimento ao ambiente ao qual está inserido, proporcionando, dessa maneira, melhorias nos projetos de pavimentação em termos de eficiência estrutural e funcional.

CAPÍTULO III

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem a finalidade de reunir informações que subsidiem a utilização de modelagem mecânica-empírica para dimensionamento de pavimentos asfálticos. A fundamentação teórica contempla inicialmente aspectos sobre o comportamento e desempenho esperado de pavimentos, incluindo conceitos de tensões, deformações, deslocamentos, rigidez, e avaliação de condições funcionais e estruturais como ferramentas de gestão empregadas para garantir o conforto, segurança e economia aos usuários. Em uma segunda etapa, são enfatizados conceitos de ensaios não destrutivos para avaliação estrutural de pavimentos, apresentando os principais aspectos relacionados ao funcionamento do *Falling Weight Deflectometer* – FWD, incluindo as vantagens e limitações do uso desse como ferramenta de apoio à gestão de pavimentos.

Por fim, na conclusão do capítulo, aborda-se conceitos relacionados a retroanálise, como ferramenta de apoio à obtenção de parâmetros utilizados em modelos de previsão de desempenho, assim como principais modelos computacionais utilizados para essa finalidade em pesquisas no Brasil.

3.1 Comportamento e desempenho esperado das estruturas dos pavimentos asfálticos

O pavimento é uma estrutura de vida útil predeterminada, composto de múltiplas camadas de diferentes materiais e espessuras finitas, construídas sobre o subleito. É destinado a atender esforços oriundos do tráfego e do clima, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerando diferentes horizontes para serviços de manutenção que propiciem aos usuários condições de rodagem satisfatórias.

Segundo Bernucci et al. (2022), o pavimento viário classifica-se tradicionalmente como rígido ou flexível, porém existe uma tendência de utilização da nomenclatura pavimentos de concreto de cimento Portland e pavimentos asfálticos, respectivamente, para indicar o tipo de revestimento do pavimento. Segundo os autores, os pavimentos asfálticos englobam: (i) os pavimentos flexíveis, cujas camadas abaixo do revestimento asfáltico são constituídas por materiais granulares, solos, solo-agregados, entre outros; e (ii) os pavimentos semirrígidos,

onde abaixo do revestimento asfáltico, a base ou sub-base são constituídas por materiais cimentados ou aglutinados por ligante hidráulico, e que resistem a esforços de tração.

Para Balbo (2007), a estrutura de um pavimento asfáltico é projetada para receber e transmitir esforços de maneira a aliviar pressões sobre as camadas inferiores, as quais geralmente são menos resistentes, embora haja exceções (vide Figura 3.1). O pavimento possui um comportamento mecânico adequado quando todas as peças que compõem essa estrutura desenvolvem deformações compatíveis com sua natureza e estados de tensões compatíveis com os cálculos de dimensionamento, para que não ocorram processos de ruptura ou danificação de forma prematura e inadvertida nos materiais que constituem as camadas do pavimento.

Em geral, a estrutura dos pavimentos asfálticos na região do Distrito Federal e entorno é formada por duas camadas: revestimento asfáltico e base. No entanto, nas estruturas desses podem ser acrescentadas camadas de sub-base e reforço do subleito a depender da disponibilidade de materiais e volume de tráfego a suportar.

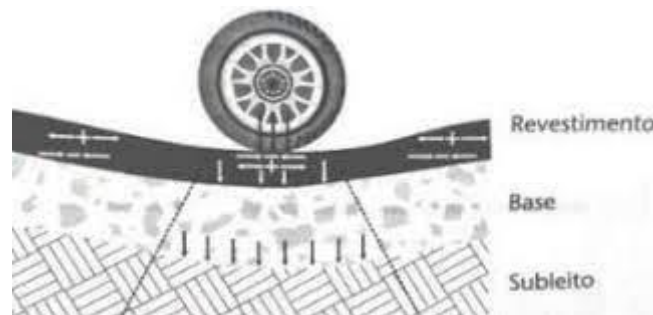


Figura 3.1 - Esforços em camadas do pavimento (Balbo, 2007)

De acordo com Franco (2007), o dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos é um processo complexo, o qual trabalha com variáveis de difícil previsão e modelagem, tais como: carregamento da estrutura e a resposta dada sob condições climáticas variadas, que muito dependerá das características dos materiais utilizados e do comportamento mecânico de cada uma das camadas e do conjunto destas.

O emprego da mecânica dos pavimentos, disciplina da engenharia civil que estuda os pavimentos como sistemas em camadas e sujeitos às cargas dos veículos, em muito tem auxiliado nessa difícil tarefa de compatibilizar essas variáveis com a vida útil de projeto estimada para a estrutura do pavimento.

Medina e Motta (2005) esclarecem que o emprego dos conceitos atrelados a essa disciplina, com o auxílio de programas de computador, possibilita o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, desde que obtidos os parâmetros de deformabilidade dos

materiais, além de permitir a verificação do número de aplicações de carga que leva o revestimento asfáltico à ruptura por fadiga. Há possibilidade também de análises das deformações permanentes e das rupturas plásticas, podendo incluir, inclusive, uma avaliação das respostas às cargas de tráfego e às variações plásticas e diárias de temperatura e umidade do subleito e das camadas do pavimento.

Por outro lado, para a condição de mudanças de resposta do pavimento relacionadas com a velocidade de deterioração dos materiais empregados e com as condições climáticas, ensaios de campo, como a deflectometria e outros, complementam o quadro de dados experimentais necessários à calibração dos modelos de desempenho estrutural. A esses podem ser associados dados de desempenho funcional, os quais se referem a parâmetros de conforto e segurança.

Entende-se como principal vantagem do emprego dos conceitos da mecânica dos pavimentos atrelada à teoria da elasticidade em relação aos métodos em utilização no país, a possibilidade de se avaliar o desempenho estrutural do pavimento quanto ao emprego de materiais diversos, dispostos de modo distinto na estrutura de um pavimento. Ao possibilitar tal tipo de análise, o empirismo deixa de predominar, embora ainda se demonstre necessário para calibração de modelos de dimensionamento as situações observadas em campo (modelos mecanístico-empíricos) (Medina e Motta, 2005).

Na sequência, apresentam-se os principais conceitos da mecânica dos pavimentos relacionados a teoria da elasticidade.

3.2 Tensão e Deformação

Com base em estudos realizados e na experiência da construção de pavimentos flexíveis, há o entendimento que, na composição clássica de base granular e revestimento utilizando concreto asfáltico, os pavimentos usualmente possuem dois critérios de ruptura: dano à fadiga, que ocorre devido às deformações de tração na fibra inferior do revestimento; e/ou afundamento na trilha de roda (vide Figura 3.2), ocasionado pelo acúmulo de deformações plásticas em todas as camadas, principalmente no subleito (Silva, 2014 e Pitangui, 2019).

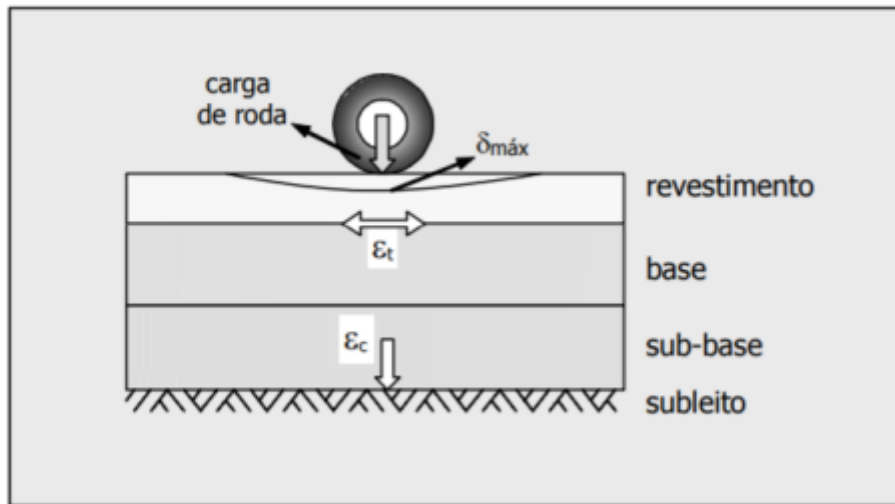


Figura 3.2 - Esquema representativo das tensões, deformações e deslocamentos na estrutura do pavimento, em pontos críticos (Franco, 2007)

Os métodos mais comuns para análise de tensões, deformações e deslocamento em pavimentos são a teoria do sistema de múltiplas camadas elásticas e o método dos elementos finitos. A Teoria do Sistema de Camadas Elásticas (TSCE), proposta por Burmister em 1945, permite a determinação de estado de tensões e deformações em vários pontos das camadas, utilizando o coeficiente de Poisson e o módulo de Young dos materiais, a espessura das camadas e a magnitude e distribuição das cargas como dados de entrada. A TSCE apoia-se nas seguintes hipóteses:

- todas os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
- todas as camadas são infinitas na direção horizontal;
- todas as camadas possuem espessuras constantes;
- não existem descontinuidades, a menos na superfície do pavimento;
- não existem forças de gravidade agindo no sistema;
- a carga aplicada é estática; e
- não existem nem deformações nem tensões iniciais residuais.

Por outro lado, o Método dos Elementos Finitos (MEF) transforma um problema específico em várias regiões de geometria simples, tais como triângulos e quadriláteros. Essas regiões formam um conjunto de pontos (conhecidos como nós) e o conjunto de elementos, juntos denominados como malha de elementos finitos. Em cada elemento ocorre o cálculo das forças internas, por meio do uso de equações diferenciais, levando em consideração as propriedades geométricas e do material. Para determinar tais esforços executa-se as seguintes

etapas: a) montagem da matriz de rigidez da estrutura com base na matriz de rigidez de cada elemento; e b) determinação do deslocamento nodal da estrutura inteira, e, também, os de cada elemento, de modo a encontrar as forças internas, usando as condições de contorno como as restrições e o carregamento atuante (Fish e Belytschko, 2007).

Cabe registrar que independentemente da metodologia de cálculo adotada, as quais possuem vantagens e desvantagens a depender do caso a ser analisado, Medina e Motta (2005) enfatizam que o objetivo a ser perseguido é de limitar as tensões e as deformações na estrutura do pavimento, por meio da combinação de materiais e espessuras das camadas constituintes. E nesse aspecto, as simulações exigem o conhecimento das características comportamentais dos materiais desejados para a estrutura analisada, devendo ser selecionados ensaios de campo ou laboratório que permitam a sua melhor representatividade diante do caso analisado.

Tal condição se justifica pelos seguintes fatos: (i) a maioria dos materiais de pavimentação apresentam deformações outras (viscosa, viscoelástica e visco-plástica) que não são puramente elásticas quando submetidos a um estado de tensões; (ii) os materiais são frequentemente heterogêneos, anisotrópicos, possuem comportamento tensão-deformação não linear e constituem um meio particulado; e (iii) além do que descontinuidades como fronteiras, juntas ou trincas estão frequentemente presentes no pavimento, sendo as condições de interfaces (grau de aderência) não muito bem conhecidas.

3.3 Deformações Recuperáveis

O pavimento é uma estrutura formada por um sistema em camadas que trabalham solidariamente, o que permite compatibilizar o emprego de distintos materiais em termos de rigidez/elasticidade. A elasticidade de um material está relacionada com a sua capacidade de absorver energia de deformação, que é completamente recuperada após a remoção de forças externas que agem sobre a matéria. Portanto, sob essas condições, esse tipo de deformação é denominado de deformação elástica.

Borges (2001) aprofunda no conceito de deformações elásticas, ao considerá-las como um dos tipos de deformações reversíveis a que o pavimento está sujeito. Para a pesquisadora, as deformações reversíveis, ou transitórias, correspondem às deformações elásticas ou viscoelásticas da estrutura. Essas deformações são relacionadas aos deslocamentos relativos verticais que surgem na superfície, ou no interior da estrutura do pavimento, e desaparecem após ser retirada a carga que os produziu. Enquanto as deformações viscoelásticas se recuperam

de forma completa, somente após um certo intervalo de tempo, as deformações elásticas se recuperam de modo imediato.

Atribui-se à frequência e magnitude das deformações recuperáveis das camadas do pavimento e do subleito o fenômeno da fadiga das camadas superficiais rijas e coesivas, pelo qual ocorre a ruptura do material com valores inferiores aos seus limites de escoamento.

3.4 Deformações Permanentes

As deformações permanentes de um pavimento resultam do acúmulo de pequenas quantidades de deformação não recuperável, decorrentes de cargas repetidas aplicadas pela passagem dos veículos. Como consequência a estrutura apresenta o afundamento na trilha de roda ou escorregamento de massa (no revestimento asfáltico), que apesar de ser indesejada é um defeito estrutural muito comum nos pavimentos asfálticos brasileiros.

Bastos (2016) esclarece que a presença desse tipo de defeito cria uma perda de capacidade de drenagem do pavimento, resultando em danos causados pela água, além de torná-lo suscetível a fissuração por fadiga como resultado do afinamento da estrutura sob a trilha da roda. O excesso de irregularidade e acúmulo de água no pavimento causados pelos afundamentos também podem gerar insegurança à trafegabilidade dos veículos.

Segundo Borges (2001), as deformações plásticas ou irreversíveis podem ocorrer por:

- a) consolidação da camada do pavimento ou do subleito devido a deficiências construtivas como má compactação das camadas e falta de drenagem profunda, ou provocada pelo tráfego após a construção do pavimento, produzindo sulcos nas trilhas de roda dos veículos;
- b) deficiência estrutural devido a erros no dimensionamento da estrutura do pavimento;
- c) escoamento plástico do revestimento betuminoso devido ao excesso de ligante na mistura ou à aplicação de cargas além da capacidade da estrutura quando uma das camadas se rompe por cisalhamento;
- d) mudança de volume dos materiais expansivos constituintes do subleito, devido à variação de umidade ocasionando decréscimo da capacidade de suporte do subleito; e
- e) rompimento das camadas intermediárias do pavimento por não resistir às tensões de cisalhamento.

Em laboratório, o ensaio de deformação permanente é executado no mesmo equipamento utilizado no ensaio de módulo de resiliência (ensaio triaxial), sendo que a diferença está na frequência de carregamento e na utilização de um único par de tensões por corpo de prova. Há a propensão que a partir de um certo número de aplicações de cargas, alguns materiais apresentem um acomodamento, chamado de *shakedown*, sendo que a curva que descreve este comportamento quanto à deformação permanente do material tende a uma reta com inclinação muito pequena, ou mesmo horizontal. Assim a extrapolação de uma expressão exponencial fica incompatível para previsão se as definições forem realizadas com poucos ciclos de carga (Silva, 2021). Nas Figuras 3.3 e 3.4, são apresentadas alterações de comportamento de um material de subleito quando sujeito a 6 (seis) pares de tensões distintos. Nessas figuras é possível verificar que, após determinada deformação acumulada, o material tende a se estabilizar mesmo com o acréscimo do número de ciclos de cargas aplicadas.

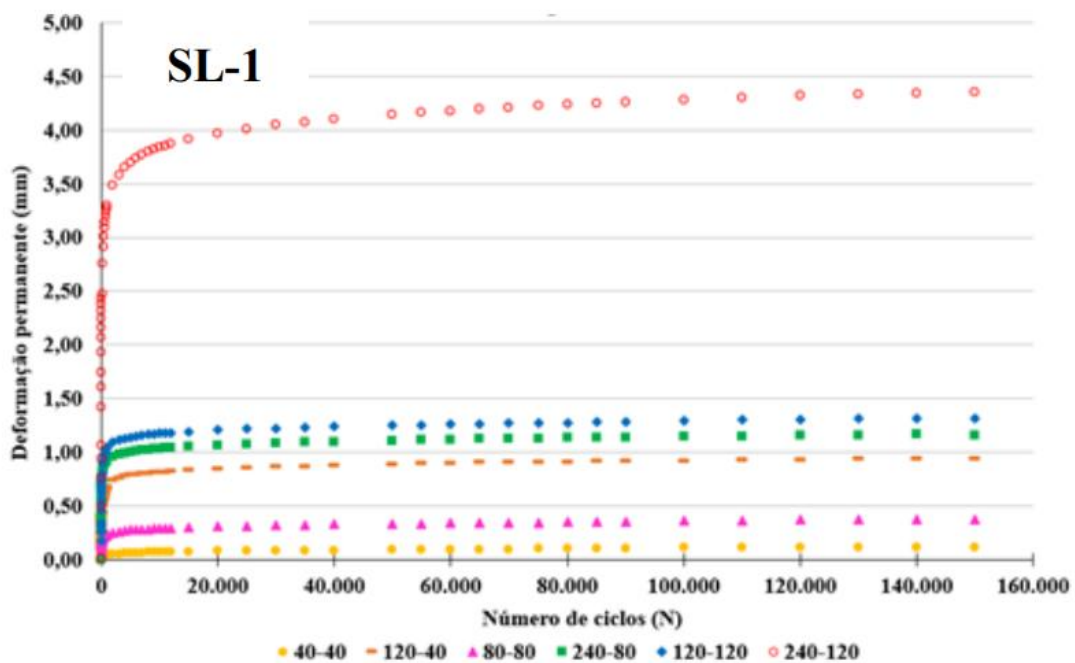


Figura 3.3 – Deformação plástica acumulada em relação ao número de ciclos aplicações de carga (de Paula et al., 2022)

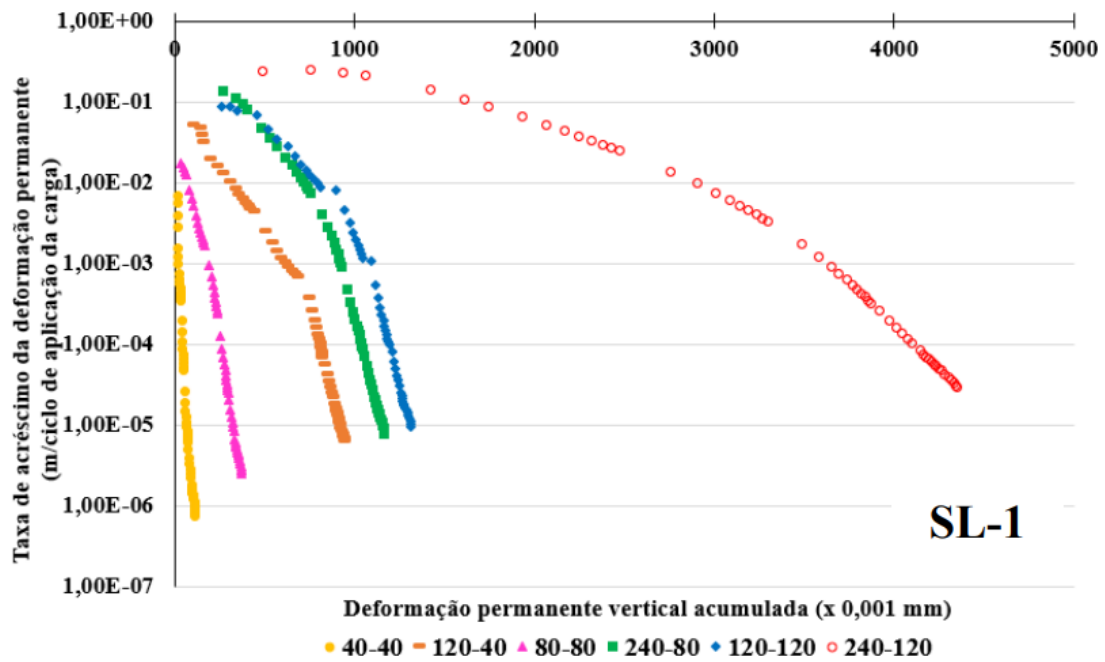


Figura 3.4 – Taxa de Acréscimo de deformação plástica em relação a deformação plástica acumulada (de Paula et al., 2022)

Ademais, observa-se na Figura 3.4 que as condições para pavimentos são mais favoráveis para os pares de tensões com relações 1:1, pois tende a estabilizar as deformações de modo rápido, diminuindo as chances de afundamento do pavimento. Porém, Guimarães (2009) indica a tendência de solos tropicais, quando aplicado em obras rodoviárias, se comportarem geralmente como as curvas com pares de tensões com relação 3:1, no qual embora haja significativa deformação inicial, a acomodação plástica ocorre com um tempo maior. O modelo de cálculo de deformação permanente implementado no programa MeDiNa segue a proposta desse autor conforme apresentado na Equação 3.1.

$$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_0}\right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{p_0}\right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (3.1)$$

onde:

- $\varepsilon_p(\%)$ é a deformação permanente (%);
- $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ são parâmetros de regressão;
- σ_3 é a tensão principal menor;
- σ_d é a tensão de desvio variável;
- p_0 é a tensão de referência (tensão atmosférica); e
- N é o número de ciclos de aplicação da carga.

Verifica-se, portanto, a importância da caracterização em laboratório dos materiais para garantir pavimentos resistentes ao acúmulo acentuado de deformação plástica na superfície, ao longo do tempo.

3.5 Módulo de Resiliência

O termo resiliência, segundo Medina e Motta (2005), deve-se a Francis Hveem, que o empregou em 1955 no intuito de diferenciar as deformações elásticas ocorridas nos pavimentos, que são muito maiores, das observadas em outros sólidos elásticos como o concreto e o aço. Segundo os autores, o termo “resiliência” significa “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”.

Já a relação entre a tensão desviadora aplicada e a deformação axial recuperável a partir da aplicação de um ciclo de carga axial, obtidos por meio do ensaio triaxial de cargas repetidas, é atribuído o termo “módulo de resiliência (MR)”. A expressão é dada pela Equação 3.2 a seguir:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (3.2)$$

onde:

MR	é o módulo de resiliência;
ε_r	é a deformação vertical recuperável ou resiliente; e
σ	é a tensão-desvio atuante.

Segundo Araújo (2009), o nome módulo de resiliência foi criado para que não fosse confundido com o módulo de Young, determinado estaticamente. O módulo de resiliência dos materiais de pavimentação é determinado normalmente de duas maneiras: i) por meio de ensaios em laboratório; ou ii) por meio de programas de retroanálise de bacias de deflexão medidas em campo por equipamentos específicos.

No entanto, Balbo (2007) esclarece que os materiais não obrigatoriamente apresentam valor de módulo de resiliência constante, pois o material raramente possui comportamento elástico linear, apresentando normalmente resposta elástica não linear, como é o caso de solos e de britas. Para o autor, no caso em que os materiais não apresentam módulo de resiliência constante ou linear, há a necessidade da definição, por meio de ensaio triaxial dinâmico em laboratório, de modelos constitutivos de comportamento que possam prever as variações do módulo de resiliência em função dos níveis de tensões, que ocorrem na estrutura. Nesse aspecto,

Macêdo (1996) demonstrou que do ponto de vista estatístico é mais aceitável o modelo de cálculo composto de módulo de resiliência, conforme descrito na Equação 3.3 a seguir:

$$MR = K_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (3.3)$$

onde:

MR	é o módulo de resiliência;
σ_3	é a tensão principal menor (confinante);
σ_d	é a tensão de desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$) variável; e
K_1, k_2 e k_3	são parâmetros experimentais.

O chamado modelo misto da Eq. (3.3) está codificado na versão atual do programa MeDiNa. No entanto, apontam-se algumas deficiências neste modelo: (i) para uma tensão confinante nula ($\sigma_3=0$), o modelo fornece um módulo nulo, quando muitos materiais (argilas não saturadas, por exemplo) apresentam uma rigidez inicial em estado não confinado; (ii) para uma tensão desviadora nula ($\sigma_d=0$), o modelo também calcula $MR=0$, quando quase todos os materiais apresentam rigidez não nula para estados de tensão isotrópicos ($\sigma_1=\sigma_3$); (iii) as constantes do modelo (k_1, k_2 e k_3) são dependentes da unidade (kgf/cm², MPa, psi etc) utilizada na calibração da expressão do MR. Estas deficiências poderiam ser facilmente sanadas com a adoção de uma expressão baseada no chamado Modelo Universal de Uzan-Witczak (Cunto, 1998), conforme apresentado na Equação 3.4 a seguir:

$$MR = k_1 \cdot p_a \cdot \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3} \quad (3.4)$$

onde:

MR	é o módulo de resiliência;
$\theta = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$	é a pressão hidrostática;
τ_{oct}	é a tensão octaédrica;
k_1, k_2 e k_3	são parâmetros experimentais; e
p_a	é a pressão de referência (atmosférica) na unidade adotada.

Medina e Motta (2005) registram que o módulo de resiliência de solos depende de sua natureza (constituição mineralógica, textura, plasticidade da fração fina), umidade, densidade e estado de tensões (peso próprio mais tensões causadas pelas cargas dos veículos).

Para Macêdo (1996) o comportamento de solos granulares sob carregamento repetido depende fundamentalmente do nível de tensão aplicado. Quando estes materiais são submetidos a estados de tensões longe da ruptura, a deformação irreversível diminui a cada repetição de carga e, eventualmente, sob condições drenadas, o comportamento chega a ser quase completamente resiliente linear. Já sob condições não drenadas, as deformações resilientes e permanente podem sofrer modificações pelas mudanças na poro-pressão, entretanto, como possuem superfície específica muito pequena é de se esperar que a umidade e a pressão de sucção não tenham a mesma importância que é dada a estas propriedades quando se trata de solos finos. Logo, as pressões intergranulares de contato passam a ter maiores importâncias e conseqüentemente o módulo de resiliência é influenciado pela pressão confinante.

Já os solos finos apresentam um comportamento dependendo da tensão desvio. Medina e Motta (2005) indicam que este comportamento é corriqueiramente chamado de bi-linear. Normalmente, a partir de um dado valor de tensão de desvio, o valor do módulo de resiliência torna-se menos sensível a variações na tensão-desvio. Porém, no caso de solos finos coesivos é registrada uma queda de magnitude do módulo de resiliência na medida que a tensão desvio aumenta, ou seja, para um valor fixo de tensão confinante, o módulo de resiliência diminuiria com o incremento da tensão vertical aplicada.

Macêdo (1996) complementa tal entendimento ao esclarecer que embora geralmente se considere o módulo de resiliência como dependente do estado de tensão, em vez do estado de deformações, o comportamento dinâmico desses solos são influenciados também pelas amplitudes de deformação elástica experimentadas como resposta às tensões/cargas aplicadas e não somente a intensidade dessas cargas. Assim, para um mesmo nível de tensão, as deformações induzidas dependem da poro-pressão desenvolvida para aquele estado de tensões.

Por outro lado, também existem materiais que possuem propriedades elásticas variáveis ao longo da vida útil de serviço. É o caso de camadas com materiais estabilizados, como a brita graduada tratada com cimento, do concreto compactado a rolo e do solo cimento, embora tratadas inicialmente como possuidoras de módulos de resiliência lineares. O módulo de resiliência desses materiais decai a cada mês devido ao aumento do dano de fadiga, com comportamento do tipo sigmoidal, variando entre dois limites: o limite superior representa a camada nova, que ainda não sofreu nenhum dano de fadiga; e o limite inferior que é quando a camada atingiu sua vida de fadiga e está totalmente trincada, com comportamento próximo a de uma camada granular. A representação matemática desse modelo é ilustrada na Equação 3.5 a seguir:

$$MR = MR_{mín} + \frac{MR_{máx} - MR_{mín}}{1 + e^{-4+14 \cdot Di}} \quad (3.5)$$

onde Di representa o dano de fadiga, sendo representado no intervalo de 0 a 1, conforme observado na Figura 3.5 a seguir:



Figura 3.5 - Representação de Módulo de Resiliência de camadas estabilizadas com cimento (MeDiNa)

Os módulos de resiliência de misturas asfálticas ou cimentadas podem ser determinados em ensaios de compressão diametral dinâmico, ou de tração indireta, em condições controladas de temperatura (misturas asfálticas) e de umidade (misturas cimentadas). Nesses ensaios os corpos-de-prova são cilíndricos, sendo moldados em laboratório ou extraídos diretamente da pista com sonda rotativa. Existe também a possibilidade da adoção do ensaio de flexão dinâmico, que consiste em submeter uma vigota de mistura asfáltica ou cimentada bi-apoiada a um carregamento cíclico, sendo mais indicada a flexão a quatro pontos (4PB).

Cabe registrar que a escolha da maneira como se obtém os módulos de resiliência dos materiais empregados na estrutura do pavimento não deve ocorrer de modo unilateral. A obtenção de módulos por meio de ensaio não destrutivo em muito agiliza o processo, além de ser mais econômico. Por outro lado, os valores dos módulos de resiliência obtidos nos ensaios de laboratório constituem uma contribuição importante para o balizamento dos programas de retroanálise de bacias deflectométricas.

3.6 Deflexão

A deflexão do pavimento é a resposta das camadas estruturais e do subleito, em termos de deslocamentos verticais recuperáveis, à aplicação do carregamento, sendo dependente

diretamente da rigidez das camadas, expressa pelos valores dos módulos de resiliência, sendo utilizada pela norma DNER 011-PRO (1979) para diferenciar os pavimentos em bom estado estrutural dos debilitados.

Tendo as camadas superiores do pavimento a função de redistribuição das cargas geradas pela passagem das rodas dos veículos de modo e minimizar os seus efeitos nas camadas de menor resistência, o valor da deflexão tende a diminuir com a profundidade e com o distanciamento do ponto de aplicação da carga.

A deflexão do pavimento, da forma como é medida, é o resultado de uma parcela de deformação elástica e uma parcela viscoelástica. Logo, pode-se dizer que a deflexão do pavimento faz parte do grupo das respostas recuperáveis, que deixam de existir alguns momentos após a retirada da carga.

3.7 Bacias Deflectométricas

Em muitos casos, somente a deflexão máxima não é suficiente para explicar sozinho o comportamento estrutural e o processo de distribuição de cargas no interior do pavimento. A incorporação de leituras adicionais permite o delineamento da linha elástica dos deslocamentos verticais recuperáveis, isto é, a linha deformada do pavimento quando solicitado por uma carga, conforme ilustrado na Figura 3.6 a seguir.

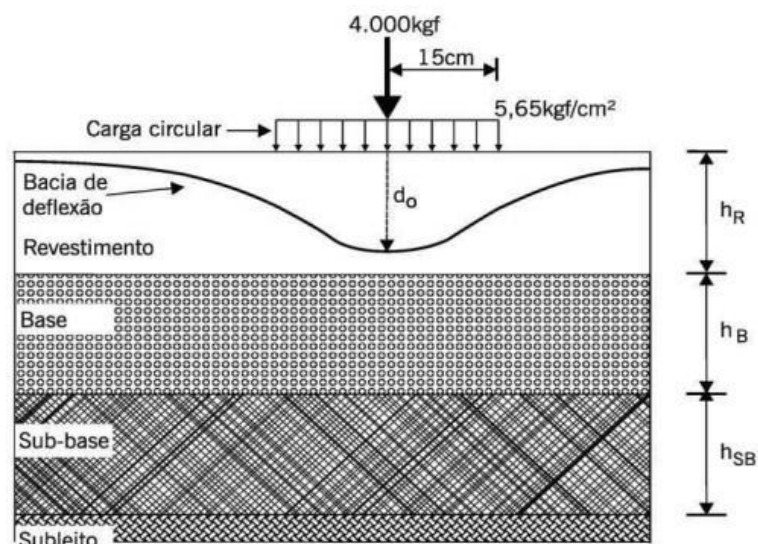


Figura 3.6 – Representação gráfica de bacia deflectométrica gerada a partir da passagem da roda de um veículo no pavimento (Balbo, 2007)

A partir da análise da Figura 3.6, percebe-se que apenas valores de deflexões máximas não são capazes de trazer maior luz para o esclarecimento do comportamento estrutural de um pavimento. A forma assumida pela deformada ou bacia de deflexões pode indicar, por meio da

análise de parâmetros, a capacidade de cada camada do pavimento em distribuir as cargas para as camadas subjacentes do pavimento. Para ilustrar essa situação, a Figura 3.7 ilustra exemplo citado por Balbo (2007).

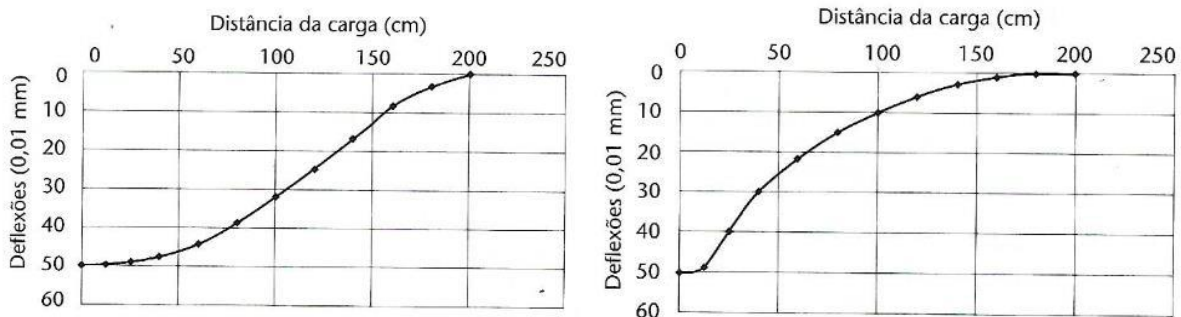


Figura 3.7 – Exemplos de bacia deflectométrica com mesma deflexão máxima e de comportamentos distintos (Balbo, 2007)

Observa-se no gráfico do lado esquerdo da Figura 3.7 uma boa distribuição de esforços sobre as camadas inferiores uma vez que há uma redução paulatina no valor de deflexão à medida que a carga é afastada do ponto de prova. Por outro lado, o gráfico do lado direito apresenta ponto de inflexão brusco depois de um pequeno afastamento da carga do ponto de prova, revelando um pavimento que, embora com a mesma deflexão total em relação a outro caso, concentra a reação à carga em área muito próxima ao ponto de aplicação de cargas, denotando assim um comportamento inapropriado.

Outro aspecto a ser observado com o levantamento de bacias deflectométricas é a influência dos resultados decorrentes de alterações pontuais de módulos de resiliência dos materiais provocados pelo trincamento, afundamento plástico e variações de temperatura do revestimento asfáltico, ou pelas condições de drenagem observadas nas camadas inferiores. Para mitigar esses casos, faz-se necessária a definição de uma amostra estatisticamente representativa de bacias para o segmento homogêneo avaliado, de modo a possibilitar expurgar aquelas que apresentem erros de convergência na retroanálise ou que apresentem comportamento muito discrepante da maioria (*outliers*).

3.7.1 Contribuição relativa de cada camada na deflexão total

Segundo Balbo (2007), cada uma das camadas do pavimento contribui de modo distinto para a deflexão total. Para tanto, o autor relacionou os principais aspectos relacionados a esse cenário, dentre os quais destacam-se:

- a) Os revestimentos asfálticos, elementos mais rígidos das estruturas analisadas, praticamente não sofrem deformações específicas verticais em suas camadas de maneira que sua contribuição para deflexão total é quase inexistente;
- b) Os subleitos, elementos mais deformáveis elasticamente, respondem pela maior parcela de contribuição para formação das deflexões totais (variação de 60 a 85%);
- c) A menor contribuição do subleito ocorre pelo aumento de seu módulo de resiliência, o que torna a estrutura menos deformável;
- d) O aumento do módulo de resiliência da base gera melhor distribuição de pressões sobre os subleitos (menores valores de σ_v garantem níveis de deformação menores no subleito, que está menos solicitado, reduzindo sua contribuição).
- e) Quanto menos rígida for a base, mais esta passa a contribuir na mobilização de deformações. Ressalta-se que a base é mais exigida nesse quesito quando apoiada sobre subleitos de menor rigidez; e
- f) O aumento da espessura do revestimento alivia pressões sobre as bases de tal sorte que estas se deformam menos, contribuindo menos com a deflexão total em contrapartida, os revestimentos apresentam ligeiro aumento em sua contribuição quando são mais espessos.

Na Figura 3.8 a seguir são apresentadas as formas assumidas pelas bacias deflectométricas quando são alterados os parâmetros das camadas do pavimento e subleito, proporcionando melhor entendimento sobre a contribuição relativa de cada um desses elementos na deflexão total.

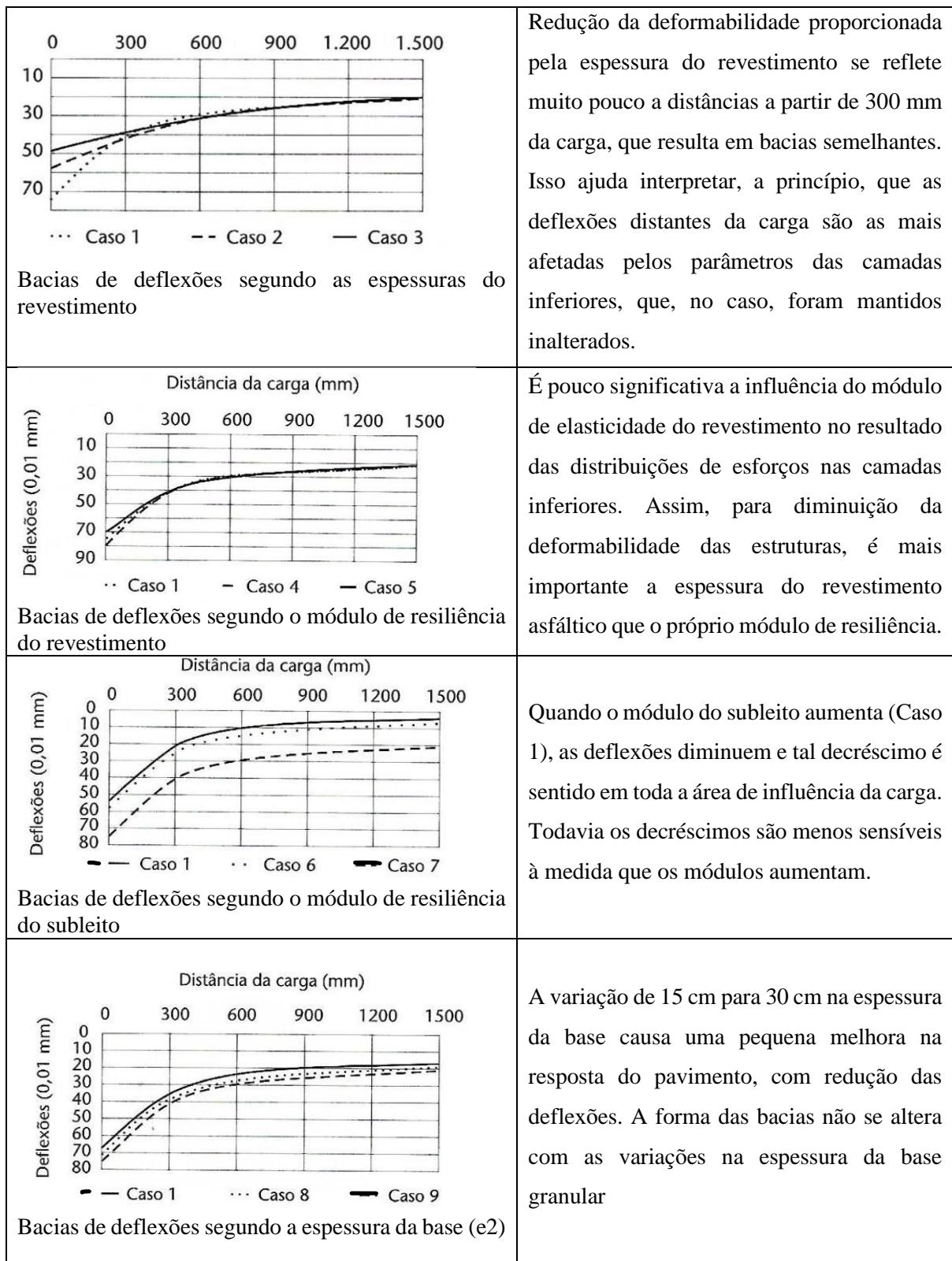


Figura 3.8– Formas assumidas pelas bacias deflectométricas em função da caracterização das camadas do pavimento (Balbo,2007)

3.7.2 Parâmetros de Bacias Deflectométricas

Os dados provenientes de avaliações com equipamentos deflectométricos permitem ao projetista estimar a condição estrutural do pavimento e para isso pode-se lançar mão de parâmetros de bacia deflectométrica previstos na literatura. Os critérios para estas avaliações são apresentados na sequência.

a) Deflexão Recuperável Máxima (Do)

A deflexão recuperável máxima (D_0) é a deflexão medida no ponto de aplicação de carga, estando estabelecida na norma DNER 011-PRO (1979) como um parâmetro importante para a compreensão do comportamento da estrutura do pavimento como um todo. Ferri (2014) informa que quanto maior for o valor desse parâmetro menor será a rigidez da estrutura, e maior o potencial de danos às camadas de pavimentos convencionais. No entanto, Pinto e Preussler (2002) indicam que a análise isolada de seu valor não dá todos os indícios necessários para a completa caracterização estrutural, já que estruturas de pavimentos distintas podem apresentar a mesma deflexão máxima, porém com curvaturas diferentes ao longo da deformada. Assim, a forma da deformada acaba por assumir grande relevância na avaliação estrutural.

b) Raio de Curvatura (RC)

A expressão de cálculo utilizada para a determinação do raio de curvatura é preconizada pelo DNIT na norma DNER 024-ME (1994). O raio de curvatura é um parâmetro indicativo da curvatura da bacia de deflexões na sua porção mais crítica, em geral considerada a 25 cm do centro da carga. A norma DNER 011-PRO (1979), que preconiza procedimentos de cálculo de reforço estrutural para reabilitação de pavimentos asfálticos, estabelece que raios de curvaturas baixos (menores que 100 m) indicam condições estruturais críticas da estrutura do pavimento. Porém, de acordo com Ferri (2014) esta regra não é universal e não se aplica a pavimentos do tipo semirrígidos, por exemplo. O valor do raio pode ser definido por meio da Equação 3.6 apresentada a seguir:

$$RC = \frac{3125}{(D_0 - D_{25})} \quad (3.6)$$

onde D_0 e D_{25} são as deflexões (em 0,01mm) às distâncias de 0 e 25 cm, respectivamente, do ponto de aplicação da carga.

A expressão geral do raio de curvatura é representada matematicamente a partir da curvatura de um arco parabólico, sendo apresentada na forma da Equação 3.7 a seguir:

$$RC = \frac{10 \cdot x^2}{2 \cdot (D_0 - D_x)} \quad (3.7)$$

onde:

RC	é o raio de curvatura (em m);
x	é a distância da origem (em cm);
D_0	é a deflexão sob o ponto de aplicação da carga (origem); e
D_x	é a deflexão a uma distância x próxima do ponto de aplicação da carga (ambos em 0,01 mm).

Para bacias obtidas com viga Belkelmann toma-se D_x a 25 cm, o que resulta na Equação (3.6), mas para bacias obtidas com FWD o valor de D_x é geralmente obtido a 30 cm da origem.

Esse parâmetro é afetado especialmente pelas características elásticas dos componentes da porção superior da estrutura, ou seja, o próprio revestimento e a base. Assim, um raio de curvatura de valor baixo é normalmente um indicativo de que os módulos elásticos das camadas superiores do pavimento apresentam valores abaixo dos desejáveis (Pinto e Preussler, 2002).

c) AREA

O parâmetro AREA é apresentado no guia de dimensionamento da AASHTO de 1993, sendo proposto por Hoffman e Thompson em 1981 para pavimentos flexíveis. A sua medida é derivada do resultado da área sob a curva da bacia de deformação, utilizando a regra de Simpson, e normalizada pela deflexão recuperável máxima (D_0) com a finalidade de remover o efeito de diferentes níveis de carga e restringir a faixa de valores obtidos. Deste modo, o valor do parâmetro AREA é função da localização dos sensores, até 90 cm do ponto de aplicação da carga, e tem como unidade o comprimento. A expressão para cálculo é apresentada na Equação 3.8 a seguir:

$$AREA = 15 \cdot \left[1 + 2 \cdot \frac{D_{30}}{D_0} + 2 \cdot \frac{D_{60}}{D_0} + \frac{D_{90}}{D_0} \right] \quad (3.8)$$

onde D_0 , D_{30} , D_{60} e D_{90} são as deflexões (em 0,01mm) às distâncias de 0, 30, 60 e 90 cm, respectivamente, do ponto de aplicação da carga.

Para Ferri (2014), o valor numérico máximo que o parâmetro AREA pode atingir é aproximadamente 90 cm e isso ocorrerá quando as medidas de deflexões D_0 , D_{30} , D_{60} e D_{90} forem iguais, embora na prática isto seja muito difícil de se verificar. As quatro deflexões iguais ou aproximadamente idênticas numericamente indicam uma estrutura extremamente rígida, semelhante à dos pavimentos de concreto de cimento Portland ou pavimentos asfálticos espessos e de elevado módulo de resiliência. Já o mínimo valor do parâmetro AREA é da ordem de 28 cm e corresponde ao valor determinado para um sistema elástico homogêneo, constituído de apenas uma camada. Isto pode ocorrer quando se efetua o levantamento deflectométrico sobre o topo do subleito. Uma estrutura constituída de três camadas elásticas que apresenta valor de AREA próxima do valor mínimo corresponde a uma estrutura onde os módulos do revestimento, da base e do subleito são praticamente iguais, situação essa indesejável para o bom desempenho real dos pavimentos. A Tabela 3.1 apresentada a seguir ilustra a faixa de valores de AREA para alguns tipos de pavimentos.

Tabela 3.1- Faixa do parâmetro AREA (WSDOT ,2005 *apud* Ferri, 2014)

Tipo de Pavimento	Parâmetro AREA (cm)
Pavimento de Concreto – CCP	60 - 90
Asfálticos espessos – CA > 12 cm	55 - 75
Asfálticos delgados	40 – 50
Flexíveis “Fracos”	28 - 40

d) Índice de Curvatura da Superfície (SCI)

Do inglês *Surface Curvature Index*, é o indicador mais sensível para evidenciar a situação da rigidez da camada de revestimento asfáltico. O cálculo do SCI é realizado por meio da Equação 3.9 apresentada a seguir:

$$SCI = D_0 - D_{30} \quad (3.9)$$

onde D_0 e D_{30} são as deflexões (em 0,01mm) às distâncias de 0 e 30 cm, respectivamente, do ponto de aplicação da carga.

Lopes (2012) menciona tratar-se de um parâmetro indicativo de rigidez das camadas superiores do pavimento (revestimento e base), sendo o seu valor inversamente proporcional à rigidez global do pavimento, isto é, quanto menor o seu valor mais rígido é o pavimento. Segundo Andrade et al. (2016), os valores de SCI superiores a 25×10^{-2} mm indicam que a camada de revestimento é pouco rígida ou é de pequena espessura.

e) Índice de Danos na Base (BDI)

Do inglês *Base Damage Index*, é o indicador para evidenciar a situação da rigidez da camada de base. O cálculo do BDI é realizado por meio da Equação 3.10 apresentada a seguir:

$$BDI = D_{30} - D_{60} \quad (3.10)$$

onde D_{30} e D_{60} são as deflexões (em 0,01mm) às distâncias de 30 e 60 cm, respectivamente, do ponto de aplicação da carga.

Para Lopes (2012) o BDI é apresentado como um indicativo aproximado da rigidez do conjunto das camadas de revestimento, base e sub-base do pavimento. Assim sendo, para um dado valor de módulo de elasticidade do subleito, esse parâmetro é inversamente proporcional à rigidez da estrutura do pavimento, isto é, seus valores diminuem com o aumento da espessura equivalente “t” do pavimento. Segundo Andrade et al. (2016), valores de BDI superiores a 40×10^{-2} mm indicam pavimentos pouco rígidos ou pavimentos com problemas estruturais.

f) Índice de Curvatura da Base (BCI)

Do inglês *Base Curvature Index*, é o indicador para verificar a condição do subleito. O cálculo do BCI é realizado por meio da Equação 3.11 apresentada a seguir:

$$BCI = D_{60} - D_{90} \quad (3.11)$$

onde D_{60} e D_{90} são as deflexões (em 0,01mm) às distâncias de 60 e 90 cm, respectivamente, do ponto de aplicação da carga.

Para Lopes (2012) este parâmetro é apresentado como o melhor indicador da condição do subleito, e por possuir tal condição acaba por variar pouco durante a vida útil do pavimento, mesmo quando este já atingiu a fase de fadiga. Logo, o BCI tende a não sofrer influência das características das camadas estruturais do pavimento. Para Andrade et al. (2016), valores de BCI superiores a 10×10^{-2} mm indicam que o subleito possui CBR menor que 10% e indicam problemas estruturais no subleito.

3.8 Segmento Homogêneo

Trata-se de segmento da rodovia que apresenta, dentro dos seus limites, similaridade em termos funcionais, estruturais e de tráfego. Por apresentar essas características possibilita a representatividade estatística e consequente obtenção de um valor numérico de um determinado parâmetro analisado.

De acordo com a norma DNER 011-PRO (1979), a divisão dos segmentos deve partir de alguns pré-requisitos; comprimento mínimo de 200 m e máximo de 2000 m. O critério de divisão dos segmentos homogêneos foi estabelecido pelo manual DNIT IPR-720 (2006), que segue o método das diferenças acumuladas da AASHTO (1993). Esse método consiste na seguinte sequência de cálculo:

- a) Calcula-se o valor médio da deflexão para todo o trecho (D);
- b) Calcula-se a diferença entre cada valor individual e o valor médio;
- c) Calculam-se os valores acumulados das diferenças;
- d) Plota-se em um gráfico, nas abscissas as distâncias e nas ordenadas os valores acumulados das diferenças.

Cada variação de coeficiente angular da curva obtida indica uma mudança do comportamento médio de um determinado segmento para outro, delimitando as extremidades dos segmentos homogêneos (Bernucci et al., 2022).

3.9 Tráfego

A avaliação da solicitação do tráfego é um dos parâmetros de análise de maior relevância tanto para pavimentos novos como para projetos de reforço, pois as estruturas projetadas e existentes estão intimamente ligadas às magnitudes das cargas que a solicitarão por eixos de diversas configurações com cargas distintas. Em termos de dimensionamento de pavimentos, o tratamento das solicitações do tráfego é a conversão de todo o universo de cargas de eixos permitidos por lei em um número equivalente de repetições de um eixo-padrão. No caso do Brasil, o eixo padrão estabelecido é o eixo simples de rodagem dupla (ESRD) com carga total de 8,2 tf.

Segundo Cavalcante (2005), o efeito deletério do tráfego sobre os pavimentos é bastante complexo se constituindo numa das maiores dificuldades encontradas na tentativa de tornar racional a consideração deste componente no dimensionamento da estrutura do pavimento. O pesquisador cita os seguintes fatores que concorrem para a complexidade do problema:

- Heterogeneidade das configurações de eixos;
- Variações nos valores das cargas por eixo e pressão de inflação dos pneumáticos ao longo da vida de projeto;
- Variações na velocidade dos veículos devido à geometria da via e volume de tráfego;
- Efeito do meio ambiente (temperatura e umidade);

- Comportamento dos materiais das camadas do pavimento e do subleito.

De acordo com a norma DNIT TER-005 (2003), os defeitos nos pavimentos flexíveis podem assumir várias formas, dentre os principais tipos associados à passagem de veículos citam-se:

- a) trincas no revestimento geradas por deformação permanente excessiva e/ou decorrentes de fenômenos de fadiga;
- b) afundamentos na trilha de roda devido a deformações plásticas de uma ou mais camada do pavimento ou do subleito;
- c) ondulações e escorregamentos no revestimento causadas por instabilidade da mistura betuminosa;
- d) desgaste acentuado na superfície do revestimento;
- e) painéis ou buracos decorrentes da desagregação do revestimento e, às vezes, de camadas inferiores.

A presença desses tipos de defeitos associados ao acúmulo da chuva no pavimento provoca a insegurança nas condições de rodagem dos veículos, exigindo de agências de transportes medidas corretivas de manutenção quando detectados. Cabe ressaltar que o surgimento desses defeitos pode ocorrer muitas das vezes de modo prematuro devido a excessos de pesos praticados por caminhões.

No Brasil, os veículos são regulamentados pelas Leis do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), que no ano de 1997 estabeleceu a carga máxima admissível por eixo simples de rodagem dupla de 10 tf (98 kN) e o peso bruto total por unidade ou combinações de veículos em 45tf (441 KN). O CONTRAN, na resolução nº 882 de 13.12.2021, admitiu uma tolerância de 5% sobre o peso bruto total, acima das cargas legais admitidas, devido à falta de precisão das balanças. Os limites legais para a carga máxima por eixo vigente no Brasil de acordo com a Lei nº 7408/1985 são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Limite legal de carga por eixo (Lei nº 7408/1985)

Tipo de Eixo	Carga Legal (tf)
Eixo simples de roda simples	6
Eixo simples de roda dupla	10
Eixo tandem duplo	17
Eixo tandem triplo	25,5

Para a representatividade do tráfego em projetos de pavimentação, adota-se o conceito de “volume médio diário” (VMD). Por esse conceito entende-se o volume total de veículos que

passam por uma seção completa da via, ou seja, não estando descontados, nessa definição, os veículos leves (desprezados para a análise de pavimentos). O VMD é geralmente obtido com base em cálculos de 365 dias para abrigar todas as condições de sazonalidade semanais ou mensais do tráfego. Por essa razão, o VMD é frequentemente denominado VMD anual.

3.10 Avaliação de pavimentos asfálticos

O estudo da condição de um pavimento é feito por meio do conhecimento de diversos parâmetros de referência, já normatizados e citados pelo manual DNIT IPR-720 (2006). Este estudo é precedido por uma avaliação funcional e uma avaliação estrutural.

A avaliação funcional descreve a qualidade da rodovia em termos de conforto, segurança, custo ao usuário, influência do meio ambiente e aspectos estéticos, procurando-se associar a natureza dos defeitos às causas determinantes. A avaliação estrutural, por sua vez, está relacionada à capacidade de suporte do pavimento, abrangendo as características de resistência e deformabilidade das camadas do pavimento e do subleito sob a ação das cargas atuantes. Essas duas avaliações fornecem dados para a definição das alternativas de restauração apropriadas.

Nas soluções de reabilitação funcional do pavimento deve-se dar especial atenção à execução de camada asfáltica sobre o pavimento existente que preserve o greide de projeto, para que tal solução não comprometa o sistema de drenagem, o nivelamento e as declividades da via, assim como a passagem de veículos sob viadutos.

Caso a solução seja de cunho estrutural, faz-se necessário utilizar um método de projeto que considere as características de deformabilidade das camadas e do novo revestimento, levando em conta os parâmetros de rigidez medidos ou obtidos por retroanálise para se calcular as espessuras de reforço necessárias. Os procedimentos de projeto que resultem em uma espessura de camada asfáltica complementar como reforço estrutural não devem ser empregados sem que haja necessariamente a verificação do estado do pavimento existente. Esta recomendação deve-se ao fato de que as camadas superficiais deterioradas ou a presença de trincas severas no pavimento antigo podem se refletir na nova camada em curto intervalo de tempo após a execução da restauração asfáltica (Bernucci et al., 2022).

3.10.1 Avaliação funcional de pavimentos asfálticos

Na avaliação funcional, verifica-se a condição da superfície do pavimento, por meio do levantamento e análise de defeitos superficiais, e da irregularidade longitudinal. Os principais

defeitos considerados na avaliação funcional do pavimento existente são os de degradação superficial (trincas, panelas, exsudações, desgastes etc.) e os de deformação de perfil (deformações permanentes - irregularidades transversais e longitudinais).

Segundo Borges (2001), os dados da condição superficial do pavimento constituem um papel importante para a avaliação da serventia do pavimento e para os programas de reabilitação de pavimentos, devendo para tanto serem descritos de maneira quantitativa e qualitativa por meio de procedimentos padronizados.

A avaliação das características funcionais de um pavimento de maneira qualitativa ocorre por meio de emprego de técnicas de avaliação subjetiva, na qual é avaliado o nível de serventia do pavimento. Como exemplos de indicadores utilizados para externar esse tipo de avaliação estão o “Valor de Serventia Atual - VSA”, estabelecido na Norma DNIT PRO-009 (2003), e o “Índice de Gravidade Global Exedito - IGGE”, estabelecido na Norma DNIT PRO-008 (2003).

Por sua vez, as técnicas de avaliações objetivas são aquelas que permitem expressar a degradação do pavimento por meio de quantificação numérica e da distribuição de severidade das diversas manifestações de ruína. Exemplos de aplicação dessa técnica estão registrados na Norma DNIT PRO-006 (2003), que estabelece o uso do indicador “Índice de Gravidade Global - IGG”, e a Norma DNIT PRO-007 (2003), que consiste em procedimento de medida das dimensões de defeitos dentro da área amostral de estações de análise.

Como exemplos de levantamentos funcionais usualmente utilizados por agências rodoviárias citam-se:

- a) levantamento visual detalhado, no qual há o cadastramento de trincas, panelas e buracos;
- b) medição de desgastes e rugosidade, por meio de ensaios de microtextura e macrotextura;
- c) medição de afundamentos na trilha de roda com o uso da treliça; e
- d) medição do índice de irregularidade longitudinal – IRI com o uso de perfilômetro a laser.

3.10.2 Avaliação estrutural de pavimentos asfálticos

Na avaliação estrutural verifica-se a capacidade de carga do pavimento, compreendendo o estudo das características de resistência e de deformabilidade de suas camadas. Dados referentes à adequabilidade estrutural do pavimento permitem detectar as causas mais prováveis

das manifestações de ruína do pavimento, e conseqüentemente, definir a magnitude das operações necessárias à sua restauração (Borges, 2001).

Em geral, a avaliação estrutural de um pavimento, em campo, pode ser feita por métodos destrutivos ou não-destrutivos.

3.10.2.1 Avaliação estrutural por ensaios destrutivos

Um método destrutivo é aquele que investiga a condição estrutural de cada camada que compõe o pavimento por abertura de trincheiras ou poços de sondagem, permitindo recolher amostras de cada material até o subleito e realizar ensaios posteriores em laboratório. Pela sua própria natureza, invalida as áreas onde foram feitas as remoções para futuros testes, devendo, portanto, ser utilizado em poucos pontos selecionados como representativos de cada segmento a ser avaliado para auxiliar. Segundo Medina et al. (1994), esses ensaios são de fundamental importância para balizar os programas de retroanálise, utilizados com dados resultantes de ensaios não destrutivos de pavimentos.

3.10.2.2 Avaliação estrutural por ensaios não destrutivos

O princípio de funcionamento de métodos não destrutivos, em geral, está baseado na determinação da deformação elástica do pavimento como resposta de um carregamento dinâmico do tráfego. O principal parâmetro buscado nesse método é o módulo de resiliência dos materiais que compõem a estrutura do pavimento, o qual é influenciado pelo teor de umidade e pela temperatura.

As vantagens dos ensaios não destrutivos residem no fato de que as medições são verdadeiramente *in-situ*, possibilitando a medição da resposta real do pavimento ao carregamento aplicado, sem submeter os materiais aos distúrbios causados pela retirada de amostras e dispensando a preparação de corpos de prova que reproduzam as características do material na estrutura real do pavimento.

De acordo com Cavalcante (2005), os equipamentos que são utilizados para ensaios não destrutivos se dividem nos que se baseiam em ensaios deflectométricos, em transmissão de ondas eletromagnéticas ou na propagação de ondas sísmicas. Os equipamentos de ensaio deflectométricos são os mais adotados nas obras de pavimentação no Brasil, tendo como vantagens perante outros métodos: (i) a acurácia das medidas; (ii) a produtividade, em termos de números de ensaios por dia de trabalho; (iii) a simulação mais próxima da realidade das

condições de carregamento do tráfego; (iv) a forma simples de operação e de interpretação dos resultados; e (v) os custos de ensaios frente a métodos destrutivos.

Para o pesquisador, os equipamentos de aquisição de dados deflectométricos se dividem em três classes:

- a) Equipamentos de carregamento quase-estático: são os que medem a deflexão do pavimento sob carregamento das rodas de veículos, devendo, no entanto, se deslocar a velocidade muito baixa para que não ocorra a influência de forças inerciais. Nesta classe estão incluídos: o ensaio de placa, a viga Benkelman, o curviâmetro, o deflectógrafo Lacrox e o “*California travelling deflectometer*”;
- b) Equipamentos de carregamento dinâmico em regime permanente: são os que aplicam uma carga estática na superfície do pavimento conjuntamente com uma vibração harmônica estável para induzir o caráter dinâmico do ensaio. Nesta classe estão incluídos: o Dynaflect, o *road rater* e o vibrador WES-16 do Corpo de Engenharia dos EUA;
- c) Equipamentos que medem a deflexão a partir de carregamentos por impulso: são os que aplicam uma força transiente ao pavimento pelo impacto causado pela queda de um peso alçado a uma certa altura num sistema guia. O peso ao cair choca-se com uma placa que transmite a força ao pavimento, força esta que pode ser variada pela alteração do conjunto de massas e/ou altura por um processo de tentativa e erro para a resposta conveniente da estrutura. Nessa classe de equipamentos são incluídos os “*Falling Weight Deflectometer – FWD*” e o “*Light Weight Deflectometer – LWD*”

No presente estudo, serão abordados aspectos relacionados ao FWD devido a sua utilização cada vez mais presente nas avaliações de pavimentos flexíveis no Brasil, e pelas vantagens e precisão em caracterizar as bacias deflectométricas de pavimentos já implantados. O princípio de funcionamento do FWD é caracterizado pela queda de um conjunto de pesos sobre um sistema de borracha que amortece e transfere as cargas aplicadas a uma placa circular apoiada no pavimento. As deflexões provocadas pela aplicação da carga são registradas por um conjunto de sensores dispostos longitudinalmente a partir do ponto de aplicação da carga (Rocha Filho, 1996), conforme ilustrado na Figura 3.9.

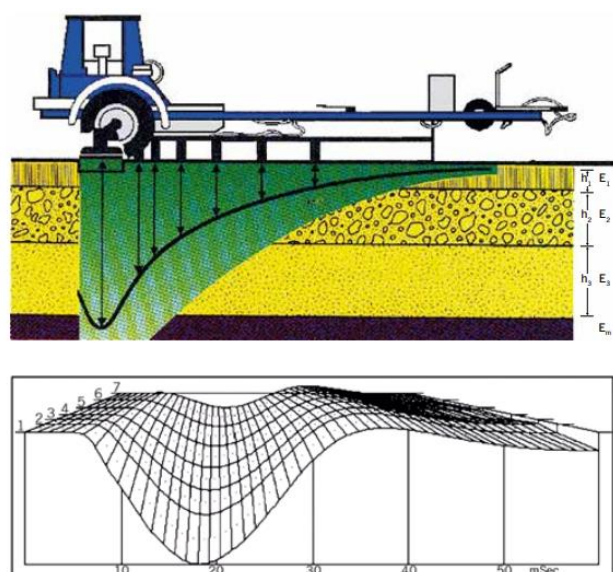


Figura 3.9 - Representação de bacia deflectométrica medida por FWD (Bernucci et al., 2022, apud dynatest.com)

Todos os equipamentos FWD comercialmente disponíveis possuem o mesmo princípio de funcionamento, porém se diferenciam quanto a 3 (três) aspectos: forma de geração de carga impulsiva (um peso ou dois pesos de queda); forma de distribuir a carga para a superfície do pavimento e tipo de transdutor utilizado para medir as deflexões (geofones, LVDTs, acelerômetros).

No Brasil os ensaios com os equipamentos tipo FWD são normatizados pelo procedimento DNER PRO-273 (1996). Os equipamentos mais conhecidos no Brasil são o Dynatest FWD e o KUAB FWD. Na Tabela 3.3 constam as características desses dois equipamentos.

Tabela 3.3 – Comparação entre equipamentos FWD utilizados no Brasil (Theisen et al., 2020)

Característica	FWD Dynatest®	FWD Kuab®
Montagem	trailer aberto	trailer fechado
Pulso de carga	queda de um conjunto de massas	queda de dois conjuntos de massas
Tempo de duração do pulso	0,030 s	0,034 s a 0,05 s
Placa rígida de carga	uma com 30 cm de diâmetro e outra com 45 cm de diâmetro	placa segmentada e quatro partes unidas por êmbolos
Ajuste à superfície do pavimento	inclinação da placa até 6° em relação à horizontal	segmentação da placa
Força aplicada	7 kN a 120 kN	14 kN a 150 kN
Medida de deflexão	7 a 15 geofones	9 sismômetros
Deflexão máxima	2 mm	5 mm

Dentre os aspectos positivos na utilização deste tipo de equipamento, destacam-se:

- A capacidade de promover leituras rápidas e apuradas, com sistema de aquisição de dados automático;
- A possibilidade de variação dos níveis de carga aplicados sobre um mesmo ponto;
- A rapidez e facilidade de operação sob condições de tráfego;
- A obtenção das bacias deflectométricas, propiciando a análise dos módulos de elasticidade das camadas constituintes do pavimento; e
- A possibilidade de uso no controle de qualidade estrutural das camadas de pavimento.

Medina e Motta (2005) ressaltam que o uso do FWD também apresenta situações que podem representar limitações de análises, dentre as quais:

- A presença de uma camada rígida, dependendo da profundidade, pode interferir no ajuste da bacia de deflexões obtida e, por consequência, na retroanálise dos módulos;
- A aceleração da carga do FWD é maior que a de uma carga de roda em movimento, de modo que a inércia da massa do pavimento pode desempenhar um papel importante para o FWD, enquanto é desprezível para a roda em movimento;
- O FWD gera um sinal de carga transiente e o impacto gerado no pavimento cria ondas de corpo e ondas superficiais. Usualmente este sinal é utilizado para extrair o pico de carga e o pico de deflexão em cada sensor, de modo que a bacia de deflexão não é na verdade o que se observa durante o ensaio, pois há a diferença de fase (“*phase lag*”) dos sinais dinâmicos captados pelos transdutores.
- A presença de nível d’água ou solo saturado pode influenciar os resultados, induzindo a falsa indicação da presença de um material rígido.

Por outro lado, também é importante que se tenha conhecimento dos fatores que influenciam os valores de deflexões obtidos em campo. Segundo Cavalcante (2005) e Ferri (2014), os principais fatores que influenciam a magnitude das deflexões são:

a) Influência da Sazonalidade

No período chuvoso o teor de umidade do subleito pode aumentar, e com isso diminuir a sua capacidade de suporte, conseqüentemente influenciar na medida da deflexão superficial no centro de aplicação da carga.

b) Influência da Temperatura

O ligante asfáltico está sujeito a alterações de sua viscosidade a depender da variação da temperatura do pavimento. Quando a temperatura diminui a viscosidade aumenta e o revestimento torna-se mais rígido, aumentando a sua capacidade de distribuição de carga na estrutura e, conseqüentemente, diminuindo as deflexões. No entanto, quando a temperatura aumenta, o efeito se inverte, e a viscosidade diminui, reduzindo a rigidez e, conseqüentemente, tem-se um aumento nas deflexões.

c) Influência do Modo de Carregamento

A magnitude das deflexões é extremamente afetada pelo modo de carregamento utilizado e, dentre todos os equipamentos analisados, o que melhor simula o efeito das cargas de roda do pavimento é o FWD.

d) Posicionamento dos Sensores

O posicionamento dos sensores é muito importante nos levantamentos deflectométricos, pois influenciam nas medidas de deflexões. A escolha do posicionamento dos sensores deve ser feita em função da rigidez e espessura do pavimento em análise. Quanto mais espessa for a camada asfáltica mais distante o último sensor deve ficar do ponto de aplicação da carga a fim de se obter somente as deflexões sofridas pelo subleito.

e) Geometria do segmento

A existência de rampas longitudinais, abaulamento transversal da plataforma, cortes, aterros, influenciam no modo como as tensões e deformações se distribuem no pavimento. Do mesmo modo, a presença de bueiros de greide, drenos subsuperficiais sob os pontos avaliados também contribuem para esta questão.

f) Natureza dos materiais

Durante os processos de exploração, mistura, transporte, distribuição e confecção, pode haver alterações nas características dos materiais empregados no pavimento.

3.11 Métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos adotados no Brasil

Conforme Balbo (2007), o pavimento asfáltico é uma estrutura não perene, composta de camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerando diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios.

O dimensionamento de um pavimento é definido por meio da combinação e dosagem de materiais e definição das espessuras das camadas que o constituem, a fim de garantir a integridade da estrutura e atendimento à vida útil (Fernandes et al., 2017). Para tanto, o conhecimento das características e comportamento dos solos a serem empregados no pavimento e do subleito ao qual está disposto é fundamental.

Dentre os métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos utilizados em pavimentos no Brasil, observa-se o emprego dos empíricos, semiempíricos e mecanístico-empíricos.

No método empírico, destaca-se a proposta de enquadramento das intervenções associadas aos segmentos homogêneos do novo catálogo de soluções gerenciais do DNIT para a manutenção dos trechos pavimentados, o qual está fundamentado em parâmetros de tráfego (volume médio diário comercial - VMD_c), na condição estrutural (deflexão característica – D_c e deflexão admissível - D_{adm}) e na condição funcional (índice de irregularidade internacional – IRI e porcentagem da área trincada) dos pavimentos (Souza Júnior, 2018).

No método semiempírico, destaca-se método do DNER, extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, utilizado para o dimensionamento de grande parte da malha rodoviária brasileira. O método do DNER consiste em uma adaptação elaborada pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza, em 1966, do método de dimensionamento desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, com a inclusão de alguns resultados da pista experimental da AASHO. Esse método tem base nas características de suporte do solo do subleito, materiais que irão constituir a estrutura do pavimento e características de tráfego como o número repetições do eixo simples padrão (ESP) no período de projeto, N_p , que é um valor representativo da frota (número de operações do eixo padrão). Em 1981, o método foi

atualizado com a inserção de novos coeficientes estruturais para as camadas (Bezerra Neto, 2004).

Já no método mecanístico-empírico, faz-se uso de recursos computacionais, de modelos constitutivos e considera-se o pavimento constituído de multicamadas (geralmente elásticas) para fazer a modelagem do comportamento da estrutura. Então, calcula-se as tensões, deformações e deslocamentos gerados pelas cargas do tráfego. Os valores obtidos são correlacionados com o desempenho do pavimento, podendo-se prever problemas associados ao seu desgaste funcional (Fernandes et al., 2017).

É este método que possibilita um tratamento mais racional da estrutura do pavimento, podendo, por exemplo, fazer previsão das deflexões, além do efeito de fadiga, os quais não são tratados no método semiempírico (Franco, 2007).

O método mecanístico-empírico também permite a avaliação qualitativa do uso de novos materiais, carregamentos diferentes dos normalmente utilizados, configuração diferente de rodas e outros fatores que influenciam o desempenho dos pavimentos (Bezerra Neto, 2004).

Para Soares (2020), independentemente do método a ser adotado, a sua lógica requer um amadurecimento ao longo de um período por meio daquilo que se denomina na literatura de um programa de pesquisa científica.

O autor menciona o primeiro programa de pesquisa estruturado no Brasil foi o que possibilitou a internalização do método desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos em 1966, sendo reconhecido como método do DNER. Nesse método, o CBR (medida indireta da resistência ao cisalhamento por meio de ensaio penetrométrico) e o número N (número de repetições de um eixo padrão de 8,2 tf em um determinado período) são os parâmetros de análise, sendo adotados para efeito de atualização em 1981 o emprego de coeficientes estruturais e fatores climáticos. Os coeficientes estruturais das camadas, eram coeficientes empíricos estabelecidos de forma comparativa entre os materiais inicialmente previstos e integrados a soluções de pavimentação devido a avanços tecnológicos, e que levavam em consideração a resistência ou a deformabilidade. Já o fator climático, foi uma tentativa de corrigir eventuais mudanças observadas nos materiais pela ação do clima. Essa ideia foi abandonada, sendo considerada a aplicação do fator apenas como se a pior situação prevalecesse no dimensionamento, ou seja, a saturação dos materiais granulares testados.

Com o surgimento dos ensaios de carga repetida, um segundo programa de pesquisa estruturado foi atribuído na tentativa de buscar diferentes formas de análise estrutural. Utilizando de análise elástica linear (Motta, 1991) estabeleceu a possibilidade de calcular as tensões (ou deformações) na fibra inferior do revestimento asfáltico, no fundo das camadas

cimentadas e no topo do subleito, que foram atribuídos a critérios de falhas empíricas (fadiga e deformação permanente), os quais passaram a ser, juntamente com o módulo de resiliência e o número N para tráfego, o núcleo central desse novo tipo de método.

Mais recentemente, no Brasil, como terceiro programa de pesquisa estruturado destaca-se a chamada “Rede Temática de Asfaltos”, que reunindo o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), várias universidades e a Petrobrás, estabeleceu os alicerces para o desenvolvimento no Brasil novos métodos de dimensionamento de pavimentos de caráter mais mecanicista, no qual destacam-se como parâmetros de análise os modelos de comportamento elástico linear e o viscoelástico, a possibilidade de atribuir módulos de resiliência para subcamadas, a possibilidade de utilizar espectro de carga no lugar do número N, e a utilização de uma base de dados para o desenvolvimento de funções de transferência.

3.12 Retroanálise

A retroanálise em pavimentos é um método de regressão numérica que permite inferir os módulos de resiliência das camadas do pavimento e do subleito por interpretação das bacias de deflexão. O seu emprego está atrelado à Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas – TSCE, sendo necessário para obtenção dos módulos o conhecimento prévio das características básicas dos tipos de materiais presentes em cada camada, e suas espessuras na seção-tipo do pavimento. Caso o projetista não possua informações sobre os coeficientes de Poisson e faixas de valores modulares para cada camada da estrutura, pode-se adotar valor de referência da literatura para materiais similares. Outro aspecto a ser observado durante o processo, e que pode impactar nos resultados, é a condição de aderência atribuída às camadas.

A regressão é feita considerando-se determinada combinação de módulos das camadas de modo a fazer coincidirem a bacia teórica calculada e a bacia de campo determinada.

Conforme relatam Albernaz et al. (1996) e Preussler et al. (2000), a retroanálise de bacias deflectométricas de um pavimento apresenta as seguintes vantagens:

- possibilita estimativa dos módulos de resiliência dos materiais nas condições reais de campo;
- eliminação ou minoração da necessidade de ensaios destrutivos para a coleta de amostras do pavimento e subleito para determinação dos parâmetros desejados, que são de difícil reprodução em laboratório;
- utilizar-se dos ensaios não destrutivos que são menos onerosos e menos demorados do que os ensaios destrutivos; e

- possibilita o uso pleno da bacia deflectométrica, não só a deflexão máxima (d0) como nas técnicas de avaliação estrutural.

A sistemática de retroanálise se justifica por permitir estimar qual a camada que mais está contribuindo para a deflexão e assim apontar qual delas contribuiu mais para a incidência de danos no pavimento.

Porém Bernucci et al. (2022) também elencam desvantagens de obtenção dos módulos de elasticidade por retroanálise, que dentre as quais estão:

- a sensibilidade do cálculo dos valores dos módulos de elasticidade aos valores das bacias deflectométricas que possuem uma imprecisão inerente aos levantamentos de campo;
- a confiabilidade dos instrumentos e dos procedimentos operacionais de medição das deflexões deve ser continuamente verificada;
- os módulos de elasticidade retroanalizados não representam necessariamente os módulos reais dos materiais das camadas e sim “módulos equivalentes” (a igualdade depende de diversos fatores, como por exemplo número de camadas, grau de trincamento, homogeneidade de material e regularidade de espessura); e
- o conjunto de módulos retroanalizados não é único, depende do programa utilizado para obtê-los, das hipóteses simplificadoras, dos níveis de ajustes atingidos etc.

Segundo esses autores, a ideia da retroanálise não é nova e já existem métodos de retroanálise desde a década de 1970. Porém, com o advento dos equipamentos automatizados tipo FWD e com o avanço da computação, houve um acelerado desenvolvimento dessa tecnologia, estando hoje fartamente disponível em várias versões de softwares.

Camarini (2019) indica que as técnicas de retroanálise aplicadas ao pavimento são diversas, porém nenhuma foi comprovada no sentido de produzir os melhores resultados. Elas diferem entre si pelo modelo de cálculo das respostas estruturais (teoria da elasticidade ou método dos elementos finitos) e pelo critério de convergência entre a bacia teórica e a real, a necessidade de módulos iniciais de resiliência (*seed moduli*) ou faixas de valores de módulos.

Por vez, quanto ao procedimento matemático utilizado na retroanálise, os métodos de retroanálise são descritos e classificados em dois tipos: iterativos e simplificados. Os métodos iterativos procuram obter os módulos de todas as camadas do sistema pavimento-subleito, tenha

ele duas ou mais camadas. Os métodos simplificados, em geral, convertem o pavimento real multicamadas em pavimentos equivalentes mais simples de duas ou, no máximo, três camadas, e estimam os módulos equivalentes por meio de equações diretas (Albernaz, 1997).

No método iterativo para obtenção do comportamento elástico das camadas há necessidade de indicação de valores iniciais de módulos de resiliência para se calcular as deflexões em pontos afastados axialmente do ponto de aplicação de carga. Essas bacias calculadas são comparadas com as bacias medidas in loco, por meio do cômputo dos erros entre elas. O processo se repete, alterando os valores dos módulos, até que um erro aceitável seja alcançado, ou até um número máximo de iterações (Camarini, 2019).

A Tabela 3.4 resume as principais características dos programas de retroanálise utilizados nas últimas décadas no Brasil.

Tabela 3.4 - Características dos programas de retroanálise (Bernucci et al., 2022, adaptado)

Nome do Programa	Última versão	Desenvolvedor	Domínio Público	Tipo de Pavimento	Método de Cálculo	Método de Retroanálise	Número Máximo de Camadas	Cálculo do Erro
Evercalc	5.0	Washington State of Transportation	sim	flexível	teoria das multicamadas elásticas	otimizador	5	sim
Elsym	5.0	University of California,	sim	flexível	teoria das multicamadas elásticas	iterativo	5	sim
BkFAA	2.0	Federal Aviation Administration (FAA)	sim	flexível/rígido	teoria das multicamadas elásticas	iterativo	10	sim
BackMeDiNa	1.2.0	COPPE/UFRJ	sim	flexível	teoria das multicamadas elásticas	iterativo	6	sim

Para Bernucci et al. (2022), os dados da retroanálise podem contribuir para a elaboração de projetos mais confiáveis, para pavimentos mais duráveis, representando um ganho de tempo nos projetos e minimizando a coleta de amostras. Não é por acaso que a retroanálise é o procedimento de obtenção de módulos de rigidez para projetos de reforços que mais evoluiu no mundo.

Segundo Albernaz (1997), a retroanálise é de extrema importância para a avaliação estrutural de pavimentos pelos seguintes aspectos:

- permite a avaliação estrutural comparativa entre trechos de uma mesma rodovia ou de rodovias diferentes;
- fornece dados para projetos de drenagem, indicando a presença de possíveis camadas rígidas no subleito;

- proporciona a elaboração de projetos mais racionais, que se convertem em pavimentos mais duráveis e de custo mais baixo;
- projetos mais confiáveis evitam restaurações prematuras e altos custos de manutenção e/ou restauração, se for o caso;
- a obtenção dos módulos de resiliência dos materiais na condição em que se encontram em campo.

Preussler et al. (2000) indicam que a retroanálise constitui uma ferramenta que permite apenas uma aproximação do comportamento real, pois sabe-se que a maioria dos materiais aplicados em pavimentação pode apresentar deformações viscosas, viscoelásticas e/ou plásticas sob tensões em adição a deformações elásticas. Além disso, esses materiais na maioria dos casos são heterogêneos e particulados.

Por vez, Macêdo (1996) indica existência de vários fatores que concorrem para influenciar o processo de retroanálise de módulos de resiliência tornando o papel do projetista ainda mais importante, no sentido de estabelecer critérios consistentes que permitam realizar análises esclarecedoras quanto ao comportamento dos materiais e o desempenho como um todo. Algumas dessas limitações dos processos de retroanálise são apresentados a seguir:

a) Não Unicidade do Conjunto de Módulos

Devido ao emprego de técnicas diferentes e dos diversos critérios de convergência adotados para obtenção das soluções, podem existir várias combinações de módulos que levem a uma bacia de deflexões, de modo que o conjunto de módulos obtido para cada situação nem sempre é único.

b) Modelagem Teórica

Existem várias simplificações adotadas na modelagem da estrutura que induz a erros na análise. Em geral considera-se o pavimento como um sistema multicamadas, composto por materiais isotrópicos, homogêneos e perfeitamente elásticos. Entretanto estas condições ideais não representam o comportamento real do pavimento em campo já que além das deformações elásticas, acontecem deformações viscosas, viscoelásticas e plásticas. O subleito, em geral, torna-se mais rígido com aumento da profundidade e geralmente é tratado como camada de módulo constante. Além disso, a maioria dos programas tratam uma carga aplicada dinamicamente como se fosse estática.

c) Não Linearidade

A não linearidade no comportamento tensão x deformação resulta em variações do módulo com o estado de tensões, o que ocorre geralmente ao longo da distância horizontal e vertical a partir da área carregada.

d) Espessura das Camadas

Vários estudos de sensibilidade têm demonstrado que a consideração de espessura incorreta para as camadas do pavimento pode levar a erros nos módulos retroanalizados. A espessura de cada camada é muito importante para o cálculo dos módulos, acrescentando os autores que nos casos em que a espessura é superestimada os módulos correspondentes obtidos serão subestimados, mesmo que a rigidez permaneça razoavelmente correta.

e) Posição da Camada Rígida no Subleito

A grande maioria dos programas de retroanálise considera o subleito como semi-infinito. Porém a presença de um leito rochoso pode afetar significativamente a análise de bacias de deflexão quando a rocha se encontra a até 6m de profundidade.

f) Efeitos Dinâmicos

A análise de dados deflectométricos obtidos com equipamentos dinâmicos envolve formulação empírica ou utilização de modelos elásticos e/ou viscoelásticos numa análise estática dentro do processo de retroanálise. As correlações empíricas são limitadas às condições para as quais foram desenvolvidas ao passo que a análise estática não leva em consideração a inércia, ou seja, admite que a resposta dinâmica não é diferente da resposta do mesmo pavimento submetido a carregamento estático.

Para Bernucci et al. (2022), a escolha do programa de retroanálise e o conhecimento das suas condições de ajustes dos módulos para atender a determinado conjunto de bacias de deflexão é uma tarefa complexa e que tem consequência na avaliação final da real condição estrutural de um trecho de rodovia. Em geral, é difícil que diferentes programas de retroanálise levem a um mesmo conjunto de módulos retroanalizados. Tais circunstâncias podem ser atribuídas as diferenças observadas nas condições de contorno e modelo de regressão estabelecidos por esses programas.

3.13 Programas de Análise de Tensões e Deformações

Segundo Silva (2014), na década de 70, começaram a surgir os primeiros programas computacionais de cálculo baseados na relação tensão-deformação, o que facilitou o dimensionamento de pavimentos em vários aspectos, tais como: redução de tempo gasto nos processos de cálculo; consideração de coeficientes de Poisson variáveis, aplicação de estruturas com mais do que três camadas, entre outras. De maneira geral, em relação aos métodos computacionais de cálculo, dois em especial chamam a atenção:

a) Cálculo analítico com base na teoria de Burmister

As hipóteses são baseadas na teoria modelada por Donald Burmister em 1945, na qual se permite considerar múltiplos carregamentos, por meio do princípio da superposição de camadas elásticas. Comumente são aplicados métodos numéricos de diferenças finitas para obtenção de resultados.

b) Cálculo utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF)

A análise de elementos finitos é um método para resolver equações diferenciais capaz de calcular tensões, deformações e deslocamentos de uma estrutura. O método consiste na discretização do sistema em análise em vários elementos fictícios de dimensões finitas, ligados entre si por pontos nodais que se assemelham a articulações. Com essa divisão, é possível transformar um problema complexo em problemas menores e mais simples de se resolver, além de possibilitar um entendimento mais apurado sobre o comportamento de cada parte de uma peça exposta a esforços e cargas, aproximando mais o modelo às condições reais de campo.

Macêdo (1996) indica que a escolha do método computacional depende do problema que se deseja investigar, de modo a se obter o menor tempo de processamento possível. O pesquisador cita como exemplo, os programas que usam a teoria de elementos finitos (MEF) consomem mais tempo para preparação de dados e interpretação dos resultados do que um programa que utiliza a teoria dos sistemas de camadas elásticas (TSCE). Porém, com o avanço dos softwares de elementos finitos tais dificuldades deixam de existir. O surgimento de programas que utilizam esse método com uma interface mais amigável (de fácil entendimento e operação) às necessidades do usuário e a melhoria do processamento de computadores observada na última década criam a possibilidade hoje de se afastar a ideia de que ao analisar sistemas elásticos lineares com o método de elementos finitos ainda deixam de oferecer vantagens em relação ao método de camadas elásticas, exceto em situações especiais como na

análise de trincas ou carregamento próximos às laterais do pavimento. Porém, cabe reconhecer que independente do método utilizado, usuários tendem a dar preferência aos programas que sejam relativamente simples de utilizar e capazes de lidar com as características mais importantes do pavimento.

A seguir são descritos alguns dos programas mais utilizados em análise de pavimentos no Brasil, sendo apresentados detalhes sobre sua estrutura e relevância para o projeto. Ao final do capítulo são discutidos os prós e contras desses programas.

3.13.1 Programa FEPAVE

Segundo Cavalcante (2005), o programa computacional FEPAVE (*Finite Element Analysis of Pavement Structures*) é um sistema baseado na teoria da elasticidade linear direcionada para pavimentos de meios semi-infinitos e estratificados em até 12 camadas. Adota modelagem elástico-não linear e o procedimento de cálculo é método dos elementos finitos (MEF). O pesquisador indica que Motta (1991) foi a responsável por implementar modificações no sistema de modo a permitir sua utilização em microcomputadores. Os dados necessários para alimentação do programa são:

- a) carregamento ocasionado pelo tráfego;
- b) parâmetros de materiais; e
- c) configurações estruturais.

Ao programa FEPAVE, foi incorporado o utilitário UTILFEP em 1995, o qual permite a entrada rápida de dados do projeto. Posteriormente uma segunda versão do programa foi desenvolvida, o FEPAVE2, sendo essa capaz de calcular a distribuição de tensões de um pavimento a partir de uma matriz de rigidez gerada por até 8 (oito) modelos de comportamento tensão-deformação distintos.

3.13.2 Programa ELSYM5

De acordo com Brito et al. (2009), o programa computacional ELSYM5 (*Elastic Layered System*) foi desenvolvido pela Universidade da Califórnia em Berkeley. O sistema é baseado na teoria da elasticidade linear de meios estratificados, com a solução de Burmister ampliada para cinco camadas, permitindo o carregamento de até 10 (dez) cargas. Os dados necessários para alimentação do programa são:

- a) carregamento ocasionado pelo tráfego, número e localização das cargas;
- b) Módulos de Young e coeficientes de Poisson das camadas constituintes do pavimento;
- c) espessuras das camadas constituintes do pavimento; e
- d) pontos em que serão analisadas as tensões, as deformações e as deslocamentos.

O programa ELSYM5 é também capaz de determinar por retroanálise os módulos das camadas do pavimento a partir da geração de tensões, deformações e deslocamentos, em vários pontos do pavimento, quando da aplicação de cargas similares às oriundas do tráfego. A maneira de realizar o projeto de um pavimento novo ou restauração ocorre pela análise das tensões e deformações solicitadas nos arquivos de saída do programa. De posse dessas informações, é possível determinar a partir da tensão de tração na fibra inferior do pavimento, qual é a vida de fadiga a partir de modelos de deterioração previstos na literatura. Já com a deformação de compressão no topo do subleito é possível estimar o desenvolvimento de deformações permanentes na estrutura do pavimento.

3.13.3 Programa SISPAV

O Programa SISPAV foi desenvolvido por Franco (2007), tendo como objetivo realizar análises da vida útil de projeto de pavimentos, além de possibilitar o dimensionamento desses por meio do cálculo da espessura da camada necessária para atendimento aos requisitos de projeto. Segundo Fonseca (2013), o programa foi elaborado com base na teoria da elasticidade, que conta com auxílio do módulo Análise Elástica de Múltiplas Camadas - AEMC, a qual está baseada no programa JULEA que utiliza a teoria de Burmister. Os dados necessários para alimentação do programa são:

- a) carregamento ocasionado pelo tráfego, número e localização das cargas;
- b) parâmetros de misturas asfálticas: módulo de resiliência, coeficiente de Poisson, granulometria da mistura, viscosidade do ligante e índices volumétricos;
- c) parâmetros de materiais granulares e solos finos: módulo de resiliência e coeficiente de Poisson. Para estes materiais, o programa permite a consideração do modelo elástico linear ou não linear;
- d) parâmetros de materiais estabilizados quimicamente: módulo de resiliência e coeficiente de Poisson. Porém, é permitido a consideração do modelo elástico linear ou pela função sigmoideal dependendo do consumo de vida de fadiga.

Fonseca (2013) indica que o programa considera como parâmetros referentes ao tráfego que solicitam a estrutura de pavimento, o efeito de cada configuração de eixo sobre a estrutura do pavimento analisada, da distribuição e variação lateral do tráfego no acúmulo de danos do pavimento, além da variação do tráfego ao longo do ano.

3.13.4 Programa MeDiNa

O MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos) é o programa de enfoque do presente trabalho. Ele consiste em uma metodologia de dimensionamento de pavimentos flexíveis que leva em consideração o método empírico-mecanicista, o qual busca associar dados relacionados aos materiais utilizados na pavimentação, condições ambientais da localidade e o tráfego aplicado. No programa, é possível a realização de dois modos de dimensionamento: projeto de reforço e projeto de pavimento novo.

O MeDiNa é uma adaptação do SISPAV para âmbito nacional, incorporando critérios de ruptura do pavimento baseados na área trincada do pavimento e afundamento na trilha de roda, assim como introduz o conceito de nível de confiabilidade em função do tipo de via a ser analisado (função N). Dentre as principais novidades está a possibilidade de criação de catálogo de materiais e a utilização de curvas de desempenho. Esta possibilita uma melhor representatividade das previsões de comportamento do pavimento decorrentes da modelagem analítica para as reais condições observadas em campo. Essa função é dependente de estudos de materiais e clima em nível regional, sendo necessários procedimentos específicos para a sua calibração.

Os dados necessários para alimentação do programa são similares aos adotados pelo SISPAV. Maiores detalhes sobre o funcionamento do programa serão abordados no capítulo seguinte.

CAPÍTULO IV

4 APRESENTAÇÃO DO MODELO DE CÁLCULO ADOTADO

O Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos, denominado MeDiNa, é um software baseado no método mecanístico-empírico capaz de dimensionar pavimentos asfálticos e de obter parâmetros de pavimentos existentes por meio de retroanálise (BackMeDiNa) de bacias deflectométricas. O MeDiNa analisa as tensões, deformações e deslocamentos, gerados pelas cargas do tráfego, com o auxílio do módulo AEMC, e verifica ou dimensiona um pavimento, integrado aos critérios de dimensionamento propostos pelo DNIT. Os valores obtidos são correlacionados com o desempenho do pavimento, podendo-se prever problemas associados ao seu desgaste funcional.

Foi desenvolvido a partir do Termo de Execução Descentralizada, celebrado entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, bem como da colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás – CENPES e de diversas Universidades do Brasil.

Em suma, o software é uma atualização da técnica de dimensionamento de pavimentos anteriormente utilizada no Brasil, realizado majoritariamente pelo Método do DNER, trazendo tecnologias mais avançadas, a aplicação das condições climáticas do país, mensuração do tempo de surgimento de trincas, entre outras vantagens. No programa, é possível a realização de dois modos de dimensionamento: projeto de reforço e projeto de pavimento novo.

No MeDiNa, o sistema do pavimento é dimensionado a partir dos esforços aos quais o pavimento estará sujeito, considerando o módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson, para interpretar a rigidez das camadas, além dos coeficientes para modelagem matemática dos parâmetros de danificação: fadiga para revestimentos asfálticos e camadas estabilizadas; e deformação permanente para as camadas granulares e solos.

Para validar o dimensionamento estrutural pelo MeDiNa, torna-se necessário realizar ensaios laboratoriais de caracterização de materiais constituintes, além de inserir um conjunto amplo de informações no software. Essas informações são referentes a todos materiais que compõem a estrutura do pavimento flexível.

No que tange ao subleito, o módulo de resiliência (DNIT 134 – ME) e os parâmetros de deformação permanente (DNER IE-179, 2018) são parâmetros imprescindíveis, além da caracterização básica e classificação (DNER CLA-259,1996) do material constituinte. Além do subleito, os materiais naturais empregados na base, sub-base e reforço de subleito também devem ser caracterizados e ter suas propriedades resilientes e plásticas detalhadas. Para as camadas estabilizadas quimicamente, executar a curva de fadiga do material, obtida por meio do ensaio à compressão diametral (DNIT ME-434, 2022). Quanto à camada de revestimento, inserem-se informações como faixa granulométrica (DNIT 412 – ME, 2019), teor do asfalto (DNER 010-ME), abrasão Los Angeles do agregado mineral utilizado na mistura (DNER ME-035, 1984), volume de vazios (DNIT ME-428, 2022), massa específica (DNIT ME-411, 2021), deformação permanente obtida por meio do *flow number* (DNIT ME-184, 2018) e a curva de fadiga do material, obtida por meio do ensaio à compressão diametral (DNIT ME-183, 2018).

Apresenta-se a seguir um apanhado de informações sobre os princípios de funcionamento do MeDiNa extraídos do Manual de apresentação e utilização do programa (DNIT, 2020), dentre elas as hipóteses adotadas, os parâmetros de entrada e critérios de cálculo.

4.1 Hipóteses adotadas

Assim como grande parte dos programas computacionais usados para esse tipo de análise, leva em conta uma série de hipóteses e considerações fundamentais, baseadas na solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos, que de acordo ao Manual do MeDiNa, são:

- a) os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
- b) a Lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- c) todas as camadas são ilimitadas na direção horizontal e possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- d) a superfície da camada não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- e) na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- f) a carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- g) a grandes profundidades as tensões e deformações são nulas; e
- h) as condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

Os parâmetros levados em consideração para o dimensionamento no MeDiNa são diversos e dependem do tipo de análise a ser realizada. Na Figura 4.1 são apresentados os parâmetros de entrada necessários ao dimensionamento de pavimentos novos, e na Figura 4.2 aqueles necessários para projetos de reforço de pavimentos, considerando que neste caso foi realizada a etapa de retroanálise de bacias deflectométricas por meio da ferramenta BackMeDiNa.

MeDiNa – Modo Projeto Novo			
Dados do Tráfego	Mistura asfáltico	camadas estabilizadas com cimento e cal	Camadas granulares, de solo fino e subleito
<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de via • Volume médio diário • fator de veículo • % veículos na faixa de projeto • taxa de crescimento • período de projeto 	<ul style="list-style-type: none"> • Parâmetros <ul style="list-style-type: none"> • espessura • coef. Poisson • condição de aderência • Módulo de resiliência • Características <ul style="list-style-type: none"> • tipo de CAP • aditivo estabilizante • teor de aditivo • volume de vazios • massa específica • faixa granulométrica • abrasão Los Angeles • norma ou especificação • Fadiga <ul style="list-style-type: none"> • modelo • coeficientes de regressão • classe de fadiga • FFM 	<ul style="list-style-type: none"> • Parâmetros <ul style="list-style-type: none"> • espessura • coef. Poisson • condição de aderência • Módulo de resiliência • Características <ul style="list-style-type: none"> • teor de cimento • resistência a tração • massa específica • umidade ótima • energia de compactação • norma ou especificação • Fadiga <ul style="list-style-type: none"> • modelo • coeficientes de regressão 	<ul style="list-style-type: none"> • Parâmetros <ul style="list-style-type: none"> • espessura • coef. Poisson • condição de aderência • Módulo de resiliência • Características <ul style="list-style-type: none"> • massa específica • umidade ótima • energia de compactação • norma ou especificação • Deformação Permanente <ul style="list-style-type: none"> • modelo • coeficientes de regressão

Figura 4.1 - Parâmetros de entrada para construção/reconstrução do pavimento no MeDiNa

MeDiNa – Modo Reforço				
Dados do Tráfego	Mistura asfáltico	camadas estabilizadas com cimento e cal	Camada asfáltica existente	Camadas existentes e subleito
<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de via • Volume médio diário • fator de veículo • % veículos na faixa de projeto • taxa de crescimento • período de projeto 	<ul style="list-style-type: none"> • Parâmetros <ul style="list-style-type: none"> • espessura • coef. Poisson • condição de aderência • Módulo de resiliencia • Características <ul style="list-style-type: none"> • tipo de CAP • aditivo estabilizante • teor de aditivo • volume de vazios • massa específica • faixa granulométrica • abrasão Los Angeles • norma ou especificação • Fadiga <ul style="list-style-type: none"> • modelo • coeficientes de regressão • classe de fadiga • Fator de fadiga da mistura - FMM 	<ul style="list-style-type: none"> • Parâmetros <ul style="list-style-type: none"> • espessura • coef. Poisson • condição de aderência • Módulo de resiliencia • Características <ul style="list-style-type: none"> • teor de cimento • resistencia a tração • massa específica • umidade ótima • energia de compactação • norma ou especificação • Fadiga <ul style="list-style-type: none"> • modelo • coeficientes de regressão 	<ul style="list-style-type: none"> • Parâmetros <ul style="list-style-type: none"> • espessura • coef. Poisson • condição de aderência • Módulo de resiliencia • Características <ul style="list-style-type: none"> • espessura de fresagem • espessura de campo • área trincada • IRI • deflexão característica • idade do pavimento • módulo mínimo • módulo máximo • desvio padrão do módulo • coef. variação do módulo 	<ul style="list-style-type: none"> • Parâmetros <ul style="list-style-type: none"> • espessura • coef. Poisson • condição de aderência • Módulo de resiliencia • Características <ul style="list-style-type: none"> • módulo mínimo • módulo máximo • desvio padrão do módulo • coef. variação do módulo

Figura 4.2 - Parâmetros de entrada para restauração/recuperação do pavimento no MeDiNa

Embora sejam vários parâmetros de entrada, conforme observado nas Figuras 4.1 e 4.2, há de se considerar que o modelo de cálculo restringe a utilização a:

- composição de tráfego (carregamento);
- módulos de resiliência dos materiais, podendo ser lineares ou não lineares;
- modelos de deformação permanente para solos;
- modelos de fadiga para misturas asfálticas e solos estabilizados; e
- composição da estrutura, incluindo definição do tipo de material empregado nas camadas do pavimento e subleito, e respectivas espessuras, sendo no caso do subleito admitida espessura zero.

Cabe ressaltar como um dos pontos de atenção na utilização do MeDiNa a condição de aderência entre as camadas da estrutura do pavimento, relacionada ao movimento horizontal relativo na interface entre duas camadas. No programa, não é permitido que o projetista insira valores numéricos para condição de aderência entre as camadas, deixando apenas duas condições pré-estabelecidas: “Não aderido” e “Aderido”. Tal condição é atribuída ao fato do

módulo AEMC utilizar uma modelagem simplificada da teoria de molas, de modo a facilitar o cálculo numérico da condição de cisalhamento na interface entre as camadas.

A Tabela 4.1, retirada do Manual do MeDiNa, mostra a condição de aderência especificada, a depender de qual camada está acima da outra.

Tabela 4.1– Condição de aderência (Manual do MeDiNa)

Camada	Condição
Camada asfáltica sobre outra camada asfáltica	ADERIDO
Camada asfáltica sobre camada cimentada	NÃO ADERIDO
Camada asfáltica sobre camada antirreflexão de trincas	ADERIDO
Camada asfáltica sobre camadas de solos ou granulares	NÃO ADERIDO
Tratamento superficial sobre camadas asfálticas	ADERIDO
Tratamento superficial sobre camadas de solos ou granulares	NÃO ADERIDO
Camada estabilizada sobre outra camada estabilizada	NÃO ADERIDO
Camada estabilizada sobre camadas de solos ou granulares	NÃO ADERIDO
Camada antirreflexão de trincas sobre camadas estabilizadas	NÃO ADERIDO
Camadas de solos ou granulares sobre camadas asfálticas, cimentadas, de solos ou granulares	NÃO ADERIDO

Segundo Toffoli et al. (2020), diversos pesquisadores (Torquato e Silva et al., 2019; Khweir e Fordyce, 2003; Chun et al., 2015; Uzan et al., 1978) demonstram que o tratamento dado à condição de aderência na fronteira das camadas tem influência elevada no dano resultante no pavimento calculado pelo método mecanístico-empírico, tendo em vista sua participação ativa e fundamental na redistribuição de tensões na estrutura. Ao assumir condição binária de aderência (aderido ou não aderido), pode-se gerar distorções na simulação de vida útil do pavimento, sendo importante criar-se a possibilidade em futuras versões do programa de se considerar a aderência parcial entre as camadas, possibilitando simulações mais próximas da realidade.

4.2 Calibração e validação – Função de Transferência

O caráter mecanístico de um método de dimensionamento como o MeDiNa consiste, resumidamente, no cálculo de parâmetros estruturais como tensões e deformações, e a quantificação de defeitos associados a esses parâmetros. Porém, segundo Pitanguí (2019), uma das principais dificuldades encontradas no campo da pavimentação diz respeito ao

conhecimento dos materiais e a previsão do desempenho destes em campo, devendo os modelos computacionais caracterizá-los de forma que seu comportamento em laboratório e seu desempenho em campo sejam os mais próximos possíveis.

Nesse sentido, o MeDiNa adota otimização de uma metodologia de previsão do dano de fadiga em estrutura de pavimentos asfálticos proposta por Fritzen (2016), na qual, por meio de uma análise elástica-linear, a evolução do dano é obtida por meio de ensaios laboratoriais de materiais asfálticos e utilizada uma Função de Transferência calibrada de acordo com observações de campo. Para funcionamento do programa foi necessário identificar e definir matematicamente a melhor curva sigmoide que representasse o comportamento da evolução da área trincada dos segmentos monitorados.

Logo, em todas as seções avaliadas, foram utilizados fatores de deslocamento aos valores de Número N onde havia leituras de área trincada, a fim de minimizar o erro entre a curva sigmoide e a evolução de área trincada, obtendo-se, dessa forma, um valor de Número N ajustado, conforme disposto na Equação 4.1 a seguir.

$$N' = (N * fS) * 10^{-10} \quad (4.1)$$

onde:

- N' número N ajustado;
- N número de repetições do eixo padrão quando foi realizada a medição de área trincada;
- e
- fS fator de deslocamento atribuído

Assim, após a aplicação desses fatores em mais de 30 seções utilizadas no estudo de Fritzen (2016), as seções monitoradas se ajustaram à curva sigmoide, com um coeficiente de determinação $r^2 = 0,82$, cujo resultado é mostrado na Figura 4.3.

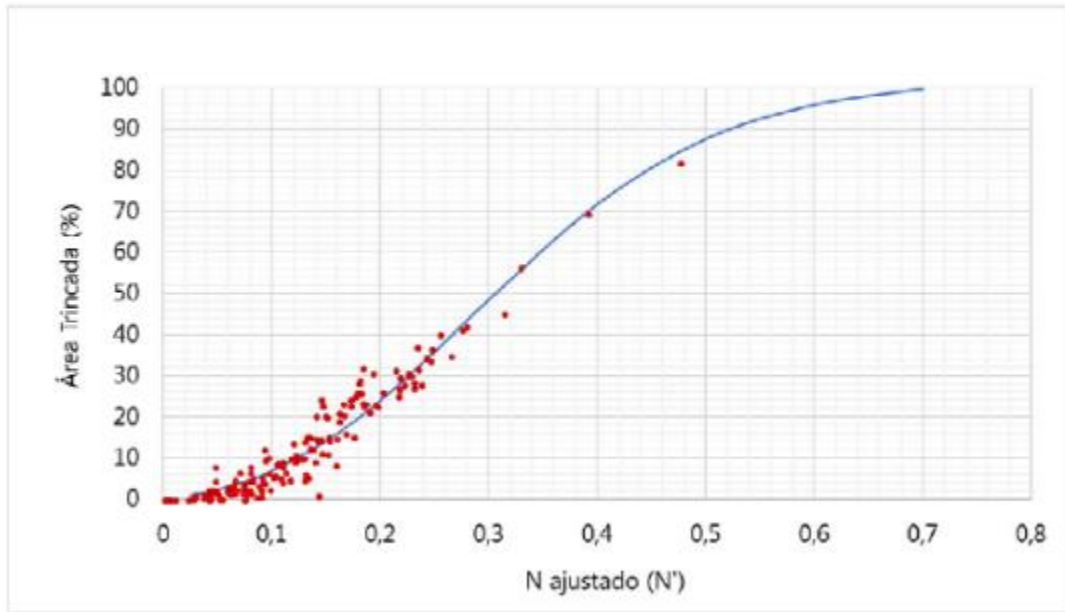


Figura 4.3 – Curva Sigmoide (Manual do MeDiNa)

Após definida a curva ajustada, foi necessário correlacionar os dados de área trincada com alguma informação estrutural do pavimento. Adotando a mesma lógica de pensamento da calibração anterior, os fatores de deslocamento de cada seção foram correlacionados com o dano médio de fadiga estimado em uma malha distribuída em 20 pontos da camada de revestimento asfáltico, ou seja, para cada período, o programa calcula o dano médio distribuído nesses 20 pontos, que se dá pela Equação 4.2 a seguir:

$$D_{\text{médio}} = \frac{1}{20} \sum \left(\frac{1}{N} \right)_{t,c} \quad (4.2)$$

Calculado o dano médio ($D_{\text{médio}}$), foi possível a obtenção de uma Função de Transferência atualizada, capaz de transformar tal dano em uma previsão de área trincada. A função se dá como mostrada na Equação 4.3 abaixo e visualizada na Figura 4.4, onde f_s é o fator de deslocamento, enquanto C_1 e C_2 são os fatores definidos no processo de calibração, cujo melhor ajuste encontrado foi de 1993,7 e 0,3737, respectivamente.

$$f_s = C_1 \cdot (D_{\text{médio}})^{C_2} \quad (4.3)$$

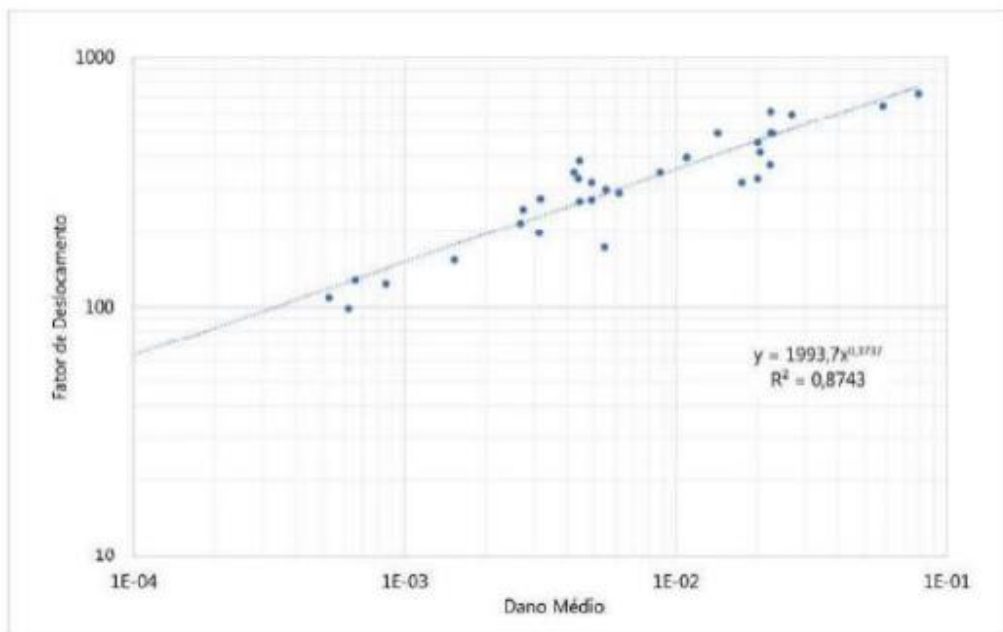


Figura 4.4 – Atualização da Função de Transferência proposta por Fritzen (2016) (Manual do MeDiNa).

Porém, há de se considerar a existência de erro desta Função de Transferência quando empregada, devido à diferença de área prevista com área observada em cada segmento usado na calibração. Logo, de modo semelhante ao feito por Fritzen (2016), após o tratamento dos resultados, obteve-se por meio de regressão o erro da nova Função de Transferência, sendo esse apresentado na Figura 4.5.

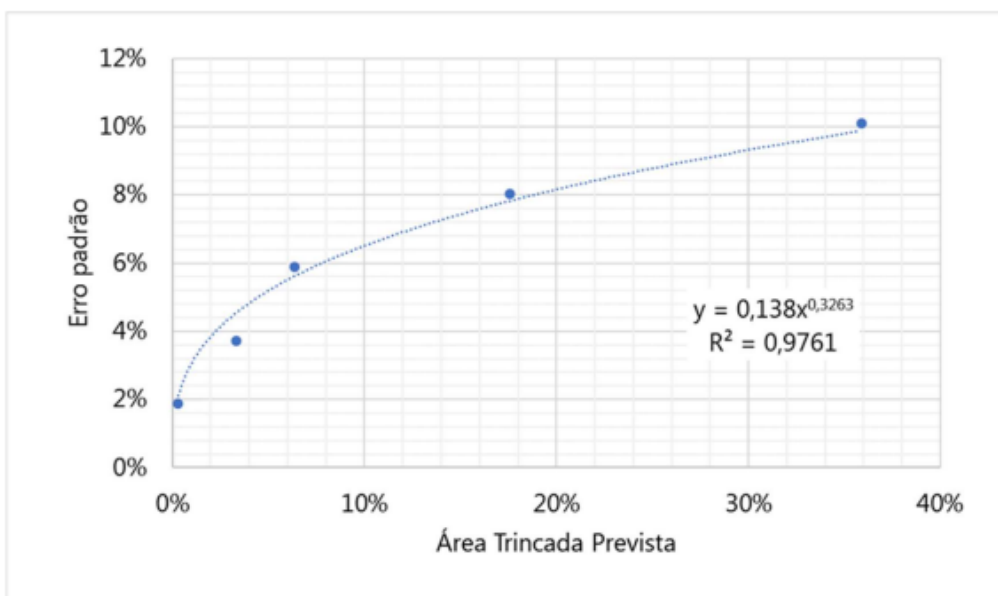


Figura 4.5 – Curva de erro da Função de Transferência proposta por Fritzen et al. (2019) (Manual do MeDiNa)

Segundo informações do manual do programa, para validar esta curva de erro, trechos de outros locais do país foram estudados e os erros apresentados entre o previsto pela calibração e os observados em campo ficaram dentro das confiabilidades previstas. Fritzen et al. (2019) informam que a aplicabilidade do Erro Padrão, indicado na Figura 4.5, nas simulações do MeDiNa segue abordagem probabilística, considerando que os modelos de previsão de danos possuem uma distribuição probabilística do tipo Normal. Nesse aspecto, dentro do intervalo de interesse do dimensionamento, o MeDiNa apresenta o valor do dano crítico para o nível de confiabilidade desejado (estabelecido de acordo com o tipo de via selecionado) a partir da Equação 4.4, a seguir:

$$X_{\alpha} = X_{m\u00e9dio} + Z_{\alpha} \cdot \delta_X \quad (4.4)$$

onde:

X_{α}	é o valor crítico para o grau de confiabilidade selecionado;
$X_{m\u00e9dio}$	é o valor médio esperado;
Z_{α}	é a distribuição normal padrão para $\alpha=1$ -confiabilidade; e
δ_X	é o erro padrão de X.

Sendo a variável X nesse caso o percentual de área trincada. O seu valor médio ($X_{m\u00e9dio}$) é dado pela curva sigmoideal apresentada na Figura 4.3, e o erro padrão (δ_x) é dado pela expressão apresentada na Figura 4.5. O projetista escolhe o nível de confiabilidade de acordo com os dados de que dispõe e o programa MeDiNa acrescenta uma parcela de área trincada de acordo com a expressão (4.4). Por exemplo, para um nível de confiança de 95% ($\alpha=0,05$), tem-se $Z_{\alpha}=1,96$.

4.3 Módulo de Resiliência

Além da adoção do módulo constante que caracteriza o comportamento elástico linear, O programa permite, ao projetista optar por caracterizar o material por alguns modelos constitutivos elástico-não-lineares, de acordo com o comportamento do material. Os modelos constitutivos das camadas granulares e de solos finos foram reunidos em apenas uma expressão matemática apresentada na forma da Equação 4.5 abaixo, sendo o comportamento desejado definido pelos parâmetros k_1 , k_2 , k_3 e k_4 , conforme apresentado no Tabela 4.2.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \cdot \theta^{k_4} \quad (4.5)$$

Tabela 4.2 – Condição de comportamento do MR (Manual do MeDiNa)

Comportamento	Parâmetros
Dependente da tensão confinante	k3 = 0; k4 = 0
Dependente da tensão desvio	k2 = 0; k4 = 0
Dependente do Invariante de tensões	k2 = 0; k3 = 0
Modelo composto	k4 = 0

Por outro lado, os materiais estabilizados são tratados no programa MeDiNa como materiais que possuem propriedades elásticas variável ao longo da vida de serviço. Logo, a análise desses é realizada mensalmente, considerando um Módulo de Resiliência que decai a cada mês devido ao aumento do dano de fadiga, com comportamento do tipo sigmoidal, variando entre dois limites: o limite superior representa a camada nova, que ainda não sofreu nenhum dano de fadiga; e o limite inferior que é quando a camada atingiu sua vida de fadiga e está totalmente trincada, com comportamento próximo a de uma camada granular.

A representação matemática utilizada no MeDiNa para demonstrar o comportamento do Módulo de Resiliência das camadas com Materiais Estabilizados, no caso a Brita Graduada Tratada com Cimento, o Concreto Compactado a Rolo e o Solo Cimento, é ilustrada na Equação 4.6.

$$MR = MR_{\min} + \frac{MR_{\max} - MR_{\min}}{1 + e^{-4+14 \cdot Di}} \quad (4.6)$$

onde Di representa o dano de fadiga, sendo representado no intervalo de 0 a 1, conforme demonstrado anteriormente na Figura 3.5.

4.4 Deformação Permanente

Em relação à deformação permanente, os materiais são avaliados de acordo ao estudo proposto por Guimarães (2009), que por meio de ensaios triaxiais dos materiais, conseguiu definir modelos de previsão com elevados coeficientes de correlação, baseados na seguinte Equação 4.7 com quatro constantes:

$$\varepsilon_p^{esp} = \psi_1 \cdot \sigma_3^{\psi_2} \cdot \sigma_d^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (4.7)$$

onde:

ε_p^{esp}	é a deformação permanente específica (%);
$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$	são parâmetros de regressão;
σ_3	é a tensão confinante (kgf/cm ²);
σ_d	é a tensão de desvio (kgf/cm ²); e
N	é o número de ciclos de aplicação da carga.

Segundo o Manual do MeDiNa, para o cálculo de deformação permanente, utiliza-se do estado de tensões calculado tanto em pontos sob a roda, quanto em pontos entre as rodas, ambas no centro das camadas (vide Figura 4.6).

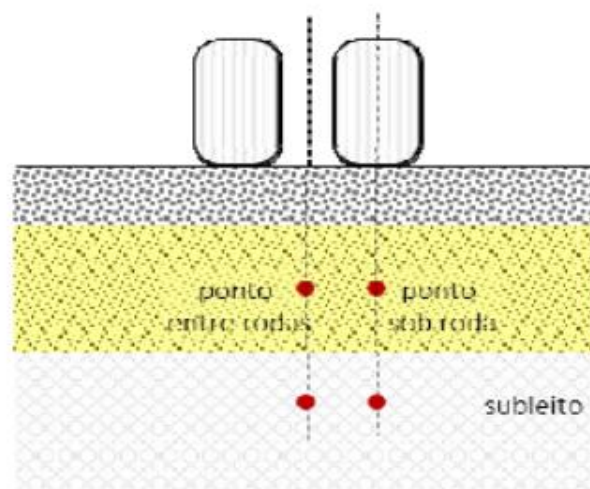


Figura 4.6 – Pontos de cálculo para deformação permanente (Manual do MeDiNa)

O programa emite alertas para deformações permanentes maiores que 5% da espessura de cada camada e avisa o projetista quando a deformação do subleito atinge 5mm. A deformação permanente total é a soma das parcelas calculadas para cada uma das camadas acrescida da deformação permanente do subleito, a qual é calculada para o estado de tensões de 25 cm de profundidade do topo do subleito. O MeDiNa desconsidera a deformação permanente de camadas estabilizadas, por entender que estas camadas, quando bem construídas e mantidas, não contribuem de forma efetiva para a trilha de roda total da estrutura do pavimento.

4.5 Dano de Fadiga

O dano por fadiga é objeto de análise nas misturas asfálticas e camadas estabilizadas.

A curva de fadiga de misturas asfálticas adota no MeDiNa é obtida por meio de ensaio de compressão diametral à tensão constante. O modelo adotado pelo programa permite apenas as relações do número de ciclos (N_{fad}) com a deformação resiliente de tração (ε_t), de acordo a Equação 4.8 a seguir, onde k_1 e k_2 são propriedades do material.

$$N_{fad} = k_1 \cdot \varepsilon_t^{k_2} \quad (4.8)$$

Já o modelo de dano por fadiga em camadas estabilizadas considerado no programa pode ser obtido por meio de ensaio de compressão diametral à tensão controlada, conforme norma DNIT 434-ME (DNIT, 2022), sendo a equação do modelo a ser adotado apresentada abaixo (Equação 4.9).

$$N_{fad} = 10^{(k_1 + k_2 \cdot \%RF)} \quad (4.9)$$

onde:

- N_{fad} é o número de repetições de carga necessárias à ruptura do corpo de prova (vida de fadiga);
- k_1 e k_2 são parâmetros experimentais;
- ε_t é a deformação resiliente de tração; e
- $\% RF$ é a razão entre a tensão de tração aplicada (σ_t) e a resistência à tração à ruptura estática do material (σ_r), expressa em megapascal (MPa).

4.6 Flow Number

De acordo com o Manual do MeDiNa a deformação permanente da camada asfáltica no programa MeDiNa é desconsiderada para o cálculo do afundamento na trilha de roda. Mas para que isso seja efetivamente válido, a mistura asfáltica deve respeitar o critério do ensaio para obtenção da classe de desempenho do *Flow Number*. A obtenção de desse parâmetro ocorre por meio da realização do ensaio de *creep dinâmico*. Os limites das classes de desempenho das misturas asfálticas quanto à deformação permanente estão apresentados na Tabela 4.3 a seguir:

Tabela 4.3 - Limites das classes de desempenho das misturas asfálticas quanto à deformação permanente (Manual do MeDiNa)

Classe	Flow Number (FN)	N recomendado	
		Condições Normais	Condições Severas
1	FN \geq 100 ciclos	N < 10 ⁶	Não recomendado

2	100 ciclos ≤ FN < 300 ciclos	10 ⁶ ≤ N < 10 ⁷	N < 10 ⁶
3	300 ciclos ≤ FN < 750 ciclos	10 ⁷ ≤ N < 10 ⁸	10 ⁶ ≤ N < 10 ⁷
4	750 ciclos ≤ FN < 2000 ciclos	N ≥ 10 ⁸	10 ⁷ ≤ N < 10 ⁸
5	FN ≥ 2000 ciclos	-	N ≥ 10 ⁸

Cabe esclarecer que as condições de tráfego e da via normais seriam aquelas quando se tem velocidades acima 60 km/h, via sem intersecções, sem terceira faixa e/ou temperatura máxima do revestimento asfáltico moderada. Do outro lado, as condições severas seriam as que implicam em tráfego lento (velocidade menor do que 60 km/h), intersecções, terceira faixa, praças de pedágio, tráfego canalizado, paradas de ônibus e/ou temperatura máxima do revestimento elevada.

Do ponto de vista da temperatura, o manual do programa considera a presença de temperatura máxima moderada do revestimento asfáltico quando a temperatura máxima média de sete dias consecutivos, a 20 mm de profundidade, determinada conforme norma AASHTO M 323 – *Superpave Volumetric Mix Design*, for igual ou inferior a 64°C. Porém, quando a mesma temperatura máxima média for superior a 64°C, então considera-se elevada.

4.7 Fator de fadiga da mistura

O Fator de Fadiga da Mistura - FFM foi definido como a área da curva de fadiga da mistura entre as deformações de tração de 100μ e de 250μ. Uma microstrain (μ) corresponde a uma deformação específica de 1m/10⁶m, ou seja, é a deformação decimal, multiplicada por 10⁻⁶. O FFM pode ser identificado esquematicamente na Figura 4.7 a seguir, que é calculado com base nas Equações 4.9, 4.10 e 4.11 abaixo:

$$FFM = 0,2 \cdot [\log(N_{100}) + \log(N_{250})] \quad (4.9)$$

onde:

$$N_{100} = k_1 \cdot (100\mu)^{k_2} \quad (4.10)$$

$$N_{250} = k_1 \cdot (250\mu)^{k_2} \quad (4.11)$$

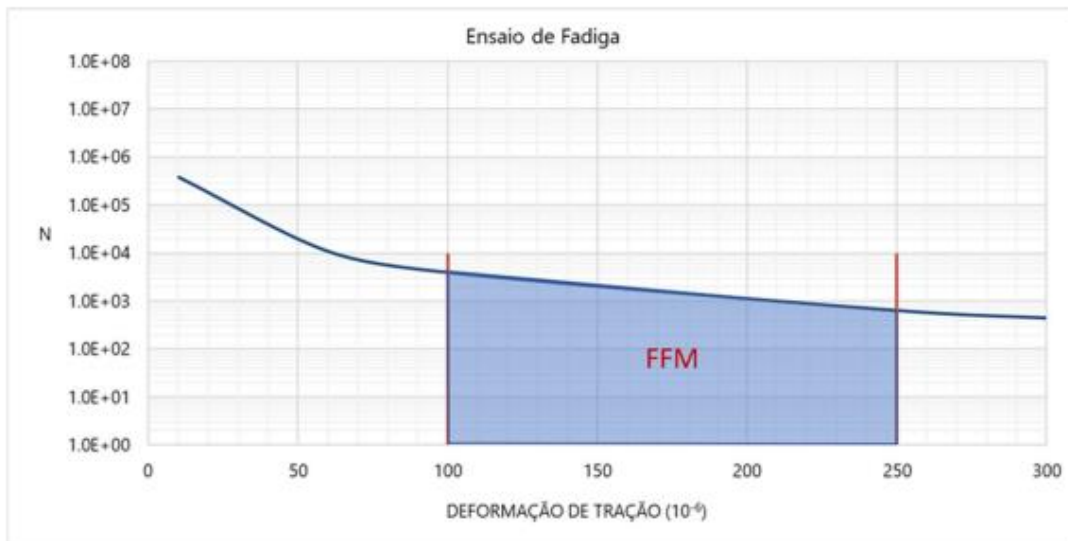


Figura 4.7– Curva de deformação de tração de misturas asfálticas em relação a número de repetições de eixo padrão (Manual do MeDiNa)

O programa MeDiNa calcula automaticamente o FFM assim que os coeficientes de regressão do modelo de fadiga (k_1 e k_2) são inseridos na janela de propriedades do material. Porém, registra-se que k_1 e k_2 dependem da "unidade" (embora deformação seja adimensional) usada na calibração da curva de fadiga (Curva de Wöhler). Assim, cabe ressaltar que a calibração de k_1 e k_2 também deve ser feita com deformações em microstrain e não em porcentagem ou decimal.

4.8 Classes de fadiga da mistura

As classes de fadiga podem ser definidas como faixas de desempenho de misturas asfálticas a esforços que causam danos por fadigas no pavimento, sendo estabelecidas pela relação do módulo de resiliência com o fator de fadiga da mistura. Quanto maior a classe melhores serão os resultados de resistência à fadiga da estrutura. No entanto, há uma exceção a essa regra, quando utilizada camadas de materiais estabilizados, pois as deformações de tração na camada asfáltica ficam em patamares de valores inferiores a 100μ , ou seja, fora da faixa de cálculo do FFM.

Segundo o manual do programa, avaliar isoladamente o módulo de resiliência ou o FMM não determina a qualidade do material. Assim, esses dois parâmetros precisam ser avaliados conjuntamente, pois um interfere no outro e juntos definem a performance do pavimento.

Graficamente se determina a Classe de Fadiga da Mistura, conforme a Figura 4.8 a seguir, mas à semelhança do FFM, o programa calcula a classe da mistura, assim que os

coeficientes de regressão do modelo de fadiga (k_1 e k_2) são inseridos na Janela Propriedades do Material.

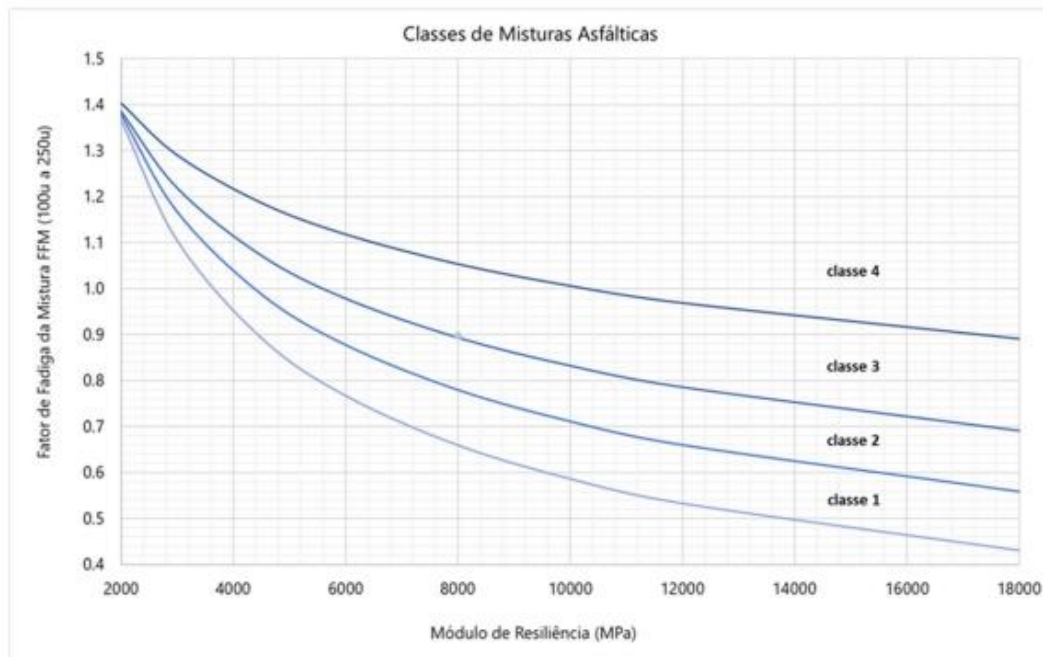


Figura 4.8 – Curvas de classes de fadiga de misturas asfálticas (Manual do MeDiNa)

CAPÍTULO V

5 OBJETO DE ESTUDO

Na região do Distrito Federal, conforme observado na Figura 5.1, predominam os Latossolos e os Cambissolos. Os Latossolos ocupam cerca de 60% do território, compreendem os Latossolos Vermelho (44%) e Latossolos Vermelho-Amarelo (16%). São solos de coloração avermelhada, altamente intemperizados, muito profundos, bem drenados, distróficos, ácidos e com teores de argila variando entre 15% e 80%. Ocorrem em áreas de topografia plana a suavemente ondulada. Já os Cambissolos correspondem a 31% da área do DF. São solos pouco desenvolvidos, com minerais facilmente intemperizáveis, associados ao relevo mais movimentado (ondulado e fortemente ondulado). Geralmente, são solos rasos, distróficos, com textura variando entre argilosa a franco-arenosa, podendo apresentar material concrecionário e cascalhos. A preservação desse solo é recomendada devido a sua posição em relevos movimentados e suas características físicas propensas à erosão (CODEPLAN-DF, 2020).

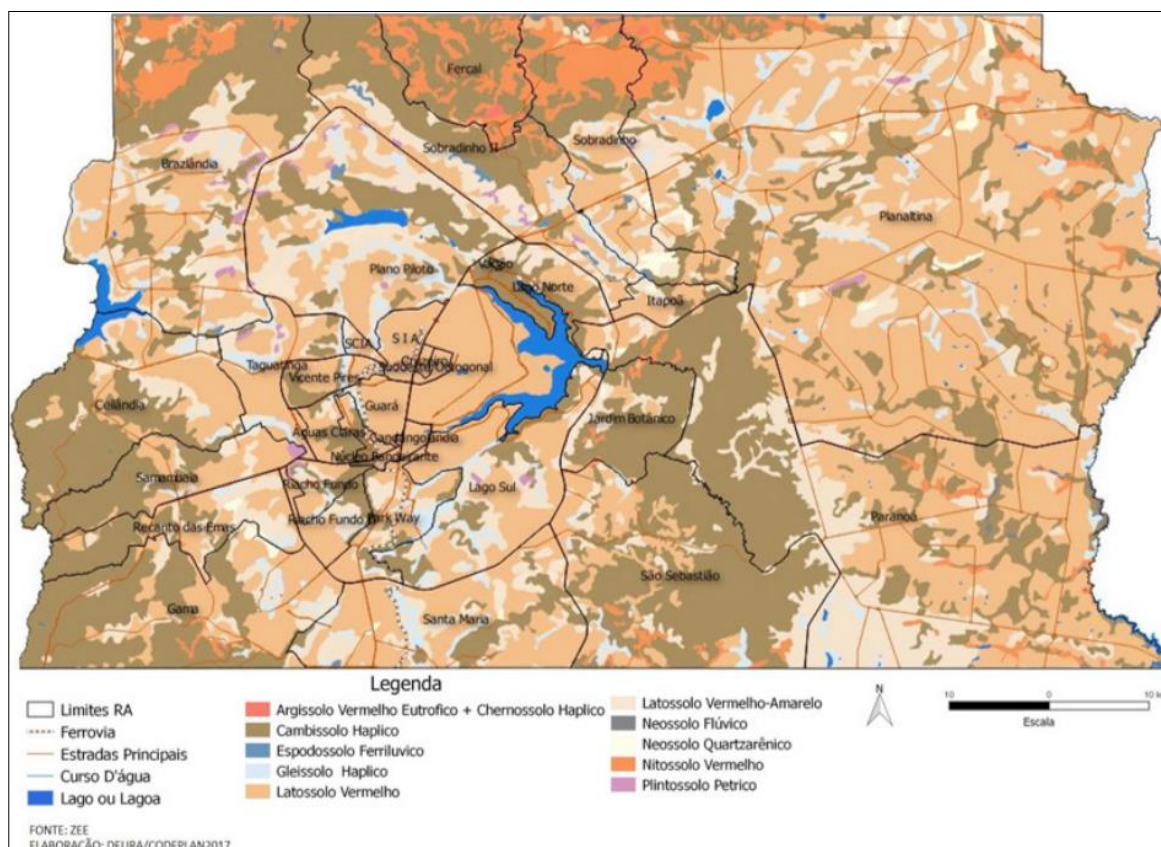


Figura 5.1 - Solos do Distrito Federal (CODEPLAN-DF, 2017)

Tal distribuição pedológica permite caracterizar os subleitos das rodovias do Distrito Federal como sendo predominantemente em Latossolos. Por outro lado, ao analisar editais de obras e estudos promovidos pelo DER-DF para diferentes rodovias verifica-se que as tipificações de base e sub-bases normalmente empregadas no Distrito Federal se dividem no uso de Brita Graduada Simples (BGS), cascalho e do próprio latossolo do subleito aditivados com cal ou cimento, e o revestimento asfáltico no uso de CBUQ (DER-DF, 2016, 2019 e 2020)

No caso da malha rodoviária distrital, além do conhecimento dos materiais empregados, a avaliação das solicitações a que o pavimento será submetido pelo tráfego é de fundamental importância para o diagnóstico preciso das suas condições no decorrer da sua vida útil. Esses dados também são necessários para a correta definição de intervenções a serem realizadas para o dimensionamento de reforço a ser aplicado no pavimento.

Para Martins et al. (1998) *apud* Moizinho (2007) a existência de vários depósitos lateríticos próximos às vias pavimentadas possibilitou o desenvolvimento das rodovias do Distrito Federal a um custo relativamente baixo.

No intuito de avaliar a concordância do modelo de previsão de desempenho de pavimentos adotado pelo *software* MeDiNa ao de rodovias na região do Planalto Central, adotou-se dados de monitoramento de Unidades de Amostragem (UA) utilizadas pelo DNIT para calibração do projeto HDM-4. Essas UA são segmentos homogêneos de rodovias federais com extensão de 1 km e monitorados durante o período de 2013 a 2017 quanto às suas condições estruturais, funcionais e de tráfego.

Para a determinação dos segmentos homogêneos, o DNIT utilizou-se do “Método de Diferenças Acumuladas” preconizado pela ASSHTO (1996), conforme descrito no Manual DNIT IPR (2006) indicado no Capítulo II.

5.1 Características das rodovias estudadas

No delineamento do presente estudo, foram consideradas 8 (oito) das 50 (cinquenta) Unidades de Amostragem selecionadas e monitoradas pelo DNIT, as quais abrangem as características dos solos observados no Distrito Federal e entorno indicadas no item anterior, bem como de estrutura de pavimentos típicas da região. As informações das localizações, espessuras e materiais componentes das estruturas, além de suas condições estruturais, funcionais e de tráfego iniciais (ano de 2013) estão apresentadas nas Figuras 5.2 e 5.3, bem como na Tabela 5.1.

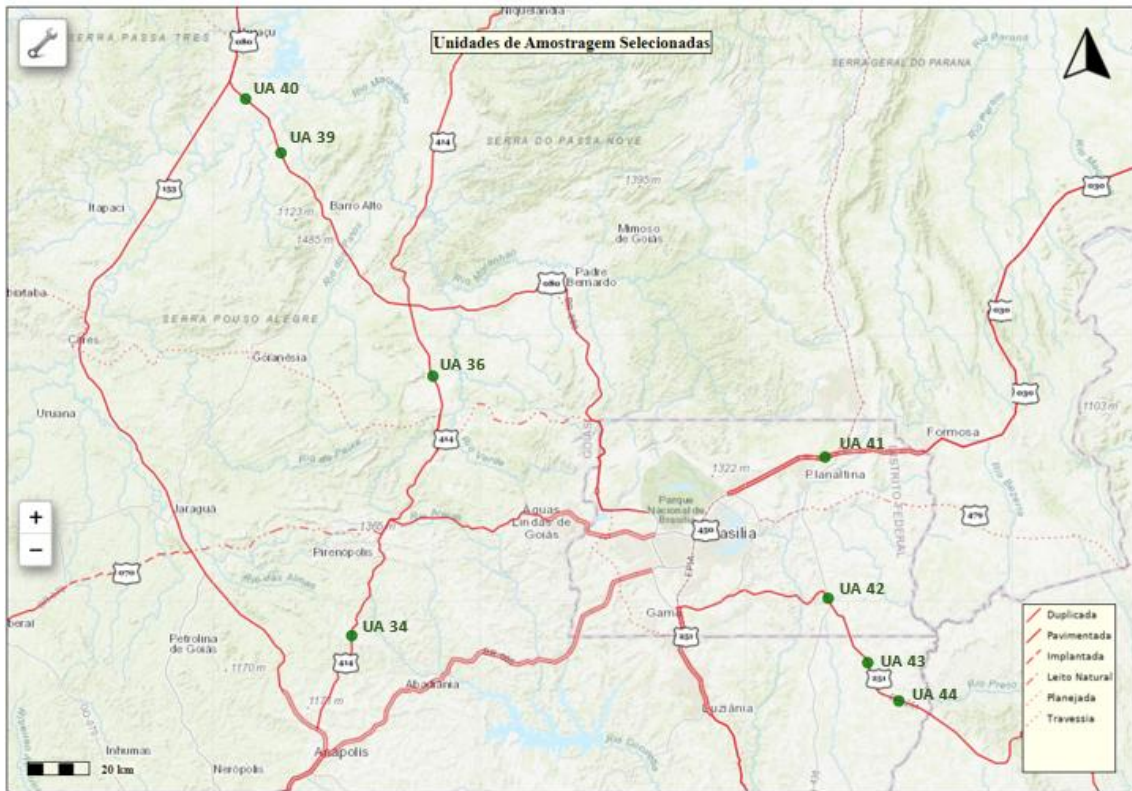


Figura 5.2 – Distribuição Geográfica das Unidades de Amostragem utilizadas no presente estudo (VGeo-DNIT)



Figura 5.3 – Fotografias das Unidades de Amostragem utilizadas no presente estudo (DNIT)

Tabela 5.1– Parâmetros levantados em campo das Unidades de Amostragem utilizadas no presente estudo

Parâmetros	Unidade de Amostragem (segmento homogêneo)							
	34	36	39	40	41	42	43	44
Localização	BR-414/GO (km 408,5 – km 409,5)	BR-414/GO (km 320 – km 321)	BR-080/GO (km 30 – km 31)	BR-080/GO (km 174 - km 175)	BR-020/DF (km 30 – km 31)	BR-251/DF (km 12 – km 13)	BR-251/GO (km 24 – km 25)	BR-251/GO (km 8,8 – km 9,8)
Revestimento Asf.	TSD (e= 3 cm)	CBUQ Faixa C (e=4 cm)	CBUQ Faixa C (e=8 cm)	CBUQ Faixa C (e=10 cm)	CBUQ Faixa C (e=12 cm)	CBUQ Faixa C (e=7 cm)	CBUQ Faixa C (e=4 cm)	CBUQ Faixa C (e=7 cm)
Base Granular	Areia Siltosa Marrom + Cascalho 1" semelhante a laterita (w=14,5%) compactação média/alta (e=20 cm)	Areia Siltosa Vermelha com quartzo + Cascalho 1" semelhante a laterita (w=15,8%), compactação baixa/média (e=41 cm)	Areia Vermelha + Cascalho 3" (w=14%) compactação média/alta (e=41 cm)	Areia Vermelha + Cascalho 4" (w=7) compactação média/alta (e=35 cm)	Silte Arenoso Vermelho + Cascalho 1" (w=18,8%) compactação média Platicidade média/alta (e=33 cm)	Silte Arenoso Vermelho + Cascalho 1" (w=14,2%) compactação média Platicidade média (e=58 cm)	Silte Arenoso Vermelho + Cascalho 1" (w=17,8%) compactação média Platicidade média/alta (e=48 cm)	Silte Arenoso Vermelho + Cascalho 1" (w=18,5%) compactação média Platicidade média (e=18 cm)
Sub-Base Granular	Areia Siltosa Vermelha + Cascalho semelhante a laterita (w=15,8%) compactação alta (e=17 cm)	-	-	-	-	-	-	Silte Arenoso Amarelo + Cascalho 1" (w=18,5%) compactação média Platicidade média (e=32 cm)
Subleito	Argila Siltosa Marrom com veias vermelhas (w=26,4%) consistência muito firme	Silte Argiloso Vermelho com quartzo (w=28,8%) consistência firme	Silte Argiloso Vermelho com quartzo (w=26,8%) consistência firme	Silte Argiloso Vermelho com quartzo (w=27,6%) consistência firme	Silte Argiloso Vermelho com quartzo (w=27,6%) consistência firme	Silte Vermelho com quartzo + Cascalho 3/8" (w=28,6%) consistência firme	Silte Argiloso Vermelho com quartzo (w=34,2%) consistência firme	Silte Argiloso Vermelho com quartzo (w=32,4%) consistência firme
IRI Média (m/km)	2	1,4	1,1	1,3	0,8	2,1	2,5	2,1
Área Trincada (%)	13	0	0	1,71	0,51	2,91	4,66	2,47
Deflexão (0,01m)	60,8	50,1	49	53	34	51,2	55	43,2
VMD Total	2776	1709	2068	2068	5822	3622	3566	3566
Fator de Veículo	0,27	0,34	0,33	0,33	0,208	0,24	0,26	0,26
Fator Direcional (%)	0,51	0,53	53	53	100	52	53	53

5.2 Ensaios realizados nos trechos estudados

Para a realização do monitoramento das 50 (cinquenta) Unidades de Amostragem, no período de 2013 a 2017, o DNIT contratou uma empresa de consultoria, a qual executou avaliações funcionais e estruturais dos pavimentos, assim como estudos de tráfego. Indica-se, a seguir, os principais exames realizados e apresentados ao DNIT para as 8 (oito) Unidades de Amostragem analisadas.

5.2.1 Levantamento de Irregularidade (IRI)

Utilizando o equipamento RSP (*Road Surface Profiler*), conforme observado na Figura 5.4, a empresa de consultoria realizou 5 (cinco) campanhas de levantamento do Índice de Irregularidade Internacional (IRI) para cada faixa de rolamento, sendo calculado o resultado a

cada 20 metros. O equipamento foi aferido no início de todas as campanhas anuais para garantir a validade das medições.



Figura 5.4 – Execução do Levantamento de Irregularidade (DNIT).

Um resumo dos resultados desse levantamento é apresentado na Tabela 5.2 a seguir.

Tabela 5.2– Comparação evolutiva – irregularidade longitudinal

Unidade de Amostragem	Média IRI (m/km)					Acréscimo			
	2013	2014	2015	2016	2017	2013 > 2014	2014 > 2015	2015 > 2016	2016 > 2017
UA 34	1,97	2,09	2,16	2,07	2,11	0,12	0,08	-0,09	0,04
UA 36	1,41	1,62	1,67	1,60	1,56	0,21	0,05	-0,06	-0,05
UA 39	1,10	1,27	1,30	1,30	1,28	0,17	0,03	0,00	-0,02
UA 40	1,30	1,52	1,88	1,59	1,60	0,22	0,37	-0,29	0,01
UA 41	0,80	1,38	1,39	1,13	1,15	0,57	0,02	-0,26	0,02
UA 42	2,07	2,35	2,48	2,77	2,76	0,27	0,14	0,29	-0,01
UA 43	2,49	2,93	2,05	2,03	2,00	0,44	-0,88	-0,02	-0,03
UA 44	2,13	2,38	2,45	2,48	2,50	0,25	0,07	0,03	0,02

5.2.2 Medição de Área Trincada

A medição da área trincada compõe a avaliação detalhada da superfície do pavimento, essa foi realizada em todas as campanhas anuais pela empresa de consultoria de acordo com a norma DNIT TER 005 (2003) para classificação dos defeitos nos pavimentos. Durante o levantamento visual detalhado os defeitos foram identificados e demarcados no pavimento para sua posterior quantificação e registro mediante o vídeo de alta resolução, como demonstrado na Figura 5.5.



Figura 5.5 – Execução do Levantamento Visual Detalhado (DNIT)

Um resumo dos resultados desse levantamento é apresentado na Tabela 5.3 a seguir.

Tabela 5.3 – Comparação evolutiva – área total de trincas

Unidade de Amostragem	Área Total de Trincas (%)					Acréscimo			
	2013	2014	2015	2016	2017	2013 > 2014	2014 > 2015	2015 > 2016	2016 > 2017
UA 34	13,00	16,60	17,11	20,97	22,52	3,60	0,51	3,86	1,55
UA 36	0,00	0,00	0,01	0,06	0,13	0,00	0,01	0,04	0,07
UA 39	0,00	1,18	1,64	7,60	6,90	1,17	0,46	5,96	0,00
UA 40	1,71	3,98	5,52	8,14	7,83	2,27	1,54	2,62	0,00
UA 41	0,51	0,84	1,95	1,62	2,39	0,33	1,11	0,00	0,77
UA 42	2,91	3,26	7,01	0,46	2,16	0,35	3,75	0,00	1,70
UA 43	4,66	5,34	0,02	0,39	1,23	0,67	0,00	0,37	0,84
UA 44	2,47	3,50	1,55	2,75	6,50	1,04	0,00	1,20	3,75

Embora não seja evidente um padrão na proporção entre trincas totais e trincas largas, os resultados confirmam que o aumento da severidade do trincamento tem uma relação com sua expansão. Conforme os resultados observados, os maiores percentuais de trincas largas se apresentam quando as trincas totais superam em média 20% da área.

O percentual de trincas largas é um importante indicador da severidade da degradação e é considerado crítico quando supera 5% da área. Na maioria das unidades de amostragem, o percentual de trincas largas é inferior a 2%.

Na Tabela 5.4 é apresentado um resumo da evolução dessas trincas nos segmentos avaliados.

Tabela 5.4 – Comparação evolutiva – área total de trincas largas (FC-2 e FC3)

Unidade de Amostragem	Área Total de Trincas Largas (%)					Acréscimo			
	2013	2014	2015	2016	2017	2013 > 2014	2014 > 2015	2015 > 2016	2016 > 2017
UA 34	2,99	2,99	2,99	3,02	5,39	0,00	0,00	0,02	2,37
UA 36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
UA 39	0,00	0,00	0,00	1,57	1,57	0,00	0,00	1,56	0,00
UA 40	0,26	0,27	0,94	1,06	1,26	0,00	0,68	0,11	0,21
UA 41	0,15	0,15	1,14	1,29	1,29	0,00	0,99	0,15	0,00
UA 42	1,82	1,89	4,74	0,00	1,24	0,07	2,84	-4,74	1,24
UA 43	0,12	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,12	0,00	0,00
UA 44	1,03	1,03	0,06	0,11	1,80	0,00	-0,97	0,05	1,69

5.2.3 Afundamento na Trilha de Roda

A empresa de consultoria realizou cinco campanhas com verificações a cada 40 metros, por faixa, nas duas trilhas de roda empregando a utilização de treliça (vide Figura 5.6). Nos levantamentos a variação na localização da treliça ao longo da seção transversal da trilha tendem a gerar dispersões que devem ser consideradas na análise estatística dos dados.



Figura 5.6 – Medição do Afundamento na Trilha de Roda (DNIT)

Um resumo dos resultados desse levantamento é apresentado na Tabela 5.5 a seguir.

Tabela 5.5 – Comparação evolutiva – afundamento na trilha de roda

Unidade de Amostragem	ATR (mm)					Acréscimo			
	2013	2014	2015	2016	2017	2013 > 2014	2014 > 2015	2015 > 2016	2016 > 2017
UA 34	6	6	5	6	4	-1	0	1	-2
UA 36	5	4	3	3	3	-1	-1	0	-1
UA 39	7	5	5	5	4	-2	0	1	-1
UA 40	7	5	5	5	4	-2	0	0	-1
UA 41	5	3	2	3	3	-2	-1	1	0

UA 42	5	3	2	2	3	-2	0	0	0
UA 43	7	6	3	3	2	-1	-3	0	0
UA 44	5	3	3	3	3	-1	0	0	0

5.2.4 Levantamento Deflectométrico

As medições de deflexões foram realizadas pela empresa de consultoria por meio do FWD segundo metodologia de ensaio definida na norma DNER PRO – 273(1996). Trata-se de um deflectômetro de impacto capaz de aplicar cargas impulsivas ao pavimento e de simular cargas de roda do semieixo padrão a velocidades da ordem de 70 km/h (DNIT, 2016), conforme apresentado na Figura 5.7. No presente estudo de caso, quando a carga momentânea do FWD foi aplicada, os deslocamentos recuperáveis gerados na superfície do pavimento foram medidos por sete geofones dispostos ao longo de uma barra metálica com os seguintes espaçamentos: 0; 30 ;60; 90; 120; 150 e 180 (centímetros). O formato da condição deformada do pavimento, a partir desse tipo de medição, é chamado de bacia de deflexão.

Como sistemática de coleta foram realizadas medições em 51 estações por quilômetro nas campanhas de 2013 e 2017, distribuídas a cada 40 metros por faixa com uma sequência de cargas de 35KN, 40KN, 50KN e 70 KN. Para cada nível de carga foram realizados quatro impactos sobre o pavimento. Posteriormente os dados coletados são normalizados para a carga do eixo-padrão rodoviário (4100 kgf/cm²). Vale salientar que são registradas as temperaturas do ar e do asfalto em cada medição.

Os valores médios da deflexão máxima apresentados na Tabela 5.6, a seguir, seguem o procedimento DNER PRO-011(1979) para a determinação de parâmetros estatísticos como a média aritmética, o desvio padrão e o intervalo de aceitação dos valores.



Figura 5.7 – Execução do Levantamento Deflectométrico (DNIT)

Tabela 5.6 – Valores das medições de deflexões

Id de de Amostragem	Unidade	Faixa Direita				Faixa Esquerda					
		Força (kN)	Média D ₀ (mm/100)	Média Temp Asfalto (°C)	Média Temp Superfície (°C)	Média Temp Ar (°C)	Força (kN)	Média D ₀ (mm/100)	Média Temp Asfalto (°C)	Média Temp Superfície (°C)	Média Temp Ar (°C)
UA 34 (2013)		41	57	30	35	27	41	64	38	45	31
UA 34 (2017)		41	60	36	32	26	41	62	27	25	22
UA 36 (2013)		41	46	38	31	28	41	54	40	36	31
UA 36 (2017)		41	51	33	31	26	41	60	27	26	22
UA 39 (2013)		41	51	43	39	33	41	47	43	33	29
UA 39 (2017)		41	61,7	47,3	42,7	32,4	41	57,8	47,1	44	33,4
UA 40 (2013)		41	55	42	43	36	41	51	34	40	30
UA 40 (2017)		41	63	37	35	27	41	61	31	28	23
UA 41 (2013)		41	33	27	33	25	41	35	38	43	31
UA 41 (2017)		41	40,4	32,5	31,5	21,4	41	40,4	39	35,8	24
UA 42 (2013)		41	49	41	46	38	41	54	48	48	38
UA 42 (2017)		41	54,7	34,1	32	21,6	41	59,7	24	23,7	17,7
UA 43 (2013)		41	56	41	38	30	41	54	38	33	27
UA 43 (2017)		41	56,8	34	32,4	23,9	41	56,1	30,2	29,4	21,4
UA 44 (2013)		41	42	31	34	26	41	45	39	45	31
UA 44 (2017)		41	48,5	39,9	35,4	26,5	41	54,3	38	33,9	24,7

Cabe registrar, que a distância do bordo para as medidas de deflexão segundo o procedimento 273/96 é de 0,90m para largura de faixa maior ou igual a 3,5m, conforme observado Tabela 5.7. Porém, as medidas foram realizadas a 1,5m do bordo do revestimento, com a finalidade de evitar os “efeitos de borda”.

Tabela 5.7 – Localização dos pontos de ensaio (DNER PRO-273, 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

5.2.5 Condições Climáticas

As duas campanhas de FWD realizadas pela empresa de consultoria nas 8 (oito) Unidades de Amostragem utilizadas no presente estudo foram realizadas no período de junho a setembro de 2013 e 2017. Trata-se dos meses com menores índices pluviométricos na região Centro-Oeste, condição que alinhada às tipologias de aterro apresentadas pelo greide dos pavimentos, à exceção do greide da UA 40, tende a diminuir o Grau de Saturação dos subleitos dos segmentos estudados. Na Tabela 5.8 é mostrada as precipitações média e máxima, medidas em postos pluviométricos próximos às Unidades de Amostragem, dos 40 dias que antecederam os levantamentos deflectométricos com o FWD.

Tabela 5.8– Dados climáticos dos 40 dias que antecederam levantamentos deflectométricos

Unidade de Amostragem	Data FWD	Posto Pluviométrico	Precipitação Média (mm)	Precipitação Máxima (mm)	Temperatura Máxima Média (°C)	Temperatura Mínima Média (°C)	Precipitação Média Mensal (mm)
UA 34 (2013)	29/08/2013	Pirenópolis - GO	0,1	3,6	32,3	15,1	
UA 34 (2017)	12/06/2017	Pirenópolis - GO	1,9	20,1	31,0	17,9	
UA 36 (2013)	05/09/2013	Pirenópolis - GO	0,1	3,6	32,5	16,1	
UA 36 (2017)	14/06/2017	Pirenópolis - GO	1,34	17,9	31,1	17,6	
UA 39 (2013)	12/09/2013	Pirenópolis - GO	0,1	3,6	32,5	16,5	
UA 39 (2017)	19/06/2017	Pirenópolis - GO	0,8	7,6	31,1	17,4	
UA 40 (2013)	12/09/2013	Pirenópolis - GO	0,1	3,6	32,5	16,5	
UA 40 (2017)	19/06/2017	Pirenópolis - GO	0,8	7,6	31,1	17,4	
UA 41 (2013)	20/09/2013	Formosa - GO	0,6	20,0	29,2	16,9	
UA 41 (2017)	23/06/2017	Formosa - GO	1,1	12,9	28,0	17,6	
UA 42 (2013)	21/09/2013	Brasília - DF	0,8	36	28,0	15,8	
UA 42 (2017)	24/06/2017	Brasília - DF	1,8	33,8	27,1	16,0	
UA 43 (2013)	19/09/2013	Unaf - MG	0,3	12,3	32,1	17,3	
UA 43 (2017)	21/06/2017	Unaf - MG	0,94	17,2	31,7	18,5	
UA 44 (2013)	18/09/2013	Unaf - MG	0,3	12,3	32,1	17,3	
UA 44 (2017)	21/06/2017	Unaf - MG	0,94	17,2	31,7	18,5	

5.2.6 Estudo de Tráfego

A coleta de dados de campo foi realizada pela empresa de consultoria de acordo com as disposições fornecidas no Manual de Estudos de Tráfego 2006 (Publicação IPR - 723) do DNIT, onde se reúnem as prescrições suficientes para a obtenção de dados de tráfego. Também foi levado em consideração os requerimentos solicitados pelo Volume 4 (Parte B) e Volume 6 do Manual do software HDM-4.

As atividades realizadas abrangem a coleta de dados por meio de contagens manuais e contagens automáticas.

a) Procedimentos de Contagens Manuais

Os veículos contados e classificados são registrados manualmente em fichas padrão, que contêm a silhueta e código de cada tipo de veículo a ser registrado, totalizando as informações em intervalos de 15 minutos.

A coleta de dados é realizada de forma independente em cada sentido do fluxo veicular, durante dois dias em um período contínuo de oito horas.

Após a execução dos trabalhos de campo, foram realizados o processamento, revisão e análise preliminar dos dados com a finalidade de se obter o Volume Médio Diário – VMD para cada trecho em estudo, o que, junto com outras pesquisas realizadas em campo, serviram como insumos básicos requeridos no HMD-4.

Outras informações adicionais fornecidas pelos dados coletados estão relacionadas com a variação do fluxo de veículos ao longo do período do dia, o que permite identificar os períodos de maior solicitação, a composição veicular e sua distribuição por sentido, conforme os exemplos apresentados nas Figuras 5.8 e 5.9 a seguir.



Figura 5.8 – Execução da Contagem Manual do Tráfego (DNIT)

b) Procedimentos de Contagens Automáticas

As contagens automáticas foram realizadas com a ajuda de contadores automáticos portáteis. O equipamento é composto por uma placa pequena com um sensor magnético que é fixado no pavimento e coberto com um protetor de borracha. As placas foram programadas para realizar as contagens durante sete dias contínuos e classificar os veículos de acordo com o comprimento destes.

Os contadores automáticos portáteis foram instalados dentro da extensão das Unidades de Amostragem.

Os equipamentos empregados nas contagens automáticas são sensores eletromagnéticos que registram continuamente os veículos que transitam pela faixa onde são montados. São dispostos dois sensores, um em cada faixa de tráfego da UA. Cabe observar que as contagens automáticas realizadas durante sete dias no período de vinte e quatro horas podem ser executadas simultaneamente em três unidades de amostragem, caso estas estejam próximas.

O sensor é colocado diretamente na faixa de tráfego, e pode ser instalado e removido rapidamente. Este sensor, NC-200, fornece contagem, velocidade e classificação de veículos. Utilizando tecnologia de visualização magnética VMI (*Vehicle Magnetic Imaging*), é registrada a passagem de cada veículo sobre ou junto ao sensor, onde são capturados dados como comprimento, aceleração e velocidade do veículo. Os dados são facilmente exportados para o Software “Highway Data Management”, sendo depois processados estatisticamente e conferidos com os resultados obtidos a partir das contagens manuais.

Durante a semana de execução dos levantamentos em cada uma das UA’s foram realizadas três visitas por dia, para assegurar o estado físico e funcional das placas, de forma que a coleta de dados não fosse alterada pelo mau funcionamento dos sensores.

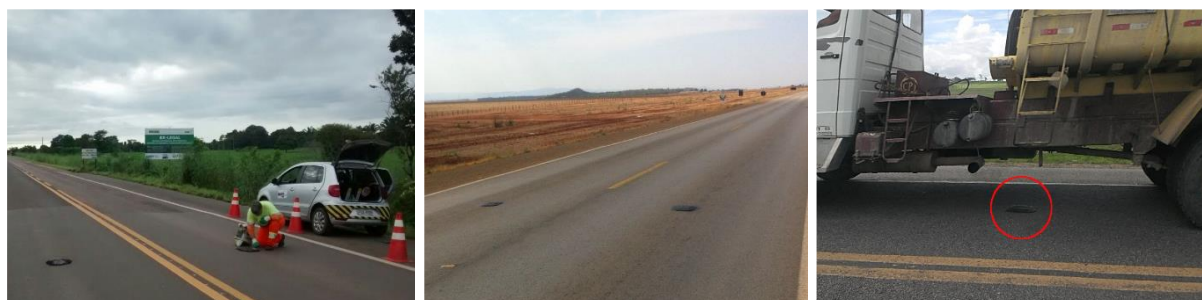


Figura 5.9 – Execução da Contagem Automática do Tráfego (DNIT)

Em razão de que os levantamentos dos dados de tráfego foram realizados em períodos de sete dias consecutivos, é necessário realizar a expansão e correção dos resultados obtidos.

Para este processo de expansão, são utilizados dados existentes de contagens permanentes realizadas pelos órgãos competentes.

Para estimar os fatores de expansão e correção, foram utilizados para este estudo dados históricos de tráfego com pedágio de 33 concessionárias. Estes dados fazem parte do estudo realizado pela Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias (ABCR) em conjunto com a Tendências Consultora Integrada. Antes de entrar no cálculo dos fatores de expansão, cabe mencionar que os volumes semanais obtidos nos levantamentos em campo foram considerados representativos do mês.

O cálculo do fator de expansão foi realizado utilizando a Equação 5.1 a seguir:

$$fA = VMD_A \div VMD_M \quad (5.1)$$

onde:

fA : Fator de expansão;

VMD_A : Volume médio diário anual; e

VMD_M : Volume médio diário mensal.

Tabela 5.9 - Comparação evolutiva – tráfego

Unidade de Amostragem	Fator Direcional			VMDa Comercial			VMDa Total			Taxa Crescimento 2014 > 2016	Taxa Crescimento 2016 > 2017	Taxa Média de Crescimento 2014>2017
	2014	2016	2017	2014	2016	2017	2014	2016	2017			
UA 34	0,51	0,51	0,52	763	462	462	2813	3121	3316	11%	6%	5,6%
UA 36	0,53	0,52	0,60	593	802	534	1731	2346	1626	36%	-30%	2%
UA 39	0,53	0,51	0,53	694	682	707	2095	2006	1954	-4%	-3%	-2%
UA 40	0,53	0,51	0,53	694	682	707	2095	2006	1954	-4%	-3%	-2%
UA 41	1,00	1,00	1,00	1226	1351	1032	5898	7664	6542	30%	-15%	5%
UA 42	0,52	0,50	0,51	897	1183	975	3669	4908	3908	34%	-20%	5%
UA 43	0,53	0,51	0,52	955	467	413	3613	2068	2020	-43%	-2%	-15%
UA 44	0,53	0,51	0,52	955	467	413	3613	2068	2020	-43%	-2%	-15%

Também de forma geral, com a totalidade dos dados levantados nesta campanha, percebem-se que as UA 36, 39 e 40 possuem a maior participação de veículos pesados. De forma geral, dentro dos resultados, evidencia-se um fator de distribuição direcional próximo de 50%, o que significa que aproximadamente o número de veículos que atravessam o segmento

da UA no sentido crescente é semelhante ao número de veículos que atravessa no sentido decrescente.

É adequado informar que a UA (41) está localizada em pistas duplas, por consequência a coleta de dados foi realizada somente em um sentido do fluxo, correspondente com as áreas delimitadas para as pesquisas do projeto.

5.3 Retroanálise e validação do uso de parâmetros representativos por meio de análise probabilística

A maioria dos dados de entrada numa análise de conservação de pavimentos (módulos de resiliência, estrutura das camadas etc.) não é conhecida com precisão. As variabilidades devem-se à dispersão dos resultados de ensaios ou à variabilidade natural no valor da grandeza que existe de um ponto a outro do pavimento. Há, portanto, uma distribuição de valores para cada parâmetro, o que faz com que esses valores possam ser considerados variáveis aleatórias.

No presente estudo estabelece-se a hipótese de homogeneidade das estruturas das camadas do pavimento, ao considerar que o levantamento de bacias deflectométricas foram realizadas em segmentos homogêneos. Logo, o objeto de análise passa a ser a possibilidade de se estabelecer um valor médio representativo de bacia deflectométrica para cada Unidade de Amostragem, assim como parâmetros e módulos de resiliência decorrentes dessa bacia. Para a obtenção dos módulos de resiliência foi utilizado o BackMeDiNa.

Inicialmente, realizou-se a retroanálise de cada uma das bacias de deflexões medidas de cada um dos segmentos homogêneos. Foram retiradas da amostragem as bacias que apresentavam erro de convergência superiores a 10% entre as bacias medidas e calculadas, e em seguida foram realizados os testes de distribuição normal para cada UA, adotando-se um nível de confiança de 95%. Tendo os resultados desse teste, ao excluir os outliers, confirmada a presença de distribuição normal para a amostras ajustadas de cada UA, procedeu-se com testes de correlação entre parâmetros da bacia e módulos de resiliência de modo a avaliar o comportamento das estruturas.

5.3.1 Retroanálise de bacias medidas

De posse dos dados das bacias medidas por FWD e da espessura/caracterização dos materiais empregados na estrutura do pavimento de cada segmento homogêneo (informações obtidas por meio de poços de inspeção), foram definidos no BackMeDiNa, versão 1.2.0, as

composições da estrutura do pavimento, com respectivos módulos de resiliência iniciais, coeficientes de Poisson e condições de aderência. Dentre as premissas adotadas estão:

- Camadas não aderidas;
- Coeficientes de Poisson (camada asfáltica = 0,30; camada granular=0,40; e subleito = 0,45);
- Número de Camadas do Pavimento foi limitada a três.

Após a execução da retroanálise até a obtenção de uma bacia de deflexões teórica próxima à bacia medida com o FWD prosseguiu-se com a análise do erro de convergência de ambas. Pela Equação 5.2 (raiz do valor quadrático médio das diferenças) o erro de proximidade entre as bacias é medido ponto a ponto.

$$Erro (RMS) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_{calc.i} - d_{med.i})^2 \right]^{0,5} \quad (5.2)$$

onde:

- n é o número de pontos de deflexão na bacia ou número de sensores do FDW;
 $d_{calc.i}$ é a deflexão calculada no sensor i (μm); e
 $d_{med.i}$ é a deflexão medida em campo no sensor i (μm).

O manual do *software* indica que a retroanálise possui uma boa correlação entre a bacia medida com FWD e a calculada quando o erro for inferior a 5%, uma correlação razoável quando o erro variar de 5% a 10%, e a não existência de correlação satisfatória quando o erro for superior a 10%. Nesse aspecto, foram excluídas da análise as bacias que apresentaram erro de convergência (RMS) superior a 10%.

5.3.2 Teste de normalidade de parâmetros e módulos de resiliência extraído das bacias medidas

Para testar a existência de distribuição normal das amostras analisadas, foi realizado o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, adotando-se um nível de confiança de 95%, o que representa a aceitação de faixa de valores até duas vezes o desvio padrão, de modo a rejeitar os módulos de resiliência obtidos na retroanálise pouco representativos (outliers). Os testes tiveram como hipótese nula que a distribuição dos dados era normal e hipótese alternativa que

a distribuição era diferente dessa. Valores de p maiores que 0,05 significam uma distribuição normal do parâmetro. A Tabela 5.10 resume os valores estatísticos desses testes que confirmaram a presença de distribuição normal de parâmetros de bacia e módulos de resiliência. Informações detalhadas sobre os parâmetros oriundos de cada bacia deflectométrica medida em campo, que foram utilizados no presente teste, estão disponibilizados nos Anexos I a VII.

Tabela 5.10 – Teste de normalidade dos parâmetros analisados - excluindo os outliers

Parâmetro	Kolmogorov-Smirnov (p)							
	UA 34	UA 36	UA 39	UA 40	UA 41	UA 42	UA 43	UA 44
RC	0,720	0,591	0,989	0,862	0,696	0,515	0,794	0,264
AREA	0,973	0,893	0,784	0,613	0,164	0,684	0,99	0,407
SCI	0,941	0,703	0,986	0,794	0,496	0,755	0,828	0,300
BDI	0,964	0,954	0,403	0,462	0,968	0,777	0,110	0,126
BCI	0,319	0,254	0,333	0,850	0,212	0,888	0,555	0,702
Mr_rev	0,620	0,893	0,657	0,487	0,391	0,958	0,654	0,916
Mr_camada granular	0,834	0,466	0,113	0,408	0,715	0,986	0,715	0,573
Mr_subleito	0,988	0,462	0,458	0,250	0,932	0,869	0,397	0,951

A presença de uma distribuição normal nos parâmetros avaliados possibilita a utilização de um valor médio representativo para esses. No presente estudo, considera-se a obtenção desses parâmetros médios a partir de uma bacia deflectométrica média representativa para cada Unidade de Amostragem avaliada.

5.3.3 Teste de correlação de parâmetros e módulos de resiliência extraído das bacias medidas

Tendo sido observado na Tabela 5.10 que as variáveis em análise apresentam distribuição normal, pode-se aplicar o teste de correlação de Pearson (r), conforme Tabela 5.11, para confirmar a força da relação dos módulos de resiliência de cada camada do pavimento com os parâmetros de bacia deflectométricas discutido. Valores de $|r|$ superiores a 0,70 indicam forte correlação entre parâmetros, valores de $|r|$ entre 0,5 e 0,7 indicam uma correlação moderada e valores de $|r|$ entre 0,3 e 0,5 indicam uma fraca correlação.

Tabela 5.11 – Teste de correlação de Pearson (amostra de 2013)

Parâmetros		Pearson (r)							
		UA 34	UA 36	UA 39	UA 40	UA 41	UA 42	UA 43	UA 44
RC	Mr_rev	0,393	0,007	0,416	0,769	0,793	0,746	0,533	0,909
	Mr_base	0,460	0,728	0,408	0,220	0,750	0,573	0,577	0,677

	Mr_subleito	-0,105	0,600	0,158-	0,040	-0,185	0,343	-0,326	0,123
AREA	Mr_rev	0,556	0,634	0,443	0,194	0,809	0,889	0,603	0,937
	Mr_base	0,116	-0,358	0,126	0,632	0,633	0,011	0,353	0,582
	Mr_subleito	-0,722	-0,797	-0,380	-0,792	-0,525	-0,396	-0,715	-0,029
SCI	Mr_rev	-0,412	-0,035	-0,429	-0,753	-0,793	-0,726	-0,524	-0,861
	Mr_base	-0,431	-0,696	-0,409	-0,231	-0,727	-0,542	-0,580	0,709
	Mr_subleito	0,091	-0,601	-0,171	-0,018	0,294	-0,385	0,356	-0,076
BDI	Mr_rev	0,655	0,601	0,060	-0,224	-0,381	-0,280	0,373	-0,367
	Mr_base	-0,814	-0,818	-0,729	-0,115	-0,901	-0,871	-0,906	-0,938
	Mr_subleito	-0,393	-0,876	-0,175	-0,476	-0,039	-0,445	0,103	0,167
BCI	Mr_rev	0,614	0,531	0,540	0,116	0,309	0,219	0,692	-0,116
	Mr_base	-0,555	-0,714	-0,824	0,272	-0,515	-0,883	-0,906	-0,929
	Mr_subleito	-0,535	-0,887	-0,039	-0,737	-0,606	-0,737	0,103	0,032

A presença de correlação negativa ou inversa na Tabela 5.11 indica uma variável tende a aumentar quando a outra diminui. No caso de correlações positivas, um aumento no valor de uma variável implica também no aumento do valor de outra.

Por meio da análise da correlação de Pearson, nota-se que o parâmetro de raio de curvatura (RC) é influenciado principalmente pela rigidez da camada de base e do revestimento, uma vez que sua equação leva em conta deflexões mais ao centro (25cm). Tal correlação evidencia que o parâmetro pode ser um bom balizador da condição estrutural do pavimento.

Para o parâmetro AREA, percebe-se melhores correlações com a camada de subleito e do revestimento, podendo ser um bom indicador da qualidade de camadas mais profundas do pavimento.

O parâmetro SCI, como esperado, apresentou boa correlação negativa com a rigidez da camada asfáltica e da base, indicando que quanto maior seu valor, mais comprometido estruturalmente é o pavimento.

Os parâmetros BDI e BCI apresentaram correlações significativamente forte com a rigidez das camadas de base e subleito, como era de se esperar. Para o índice BDI, nota-se que é um bom indicador de camada intermediária. Já o índice BCI apresentou boa correlação tanto com a camada da base como a do subleito, podendo ser um balizador do comportamento de rigidez de camadas mais profundas.

Do exposto, verifica-se que a análise desses parâmetros de bacia deflectométricas associada aos módulos de resiliência das camadas tendem a demonstrar a condição estrutural do pavimento. Sobre esse aspecto, apresenta-se nos próximos capítulos um maior detalhamento do modo como tais correlações podem ser aproveitadas para a avaliação das condições estruturais de um pavimento.

CAPÍTULO VI

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se considerações e resultados de retroanálise de bacias de deflexão representativas a partir do software BackMeDiNa.

Inicialmente foi realizado o cálculo das bacias deflectométricas médias representativas, dos parâmetros dessas bacias e respectivos módulos de resiliência das camadas do pavimento. Com o objetivo de verificar a correlação dos módulos obtidos por retroanálise de materiais similares aplicados em diferentes segmentos homogêneos avaliados, assim como os observados com estudos similares na região geográfica avaliada, aplicou-se, além da retroanálise das bacias médias com estruturas similares às das análises pontuais, a retroanálise de bacias médias limitando a espessura das camadas granulares a 20cm, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT ES – 098 (2007).

A partir dessa análise, foi possível identificar que algumas estacas avaliadas, quando não limitada a espessura de 20 cm de camadas granulares, apresentavam módulos não condizentes com as características elásticas das camadas do revestimento asfáltico empregado na região. Desta forma, optou-se por adotar a limitação dos 20 cm de espessura das camadas granulares (divisão da camada em subcamadas de no máximo 20 cm), empregando-se os mesmos valores de módulos de resiliência. A adoção de tal condição resultou na diminuição dos erros de convergência entre as bacias medidas e calculadas pela ferramenta de retroanálise BackMeDiNa.

Definidos os valores modulares médios por segmento homogêneo, confrontou-se os resultados da modelagem matemática do MeDiNa com as condições do pavimento levantadas em campo para um período de 4 (quatro) anos, 2013 a 2017, tendo sido utilizado como parâmetros a área trincada e o afundamento na trilha de roda (deformação plástica).

Por último, buscou-se ampliar a análise de concordância do modelo proposto no MeDiNa com as situações observadas em campo por meio da adoção parâmetros de materiais contidos na biblioteca do *software* e de pesquisas publicadas realizadas em trechos rodoviários da região, avaliando-se o nível de precisão observado nas simulações a partir desses dados de origem diversa.

6.1 Obtenção de parâmetros representativos

6.1.1 Retroanálise de bacias deflectométricas representativas

Confirmada a presença de distribuição normal de parâmetros de bacia e módulos de resiliência, possibilitando a utilização da média amostral como elemento de análise, foram estabelecidos os valores médios e coeficientes de variação da amostra ajustada. No geral as amostras ajustadas das bacias permaneceram com mais de 30 elementos, após os descartes devido erros de convergência, possibilitando uma boa representatividade dos parâmetros estudados.

Na Tabela 6.1 são apresentadas as curvas deflectométricas médias de cada segmento homogêneo a partir de levantamentos realizados em 2013 e 2017.

Tabela 6.1– Valores médios das bacias deflectométricas e dos coeficientes de variação da amostra

UA	Ano	Amostra (unid.)	Tm Asf. (°C)	Bacia Deflectométrica	D ₀	D ₃₀	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₁₈₀
34	2013	44/52	34	Deflexão Média (10 ⁻² mm) medida	61,5	29,5	12,9	8,0	6,0	4,8	4,1
				Coef.Variação (%)	21	26	31	29	25	24	22
	2017	39/51	32	Deflexão Média (10 ⁻² mm) medida	62,6	27,2	12,8	7,8	5,8	4,6	4,0
				Coef.Variação (%)	18	23	28	30	26	24	21
36	2013	30/51	39	Deflexão Média (10 ⁻² mm) medida	54,7	23,9	10,1	6,4	4,7	3,8	3,1
				Coef.Variação (%)	35	52	9	56	52	56	56
	2017	28/51	29	Deflexão Média (10 ⁻² mm) medida	58,5	21,6	9,8	6,1	4,5	3,6	3,1
				Coef.Variação (%)	41	58	60	57	53	55	62
39	2013	43/51	43	Deflexão Média (10 ⁻² mm) medida	49,8	24,9	9,4	5,1	3,6	3,0	2,6
				Coef.Variação (%)	9	9	9	11	14	15	14
	2017	39/51	47	Deflexão Média (10 ⁻² mm) medida	59,8	24,6	9,6	5,3	3,8	3,2	2,8
				Coef.Variação (%)	10	12	15	19	22	21	21
40	2013	37/51	38	Deflexão Média (10 ⁻² mm) medida	54,4	25,9	9,8	5,9	4,5	3,6	3,0
				Coef.Variação (%)	13	17	34	42	42	40	38
	2017	33/51	34	Deflexão Média (10 ⁻² mm) medida	63,8	28,1	10,8	6,2	4,8	3,8	3,3
				Coef.Variação (%)	13	19	33	41	43	37	36
41	2013	38/50	32	Deflexão Média (10 ⁻² mm) medida	34,6	19,1	8,5	5,3	4,1	3,3	2,9
				Coef.Variação (%)	14	10	9	9	8	8	8
	2017	45/51	36	Deflexão Média (10 ⁻² mm) medida	40,4	22,2	10,6	6,2	4,6	3,8	3,4
				Coef.Variação (%)	9	9	10	12	12	11	10

42	2013	43/50	45	Deflexão Média (10 ⁻² mm) medida	51,9	32,9	16,7	10,3	7,5	6,1	5,2
				Coef.Variação (%)	13	12	13	13	12	11	11
	2017	44/51	30	Deflexão Média (10 ⁻² mm) medida	57,4	32,8	17,2	10,1	7,3	5,8	5,0
				Coef.Variação (%)	17	14	13	11	12	11	10
43	2013	37/51	40	Deflexão Média (10 ⁻² mm) medida	55,3	27,9	12,3	7,4	5,6	4,7	4,1
				Coef.Variação (%)	8	8	8	9	10	9	8
	2017	26/51	32	Deflexão Média (10 ⁻² mm) medida	55,2	27,1	12,7	7,8	5,6	4,7	4,2
				Coef.Variação (%)	8	6	6	8	9	9	9
44	2013	24/51	38	Deflexão Média (10 ⁻² mm) medida	51,7	27,7	12,8	7,9	5,9	4,9	4,2
				Coef.Variação (%)	12	8	6	6	7	6	4
	2017	35/51	39	Deflexão Média (10 ⁻² mm) medida	53,1	28,0	13,9	8,5	6,2	5,1	4,5
				Coef.Variação (%)	19	13	10	9	9	7	7

Ao avaliar os desvios em relação a valores de deflexão máximas médias em cada segmento homogêneo analisado, percebe-se um Coeficiente de Variação (CV) variando de 8 a 21% em sete das oito UA, sendo a exceção a UA 36 com CV de 35 a 41%. Trata-se de valores semelhantes ao apresentado por Macêdo (1996) quando do controle tecnológico de construção da Rodovia Carvalho Pinto, que apresentou CV de 8 a 29% na camada final de terraplanagem.

Ao avaliar os desvios nas deflexões apresentadas pelo coeficiente de variação à medida que se afasta do centro da bacia (Do), percebe-se um ligeiro aumento dos desvios em três UA (36, 39 e 40), ausência de tendência em três UA (34,41 e 43) e uma ligeira diminuição dos desvios em duas UA (42 e 44). Tal situação pode ser entendida que ao contrário do estudo apresentado por Soares et al. (2000), que identificou o aumento dos coeficientes de variação com o afastamento do centro da aplicação da carga na utilização da Viga Benkelman, não há uma tendência de perda clara dessa precisão das leituras de deflexões no uso do FWD.

6.1.2 Análise de parâmetros de bacias deflectométricas representativas

Na Tabela 6.2 apresenta-se os valores médios amostrais de parâmetros de bacias deflectométricas obtidos para cada uma das 8 (oito) Unidades de Amostragem estudadas, incluindo os respectivos coeficientes de variação.

Tabela 6.2 – Valores de parâmetros de bacia deflectométrica, com respectivos coeficientes de variação da amostra

UA	Ano	Amostra (unid.)	Tm Asf. (°C)	Bacia Deflectométrica	RC (m)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
34	2013	44/52	34	Valor Médio Amostral	140,7	37,64	32,0	16,6	4,93
				Coef. Variação (%)	12	4	1	1	2
	2017	39/51	32	Valor Médio Amostral	127,0	36,03	35,4	14,4	5,0
				Coef. Variação (%)	13	6	12	13	18
36	2013	30/51	39	Valor Médio Amostral	146,0	35,4	30,8	13,7	3,7
				Coef. Variação (%)	15	7	15	24	35
	2017	28/51	29	Valor Médio Amostral	122,0	32,6	36,9	11,8	3,7
				Coef. Variação (%)	21	6	18	29	36
39	2013	43/51	43	Valor Médio Amostral	180,5	37,18	24,9	15,4	4,37
				Coef. Variação (%)	11	3	11	11	13
	2017	39/51	47	Valor Médio Amostral	126,2	33,68	35,7	15,3	4,4
				Coef. Variação (%)	9	4	9	11	16
40	2013	37/51	38	Valor Médio Amostral	157,9	36,29	28,5	16,1	3,8
				Coef. Variação (%)	19	10	18	11	24
	2017	33/51	34	Valor Médio Amostral	126,0	34,76	35,7	17,3	4,57
				Coef. Variação (%)	15	9	14	14	28
41	2013	38/50	32	Valor Médio Amostral	290,5	41,18	15,49	10,61	3,20
				Coef. Variação (%)	22	7	21	16	11
	2017	45/51	36	Valor Médio Amostral	246,1	41,72	18,3	11,6	4,5
				Coef. Variação (%)	13	4	13	12	10
42	2013	43/50	45	Valor Médio Amostral	236,6	46,74	19,02	16,00	6,56
				Coef. Variação (%)	16	4	17	15	16
	2017	44/51	30	Valor Médio Amostral	182,7	43,7	24,63	15,65	7,11
				Coef. Variação (%)	25	6	28	18	21
43	2013	37/51	40	Valor Médio Amostral	164,7	38,85	27,3	15,7	4,9
				Coef. Variação (%)	12	4	12	10	12
	2017	26/51	32	Valor Médio Amostral	160,4	38,76	28,1	14,4	4,96
				Coef. Variação (%)	13	4	13	9	11
44	2013	24/51	38	Valor Médio Amostral	187,5	40,78	24,0	14,9	4,9
				Coef. Variação (%)	26	7	20	11	13
	2017	35/51	39	Valor Médio Amostral	179,1	41,06	25,1	14,1	5,4
				Coef. Variação (%)	29	8	29	20	18

O raio de curvatura (RC) pode ser entendido como o ponto de arqueamento da bacia de deflexão, no qual, em pavimentos flexíveis é o ponto mais crítico, que em geral é considerado a 25 cm do centro da carga. No Brasil, é o parâmetro adotado para a verificação da integridade estrutural dos pavimentos flexíveis, de acordo com a norma DNER-PRO/11-79. Esta Norma estipula que valores menores que 100m indicam pavimentos com baixa capacidade estrutural.

No presente estudo, o Raio de Curvatura foi determinado tomando-se como base os valores de D_0 e D_{30} , sendo expresso, a partir da expressão geral (Eq. 7), por $RC = 9000/[2(D_0 - D_{30})]$. De acordo com a Tabela 6.2, houve uma redução desse parâmetro em todos os segmentos avaliados quando comparado o período de 2013 e 2017, o que indicaria perda de vida útil. Em 2013 os resultados ficaram entre 117 e 197m, e em 2017 os resultados ficaram entre 101 e 152. Porém, em ambos os períodos, esse parâmetro ainda indicava uma boa capacidade das estruturas analisadas (valores acima de 100 m).

Das amostras de bacias avaliadas para cada UA, verifica-se coeficientes de variação de RC variando de 9% a 29%, inferior ao valor de 39,4% com viga Benkelman e bem acima do valor de 3,26% com FWD reportados no estudo de Rocha Filho e Rodrigues (1998), citado por Soares et al. (2000).

O parâmetro AREA visa combinar as deflexões medidas em todos os sensores, o que minimizaria os efeitos de um desses em mau funcionamento. Matematicamente, de acordo com a fórmula, esse parâmetro tem valor máximo limite, sendo igual a 90 cm, e um valor mínimo de 28. Os resultados apresentados na Tabela 6.2 mostram que os valores variavam entre 35 e 46 no ano de 2013, e entre 32 e 43 no ano de 2017. Segundo a classificação de Lopes (2012) se encaixam como revestimentos de CBUQ fino (<12cm), entre 40 e 55, e flexíveis fracos, entre 28 e 40. Ao verificar que as espessuras dos revestimentos nas Unidade de Amostragem estudadas variam de 3 a 12 cm (ver Tabela 5.1), percebe-se relativa concordância com as faixas de valores indicadas pela pesquisadora. Em quatro das oito unidades (UA 34, 41, 42 e 44) os valores obtidos de AREA estão dentro das faixas indicadas, enquanto para as outras quatro unidades (UA 36, 39, 40 e 43) os valores obtidos para esse parâmetro estão um pouco abaixo do limite inferior de 40 cm atribuído a revestimentos de CBUQ fino, sendo obtidos valores entre 35 e 39 cm no ano de 2013, valores entre 33 e 39 cm no ano de 2017.

Segundo Horak (2008), o SCI é o indicador mais sensível para evidenciar a situação da deformabilidade da camada de revestimento. O seu valor é inversamente proporcional à rigidez do pavimento, e valores superiores à 25 podem indicar que a camada de revestimento é pouco rígido ou é de pequena espessura. Como observado Tabela 6.2, em 2013, três das oito unidades

(UA 36, 40 e 43) apresentavam valores de SCI superiores a 25. Em 2017, somente duas UA avaliadas (UA 41 e 42) apresentavam este índice abaixo do limite aceitável.

Por vez, os parâmetros BDI e BCI são os melhores indicadores da condição da camada de base e subleito, respectivamente. Para o primeiro, valores superiores a 40 indicam pavimentos pouco resistentes ou com problemas estruturais, e para o segundo, valores superiores a 10 de BDI indicam problemas estruturais no subleito. De acordo com Tabela 6.2, nenhuma bacia apresentou valor superior ao limite para o BDI ou BCI, podendo indicar boa resistência das camadas subjacentes ao revestimento asfáltico de todas as UA avaliadas.

6.1.3 Análise dos módulos de resiliência de bacias deflectométricas representativas

Na Tabela 6.4 são apresentados módulos de resiliência obtidos da retroanálise dessas bacias deflectométricas, considerando a espessura total das camadas (revestimento, base, sub-base e subleito) e limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES. Em tal procedimento foi atribuído um valor único de módulo de resiliência para a camada granular e realizado o comando de retroanálise quantas vezes fossem necessários para obter o menor RMS.

Tal procedimento visa verificar se há convergência dos módulos de resiliência de materiais semelhantes empregados nas camadas do pavimento de diferentes segmentos homogêneos, pois na retroanálise a espessura de uma camada tem correlação inversamente proporcional ao módulo dessa. Segundo Ullidtz & Stubstad (1985) *apud* Macêdo (1996) a espessura de cada camada é muito importante para o cálculo dos módulos, acrescentando os autores que nos casos em que a espessura é superestimada os módulos correspondentes obtidos serão subestimados, mesmo que a rigidez permaneça razoavelmente correta.

Para tanto, utilizou-se de informações apresentadas em Balbo (2007) e Freitas (2019) como referência de valores de módulos de resiliência de materiais similares aos empregados nas estruturas das UA estudadas, conforme exposto na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Valores de referência para materiais empregados na estrutura do pavimento das UA avaliadas (Balbo, 2007 e Freitas, 2019)

Camada	Material	Faixa de Módulo de Resiliência (MPa)	Unidades de Amostragem
Revestimento Asfáltico	concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) convencional com CAP 50/60	2.700 - 4.300 ¹	Todas
Base	Solo brita laterítico	392 - 420	34, 36,41, 42, 43 e 44
Base	Similar a brita graduada simples (BGS)	444 - 530	39 e 40
Subleito	Solo não laterítico	135 - 156	34 e 42
Subleito	Solo laterítico	209 - 220	36, 39, 40, 41, 43 e 44

1 – A faixa de valores de MR não consideram o envelhecimento a curto prazo da mistura asfáltica.

Na Tabela 6.4 apresentam-se os valores médios amostrais dos módulos de resiliência das camadas dos pavimentos de cada uma das 8 (oito) Unidades de Amostragem estudadas, incluindo as respectivas raízes do valor quadrático médio (RMS).

Tabela 6.4 – Valores dos módulos de resiliência, com respectivas raízes do valor quadrático médio da amostra

UA	Ano	Amostra (unid.)	Tm Asf. (°C)	Bacia Deflectométrica Média	MR Revestimento (MPa)	MR Base (MPa)	MR Subleito (MPa)	RMS (%)
34	2013	44/52	34	Camada Granular única	31263	235	152	5,2
				Camada Granular dividida	4151	480	148	3,9
	2017	39/51	32	Camada Granular única	17827	259	156	4,5
				Camada Granular dividida	2854	460	152	2,8
36	2013	30/51	39	Camada Granular única	12348	250	197	5,4
				Camada Granular dividida	5693	410	190	3,5
	2017	28/51	29	Camada Granular única	4479	272	203	5,5
				Camada Granular dividida	1554	400	198	4,0
39	2013	43/51	43	Camada Granular única	4290	185	239	4,0
				Camada Granular dividida	4388	250	228	1,9
	2017	39/51	47	Camada Granular única	2116	185	219	4,7
				Camada Granular dividida	2110	250	211	2,8
40	2013	37/51	38	Camada Granular única	1658	216	203	5,2
				Camada Granular dividida	1894	280	196	3,1
	2017	33/51	34	Camada Granular única	1299	184	188	4,2

				Camada Granular dividida	1320	260	183	2,0
41	2013	38/50	32	Camada Granular única	2011	473	225	7,5
				Camada Granular dividida	2830	560	222	6,9
	2017	45/51	36	Camada Granular única	1960	372	191	5,9
				Camada Granular dividida	2216	560	188	4,5
42	2013	43/50	45	Camada Granular única	9230	201	128	5,5
				Camada Granular dividida	4586	560	120	5,2
	2017	44/51	30	Camada Granular única	7063	185	131	4,6
				Camada Granular dividida	1954	550	122	3,9
43	2013	37/51	40	Camada Granular única	18956	227	165	8,6
				Camada Granular dividida	6483	550	156	6,8
	2017	26/51	32	Camada Granular única	16988	240	163	7
				Camada Granular dividida	6265	560	154	5,6
44	2013	24/51	38	Camada Granular única	4933	243	160	7,0
				Camada Granular dividida	3357	540	152	6,1
	2017	35/51	39	Camada Granular única	4651	247	150	6,6
				Camada Granular dividida	3259	550	143	5,4

A partir da observação do Tabela 6.4, percebe-se que houve resultados positivos com a segregação das camadas granulares intermediárias não superiores a 20 cm. No geral, os resultados obtidos com a aplicação dessa premissa se aproximaram melhor de valores de referência obtidos em outros estudos. Dessa forma, optou-se por consolidar os resultados até então discutidos na forma do Tabela 6.5, apresentado a seguir.

Tabela 6.5 – Parâmetros médios das UA analisadas

UA	Ano	Amostragem (unid.)	Tm Asf. (°C)	Levantamentos Funcional do Pavimento		Parâmetros de Bacia Deflectométrica						Módulos de resiliência (MPa)		
				Área Trincada (%)	ATR (cm)	Do	RC (m)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BCI (mm/100)	BDI (mm/100)	Revestimento	Base	Subleito
34	2013	44/52	34	13,00	6+1	61,5	145,5	37,64	21,33	1,65	1,66	4151	480	148
	2017	39/51	32	22,52	4+3	62,6	127,0	36,03	35,4	14,4	5,0	2854	460	152
36	2013	30/51	39	0,00	5+1	54,7	146,0	35,4	30,8	13,7	3,7	5693	410	190
	2017	28/51	29	0,13	3+3	58,5	122,0	32,6	36,9	11,8	3,7	1554	400	198
39	2013	43/51	43	0,00	7+1	49,8	180,5	37,18	24,9	15,4	4,37	4388	250	228
	2017	39/51	47	6,90	4+2	60,9	126,2	33,68	35,7	15,3	4,4	2110	250	211
40	2013	37/51	38	1,71	7+1	54,4	157,9	36,29	28,5	16,1	3,8	1894	280	196
	2017	28/51	29	7,83	4+3	63,8	126,0	34,76	35,7	17,3	4,57	1320	260	183

41	2017	33/51	34	0,51	5+-1	34,6	290,5	41,18	15,49	10,61	3,20	2830	560	222
	2013	38/50	32	2,39	3+-3	40,6	246,1	41,72	18,3	11,6	4,5	2216	560	188
42	2013	43/50	45	2,91	5+-1	51,9	236,6	46,74	19,02	16,00	6,56	4586	560	120
	2017	44/51	30	2,16	3+-3	57,4	182,7	43,7	24,63	15,65	7,11	1954	550	122
43	2013	37/51	40	4,66	7+-1	55,3	164,7	38,85	27,3	15,7	4,9	6483	550	156
	2017	26/51	32	1,23	2+-3	55,2	160,4	38,76	28,1	14,4	4,96	6265	560	154
44	2013	24/51	38	2,47	5+-1	51,7	187,5	40,78	24,0	14,9	4,9	3357	540	152
	2017	35/51	39	6,50	3+-3	53,1	179,1	41,06	25,1	14,1	5,4	3259	550	143

Ao analisar as informações consolidadas na Tabela 6.5, quatro aspectos chamam atenção quanto aos resultados.

O primeiro aspecto a ser observado na Tabela 6.5 está relacionado à diminuição do módulo de resiliência calculado da camada asfáltica das estruturas analisadas no intervalo de tempo de 2013 a 2017. Percebe-se que nos casos em que ocorreu maiores perdas de rigidez da camada asfáltica (UA 34,36,39,40,41 e 42) estão associados a alterações dos módulos de resiliência da base, devido deformações plásticas, causando afundamento na trilha de roda, e ao aumento de trincas no pavimento, conforme observado na Tabela 6.5. Essa situação contribui para a diminuição da rigidez do pavimento e conseqüentemente a sua vida útil.

O segundo aspecto refere-se aos módulos de resiliência das camadas de base observadas nas UA 41 a 44 variando entre 540 e 560 MPa, tendo a faixa de referência adotada de 392 a 420 MPa. Pela uniformidade dos resultados obtidos nessa quatro UA, a explicação pode estar atrelada as características específicas do material da região ou pela própria característica dos solos lateríticos, que tendem a aumentar o módulo de resiliência com o tempo.

O terceiro ponto é referente aos módulos de resiliência das camadas de subleito observadas nas UA 43 e 44 variando entre 143 e 156 MPa, tendo a faixa de referência adotada de 209 a 220 MPa. Tal variação pode ser explicada pela perda de rigidez do solo, seja decorrente do processo de deterioração do pavimento, ou de uma presença de umidade maior, em torno de 32,4 a 34,2%, em comparação a faixa de 26,8 a 28,8% apresentada nas UA 36, 39, 40 e 41, que apresentaram valores aderentes à referência.

Por último, percebe-se que módulos de resiliência obtidos para as camadas de base observadas nas UA 39 e 40 variam entre 250 e 280 MPa, enquanto a faixa de referência adotada com base nos trabalhos de Balbo (2007) e Freitas (2019) varia de 444 a 530 MPa. Sobre esse aspecto, considerando a excelente reprodução das bacias de deflexão com os módulos aqui obtidos por retroanálise, entende-se que os valores utilizados como referência devem ser expandidos nos trabalhos futuros. Uma possível explicação para as diferenças obtidas pode ser

a metodologia empregada nas retroanálises realizadas nos diferentes trabalhos. Neste trabalho foi adotada a estratégia de subdividir a espessura da base em subcamadas de no máximo 20 cm.

Conclui-se a presente etapa da análise do comportamento das estruturas de pavimento das rodovias em avaliação, citando estudo de Rocha et al. (2021), o qual vincula as correlações dos parâmetros SCI, BDI e BCI com os módulos retroanalizados e os limites estipulados por Horak (2008), conseguiu estabelecer uma classificação da condição estrutural a partir de limites de módulos de resiliência para pavimentos flexíveis com base granular, tendo como referência os limites estipulados por Horak (2008) de parâmetros de bacia de deflexão, conforme observado na Tabela 6.6.

Tabela 6.6– Classificação da condição estrutural de acordo com os PBDs e módulos retroanalizados (Horak,2008 e Rocha et al., 2021)

Condição do pavimento	Parâmetros de Bacia Deflectométricas (10 ⁻² mm)			Módulos Retroanalizados (MPa)				
	SCI	BDI	BCI	Revestimento	Base	Sub-base	Reforço do subleito	Subleito
Seguro	< 20	< 10	< 5	> 4.000	> 200	> 200	> 150	> 150
Em alarme	20 - 40	10 - 20	5 - 10	2.000 - 4.000	100 - 200	100 - 200	80 - 150	80 - 150
Severo	> 40	> 20	> 10	< 2.000	< 100	< 100	< 80	< 80

De acordo com a Tabela 6.6, é possível notar, a partir de uma análise conjunta dos valores de Parâmetros de Bacias Deflectométricas e dos módulos obtidos por meio de retroanálise, que em todas as UA analisadas ainda permanecem com a condição das camadas inferiores do pavimento em segurança. De modo geral, verifica-se um aumento dos parâmetros SCI e BDI, provocados pela perda da rigidez das camadas asfálticas, colocando a condição desses pavimentos na condição de intervenção de manutenção necessária (em alarme). Porém, a exceção se demonstra nas UA 42 e 44, cuja camada de subleito não atenderia aos limites de segurança estabelecidos na Tabela 6.6, mas que ainda não perderam a condição de integridade devido à capacidade de suporte da camada de base, que acaba por absorver parte dessa fragilidade da estrutura quando analisado o comportamento do pavimento como um todo, condição confirmadas pelos Raios de Curvatura que ainda permanecem superiores a 100m, indicando a condição de integridade da estrutura.

Portanto, entende-se pela concordância dos resultados obtidos na análise de Parâmetros de Bacias Deflectométricas e módulos retroanalizados com o comportamento esperado dos pavimentos das diferentes UA avaliadas, a partir de discussões apresentadas nessa pesquisa.

6.2 Verificação do modelo numérico

A verificação da modelagem numérica foi realizada por meio de análises comparativas entre os resultados medidos no monitoramento e os obtidos pela modelagem no MeDiNa. Verificou-se coerência entre os resultados do monitoramento e da modelagem, tanto na geometria das bacias deflectométricas calculadas quanto no trincamento do pavimento. Conforme observado na Figura 6.1.

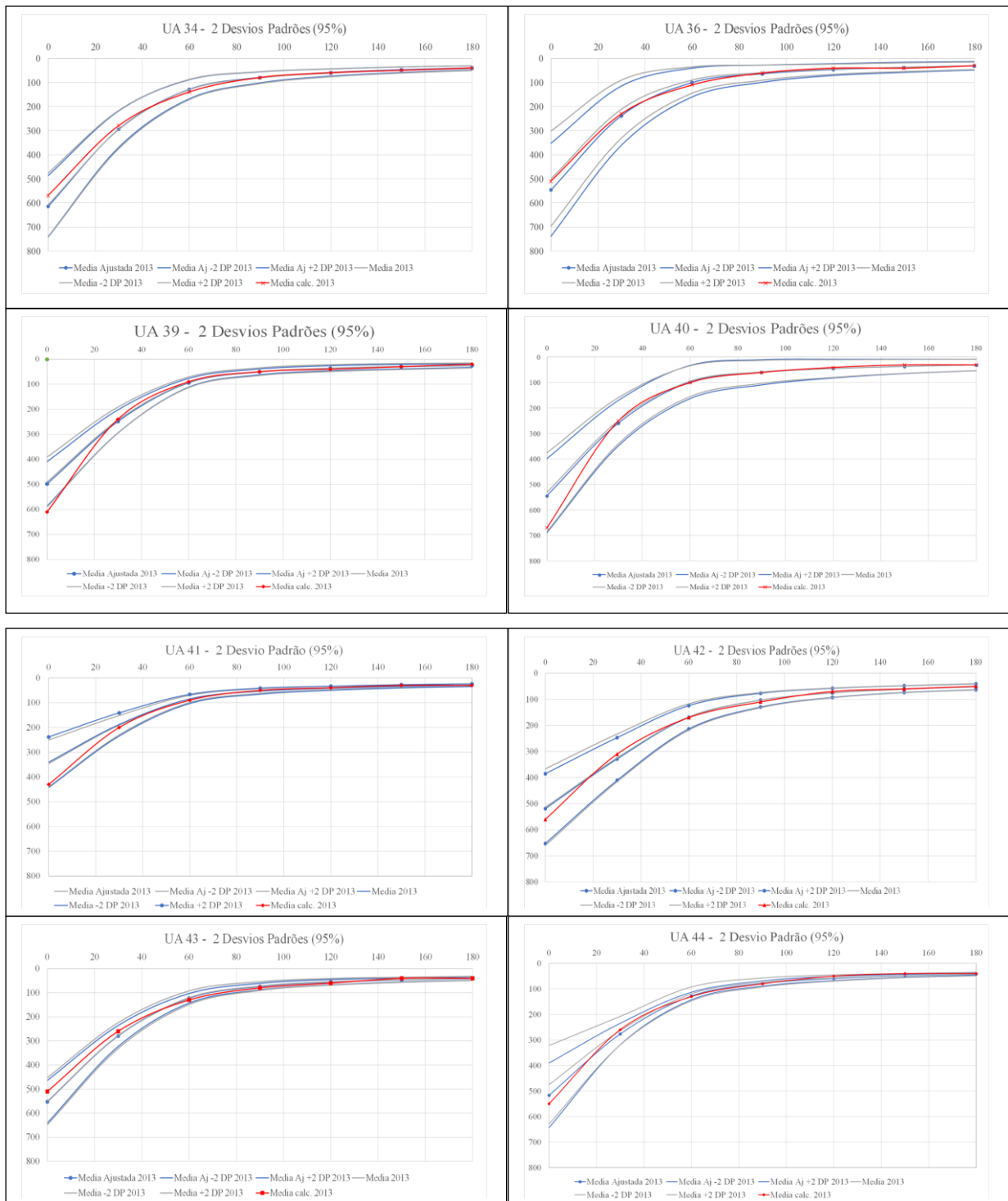


Figura 6.1- Correlação entre as bacias deflectométricas calculadas e medidas para o ano de 2013

Na Figura 6.1 são apresentadas sete curvas referentes a bacias deflectométricas para o ano de 2013, sendo: (i) três relacionadas à média mais ou menos 2 desvios padrões (95% de confiabilidade) de dados brutos, (ii) três relacionadas à média mais ou menos 2 desvios padrões (95% de confiabilidade) de dados ajustados, pela retirada bacias calculadas com RMS acima de 10% e outliers; e (iii) uma relacionada à bacia deflectométrica média calculada a partir de módulos de resiliência das camadas do pavimento obtidos por meio da retroanálise das bacias deflectométricas medidas em 2013, conforme valores apresentados na Tabela 6.7 abaixo.

Tabela 6.7– Valores médios das bacias deflectométricas calculadas para 2013

UA	Deflexão Média (10 ⁻² mm) calculada para 2013						
	D ₀	D ₃₀	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₁₈₀
34	57	28	14	8	6	5	4
36	51	23	11	6	4	4	3
39	61	24	9	5	4	3	2
40	67	25	10	6	4	3	3
41	43	20	9	5	4	3	3
42	56	31	17	11	7	6	5
43	51	26	13	8	6	4	4
44	55	26	13	8	5	4	4

Por vez, quando avaliadas as previsões de trincamento do revestimento asfáltico, afundamento na trilha de roda (ATR) e a deflexão característica indicadas pelo MeDiNa e apresentadas na Tabela 6.8, considerando como dados de entrada os módulos de resiliência das camadas obtidos por retroanálise a partir das bacias deflectométricas médias representativas de 2013 (vide Tabela 6.5), bem como das condições de tráfego a que as estruturas dos pavimentos das UA estavam sujeitas no início do monitoramento (vide Tabela 5.1), assim como as condições de área trincadas (vide Tabela 5.3) e ATR (vide Tabela 5.5) medidas em 2017, percebe-se novamente a convergência entre os modelos e as situações observada em campo.

Tabela 6.8 – Parâmetros de desempenho dos pavimentos - calculados e medidos (2013-2017)

UA	Área Trincada Calculada	Área Trincada Medida 2017 (%)	Deflexão Calculada + Erro (RMS)	Deflexão Medida 2013 (0,01mm)	ATR Calculada 2017 (mm)	ATR Medida 2017 (mm)	MR Camada Asfáltica 2013 (MPa)	MR Camada Asfáltica	Decréscimo de MR (%)
----	-------------------------	-------------------------------	---------------------------------	-------------------------------	-------------------------	----------------------	--------------------------------	---------------------	----------------------

	MeDiNa 2017 (%)		2013 (0,01mm)					2017 (MPa)	
34	12,45±7,25	22,52	57±2,22	61,5	6,29	4±3	4151	2854	31,2
36	0,75±2,90	0,13	51±1,79	54,7	4,14	3±3	5693	1554	72,7
39	1,40±3,55	6,90	61±1,16	49,8	4,14	5±2	4388	2110	51,9
40	1,99±3,98	7,83	67±2,08	54,4	4,14	5±3	1894	1320	30,3
41	3,79±4,92	2,39	43±2,97	34,6	4,14	3±3	2830	2216	21,7
42	0,35±2,26	2,16	56±2,91	51,9	3,89	3±3	4586	1954	57,4
43	0,67±2,79	1,23	51±3,47	55,3	4,01	2±3	6483	6265	3,4
44	0,92±3,10	6,50	55±3,36	51,7	4,01	3±3	3357	3259	2,9

Na Figura 6.2 a seguir são apresentados os dados da Tabela 6.8 na forma gráfica.

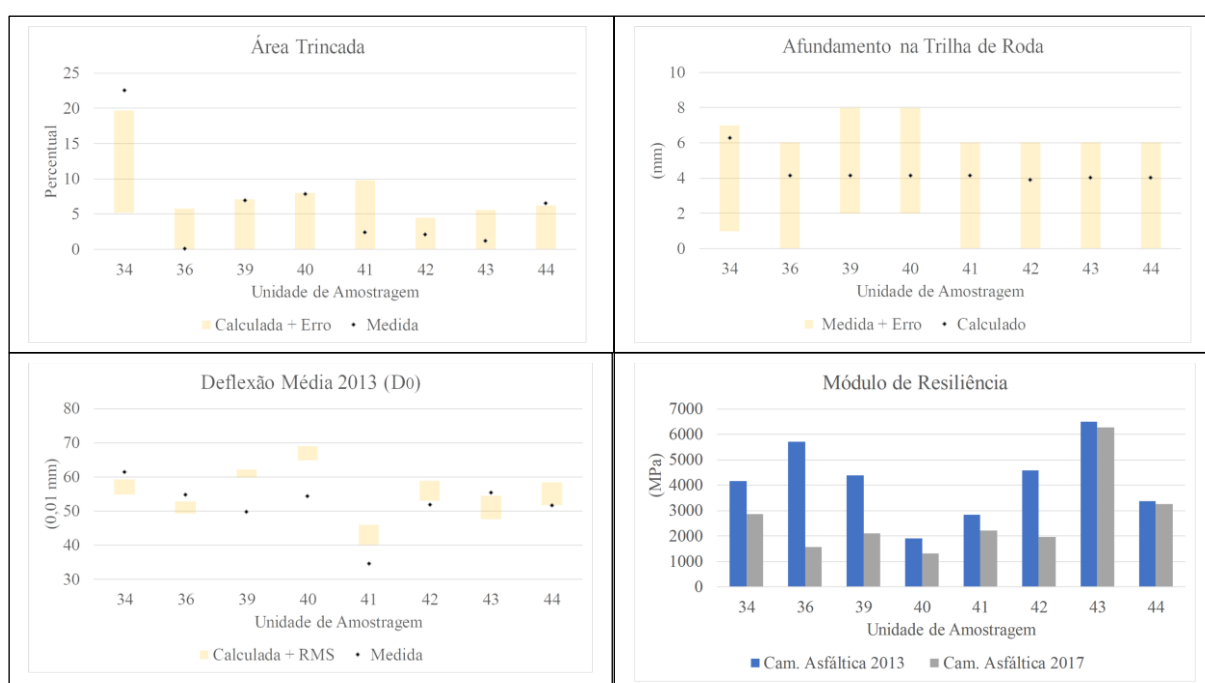




Figura 6.2 - Parâmetros de desempenho dos pavimentos - calculados e medidos (2013-2017)

Cabe registrar que os valores indicados para a área trincada calculada na Tabela 6.8 seguem abordagem probabilística a depender do nível de confiabilidade estabelecido na simulação (tipo de via) do MeDiNa, nos termos da Equação 4.4 apresentada anteriormente. Para o caso em questão adotou-se o padrão de confiabilidade de 85%, estabelecido pelo programa para vias do tipo arteriais primárias, para calcular as variações apresentadas na coluna 1. Trata-se de valores obtidos por regressão de resultados apresentados pelo MeDiNa, no sentido de obter o valor médio da área trincada e a margem de erro associada a ela, já que o programa incorpora esse erro no valor da área trincada apresentada, estabelecendo assim um valor crítico.

Outro aspecto a ser observado na Tabela 6.8 está relacionado à alteração do módulo de resiliência calculado para a camada asfáltica das estruturas analisadas devido aos danos acumulados pelo pavimento no período analisado. Nesse aspecto, torna-se compreensível como o aumento de trincas e a condição de suporte da base de um pavimento contribuem para a diminuição da rigidez do pavimento e conseqüentemente a sua vida útil.

Cabe registrar que para a apresentação dos valores dispostos na Tabela 6.8 foram analisadas as intervenções ocorridas nos pavimentos das Unidades de Amostragem durante o período de estudo. Na Tabela 6.9 são apresentadas as intervenções que se fizeram necessárias para garantia a segurança de rodagem nas Unidades de Amostragem avaliadas.

Tabela 6.9 – Intervenções realizadas nas UA avaliadas (DNIT)

Localização	Situação Observada	exemplo
UA 40	Em 2014 foi observado 1 ponto de escorregamento da camada asfáltica superior, devido a problemas na ligação das camadas asfálticas ou na composição da mistura dos agregados. No mesmo ano foi realizada a reparação localizada da área danificada, levando em consideração que a degradação poderia aumentar e causar uma condição insegura para os usuários da estrada.	
UA 42	Em 2015 foram observados 6 pontos de desprendimentos da camada de rolamento ao longo do trecho, e de igual maneira. No mesmo ano foi realizada a reparação localizada das áreas danificadas, levando em consideração que a degradação poderia evoluir e causar uma condição insegura para os usuários da estrada.	
UA 43 e 44	Em 2014 sofreram intervenções de conserva e reabilitação como parte do contrato de recuperação, restauração e manutenção - CREMA 2° etapa - na Rodovia BR-251/GO. Devido serem trechos experimentais, foi dado tratamento diferenciado em relação ao restante da rodovia, porém a presente pesquisa não obteve acesso ao mesmo.	

Para a obtenção dos resultados observados na Tabela 6.8, as misturas asfálticas utilizadas na avaliação, a exceção do módulo de resiliência obtidas por retroanálise, seguiram dados da base referencial do MeDiNa, cujas características apresentavam similaridade com as misturas utilizados na presente avaliação. Foram adaptados os parâmetros de referência utilizados no Concreto Asfáltico RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba, conforme disposto na

Tabela 6.10, devido à similaridade de módulo de resiliência com os das estruturas dos pavimentos apresentados nas UA avaliadas. Os módulos de resiliência indicados são os obtidos por retroanálise nos levantamentos de FWD realizados em 2013, os quais apresentam perda de valor em relação à mistura de referência adotada ($MR=8289$ MPa) devido aos danos observados nos pavimentos avaliados.

Tabela 6.10 – Parâmetros dos materiais usados para revestimento asfáltico (MeDiNa, adaptado)

Parâmetro	CAUQ Faixa C (UA 34)	CAUQ Faixa C (UA 36)	CAUQ Faixa C (UA 39)	CAUQ Faixa C (UA 40)	CAUQ Faixa C (UA 41)	CAUQ Faixa C (UA 42)	CAUQ Faixa C (UA 43)	CAUQ Faixa C (UA 44)
Módulo de resiliência (MPa)	4151	5693	4388	1894	2830	4586	6483	3357
Massa específica (g/cm ³)	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Poisson	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Modelo de Fadiga								
Coefficiente de Regressão (K ₁)	3e-13	3e-13	3e-13	3e-13	3e-13	3e-13	3e-13	3e-13
Coefficiente de Regressão (K ₂)	-3,78	-3,78	-3,78	-3,78	-3,78	-3,78	-3,78	-3,78
Classe Fadiga (Flow Number)	1	1	1	1	1	1	1	1
FFM (100µ a 250µ)	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73

Já para o cálculo da área trincada faz-se necessário aplicar um fator de correlação entre Método das Células (Norma DNIT PRO-433, 2021) utilizado pelo MeDiNa, e Método das Áreas (Norma DNIT PRO-007, 2003), utilizado nas medições de campo das UA. Na Tabela 6.8 somente foi apresentado o cálculo realizado pelo MeDiNa, considerando a margem de erro estabelecida pelo próprio programa. Nesse aspecto, um estudo apresentado por Beckert et al. (2020) analisou essa correlação para três Unidades de Amostragem do DNIT (UA 03, 04 e 08), ao longo da BR-040/MG. Segundo esses pesquisadores, comparando a área trincada a partir dos dois métodos foi possível observar que para as Unidades de Amostragem avaliadas (UA 03, 04 e 08) o método das células fornece um somatório de área trincada em média 22% maior que a área trincada real e um fator de correção médio de 0,798 (vide Equação 6.1). Segundo esse estudo, o Método das Áreas busca fornecer valores de áreas trincadas mais próximas da área real, corrigindo o excesso de área trincada atribuído pelo Método das Células.

$$AT_{MA} = FC \cdot AT_{MC} \quad (6.1)$$

onde:

AT_{MA} é a área trincada calculada pelo método das áreas;

AT_{MC} é a área trincada calculada pelo método das células (calculada pelo MeDiNa); e
 FC é o fator de correlação.

No estudo apresentado por Beckert et al. (2020) observou-se que a aplicação do $FC=0,798$, para ajustar a previsão às condições de campo fornecido pelo MeDiNa ao método das áreas, possibilitou que a curva os resultados dos dois tipos de análise permanecessem dentro da faixa de erro do MeDiNa (35%) até cerca de 40% da área trincada estabelecida por Fritzen (2016), como critério de um trabalho específico, para encerramento do uso do simulador de tráfego e para monitoração com o tráfego comercial. Porém, cabe ressaltar que se trata de um fator médio, o qual está sujeito variações devido a fatores como a distinção dos trechos os trechos avaliados e condições do trincamento, que pode ocorrer de maneira distinta ao longo do trecho, variando sua incidência e se apresentando de maneira mais ou menos concentrada.

A semelhança do estudo apresentado por Beckert et al. (2020), estudo recente promovido pela UnB, em parceria com a USP e UFSM, propôs-se a analisar a correlação das 50 Unidades de Amostragem utilizadas pelo DNIT para a calibração do HDM-4, o qual sugeriu uma equação polinomial de correlação entre valores de áreas trincadas obtidas pelos dois métodos (vide Equação 6.2).

$$AT_{MA} = -0,2326. (AT_{MC})^4 + 1,2568. (AT_{MC})^3 - 0,6836. (AT_{MC})^2 + 0,3694. AT_{MC} \quad (6.2)$$

onde:

AT_{MA} é a área trincada calculada pelo método das áreas; e
 AT_{MC} é a área trincada calculada pelo método das células (calculada pelo MeDiNa).

Por meio da aplicação do MeDiNa obteve-se os resultados de área trincada em função do tempo (meses). Por se tratar de resultados probabilísticos o erro padrão definido por Fritzen et al. (2019), nos termos da Figura 4.5, foi incorporada nos resultados apresentados na Figura 6.3 que avalia a distribuição de trincamentos ao longo dos anos e considerando as intervenções realizadas nos termos da Tabela 6.8. Cabe registrar que os resultados apresentados pelo MeDiNa já embutem o erro padrão indicado na Figura 4.5.

Ademais, aos resultados de trincamento obtidos das UA, foi aplicado o fator de correlação linear ($FC=0,798$) e a equação de ajuste polinomial, utilizando as Equações 6.1 e 6.2 para ajustar a previsão às condições de campo, originando a curva “método das áreas”, sendo também apresentados os resultados obtidos na Figura 6.3.

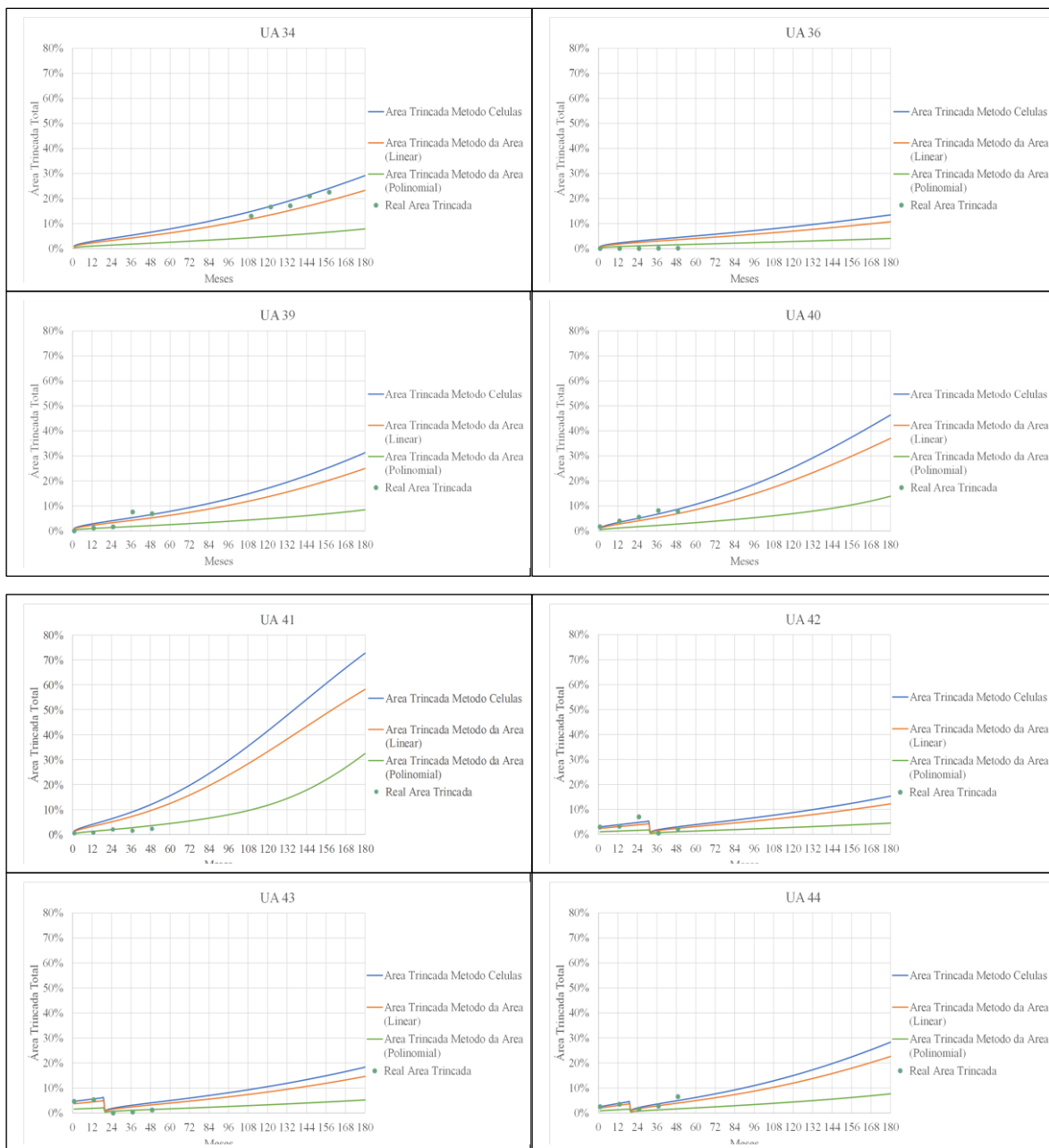


Figura 6.3 – Área trincada pelo MeDiNa, método das áreas, monitoramento (real)

Cabe registrar que as áreas medidas indicadas na Figura 6.3 foram estabelecidas segundo metodologia de avaliação objetiva estabelecida para cálculo do IGG (Norma DNIT PRO-006, 2003). Embora essa seja uma metodologia diferente para o cálculo da área trincada em relação aos métodos das células e das áreas, os resultados observados na Figura 6.3 indicam certa concordância com as simulações de área de trincamento.

Ao comparar o trincamento fornecido pelo MeDiNa com a área trincada calculada por meio do método das áreas, observa-se que os resultados oriundos do uso de fator de correlação linear seguem com um descolamento gradual da curva apresentada pelo MeDiNa, tendo uma

boa concordância para o intervalo de área trincada de nas unidades UA 34, 40, 42 e 44. No caso do uso da equação polinomial de ajuste, os resultados foram melhores para faixas mais baixas de área trincada, demonstrando uma boa previsão de resultados com os valores medidos em campo na fase inicial do trincamento, como nas unidades UA 41, 42 e 43. Já os resultados apresentados pelo MeDiNa (método das células) apresentam uma boa concordância para o intervalo de 3% a 25% da área trincada, sendo no presente caso o método que melhor se adaptou aos valores medidos pela Norma DNIT PRO-006 (2003), em cinco das oito UA avaliadas.

Outra situação a ser observada na Figura 6.3 é a evolução do percentual de áreas trincadas medidas nas diferentes Unidades de Amostragem. Isso deve-se ao fato que o percentual de área trincada no pavimento depende fundamentalmente do nível de carga a que esse está sujeito e da sua capacidade estrutural. Os trechos selecionados nesse estudo contam com diferentes níveis de tráfego e estruturas distintas, sendo natural que se apresente diferentes graus de trincamento no pavimento. A unidade UA-36 praticamente não apresentou defeitos e deve ser investigada separadamente. Em específico, a questão do módulo de resiliência do revestimento asfáltico, cujo valor obtido por retroanálise em 2013 ($MR_{rev} = 5693$ MPa) apresentou uma piora significativa quando comparado ao valor também obtido por retroanálise em 2017 ($MR_{rev} = 1554$ MPa), mesmo não tendo sido observada uma condição de aumento de área trincada ou afundamento nas trilhas de roda, e a deflexão máxima no pavimento ter se mantido abaixo dos 60×10^{-2} mm (vide Tabela 6.5).

6.2.1 Avaliação da contribuição relativa de cada camada do pavimento na deflexão total

Conforme indicado anteriormente, os revestimentos asfálticos, elementos mais rígidos das estruturas analisadas, praticamente não sofrem deformações específicas verticais em suas camadas de maneira que sua contribuição para deflexão total é quase inexistente. Já os subleitos, elementos mais deformáveis elasticamente, respondem pela maior parcela de contribuição para formação das deflexões totais (variação de 60 a 85%). Porém, variações na rigidez e espessura das várias camadas do pavimento são capazes de gerar comportamentos distintos para a resposta da estrutura como um todo. É sobre esta análise que se discorre no presente item.

Na Figura 6.4 são apresentadas as bacias de deflexão calculadas das Unidades de Amostragem a partir dos módulos de resiliência de revestimento, base e subleito obtidos por retroanálise (vide Tabela 6.7). A partir de uma análise comparativa dessas diferentes bacias, realizada de modo segmentado ao longo desse item, é possível ratificar boa parte dos

entendimentos apresentados no item 3.2.1 do presente estudo, relativos à contribuição do módulo de resiliência e espessura de cada material empregado na deflexão total do pavimento.

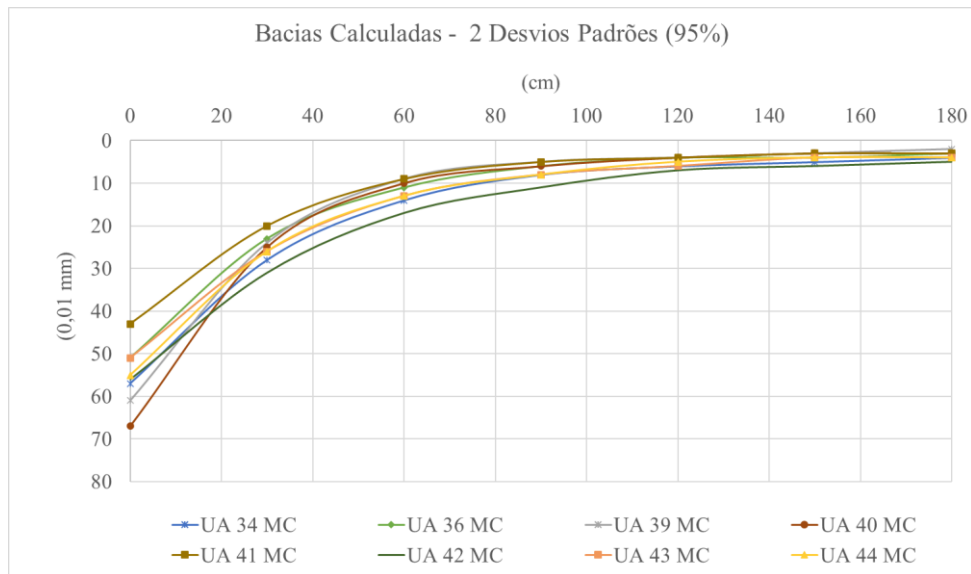


Figura 6.4 – Formas das Bacias de Deflexão Calculadas

a) Bacias de deflexões segundo as espessuras do revestimento

Na Figura 6.5 são apresentadas as diferenças obtidas nas curvaturas das bacias de deflexão quando é alterada a espessura do revestimento.

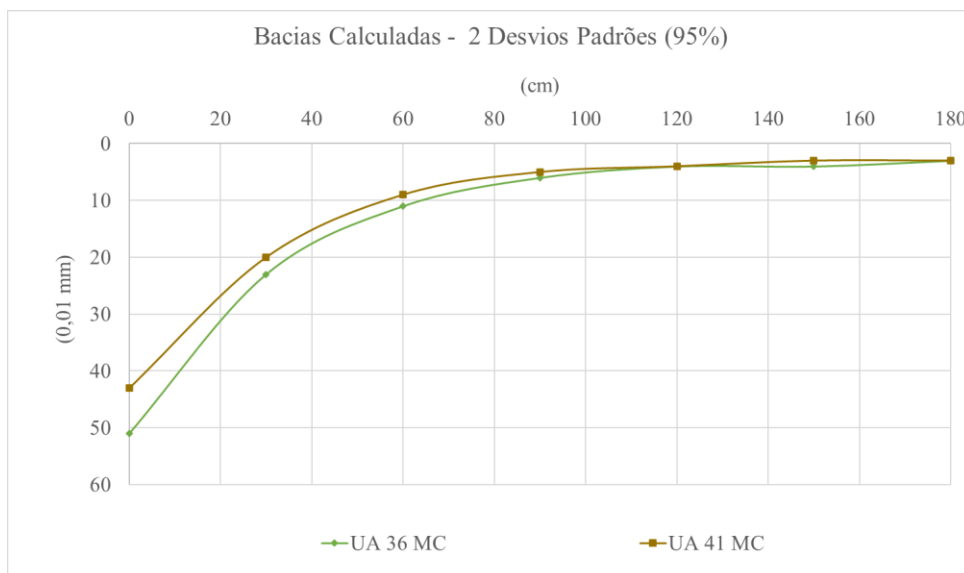


Figura 6.5 – Formas das Bacias de Deflexão Calculadas UA 36 e 41

Os pavimentos da UA 36 e da UA 41, possuem distribuição de camadas e materiais semelhantes, tendo como principal diferença a espessura no revestimento ($H_{r_{UA36}}= 4$ cm e $H_{r_{UA41}}= 12$ cm).

Redução da deformabilidade proporcionada pela espessura do revestimento se reflete muito pouco a distâncias a partir de 90 cm da carga, que resulta em bacias semelhantes. Isso ajuda interpretar, a princípio, que as deflexões distantes da carga são as mais afetadas pelos parâmetros das camadas inferiores, que, no caso, foram mantidos favoráveis.

b) Bacias de deflexões segundo o módulo de resiliência do revestimento

Na Figura 6.6 são apresentadas as diferenças obtidas nas curvaturas das bacias de deflexão quando é alterado o módulo de resiliência do revestimento.

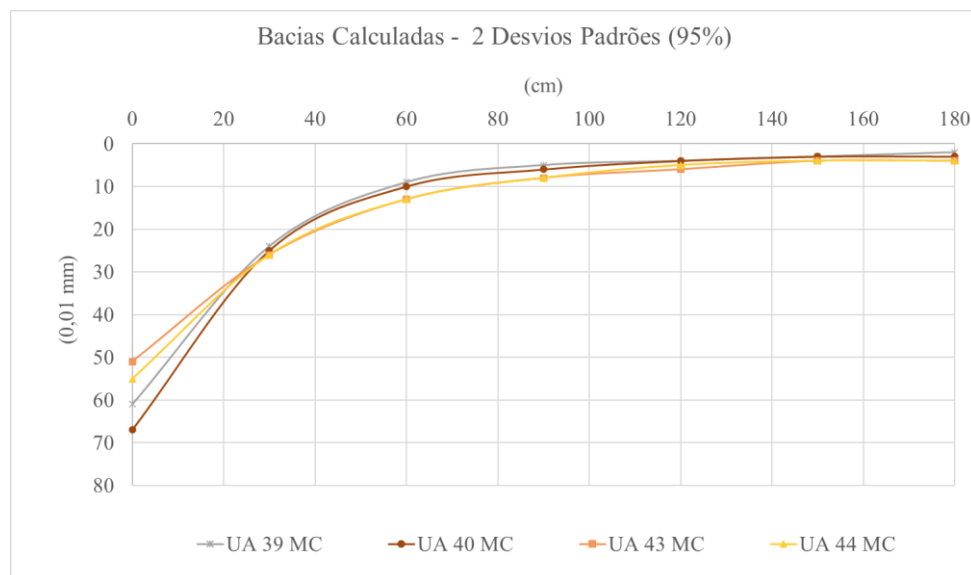


Figura 6.6 – Formas das Bacias de Deflexão Calculadas UA 39,40, 43 e 44

Os pavimentos da UA 39 e da UA 40 (BR-080/GO) possuem distribuição de camadas e materiais semelhantes, tendo como principal diferença o módulo de resiliência observado no revestimento ($MR_{rev39}=2110$ MPa e $MR_{rev40}=1320$ MPa).

Por vez os pavimentos da UA 43 e da UA 44 (BR-251/GO) também possuem distribuição de camadas e materiais semelhantes, tendo como principal diferença o módulo de resiliência observado no revestimento ($MR_{rev43}=6265$ MPa e $MR_{rev44}=3259$ MPa).

Em ambos os comparativos se verifica a redução significativa da deformabilidade na fase inicial da bacia proporcionada pelo aumento do módulo de resiliência do revestimento. A partir de 30 cm de distância horizontal da carga aplicada, observa-se nos casos analisados uma

inversão da curvatura da bacia, indicando a pouca influência do revestimento nas distribuições de esforços nas camadas inferiores. Isso ajuda interpretar, a princípio, que as deflexões distantes da carga são as mais afetadas pela espessura do revestimento asfáltico do que pelo próprio módulo de resiliência, assim como pelos parâmetros das camadas inferiores, que, no caso, foram mantidos favoráveis.

c) Bacias de deflexões segundo o módulo de resiliência do subleito

Na Figura 6.7 são apresentadas as diferenças obtidas nas curvaturas das bacias de deflexão quando é alterado o módulo de resiliência do subleito.

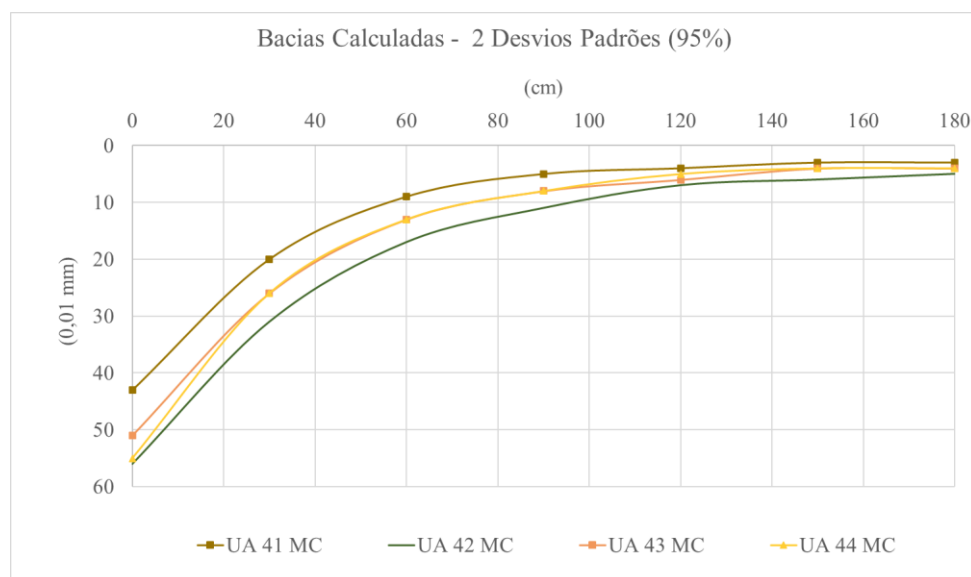


Figura 6.7 – Formas das Bacias de Deflexão Calculadas UA 41, 42, 43 e 44

As UA 41 e 42 possuem estrutura de pavimento similar a das UA 43 e 44. O que diferencia a UA 41 dessas, é o fato de possuir um subleito com grau de umidade menor (27% contra 33% das UA 43 e 44), influenciando o grau de rigidez desse material ($MR_{sub41}=188$ MPa, $MR_{sub43}=154$ MPa e $MR_{sub44}=143$ MPa). Por vez, o que diferencia a estrutura do pavimento da UA 42 das demais é que possui um subleito de material não laterítico ($MR_{sub42} = 122$ MPa). Percebe-se nesses casos que o aumento do módulo da base gerou melhor distribuição de pressões sobre o subleito, resultando em menor deflexão no ponto de aplicação da carga (D_0) e menor inflexão da curva na fase inicial da bacia.

Quando o módulo do subleito aumenta, as deflexões diminuem e tal decréscimo é sentido em toda a área de influência da carga. Todavia os decréscimos são menos sensíveis à medida que os módulos aumentam.

d) Bacias de deflexões segundo o módulo de resiliência da base

Na Figura 6.8 são apresentadas as diferenças obtidas nas curvaturas das bacias de deflexão quando é alterado o módulo de resiliência da base.

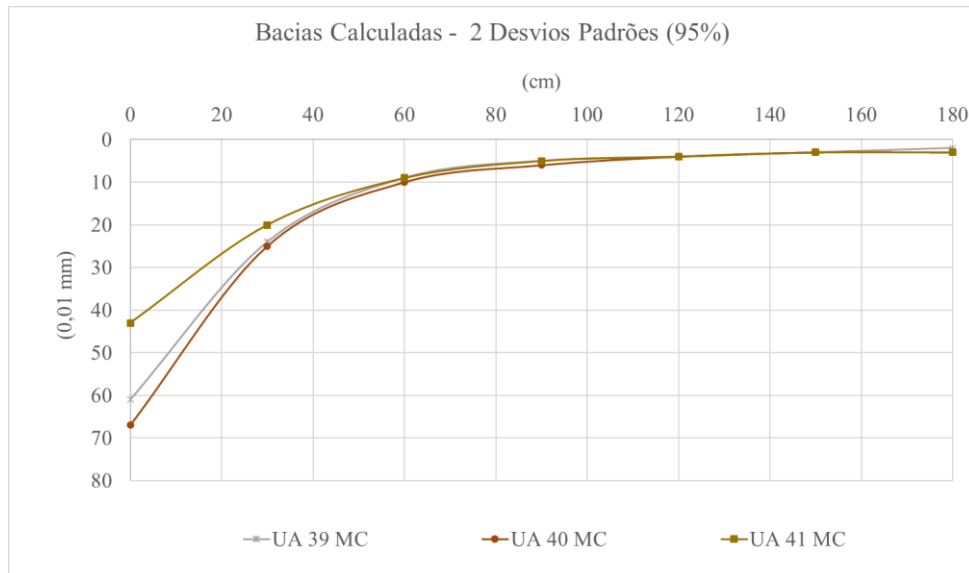


Figura 6.8 – Formas das Bacias de Deflexão Calculadas UA 39, 40 e 41

O que diferencia as estruturas dos pavimentos da UA 39 e da UA 40, ambas localizadas na BR-080/GO e de distribuição e espessuras de camadas semelhantes, é que o primeiro está em zona de aterro e o segundo em zona de corte, favorecendo ao primeiro uma maior capacidade de reagir a variações climáticas. Como consequência, observa-se ligeiro ganho no módulo de resiliência do subleito da UA 39 frente a UA 40 ($MR_{sub39}=211$ MPa e $MR_{sub40}=183$ MPa), mas que possuem uma mínima distorção quando observada a região da curva de deflexão influenciada por esse material (após uma distância horizontal de 30 cm de aplicação da carga).

Por vez, o que diferencia a estrutura dos pavimentos da UA 39 e 40 do pavimento da UA 41 é o módulo de resiliência observado na base ($MR_{base39}=250$ MPa, $MR_{base40}=260$ MPa e $MR_{base41}=560$ MPa). Nesse caso, percebe-se que o aumento do módulo da base gerou melhor distribuição de pressões sobre o subleito, resultando em menor deflexão no ponto de aplicação da carga (D_0) e menor inflexão da curva na fase inicial da bacia.

6.2.2 Considerações sobre materiais empregados nas estruturas avaliadas

A partir da discussão levantada e na concordância observada entre as previsões de desempenho do pavimento calculadas pelo MeDiNa e nas condições funcionais e estruturais observadas em campo ao final do período de monitoramento das Unidades de Amostragem (2017), entende-se pela necessidade de avaliar o grau de concordância das simulações as condições de campo quando aplicados parâmetros de materiais obtidos da realização de ensaios laboratoriais na camada de base e subleito de outros trechos rodoviários próximos.

Na Tabela 6.11 é apresentada uma correlação dos materiais observados nas oito Unidades de Amostragem analisadas como materiais de características similares estudadas por outros pesquisadores da região, sendo utilizado o módulo de resiliência como principal parâmetro de referência.

Tabela 6.11 – Módulos de resiliência para base e subleito (Freitas, 2019 – adaptado)

Camada	Material em Campo	Módulo Calculado (MPa)	Material Similar de Referência	Módulo Pesquisa Bibliográfica (MPa)
Base [a] (UA 39 e 40)	Areia Vermelha +cascalho 3” a 4” (w=14%) compactação média/alta	280	brita graduada simples (BGS)	444-530 (485)
Base [b] (UA 34, 36, 41, 42, 43 e 44)	Silte Arenoso Vermelho +cascalho 1” (w=14,2% a 18,8%) compactação média Plasticidade média/alta	560	Cascalho laterítico	392-420 (406)
Subleito [a] (UA 36, 39, 40, 41, 43 e 44)	Silte Argiloso Vermelho com quartzo (w=26,8% a 27,6%) consistência firme	208 a 224	Solo laterítico	209 – 220 (215)
Subleito [b] (UA 34 e 42)	Silte Vermelho com quartzo + cascalho 3/8” (w=28,6%) consistência firme	123	Solo Saprolítico	135-156 (144)

Conforme observado na Tabela 6.11, a possibilidade de uso de módulos de resiliência decorrentes de pesquisa bibliográfica é reforçada pela proximidade dos valores dos módulos estimados por meio de retroanálise a valores obtidos por meio de ensaios laboratoriais realizados por outros pesquisadores para materiais de mesmas características. Embora o BackMeDiNa produza modelos constitutivos de módulos lineares, o MeDiNA possibilita a realização dessa análise condicionada à definição de modelos constitutivos de comportamento

resiliente linear ou não e de deformação permanente para o caso de solos, e de comportamento resiliente linear e de fadiga para o caso de misturas asfálticas.

A possibilidade de ampliação dessa discussão no presente estudo, a partir da simulação do comportamento dos pavimentos das Unidades de Amostragem por meio de modelos constitutivos de comportamento resiliente não linear de solos, torna-se possível devido à pesquisa realizada por Freitas (2019), pelas similaridades observadas em sua caracterização com os solos das rodovias avaliadas, conforme observado nas Tabelas 6.11 e 6.12.

Como parâmetros de entrada desse estudo no MeDiNa adotou-se os modelos constitutivos de módulo de resiliência linear e não linear, a massa específica máxima, a umidade ótima e a energia de compactação. Já os coeficientes de regressão aplicados no modelo de deformação permanente seguiram dados da base referencial do software, cujas características apresentavam similaridade com os solos utilizados na presente avaliação (Brita Graduada – Gnaisse C3 e Solo Brita – MR (LG' s:1521) para a base, e Solo Siltoso NS' para o subleito).

Na Tabela 6.12 são apresentados os parâmetros de caracterização dos materiais empregados nas simulações do MeDiNa, tanto para análise do comportamento resiliente linear quanto do não linear de materiais.

Tabela 6.12 – Parâmetros de referência de materiais para base e subleito oriundos de pesquisa bibliográfica (Freitas, 2019; MeDiNa – adaptado)

Parâmetro	Resultados de Pesquisa Bibliográfica			
	Base [a]	Base [b]	Subleito [a]	Subleito [b]
Amostra Solo (Freitas,2019)	BGS	ref-2b	Ref-2a	sub2
Tipo Material	Brita Graduada Simples	Cascalho Laterítico	Solo Laterítico Fino	Solo Saprolítico
Pedregulho (%)	44,9	49,92	14,54	8,87
Areia (%)	47,9	23,09	31,68	60,4
Silte (%)	7,2	15,11	23,79	30,73
Argila (%)	-	11,88	29,98	-
TRB	A-1-a	A7-6	A7-6	A4
Massa específica máxima (g/cm ³)	2,20	1,94	1,66	1,8
Umidade Ótima (%)	7,6	13	20,2	13,3
Energia de compactação Proctor	Modificada	Intermediaria	Normal	Normal
Poisson	0,35	0,4	0,45	0,45
Tipo de Contato	Não aderido	Não aderido	Não aderido	Não aderido
Modelo Constitutivo	Resiliente linear	Resiliente linear	Resiliente linear	Resiliente linear
Módulo de Resiliência (MPa)	485	406	215	144
Modelo de MR Não Linear				
Coefficiente de Regressão (k_1)	3549,34	1828,33	623,91	590,35

Coefficiente de Regressão (k_2)	0,797	0,521	0,542	0,683
Coefficiente de Regressão (k_3)	0,145	0,246	-0,089	-0,07
Coefficiente de Regressão (k_4)	0	0	0	0
Modelo de Deformação Permanente				
Coefficiente de Regressão (k_1)	0,128	0,31	0,244	0,244
Coefficiente de Regressão (k_2)	-0,409	0,06	0,419	0,419
Coefficiente de Regressão (k_3)	1,050	0,85	1,309	1,309
Coefficiente de Regressão (k_4)	0,074	0,05	0,068	0,068

Para o modelo constitutivo de comportamento resiliente linear e de fadiga para o caso das misturas asfálticas foi adotado os mesmos parâmetros anteriormente indicados nesse estudo. A análise da concordância do comportamento dos pavimentos obtidos em campo em relação a simulação dos parâmetros de entrada oriundos da pesquisa de Freitas (2019) é apresentada na Tabela 6.13.

Tabela 6.13– Parâmetros de desempenho dos pavimentos - calculados e medidos (2017) a partir de parâmetros oriundos de pesquisa bibliográfica e retroanálise

UA	Modelo	Área Trincada MCelula (%) Calculada	Área Trincada (%) Medida	ATR (mm) Calculada	ATR (mm) Medida	Deflexão (0,01mm) Calculada 2013	Deflexão (0,01mm) Medida 2013
34	MR Linear	13,14±7,37	22,52	6,30	4±3	61	62,6
	MR Não Linear	21,25±8,63		5,83		113	
	Retroanálise	12,45±7,25		6,29		57	
36	MR Linear	1,09±3,27	0,13	6,35	3±3	48	58,5
	MR Não Linear	2,47±4,27		6,10		81	
	Retroanálise	0,75±2,90		4,14		51	
39	MR Linear	1,18±3,36	6,9	6,27	5±2	40	61
	MR Não Linear	3,20±4,65		5,27		77	
	Retroanálise	1,40±3,55		4,14		61	
40	MR Linear	0,90±3,07	7,83	5,68	5±3	44	63,8
	MR Não Linear	1,52±3,65		5,06		79	
	Retroanálise	1,99±3,98		4,14		67	
41	MR Linear	9,38±6,61	2,39	4,92	3±3	38	41
	MR Não Linear	21,04±8,60		3,87		61	
	Retroanálise	3,79±4,92		4,14		43	
42	MR Linear	0,60±2,69	2,16	6,53	3±3	54	57,4
	MR Não Linear	1,28±3,45		5,71		99	
	Retroanálise	0,35±2,26		3,89		56	
43	MR Linear	1,11±3,29	1,23	7,27	2±3	51	55,2
	MR Não Linear	2,40±4,23		6,86		82	
	Retroanálise	0,67±2,79		4,01		51	
44	MR Linear	1,60±3,71	6,50	7,23	3±3	50	53,1
	MR Não Linear	3,47±4,78		6,65		79	

	Retroanálise	0,92±3,10		4,01		55	
--	--------------	-----------	--	------	--	----	--

Na Figura 6.9 a seguir são apresentados os dados da Tabela 6.3 na forma gráfica.



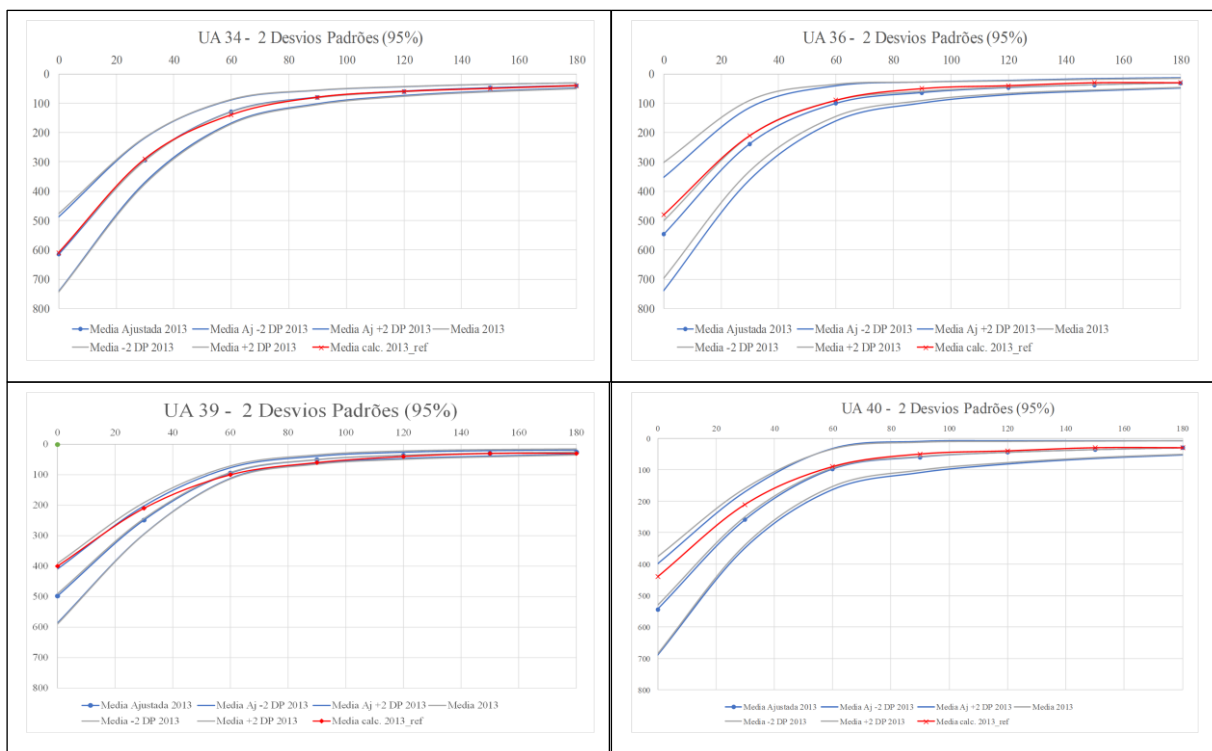
Figura 6.9 – Parâmetros de desempenho dos pavimentos - calculados e medidos (2017) a partir de parâmetros oriundos de pesquisa bibliográfica e retroanálise

A partir dos dados apresentados na Tabela 6.12 é possível observar que os modelos não lineares apresentaram um maior dano ao revestimento asfáltico decorrente de uma maior amplitude de deflexão do pavimento, resultando em uma área trincada maior que nos modelos lineares. Também é possível observar que a parcela da deformação plástica apresentada pelos modelos lineares e não lineares adaptados de Freitas (2019) possui concordância com os modelos oriundos da retroanálise e com os levantamentos de campo relacionados ao afundamento na trilha de roda (ATR). Embora perceba-se que as deformações plásticas nas UA 42, 43 e 44 tenham ligeiramente excedido os limites de leitura de campo, tal situação pode ser justificada pelo fato de o módulo de resiliência de referência ser menor do que o observado em campo ($MR_{\text{bref}} = 406 \text{ MPa}$, $MR_{\text{bcamp}} = 550 \text{ MPa}$).

Por outro lado, os modelos não lineares divergiram significativamente na previsão da parcela elástica, resultando na maior amplitude de deflexão dos pavimentos estudados e tendo como consequência uma área trincada maior que nos modelos lineares que convergiram aos levantamentos de campo de área trincada e amplitude da deflexão característica.

Nesse sentido, para a presente avaliação de aplicabilidade de modelos de previsão pode-se afirmar que os modelos lineares melhor se adequaram as condições observadas em campo frente aos modelos não lineares de módulos de resiliência de solo.

A avaliação da modelagem numérica foi realizada por meio de análises comparativas entre os resultados medidos na monitoração e os obtidos pela modelagem do MeDiNa. Verificou-se, assim como nas bacias calculadas por meio de módulos de resiliência obtidos por retroanálise, a existência de coerência entre os resultados da monitoração e da modelagem a partir dos parâmetros obtidos de referências bibliográficas, tanto na geometria das bacias deflectométricas calculadas quanto no trincamento do pavimento, conforme observado na Figura 6.10.



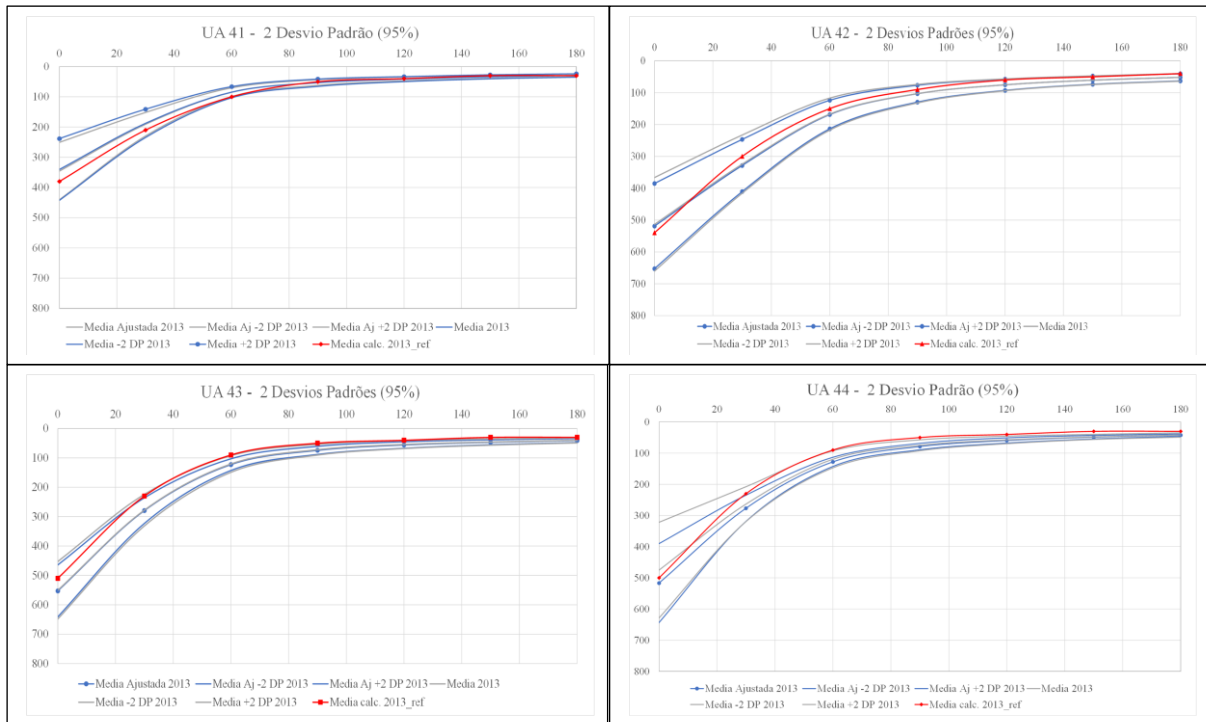


Figura 6.10 - Correlação entre as bacias deflectométricas calculadas e medidas para o ano de 2013

Na Figura 6.1 são apresentadas sete curvas referentes a bacias deflectométricas para o ano de 2013, sendo: (i) três relacionadas à média mais ou menos 2 desvios padrões (95% de confiabilidade) de dados brutos, (ii) três relacionadas à média mais ou menos 2 desvios padrões (95% de confiabilidade) de dados ajustados, pela retirada bacias calculadas com RMS acima de 10% e outliers; e (iii) uma relacionada à bacia deflectométrica média calculada a partir de parâmetros de referência de materiais para base e subleito oriundos de pesquisa bibliográfica, conforme valores apresentados na Tabela 6.14 abaixo.

Tabela 6.14– Valores médios das bacias deflectométricas calculadas para 2013

UA	Deflexão Média (10 ⁻² mm) calculada para 2013						
	D ₀	D ₃₀	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀	D ₁₈₀
34	61	29	14	8	6	5	4
36	48	21	9	5	4	3	3
39	40	21	10	6	4	3	3
40	44	21	9	5	4	3	3
41	38	21	10	5	4	3	3
42	56	30	15	9	6	5	4
43	51	26	9	5	4	3	3
44	50	23	9	5	4	3	3

Observa-se na Figura 6.10 que as Bacias Calculadas para as UA 43 e 44 tiveram ligeiro descolamento dos limites estabelecidos nas Bacias Levantadas em campo. Tal condição deve-se à alteração da magnitude do módulo do subleito de referência ($MR=215$ MPa) em relação ao obtido por retroanálise ($MR_{sub43}=156$ MPa e $MR_{sub44}=152$ MPa), podendo ser justificada pela questão de umidade ($w=26,8\%$ a $27,6\%$ contra $w=20\%$ do solo de referência). No entanto, o comportamento da curva calculada encontra-se inteiramente aderente às medições observadas em campo.

Concluídas as simulações de comportamento dos pavimentos a partir de dados oriundos de retroanálise de bacias deflectométricas medidas por meio do FWD ou de dados de ensaios laboratoriais produzidos por terceiros faz-se necessário estimar os erros médios absolutos e respectivos coeficientes de variação dos parâmetros analisados (AT, ATR e Deflexão Máxima), assim como o erro médio relativo capaz de indicar o grau de precisão que essas simulações são capazes de produzir em relação às medições observadas em campo (condição real).

Em relação aos coeficientes de variação, apresenta-se na Tabela 6.15 o cálculo do erro absoluto médio das simulações oriundas de retroanálise em relação aos valores medidos em campo (valores verdadeiros), e respectivo desvio padrão, média e coeficiente de variação.

Tabela 6.15 – Cálculo do erro absoluto médio das simulações de desempenho do pavimento a partir de módulos de resiliência obtidos por retroanálise

UA	Modelo	Área Trincada (%) Calculada	Área Trincada (%) Medida	Erro AT	ATR (mm) Calculada	ATR (mm) Medida	Erro ATR	Deflexão (0,01mm) Calculada	Deflexão (0,01mm) Medida	Erro Do
34	Retroanálise	19,7	22,52	2,82	6,29	4	2,29	57	62,60	5,60
36	Retroanálise	3,65	0,13	3,52	4,14	3	1,14	51	58,50	7,50
39	Retroanálise	4,96	6,90	1,94	4,14	5	0,86	61	61,00	0,00
40	Retroanálise	5,98	7,83	1,85	4,14	5	0,86	67	63,80	3,20
41	Retroanálise	8,7	2,39	6,31	4,14	3	1,14	43	41,00	2,00
42	Retroanálise	2,62	2,16	0,46	3,89	3	0,89	56	57,40	1,40
43	Retroanálise	3,47	1,23	2,24	4,01	2	2,01	51	55,20	4,20
44	Retroanálise	4,01	6,50	2,49	4,01	3	1,01	55	53,10	1,90
Desvio Padrão (DP)				1,70			0,56			2,45
Média				2,59			1,28			3,23
CV (%)				66			44			76

Na Tabela 6.15 observa-se que o coeficiente de variação do erro médio absoluto de AT obtido a partir dos valores calculados segundo parâmetros obtidos de retroanálise e os medidos em campo das 8 (oito) Unidades de Amostragem (UA) avaliadas foi de 66%, sendo o erro médio

de 2,59 e o desvio padrão de 1,70. Considerando tratar-se de um modelo de previsão, cujo as variáveis envolvidas são de difícil modelagem, sendo essas associadas a carregamento e resposta da estrutura, entende-se que o erro absoluto entre os valores calculados e medidos estão condizentes com o esperado.

Em relação ao afundamento na trilha de roda (ATR), o coeficiente de variação dos erros médios absolutos entre os valores calculados a partir de parâmetros obtidos de retroanálise e os medidos em campo das 8 (oito) Unidades de Amostragem (UA) avaliadas foi de 44%, sendo a média de erro 1,28 e o desvio padrão de 0,56, estando abaixo da margem de erro obtida no levantamento de campo ($\pm 3\text{mm}$).

Por vez, na Tabela 6.16 é apresentado o cálculo do erro absoluto médio das simulações oriundas do uso de parâmetros de referência (pesquisa bibliográfica) em relação aos valores medidos em campo (valores verdadeiros), e respectivo desvio padrão, média e coeficiente de variação.

Tabela 6.16 – Cálculo do erro absoluto médio da simulação de desempenho do pavimento a partir de valores de módulos de resiliência obtidos em pesquisa bibliográfica

UA	Modelo	Área Trincada (%) Calculada	Área Trincada (%) Medida	Erro AT	ATR (mm) Calculada	ATR (mm) Medida	Erro ATR	Deflexão (0,01mm) Calculada	Deflexão (0,01mm) Medida	Erro Do
34	MR Linear	20,52	22,52	2,00	6,39	4	2,39	61	62,60	1,60
36	MR Linear	4,37	0,13	4,24	6,35	3	3,35	48	58,50	10,50
39	MR Linear	4,54	6,90	2,36	6,27	5	1,27	40	61,00	21,00
40	MR Linear	3,47	7,83	4,36	5,68	5	0,68	44	63,80	19,80
41	MR Linear	15,99	2,39	13,60	4,92	3	1,92	38	41,00	3,00
42	MR Linear	3,29	2,16	1,13	6,53	3	3,53	54	57,40	3,40
43	MR Linear	4,40	1,23	3,17	7,27	2	5,27	51	55,20	4,20
44	MR Linear	5,31	6,50	1,19	7,23	3	4,23	50	53,10	3,10
Desvio Padrão (DP)				4,07			1,55			7,92
Média				4,01			2,83			8,33
CV (%)				101			55			95

Em análise semelhante a apresentada a Tabela 6.15, na Tabela 6.16 observa-se que o coeficiente de variação do erro médio absoluto de AT obtido a partir dos valores calculados segundo parâmetros obtidos de referências bibliográficas e os medidos em campo das 8 (oito) Unidades de Amostragem (UA) avaliadas foi de 101%, sendo o erro médio de 4,01 e o desvio padrão de 4,07. Caso fosse excluída a UA 41 dessa análise, tais valores seriam: CV= 54%; Média de Erro = 2,47; e DP=1,33. Tal situação se mostraria similar ao caso anteriormente

analisado, no qual entende-se que o erro absoluto entre os valores calculados e medidos estão condizentes com o esperado.

Já em relação ao afundamento na trilha de roda (ATR), o coeficiente de variação dos erros médios absolutos entre os valores calculados a partir de parâmetros obtidos de retroanálise e os medidos em campo das 8 (oito) Unidades de Amostragem (UA) avaliadas foi de 55%, sendo a média de erro 2,83 e o desvio padrão de 1,55, também estando abaixo da margem de erro obtida no levantamento de campo ($\pm 3\text{mm}$). Nesse aspecto, em específico, cabe ressaltar tratar-se de agradáveis resultados, uma vez que os parâmetros do modelo de deformação permanente ($\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$) não foram ajustados para a região do Distrito Federal e entorno, sendo utilizados nas simulações os parâmetros do modelo de deformação permanente de materiais com características similares que integram o banco de dados do MeDiNa.

No que diz respeito ao cálculo do erro médio relativo e concordância das simulações com observações de campo, utiliza-se do conceito de precisão, pois esse é usado em uma pesquisa para indicar o nível de erro ou afastamento do valor estimado em relação ao parâmetro populacional (valor verdadeiro) que se está sendo investigado com base em resultados obtidos a partir da análise de uma amostra.

Nesse aspecto, considerando a existência de três variáveis que influenciam no processo, propõe-se aqui o uso de uma equação paramétrica como ferramenta de estimação do grau de precisão das simulações (P), nos termos da Equação 6.3, utilizando-se como parâmetros os erros médios relativos obtidos das simulações de Área Trincada, ATR e D_0 , em relação as medições de campo realizadas em 2017.

$$\text{Precisão } (P) = 100 - (c_1 * \text{Erro}_{\text{MédioAT}} + c_2 * \text{Erro}_{\text{MédioATR}} + c_3 * \text{Erro}_{\text{MédioDo}}) \quad (6.3)$$

onde:

$\text{Erro}_{\text{MédioAT}}$ é o erro médio relativo da área trincada calculada e medida;

$\text{Erro}_{\text{MédioATR}}$ é o erro médio relativo do afundamento na trilha de roda calculado e medido;

$\text{Erro}_{\text{MédioDo}}$ é o erro médio relativo da deflexão máxima calculada e medida; e

c_1, c_2 e c_3 são constantes que atribuem o peso de cada erro no valor final do grau de precisão.

Na Tabela 6.17 é apresentado o cálculo do erro relativo médio das simulações oriundas de retroanálise em relação aos valores medidos em campo (valores verdadeiros), excluídos os dados relativos a UA 36 (outlier).

Tabela 6.17 – Cálculo do erro relativo médio da simulação de desempenho do pavimento a partir de módulos de resiliência obtidos por retroanálise

UA	Modelo	Área Trincada (%) Calculada	Área Trincada (%) Medida	Erro AT (%)	ATR (mm) Calculada	ATR (mm) Medida	Erro ATR (%)	Deflexão (0,01mm) Calculada	Deflexão (0,01mm) Medida	Erro Do (%)
34	Retroanálise	19,7	22,52	13	6,29	4	57	57	62,60	9
39	Retroanálise	4,96	6,90	28	4,14	5	17	61	61,00	0
40	Retroanálise	5,98	7,83	24	4,14	5	17	67	63,80	5
41	Retroanálise	8,7	2,39	264	4,14	3	38	43	41,00	5
42	Retroanálise	2,62	2,16	21	3,89	3	30	56	57,40	2
43	Retroanálise	3,47	1,23	182	4,01	2	101	51	55,20	8
44	Retroanálise	4,01	6,50	38	4,01	3	34	55	53,10	4
Média				84			42			5

Por vez, na Tabela 6.18 é apresentado o cálculo do erro de estimativa absoluto médio obtida por simulações oriundas do uso de parâmetros de referência (pesquisa bibliográfica) em relação aos valores medidos em campo (valores verdadeiros), também excluídos os dados relativos a UA 36 (outlier).

Tabela 6.18 – Cálculo do erro relativo médio da simulação de desempenho do pavimento a partir de valores de módulos de resiliência obtidos em pesquisa bibliográfica

UA	Modelo	Área Trincada (%) Calculada	Área Trincada (%) Medida	Erro AT (%)	ATR (mm) Calculada	ATR (mm) Medida	Erro ATR (%)	Deflexão (0,01mm) Calculada	Deflexão (0,01mm) Medida	Erro Do (%)
34	MR Linear	20,52	22,52	9	6,39	4	60	61	62,60	3
39	MR Linear	4,54	6,90	34	6,27	5	25	40	61,00	34
40	MR Linear	3,47	7,83	56	5,68	5	14	44	63,80	31
41	MR Linear	15,99	2,39	569	4,92	3	64	38	41,00	7
42	MR Linear	3,29	2,16	52	6,53	3	118	54	57,40	6
43	MR Linear	4,40	1,23	258	7,27	2	264	51	55,20	8
44	MR Linear	5,31	6,50	18	7,23	3	141	50	53,10	6
Média				150			98			14

Estabelecida a estrutura da equação paramétrica de cálculo da precisão e tendo em mãos os erros médios das simulações a serem utilizados, faz-se necessário atribuir os valores dos coeficientes (c_1 , c_2 e c_3) da Equação 6.3 para a sua utilização. Os erros apresentados nas Tabelas 6.14 e 6.15 são definidos como erro de estimação, que é a diferença entre o verdadeiro valor do parâmetro e o valor calculado a partir dos dados de uma amostra. Esses erros dependem diretamente do grau de dispersão (variabilidade) da variável em estudo e são inversamente ao tamanho da amostra. Desse modo, entende-se que o peso dos parâmetros que compõem a

fórmula paramétrica que define o valor final da precisão da simulação (P) deve seguir o grau de variabilidade dos parâmetros AT e ATR em relação ao parâmetro D_0 , de modo a igualar a dispersão provocada pelos erros toleráveis das simulações. Portanto, ao considerar que os dados obtidos por retroanálise (ver Tabela 6.17) tendem a produzir resultados mais fidedignos com a realidade do pavimento, condição essa verificada ao longo do presente capítulo, buscou-se estabelecer o peso das constantes por meio do inverso da normalização dos erros médios observados em relação ao parâmetro D_0 , ou seja ($Erro_{MédioDo}/Erro_{MédioAT} = 5/84 = 0,0595$, $Erro_{MédioDo}/Erro_{MédioATR} = 5/42 = 0,119$ e $Erro_{MédioDo}/Erro_{MédioDo} = 5/5 = 1$). Tomando então soma ($0,0595+0,119+1=1,1785$), tem-se os pesos relativos $c_1=0,0595/1,1785=0,05$, $c_2=0,119/1,1785=0,10$ e $c_3=1/1,1785=0,95$, restando estabelecida, portanto, a Precisão da análise na forma da Equação 6.4 a seguir:

$$Precisão (P) = 100 - (0,05 * Erro_{MédioAT} + 0,10 * Erro_{MédioATR} + 0,85 * Erro_{MédioDo}) \quad (6.4)$$

onde:

$Erro_{MédioAT}$ é o erro médio relativo da área trincada calculada e medida;

$Erro_{MédioATR}$ é o erro médio relativo do afundamento na trilha de roda calculado e medido; e

$Erro_{MédioDo}$ é o erro médio relativo da deflexão máxima calculada e medida;

Ao aplicar tal equação sobre valores obtidos nas Tabelas 6.14 e 6.15 obteve-se os seguintes resultados (vide Equações 6.5 e 6.6) relacionados ao grau de precisão para as simulações oriundas de dados de retroanálise e de referência bibliográfica:

$$Precisão (P)_{retroanálise} = 100 - (0,05 * 84 + 0,10 * 42 + 0,85 * 5) = 87\% \quad (6.5)$$

$$Precisão (P)_{referência bibliográfica} = 100 - (0,05 * 150 + 0,10 * 98 + 0,85 * 14) = 71\% \quad (6.6)$$

Por fim, caberia indicar qual seria a influência do número de camadas na precisão da simulação. Para isso, entende-se que a fatoração dos resultados de precisão apresentados nas Equações 6.5 e 6.6 possibilita a determinação de fatores a serem aplicados em composições genéricas de pavimentos. A determinação desses fatores para dados oriundos de retroanálise e de referências bibliográficas decorrentes da estrutura do pavimento analisado no presente estudo estão estabelecidas nas Equações 6.7 e 6.8.

$$P_{DOrig.Camada(i)retroanalise} = \sqrt[3]{Precisão (P)_{retroanalise}} = \sqrt[3]{87\%} = 95,5\% \quad (6.7)$$

$$P_{DOrig.Camada(i)referência bibliográfica} = \sqrt[3]{Precisão (P)_{retroanalise}} = \sqrt[3]{71\%} = 89,2\% \quad (6.8)$$

Considera-se que parâmetros obtidos exclusivamente de ensaios laboratoriais de materiais coletados no local do projeto devem ser representados ($P_{DOrig.Camada(i)laboratório} = 100\%$), por entender que esses apresentam o maior nível de precisão que se pode obter com a caracterização dos materiais empregados no pavimento.

Portanto, sendo estabelecidos os fatores de precisão por camadas, de acordo com os dados de origem, atribui-se a Equação 6.9 o formato do cálculo para se estabelecer o grau de precisão de uma simulação de um pavimento qualquer de (n) camadas:

$$P_{Simulação} = \prod_{i=1}^n P_{DOrig.Camada(i)} \quad (6.9)$$

CAPÍTULO VII

7 PROPOSTA DE DIRETRIZES PARA USO DO MEDINA NO DF – ESTUDO DE CASO

No capítulo anterior foi discutido o nível de precisão de resultados gerados pelo modelo de previsão de desempenho estabelecido no MeDiNa para a região do Distrito Federal e entorno, diante do atual estágio de desenvolvimento do modelo, que ainda não disponibiliza uma Função de Transferência calibrada especificamente para essa localidade. Para isso, foi verificada a concordância das previsões dos danos e fadiga do MeDiNa com as condições de 8 (oito) unidades de amostragem monitoradas pelo DNIT por um período de 4 (quatro) anos, 2013 a 2017, na qual constatou-se a viabilidade de uso da Função de Transferência disponibilizada atualmente pelo programa, bem como o uso de parâmetros de materiais, com características similares aos empregados na pavimentação local, obtidos de outros estudos. Diante das possibilidades de uso do MeDiNa, propõem-se no presente capítulo diretrizes a serem observadas por técnicos que queiram aproveitar dessa ferramenta na melhoria de processos de dimensionamento e controle de execução de pavimentos, assim como a aplicação de exemplo prático dessas diretrizes por meio de estudo de caso.

7.1 Uso do MeDiNa em dimensionamento de pavimentos para região do Distrito Federal e entorno

Conforme revisão bibliográfica apresentada no Capítulo II, observa-se a tendência no uso da modelagem mecanística-empírica como instrumento de dimensionamento e avaliação de estruturas, a qual permite avaliar o desempenho de pavimentos frente a fatores externos como variações climáticas e de esforços decorrentes da passagem de variados tipos de veículos comerciais, entre outros aspectos.

Nesse sentido, propõe-se no Apêndice A deste trabalho um roteiro de dimensionamento de pavimentos flexíveis novos ou de reforços, a partir do MeDiNa, que possa ser aplicada em rodovias do Distrito Federal e entorno com estruturas diferentes daquelas utilizadas em estudos de verificação do modelo apresentado no Capítulo VI.

Trata-se de proposta de procedimentos complementares a norma DNER PRO-011 (1979), em relação à avaliação da integridade de pavimentos existentes e proposição de medidas

corretivas. Para tanto, busca-se orientar projetistas atuantes na região do Distrito Federal e entorno com informações sobre dados de entrada em modelo de dimensionamento mecanístico-empírico (MeDiNA) a partir de grau de precisão exigido pelo projeto.

7.2 Uso do MeDiNa com ferramenta de auxílio ao controle de qualidade estrutural de pavimentos

As metodologias de controle de qualidade de pavimento normalmente estão incorporadas às especificações de materiais e serviços, sendo a maioria dos órgãos rodoviários ainda carentes de normatização relacionadas ao desempenho estrutural de pavimentos, principalmente os voltados a critérios de aceitação e de controle da execução camada a camada. Como resultado, geralmente as metodologias empregadas no recebimento de obras apresentam dificuldades em quantificar os eventuais prejuízos ocasionados por execuções deficientes de estruturas de pavimentos rodoviários, assim como em propor alternativas para a tomada de ações corretivas.

Ferri (2014) cita que na grande maioria dos casos a única ação corretiva indicada por órgãos rodoviários é a reconstrução integral do pavimento dito “deficiente”, independentemente do “grau de deficiência”. Porém, segundo o pesquisador, esta condição implica em comprometimento de grande parte dos recursos físicos e financeiros alocados, podendo inclusive ocasionar atrasos no andamento das obras e refletindo em prejuízos econômicos e sociais.

Tendo como base a fundamentação teórica realizada no Capítulo III, verifica-se que a qualidade de um pavimento está, em grande parte, associada ao comportamento mecânico desempenhando pelas suas camadas, sendo os módulos de resiliência dos materiais empregados os elementos de maior representatividade da condição estrutural dessas.

Nesse aspecto apresenta-se no Apêndice B deste trabalho, uma proposta de procedimento de controle de qualidade estrutural do pavimento a ser adotada por técnicos responsáveis pelo acompanhamento e recebimento de obras de construção ou de reforço de pavimento, voltado principalmente às deflexões na infraestrutura do pavimento e às deflexões finais do pavimento acabado. O intuito dessa proposta é fornecer subsídios para a realização de um controle efetivo da execução das camadas, estabelecer critérios de aceitação ou rejeição e ainda, fornecer subsídios para tomada de ações corretivas, com base no atendimento a premissas de projeto.

7.3 Estudo de Caso

No intuito de avaliar a aplicabilidade das propostas de procedimentos de dimensionamento e controle de qualidade de execução do pavimento propostos, optou-se por simular a vida útil de projeto de um pavimento sobre diferentes perspectivas de soluções de recuperação. Em específico, no presente caso, avalia-se a recente recuperação do pavimento de um segmento de 1,6 km de uma rodovia em área urbana, tendo como base os procedimentos descritos no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), o procedimento de avaliação estrutural descrito na norma DNER-PRO 011/79, e procedimentos de reforços estabelecidos na norma IP-05/2004, da Prefeitura Municipal de São Paulo. Em troca da utilização dos dados referente a condições do pavimento no segmento avaliado, adotou-se o anonimato da rodovia e das instituições responsáveis pelo seu projeto de recuperação.

O segmento avaliado atende a um intenso volume de tráfego de passagem e de tráfego local, devido, sobretudo, à sua localização adjacente a um setor de elevado desenvolvimento econômico e com considerável adensamento urbano. Congestionamentos diários em razão do volume excessivo veículos de transporte individual motorizado e a desproporcionalidade entre esse modo de transporte e os modos coletivos são propriedades notáveis da via em questão, contudo, o segmento exprime um bom desempenho operacional fora dos horários de pico. A rodovia, como um todo, possui velocidade limite regulamentada de 60 km/h, controlada por equipamentos de fiscalização eletrônica e dispõe de cruzamentos intermediários, que são controlados por semáforos isolados ou grupos semaforicos para ordenar a transposição de fluxos e as manobras de retorno.

Para a avaliação das condições funcionais e estruturais da rodovia, foram realizados, entre 2019 e 2020, o estudo de contagem de tráfego, as medições de área trincada do pavimento e afundamento na trilha de roda, a abertura de poços de inspeções e a retirada de corpos de prova do revestimento, assim como o levantamento das deflexões máximas recuperáveis (D_0), por meio da viga Benkelman. Não foi executado o levantamento de bacias deflectométricas completas ou ensaios laboratoriais que permitissem uma obtenção de módulos de resiliências dos materiais empregados, sendo utilizado na presente análise parâmetros resultantes de pesquisa bibliográfica. A norma DNER PRO-011(1979) serviu de base para a avaliação estrutural do pavimento.

a) Levantamento de tráfego

A Projeção do Número “N” para o trecho em estudo foi efetuada para o ano de abertura da rodovia de 2020 e final de vida útil de 2030. Considerou-se na projeção do volume de veículos que solicitarão o pavimento da rodovia as contagens volumétricas executadas pelos equipamentos de fiscalização eletrônica, possibilitando a distribuição de movimentação de veículos-tipo (moto, passeio, coletivo e carga) por mês. No MeDiNa o cálculo do número N tem como referência o método da USACE. Como parâmetros de cálculo adotou-se o percentual de veículos na faixa de projeto igual a 48%, considerando a existência de três faixas de rolamento. Para o período de projeto de 10 (dez) anos, obteve-se um $N_{8,2t}$ igual a $6,82 \times 10^6$.

b) Condições estruturais e funcionais do pavimento

A estrutura do pavimento executado no trecho estudado, apresentada na Figura 7.1, é formada por camada de revestimento de 5 cm em CBUQ faixa C (CAP 50/70) e uma camada de 36 cm de base em cascalho laterítico compactada com energia de Proctor Intermediária.

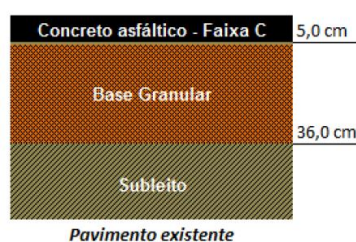


Figura 7.1- Estrutura do pavimento do segmento avaliado

A Tabela 7.1 a seguir apresenta um resumo dos resultados característicos, obtidos para cada faixa de rolamento do segmento analisado. Esses resultados, calculados conforme critérios estabelecidos pelo procedimento DNER PRO-011 (1979), e um $N_{8,2t}$ igual a $6,82 \times 10^6$, permitiram definir a deflexão máxima admissível (D_{adm}), em função da estimativa de volume de tráfego para via, a deflexão recuperável característica de projeto (D_{0c}) e o raio de curvatura (RC).

Tabela 7.1 – Resumo dos resultados da avaliação estrutural e funcional do segmento analisado

Parâmetros	Segmento Homogêneo		
	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3
Segmento analisado (m)	2220 a 3840	2220 a 3840	2220 a 3840
Comprimento do segmento (m)	1620	1620	1620
D_c – Deflexão Característica (0,01 mm)	61	61	61

D _p – Deflexão de projeto ou corrigida (0,01 mm)	61	61	61
D _{adm} – Deflexão máxima admissível (0,01 mm)	64	64	64
RC – Raio de curvatura médio (m)	119	119	137
Hipótese de Avaliação DNER-PRO 011/79	I	I	I
Medidas Corretivas DNER-PRO 011/79	Apenas Correções de Superfície	Apenas Correções de Superfície	Apenas Correções de Superfície
IRI Média (m/km)	5	4	9
IRI Máxima (m/km)	13	12	20
Flexa Trilha de Roda Média (mm)	-	-	13
Flexa Trilha de Roda Máxima (mm)	-	-	25
Área Trincada (%)	>30%	>30%	>30%

Na Tabela 7.1 percebe-se que as 3 (três) faixas de rolamento do segmento analisado apresentaram deflexões abaixo do limite admissível e raios de curvatura superiores a 100 metros, indicando um pavimento em bom estado, tanto as camadas superiores como as inferiores estão correspondendo às expectativas de qualidade se a deflexão superficial está atendendo o valor máximo admissível, inclusive no que se refere à média da deformação permanente admissível (13mm), estabelecido no MeDiNa, para o tipo de rodovia avaliado, segundo a hierarquia dos sistemas funcionais publicada pelo DNIT (via arterial primária).

Por outro lado, embora as três faixas do segmento analisado evidenciem um comportamento estrutural adequado ao tráfego existente, segundo a metodologia DNER-PRO 011/79, as condições funcionais do pavimento apresentadas pelo IRI e área trincada da superfície do revestimento demonstram a necessidade de correção da estrutura.

Registra-se que a síntese das condições funcionais do pavimento apresentada da Tabela 7.1 considera que o levantamento da irregularidade longitudinal (IRI) foi processado por faixa de tráfego por meio da medição, em contínuo, nas duas trilhas de roda a cada 20 metros. A medição da flecha na trilha de roda seguiu o mesmo procedimento, porém sendo realizada somente na faixa de tráfego mais intenso. O levantamento da área trincada foi realizado metro a metro em cada uma das faixas por meio levantamento visual contínuo do estado da superfície (LVC).

c) Soluções de reforço executadas em campo

O tráfego adotado, considerando um período de projeto de 10 (dez) anos, segundo projeto executado, em termos do eixo padrão rodoviário brasileiro, foi de um $N_{8,2t}$ igual a $1,0 \times 10^7$, considerando a abertura ao tráfego no ano de 2020.

Embora a avaliação estrutural segundo a norma DNER PRO-011(1979) não tenha indicado a necessidade de reforço da estrutura, mas apenas correções de superfície, em atenção à norma IP-05 (2004) – “procedimento para o dimensionamento de pavimentos flexíveis para tráfego meio pesado, pesado, muito pesado e faixa exclusiva de ônibus”, optou-se por incluir uma espessura mínima de 10 cm de revestimento asfáltico. Essa espessura foi justificada pelo tráfego de projeto e condição do revestimento existente, sendo este antigo com presença de defeitos como desgaste, trincas e remendos.

Para isso, em virtude da necessidade de se manter o greide da via, conforme observado nas Figuras 7.2 e 7.3, as soluções propostas para as faixas 1 e 2 considerou a fresagem do revestimento e parte da base, e a recomposição em CAUQ com espessura total de 10 cm. Já para a faixa 3, considerou a fresagem do revestimento e de toda a base, com a recomposição de nova camada de base a partir do material retirado acrescido de 4% de cimento, além de CAUQ com espessura total de 10 cm.



Figura 7.2– Nova Estrutura das faixas 1 e 2 do segmento avaliado

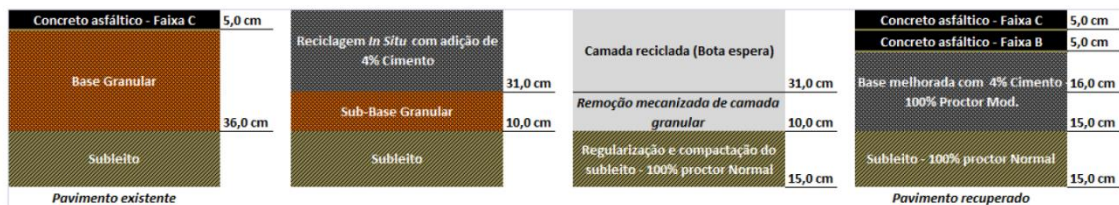


Figura 7.3– Nova Estrutura da faixa 3 do segmento avaliado

d) Análise do pavimento pelo método mecanístico-empírico

A presente avaliação visa verificar o comportamento do pavimento original e as soluções de recuperação executadas com fulcro no comportamento à fadiga. No MeDiNa, a

realização dessa análise está condicionada à definição de modelos constitutivos de comportamento resiliente e deformação permanente para o caso de solos, e de comportamento resiliente e fadiga para o caso de misturas asfálticas.

No caso em questão, os parâmetros dos solos utilizados foram os obtidas de estudos realizados por Costa (2013) e por Freitas (2019), pelas similaridades observadas em sua caracterização com o solo da rodovia avaliada, conforme observado na Tabela 7.2. Utilizou-se como parâmetros de entrada desses estudos o módulo de resiliência, a massa específica máxima, a umidade ótima e a energia de compactação. Já os coeficientes de regressão aplicados no modelo de deformação permanente seguiram dados da base referencial do software, cujas características apresentavam similaridade com os solos utilizados na presente avaliação (Solo Brita – MR (LG' s:1521) para a base e Solo Siltoso NS' para o subleito). Cabe observar que, os parâmetros utilizados como referência para base e subleito seguem proposta de procedimento apresentada no Apêndice A, cujos resultados foram amplamente discutidos em capítulo anterior.

Tabela 7.2 – Parâmetros dos materiais usados para subleito e base (PMSP,2004; Costa, 2013; e Freitas, 2019 – adaptado)

Parâmetro	Resultados obtidos com Sondagens		Resultados de Pesquisa Bibliográfica		
	Base	Subleito	Base	Base Melhorada	Subleito
Classificação TRB	A-2-6	A-7-5	A-2-6	A-2-4	A-7-6
Tipo Material	Cascalho Laterítico	Solo Laterítico Fino	Cascalho Laterítico	Cascalho Laterítico+3% cimento	Solo Laterítico Fino
Massa específica máxima (g/cm ³)	2,05	1,37	1,93	2,84	1,66
Umidade Ótima (%)	16	26	12,10	7,8	20,2
Energia de compactação Proctor	Intermediária	Normal	Intermediária	Modificada	Normal
Coefficiente de Poisson	-	-	0,40	0,40	0,45
CBR (%)	108 ¹	13 ¹	65	-	27
Tipo de Contato	-	-	Não aderido	Não aderido	Não aderido
Modelo Constitutivo	-	-	Resiliente linear	Resiliente linear	Resiliente linear
Módulo de Resiliência (MPa)	373 ²	171 ²	342	911	215

Modelo de Deformação Permanente					
Coefficiente de Regressão (K ₁)	-	-	0,31	0,31	0,244
Coefficiente de Regressão (K ₂)	-	-	0,06	0,06	0,419
Coefficiente de Regressão (K ₃)	-	-	0,85	0,85	1,309
Coefficiente de Regressão (K ₄)	-	-	0,05	0,05	0,068

¹ Obtido por análise estatísticas dos CBR obtidos em laboratório para amostras coletadas em campo.

² Valores estimados de acordo com a norma IP-08/2004.

Observa-se na Tabela 7.2 a influência da incorporação do cimento no aumento da massa específica e na rigidez do cascalho laterítico. Quanto às constantes do modelo de resiliência e de deformação permanente adotadas para a base estabilizada com cimento serem similares ao do solo puro, deve-se ao fato da necessidade de incorporar os parâmetros que mais se assemelham ao solo estudado, devido à ausência de referência bibliográfica específica para o cascalho laterítico com adição de cimento Portland.

Por vez, as misturas asfálticas utilizadas na avaliação seguiram dados da base referencial do software MeDiNa, conforme a Tabela 7.3, cujas características apresentavam similaridade com as misturas utilizados na presente avaliação, sendo utilizado CBUQ faixa C (RJ CAP50/70 #12,5mm Sepetiba) na camada superficial e CBUQ faixa B na camada de binder (RJ CAP50/70 #19,1mm Sepetiba). Ademais, para fins de avaliação de possível otimização das soluções executadas em campo, utilizou-se como parâmetros de entrada para misturas asfálticas os dados das misturas de concreto asfáltico modificado (RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22) e concreto asfáltico borracha (CAPFLEX B PG 64-22).

Tabela 7.3– Parâmetros dos materiais usados para revestimento asfáltico (MeDiNa)

Parâmetro	CAUQ Faixa B	CAUQ Faixa C	CA Modificado Faixa B	CA Borracha Faixa B
Resistencia a Tração (MPa)	2,04	1,91	1,28	1,0
Módulo de Resiliência (MPa)	9588	8289	3184	4980
Tipo de CAP	50/70	50/70	CAPFLEX 65-90 SBS	CAPFLEX B

Teor de Asfalto (%)	6,0	6,0	-	-
Volume de Vazios (%)	5,0	5,0	-	-
Massa específica (g/cm ³)	2,4	2,4	2,4	2,4
Coefficiente de Poisson	0,30	0,30	0,30	0,30
Modelo de Fadiga				
Coefficiente de Regressão (K ₁)	1e-12	3e-13	3e-11	4e-12
Coefficiente de Regressão (K ₂)	-3,59	-3,78	-3,535	-3,654
Classe Fadiga (<i>Flow Number</i>)	1	1	2	2

Em conformidade com a hierarquia dos sistemas funcionais publicada pelo DNIT, o tipo de via definido para a simulação numérica foi o “Sistema Arterial Primário”, cujos parâmetros de aceite de dimensionamento são limitados a 30% de área trincada do pavimento e uma deformação permanente com ATR de 13 mm ao final do período de 10 (dez) anos.

Para avaliar os custos das soluções executadas e as propostas apresentadas na Tabela 7.4 adotou-se os serviços de fresagem, estabilização de base, imprimação, pintura de ligação e aplicação de misturas asfálticas, com data base janeiro de 2020 do sistema de custos SICRO, considerando a localização da rodovia e que o seu projeto de recuperação foi proposto em maio de 2020.

Tabela 7.4 – Relação custo-benefício de soluções de reforço estudadas (SICRO, 2021)

Solução	Área Trincada ao final de 10 anos	Afundamento na Trilha de Roda	Vida útil estimada	Vida útil considerada para um nível precisão de 63 a 71%	Custo Estimado m/faixa (SICRO jan/20) ¹
S1 - Original (5cm CBUQ faixa C + 36cm Base)	68%	5,9mm	6 anos	4 anos	-
S2 - Reforço Executado (5cm CBUQ faixa C + 5 cm CBUQ faixa B + 31cm Base) – Faixas 1 e 2	33%	3,9mm	9 anos	6 anos	R\$ 127,59
S3 - Reforço Executado (5cm CBUQ faixa C + 5 cm CBUQ faixa	19%	4,1mm	13 anos	8 anos	R\$ 186,32

B + 31cm Base melhorada com 3% cimento) – Faixa 3					
S4 - Reforço Executado (8 cm asfalto modificado SBS – CAPFLEX 65/90+ 33cm Base)	30%	5,6mm	10 anos	7 anos	R\$ 101,32
S5 - Reforço Executado (5cm CBUQ faixa C + 5 cm modificado SBS – CAPFLEX 65/90 + 31cm Base)	21%	4,6mm	12 anos	8 anos	R\$ 127,91
S6 - Reforço Executado (7cm CBUQ faixa C + 5 cm modificado SBS – CAPFLEX 65/90 + 29cm Base)	16%	3,9mm	14 anos	9 anos	R\$ 153,35
S7 - Reforço Executado (8cm CBUQ faixa C + 5 cm modificado SBS – CAPFLEX 65/90 + 28cm Base)	14%	3,5mm	16 anos	10 anos	R\$ 166,37
S8 - Reforço Executado (5cm CBUQ faixa C + 5 cm asfalto borracha + 31cm Base)	24%	4,3mm	11 anos	7 anos	R\$ 133,66

1 – Valores extraídos de CPUs SICRO, códigos: 4011348, 4011459, 4011461, 4011463, 4011474, 4011479, 4011352 e 4011354 (não inclui BDI).

A partir da Tabela 7.4, verifica-se que embora a solução estabelecida na norma DNER PRO-011 (1979), para o presente caso, indicar apenas correções de superfície para uma nova previsão de vida útil de projeto de 10 (dez) anos, a análise mecânica-empírica, demonstrou a necessidade de reforço da estrutura do pavimento. Caso mantida a configuração original, a vida útil estimada do pavimento seria de 6 (seis) anos devido ao atingimento de 30% da área trincada. Assim, entende-se como adequada a decisão do gestor público de seguir complementarmente o dimensionamento do pavimento com o aumento da espessura do revestimento asfáltico segundo orientações da norma IP-05 (2004).

À semelhança dos resultados observados por Barroso (2018), verifica-se que o tipo de ligante precisa ser reavaliado para aplicação nas rodovias da região. A incorporação de polímeros no ligante ou a mudança do tipo de ligante podem, por si mesmo, melhorar o comportamento mecânico das misturas.

As análises realizadas no MeDiNa, considerando as misturas asfálticas comumente aplicadas na região, revelam que para o mesmo período, 10 (dez) anos, tem-se um trincamento maior. Apesar de não haver uma variação muito significativa entre os afundamentos na trilha

de roda (3,5 mm a 5,6 mm), os trincamentos foram inferiores a 30% quando do uso de misturas asfálticas modificadas, resultando em ganho de vida útil.

Os métodos executivos previstos nas soluções S2, S5 e S8 em comum tem a mesma geometria de camadas, 10 cm de mistura asfáltica sobre 31 cm de base. Como o material utilizado na base é o mesmo, a diferença está nos tipos de misturas asfálticas. Com uso de misturas convencionais (S2) estima-se vida útil de 9 (nove) anos. Entretanto, a aplicação de misturas asfálticas modificadas conduziria a vida útil superior a 11 (onze) anos. A melhor solução, dentre elas, seria a S5, pois apesar de apresentar custo similar ao da solução S2, tem-se maior tempo de vida útil (12 anos). O efeito da mistura asfáltica modificada no desempenho do pavimento, também pode ser observado nos resultados da solução S4, cuja espessura de revestimento é menor (8 cm) atingiria 10 (dez) anos de vida útil com 25% de redução no custo. O esforço em fresar também a base e voltar com o material melhorado e revestir com 10 cm de misturas asfálticas convencionais (S3) atendem à vida útil, mas os custos representam acréscimo de 45%, podendo chegar a 85%, se comparado com a solução (S4).

Para o presente estudo de caso, conclui-se que a adoção de misturas asfálticas modificadas tende a apresentar um melhor comportamento frente às misturas convencionais, impactando na melhoria do desempenho do pavimento, com menor custo para se obter uma mesma vida útil.

Cabe registrar que embora os parâmetros dos materiais adotados no software MeDiNA não tenham sido efetivamente dos materiais aplicados, tal condição não afasta a análise de comportamento do pavimento frente às soluções idealizadas, considerando tratar-se de materiais com características e propriedades similares. Porém, para se considerar a análise como efetiva de fato, restaria a ponderação do nível de precisão desses resultados. Nesse aspecto, a vida útil de projeto considerada nas análises envolve a adoção de um fator redutor sobre a vida útil estimada dos pavimentos ($P_{simulação} = 0,63$ a $0,71$), vide Equação 7.1, nos termos do procedimento de dimensionamento proposto no Apêndice A.

$$P_{simulação} = \prod_{i=1}^n P_{DOrig.Camada(i)} \quad (7.1)$$

onde,

$P_{simulação}$ é o grau de precisão da simulação, sendo dependente do número de camadas do pavimento e respectiva origem dos parâmetros dos materiais utilizados; e

$P_{DOrig.Camada(i)}$ é o fator de precisão observado nas simulações do modelo a partir de parâmetros de origem, variando de 100% a 89,2%.

Assim, $P = 71\%$ para estrutura de três camadas e $P=63\%$ para estrutura de quatro camadas, quando adotados exclusivamente parâmetros de referência.

Pelo fato de o nível de precisão de dados de origem ter alcançado a faixa de valor de 63% a 71%, abaixo dos 85% de precisão recomendado para o aproveitamento das simulações em projeto básico ou 95% para projetos executivos, a utilização do presente estudo limita-se a um caso de anteprojeto para as soluções S1 e S4. Para as demais soluções, faz-se necessária uma melhor caracterização dos materiais de modo a enquadrá-las ao menos na condição de anteprojeto (70% de precisão). Logo, a depender do nível de detalhamento necessário para a adequada tomada de decisão, sobre a solução de projeto a ser adotada em campo, há a necessidade de maior aprofundamento na caracterização dos materiais aplicados, seja por meio de dados laboratoriais ou por meio de retroanálise de bacias deflectométricas.

Para o presente estudo de caso, por exemplo, o anteprojeto na nova lei de licitações (Lei nº 14.133/2021) poderia ser considerado em contratações integradas onde o contratado é encarregado de formalizar os projetos básicos e executivos sem afastar a obrigação de concordância entre a execução da obra e a solução predefinida no anteprojeto. Contudo, para o uso dessa possibilidade, o edital deverá contemplar matriz de alocação de riscos entre o contratante e o contratado, hipótese em que o cálculo do valor estimado da contratação poderá considerar taxa de risco compatível com o objeto da licitação e com os riscos atribuídos ao contratado, de acordo com metodologia predefinida pelo ente federativo.

CAPÍTULO VIII

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nas metodologias de dimensionamento de pavimento tradicionalmente utilizadas no Brasil, as considerações utilizadas para o desempenho de pavimentos asfálticos em relação à ruptura são apresentadas de forma bastante simplificada, não sendo utilizados modelos de previsão de danos durante a vida útil do projeto, associados às análises de tensão-deformação. Assim, as previsões de vida útil estimadas para o pavimento, em muitas vezes, retornavam resultados destoantes quando comparadas às situações observadas em campo. Com o surgimento do MeDiNa, verifica-se a possibilidade de utilizar modelos de curva de fadiga e de deformação permanente para materiais efetivamente utilizados no país, e por consequência, conseguir evoluir na avaliação da previsão de desempenho das estruturas de pavimentos asfálticos, apresentando resultados mais realistas. Para tanto, o programa adota uma Função de Transferência (FT) para compatibilizar o comportamento do pavimento *in situ* com os resultados de ensaios de campo e laboratoriais. Entretanto, a FT foi desenvolvida com base no monitoramento e ensaios realizados em pavimentos flexíveis do Rio de Janeiro. A FT é um legado importante, tendo em vista que é possível ajustar a função para os tipos de pavimentos, situados nas diferentes regiões climáticas do Brasil. O DNIT e a UnB vêm trabalhando nesses ajustes específicos, para os tipos de pavimentos cujo desempenho se afasta do previsto no MeDiNa. Entretanto, a previsão pode se aproximar mais da condição real de alguns pavimentos, principalmente se conhecidos e ponderados os parâmetros de entrada impactantes no dimensionamento, seja de pavimento novo ou restaurado.

Diante desse cenário, o presente trabalho buscou avaliar a concordância da simulação da vida útil do pavimento obtidas com o MeDiNa às condições observadas em campo no Distrito Federal e Goiás a partir da atual FT disponibilizada. Para isso, utilizou-se conjunto dados sobre as condições estruturais, funcionais e de tráfego, obtidos durante o período de 4 (quatro) anos em 8 (oito) Unidades de Amostragem do DNIT, localizadas na região próxima ao Distrito Federal.

Os dados de entrada utilizados no software, oriundos do monitoramento dessas unidades em 2013, possibilitaram uma razoável caracterização dos materiais e misturas empregadas no segmento discutido, que aliado ao levantamento das condições funcionais do pavimento em

2017, permitiram constatar uma concordância razoável do MeDiNa ao desempenho dos pavimentos medidos em campo, dentro de uma faixa de aceitação compatível com as margens de erro atribuídas pelo programa para o cálculo da área trincada e pelo levantamento de campo para determinação do afundamento de trilha de roda ($\pm 3\text{mm}$).

No que tange o afundamento na trilha de roda (ATR), o coeficiente de variação dos erros médios absolutos entre os valores calculados a partir de parâmetros obtidos de retroanálise e os medidos em campo das 8 (oito) Unidades de Amostragem (UA) avaliadas foi de 44%, sendo a média de erro 1,28 e o desvio padrão de 0,56. Para valores calculados a partir de parâmetros obtidos de referências bibliográficas e os medidos em campo, o CV encontrado foi de 55%, sendo a média de erro 2,83 e o desvio padrão de 1,55. Tais valores demonstram uma agradável surpresa, uma vez que os parâmetros do modelo de deformação permanente ($\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$) não foram ajustados para a região do Distrito Federal e entorno, sendo utilizados nas simulações os parâmetros do modelo de deformação permanente de materiais com características similares que integram o banco de dados do MeDiNa.

Por vez, em relação à área trincada do pavimento (AT), os valores medidos nas oito UA permaneceram dentro da faixa de variação prevista pelo modelo de cálculo a partir de parâmetros obtidos por retroanálise de bacias deflectométricas ou por pesquisa bibliográfica (exceção neste caso a UA 41), isto é, valores previstos corrigidos pela curva de erro da Função de Transferência proposta por Fritzen (2016), conforme indicado na Figura 4.5, vide Figuras 6.2 e 6.9. Em relação à AT, o coeficiente de variação dos erros médios absolutos entre os valores calculados a partir de parâmetros obtidos de retroanálise e os medidos em campo das oito Unidades de Amostragem (UA) avaliadas foi de 66%, sendo o erro médio de 2,59 e o desvio padrão de 1,70. Para valores calculados a partir de parâmetros obtidos de referências bibliográficas e os medidos em campo, o CV encontrado foi de 101%, sendo a média de erro 4,01 e o desvio padrão de 4,07. Caso fosse excluída a UA 41 dessa análise, tais valores seriam: CV= 54%; Média de Erro = 2,47; e DP=1,33.

Essas avaliações foram facilitadas pela quantidade de medições de bacias deflectométricas utilizadas na análise, as quais propiciaram uma boa representatividade probabilística do comportamento dos materiais empregados nas estruturas de pavimentos avaliadas. Assim, as análises realizadas no MeDiNa, possibilitaram uma extração satisfatória dos módulos de resiliência de diferentes materiais de base e subleito, sendo tais valores ratificados por meio de pesquisa bibliográfica e pela discussão quanto à convergência das bacias deflectométricas calculadas pelo AEMC com respeito às situações observadas em campo.

Cabe ressaltar, no entanto, que os módulos obtidos por esse método de retroanálise não representam, necessariamente, os módulos reais dos materiais das camadas, e sim um módulo “equivalente ou médio”, considerando que a acurácia na sua determinação está sujeita a fatores que têm potencial para invalidar as hipóteses da teoria da elasticidade aplicada pelo modelo, como: calibração do equipamento de medição; geometria do segmento; natureza dos materiais; espessura, umidade e grau de compactação das camadas.

Após verificada a convergência de resultados de previsão de desempenho com as condições reais de campo, decorrentes dos módulos de resiliência calculados pelo BackMeDiNa a partir ensaios deflectométricos, avaliou-se, a partir de pesquisa bibliográfica, a existência de ensaios que melhor representassem os materiais observados nas unidades de amostragem avaliadas. Logo, foram identificados materiais com características e propriedades mecânicas similares, que possibilitaram as simulações do MeDiNa chegar a resultados similares a obtidos com a retroanálise de bacias deflectométricas.

Porém, para se considerar esse tipo de análise como efetiva de fato, a depender do nível de projeto pretendido, faz-se necessário atribuir uma precisão aos resultados. Nesse aspecto, para a vida útil de projeto considerada nas análises é aplicado um fator redutor sobre a vida útil estimada dos pavimentos, nos termos do roteiro de dimensionamento proposto no Apêndice A.

Portanto, a depender do nível de precisão exigido em projeto para a adequada tomada de decisão quanto à contratação da obra, ao acompanhamento da sua execução e o recebimento dessa, há a necessidade do aprimoramento da análise dos dados de entrada, por meio da efetiva caracterização dos materiais aplicados no caso em concreto.

Diante desse ambiente de possibilidades do MeDiNa, a partir das verificações de aproveitamento da Função de Transferência (FT) atualmente disponível no programa para a região do Distrito Federal e entorno, e sem deixar de lado as limitações apresentadas no presente estudo, se entende como possível o estabelecimento de procedimentos e critérios para o uso desse software como ferramenta na melhoria de processos de dimensionamento e controle de execução de pavimentos, embora essa função (FT atual) ainda não tenha sido calibrada ou validada em âmbito regional.

Conclui-se que o presente trabalho cumpre a sua tarefa de demonstrar os riscos associados à utilização do MeDiNa em seu atual estágio de implementação pelo DNIT para a região do Distrito Federal e entorno, assim como propor critérios para o seu emprego por profissionais dessa localidade, por meio da análise de precisão de resultados. No entanto, cumpre ressaltar que o trabalho poderia ter evoluído para proposta de uma função de transferência calibrada especificamente para o Distrito Federal e entorno se houvesse mais

dados relacionados à mistura asfáltica empregada nas unidades de amostragem selecionadas, como a data de execução do revestimento, projeto da mistura asfáltica utilizada, incluindo origem dos agregados, e ensaios de caracterização de módulo de resiliência, fadiga e *flow number*.

8.1 Sugestões para pesquisas futuras

- Complementar estudos nas unidades de amostragem adotadas no presente, considerando tratar-se de seções experimentais já consolidadas, com histórico de monitoramento e de representação estatística da malha regional, com a finalidade de uma calibração da função de transferência do MeDiNa em âmbito regional a um baixo custo e de forma célere. O objetivo seria cumprir as seguintes etapas: (i) obter informações sobre projeto de mistura asfáltica implementada à época, incluindo data de execução do serviço; (ii) abertura de poços de inspeção para coleta de amostras de subleito e camadas granulares com o objetivo de realizar a caracterização geotécnica e a obtenção de modelos de módulo de resiliência e deformação permanente; e (iii) de posse do projeto de mistura asfáltica utilizado a época, reconstituir a mistura asfáltica original e realizar ensaios para obtenção de módulo de resiliência, modelo de fadiga, resistência a tração e *flow number*.
- Ampliar a discussão levantada no presente estudo quanto à mensuração de níveis de precisão de dados de origem, por meio da proposição de fórmulas paramétricas ponderadas por parâmetros de origem das camadas, considerando as distintas contribuições que cada uma dessas traz ao comportamento do pavimento como um todo.
- Realizar estudos de bases estabilizadas quimicamente e de novas misturas asfálticas com materiais disponíveis na região, a partir das diretrizes indicadas pelo MeDiNa, de modo a constituir acervo técnico referencial para técnicos que desempenham suas atividades na região com nível de precisão adequado para uso em projetos básicos e executivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. American Association of State Highway and Transportation Officials (1993). Guide for Design of Pavement Structures: Appendix J – Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences. AASHTO, Washington, D.C., USA.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-7207: Terminologia e classificação de pavimentos. Rio de Janeiro, 1982.
- Albernaz, C. A. V. (1996). Avaliação Estrutural Simplificada de Pavimentos Através de Retroanálise. In: 30ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv. Salvador, BA, pp. 747-774.
- _____. (1997). Método simplificado de retroanálise de módulos de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 107 p.
- Andrade, L.R., Vasconcelos, K.L., Bernucci, L. B. (2016). Avaliação do comportamento estrutural de pavimentos por meio de adoção de parâmetros de bacia deflectométrica. In: 30ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Rio de Janeiro, RJ, 12 p.
- Araújo, J. L. (2009). Características funcionais e mecânicas de misturas asfálticas para revestimento de pavimentos aeroportuários. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 167 p.
- Balbo, J. T. (2007). Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 558 p.
- Barroso, L. X. (2018). Avaliação da dosagem e do comportamento mecânico de concretos asfálticos produzidos em Goiás. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 83 p.
- Bastos, J. B. S. (2016). Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 222 p.
- Beckert, K.E.K., Endres, L.P., Romeiro Júnior, C.L.S., Brito, L.A.T (2021). Comparação entre o novo método de dimensionamento e a avaliação dos pavimentos flexíveis das estradas brasileiras. In: 35ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, 100% Virtual, pp. 1108-1119.
- Bernucci, L.B., Motta, L. M. G., Ceratti, J. A. P; Soares, J. B. (2022). Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros. 2ª Edição, Petrobrás, ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, 759 p.
- Bezerra Neto, R. S. (2004). Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS). Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 189 p.
- Borges, C. B. S. (2001). Estudo comparativo entre medidas de deflexão com Viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 197 p.
- Brito, L.A.T., Graeff, A.G. (2009). Métodos de Dimensionamento de Pavimentos – Metodologias e seus Impactos nos Projetos de Pavimentos Novos e Restaurações. Relatório Final de Pesquisa. Prime Engenharia e Consultoria Ltda. Porto Alegre, RS, 93p.
- Burmister, D. M. (1945). *The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems*. In: Journal of Applied Physics, Volume 14, Issue 2, Estados Unidos da América.
- Cavalcante, F. P. (2005). Avaliação das Características Funcionais e Estruturais da Rodovia BR-230/ PB – Lote III. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE, 561 p.
- Camarini, G. C., Silva Junior, C. A. P., Fontenele, H. B. (2019). Avaliação de Bacias de Deflexão Retroanalizadas pelo Programa BackMeDiNa. In: XXXIII Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte, ANPET. Balneário Camboriú, SC, pp. 1133-1144.

- CODEPLAN-DF. Companhia de Planejamento do Distrito Federal (2017). Atlas do Distrito Federal de 2017. Brasília, DF, p. 28.
- _____. (2020). Atlas do Distrito Federal de 2020. Brasília, DF, p. 26.
- Costa, G.M., Mendonça, A.T. Albuquerque, F.S., Albuquerque, T.M.A. (2015). Características Mecânicas de Materiais para Pavimentos: Estudo de Caso Laboratório x Campo. In: Revista Scientia Plena, v. 11, n. 11. Pp. 01-12.
- Costa, L. C. S. (2013). Avaliação do comportamento de trechos de rodovias restauradas com base reciclada “in situ”. 2013. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, GO, 254 p.
- CNT. Confederação Nacional dos Transportes (2018). DNIT apresenta novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Brasília, DF. In: < <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/novo-metodo-pavimentacao-asfaltica-dnit-breve> >. Acesso em: 15 mar 2021.
- Cunto, F. J. C. (1998). Determinação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos e a sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples: estudo de três solos do nordeste brasileiro. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 178 p.
- Dalla Roza, A. E. (2018). Contribuições para projetos mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos na região norte do estado do Mato Grosso. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 178 p.
- de Paula, G.F, Fernandes, P.C., Silva, R.C. (2022). Estudo comparativo entre os métodos de dimensionamento de pavimentos: DNER e mecanístico-empírico (MeDiNa) no DER/DF. In: 47ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Bento Gonçalves, RS, pp. 266-276.
- _____, G.F, Fernandes, P.C., Silva, R.C. (2022). Modelos de comportamento tensão-deformação e parâmetros de solos tropicais de subleito do distrito federal para fins de pavimentação. In: 10º Congresso Rodoferroviário Português, CRP, Lisboa, Portugal.
- DER-DF. Departamento de Estradas e Rodagem do Distrito Federal. Edital de Concorrência nº 004/2016. DF-047 (EPAR) – Construção das vias marginais, novas faixas de rolamento e acostamentos na via principal. Brasília, 2016.
- _____. Edital de Concorrência nº 005/2019. Implantação de Pavimentação da Rodovia Vicinal VC-371. Brasília, 2019.
- _____. Estudos Preliminares - Projeto Executivo de Engenharia da Restauração da Infraestrutura Viária da Rodovia Distrital DF-011 (EPIG). TOMO I e II. Brasília, 2020.
- _____. Estudos Preliminares - Projeto Executivo de Eng. de Restauração de Pavimento da Via Central em Ambos os Sentidos e Adequação das Vias Marginais da Rodovia Distrital DF-001 (Pistão Sul). TOMO I e II Brasília, 2020.
- _____. Relatório do Sistema Rodoviário do DF de 2020. Brasília, 2020, p.157.
- Distrito Federal (2020). Lei Distrital nº 6.490, de 29 de janeiro de 2020. Dispõe sobre o Plano Plurianual do Distrito Federal para o quadriênio 2020-2023. Anexo III. Brasília, DF, pp.46-50.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (atual DNIT). DNER CLA-259: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamentos miniatura. Rio de Janeiro, 1996.
- _____. IE – 179: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. ME – 010: Cimentos asfálticos de petróleo - determinação do teor de betume (ABNT-MB 166). Rio de Janeiro, 1994.
- _____. ME – 035: Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 19984.
- _____. ME – 061: delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994.

- _____. ME – 24: determinação das deflexões no pavimento pela viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. ME – 131: Solos – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994
- _____. PRO – 10: avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis, procedimento A. Rio de Janeiro, 1979.
- _____. PRO – 11: avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis, procedimento B. Rio de Janeiro, 1979.
- _____. PRO – 132: Pavimentos – Calibração da célula de carga e de sensores de deflexão dos deflectômetros do tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”. Rio Janeiro, 2010.
- _____. PRO – 159: projeto de restauração de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio de Janeiro, 1985.
- _____. PRO – 269: projeto de restauração de pavimentos flexíveis: Tecnapav. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. PRO – 273: determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “falling weight deflectometer (FWD)”. Rio de Janeiro, 1996.
- _____. PRO – 277: Metodologia para controle estatístico de obras e serviços. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. PRO – 024: Requisitos para a qualidade na execução de obras rodoviárias. Rio de Janeiro, 2004.
- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT ES 098: Pavimentação – base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico. Rio de Janeiro, 2007.
- _____.DNIT ME – 013: Pavimento – determinação das deflexões pela Viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. ME – 133: Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman. Rio de Janeiro, 2010.
- _____. ME – 134: Pavimentação- Solos – determinação de módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. ME – 135: Pavimentação- Misturas Asfálticas– determinação de módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. ME – 136: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2010.
- _____. ME – 181: Pavimentação - Material estabilizado quimicamente - Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. ME – 183: Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. ME – 184: Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. ME – 411: Pavimentação - Misturas asfálticas - Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. ME – 412: Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados por peneiramento. Rio de Janeiro, 2019.
- _____. ME – 428:Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.
- _____. ME – 434: Pavimentação – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em camadas estabilizadas quimicamente. Rio de Janeiro, 2022.
- _____. PRO – 006: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio Janeiro, 2003.

- _____. PRO – 007: Levantamento para avaliação da condição da superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos. Rio Janeiro, 2003.
- _____. PRO – 008: Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio Janeiro, 2003.
- _____. PRO – 009: Avaliação subjetiva de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio Janeiro, 2003.
- _____. PRO – 011: Gestão de qualidade em obras rodoviárias. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. PRO – 433: Levantamento do percentual de área trincada e de afundamento de trilha de roda de pavimento asfáltico em trechos experimentais, monitorados ou trechos homogêneos de curta extensão. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. TER – 005: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio Janeiro, 2003.
- _____. IPR – 720. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Rio Janeiro, 2006.
- _____. IPR – 723. Manual de Estudo de Tráfego. Rio de Janeiro, 2006
- _____. IPR – 745. Manual de Gerência de Pavimentos. Rio Janeiro, 2011.
- _____. IPR. MeDiNa versão 1.1.4.0. Departamento Nacional de Infraestrutura. Rio Janeiro. 2020.
- _____. Relatório Técnico – Catálogo de Soluções de Manutenção para Pavimentos Flexíveis. Brasília, 2015.
- _____. HDM-4: Calibração HDM-4 (Relatórios). Disponível em: <https://servicos.dnit.gov.br/calibrahdm/Produtos/Coplan/HDM/Relatorio>.
- _____. VGEO: Visualizador de Informações Geográficas. Disponível em: <https://servicos.dnit.gov.br/vgeo>.
- _____. Manual de Utilização do Programa MeDiNa. Brasília, 2020.
- _____. MeDiNa: software. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/solicitacao-de-download-do-medina>. Acesso em 01.ago. 2021
- _____. SICRO. Sistema de Custos Referenciais de Obras. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro>. Acesso em: 01.out.2021.
- Ferri, S. (2014). Critérios de aceitação e controle da qualidade da execução de camadas de fundação de pavimentos novos através de métodos deflectométricos. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 331 p.
- Fernandes, P. G., Valoura, L. R., Espindola, A. C., Ciríaco, T. G. (2017). Estudo Comparativo dos Métodos Empírico do DNER e Mecanístico-Empírico pelo SISPAV aplicado a Rodovia BR-316. In: Anais do XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte, ANPET. Recife, PE, pp. 1217-1226.
- Fish, J., Belytschko, T. (2007). A First Course in Finite Elements. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, Inglaterra, 344 p.
- Fonseca, L. F. S. (2013). Análise das soluções de pavimentação do programa Crema 2ª etapa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 247 p.
- Franco, F. A. C. P. (2007). Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 294 p.
- Fritzen, M. A. (2016). Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 286 p.

- _____, Franco, F. A. C. P., Motta, L. M. G., Ubaldo, M. O. (2019). Atualização da função de transferência do dano de fadiga para a área trincada do programa MEDINA. In: IX Congresso Rodoviário Português. Lisboa, Portugal, 10 p.
- Freitas, J. B. (2019). Análise de parâmetros para projetos mecanísticos-empíricos de pavimentos asfálticos em Goiás. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 212 p.
- Guimarães, A. C. R. (2009). Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 367 p.
- Horak, E. (2008). *Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters*. In: Journal of the South African Institution of Civil Engineering, v. 50, n. 2, pp.2-9.
- Lopes, F. M.; Fortes, R. M.; Suzuki, C. Y. (2013). Pavimentos Flexíveis com Revestimento Asfáltico– Avaliação Estrutural a Partir dos Parâmetros de Curvatura da Bacia de Deformação. In: Revista Pavimentação, v. 8, n. 30, pp. 58-65.
- Macêdo, J. A. G. (1996). Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 478 p.
- Medina, J., Motta, L. M. G.(2005). Mecânica dos pavimentos. 2ª Edição. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 570 p.
- _____, Macêdo, J. A. G., Motta, L. M. G, Albernaz, C. A. V..(1994). Utilização de Ensaio Deflectométricos e de Laboratório para a Avaliação Estrutural de Pavimentos. In: 28ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv. Belo Horizonte, MG, pp. 595-625.
- Moizinho, J C. (2007). Caracterização e uso de agregados laterítico do Distrito Federal e do estado de Roraima em CBUQ. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 315 p.
- Nunes, R. A. A. (2018). Desenvolvimento de matriz de soluções de pavimentos adaptada às condições do DF. Monografia de Graduação, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 113 p.
- Pinto, S., Preussler, E. (2002). Pavimentação Rodoviária – conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Copiarte. Rio de Janeiro, RJ, 259 p.
- Pitangui, L. C. (2019). Análise comparativa do método do DNER com o método mecanístico-empírico MeDiNa. Monografia de Graduação, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 93 p.
- Prefeitura Municipal de São Paulo. IP-05: Dimensionamento de pavimentos flexíveis tráfego meio pesado, pesado, muito pesado e faixa exclusiva de ônibus. São Paulo, SP, 2004.
- _____. IP-08: Análise mecanicista à fadiga de estruturas de pavimentos. São Paulo, SP, 2004.
- Preussler, E.S., Vale, A.F., Carvalho, R.L.E., Pinto, I.E. (2000). Retroanálise – Processos para avaliação estrutural de pavimento. In: 32ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Brasília, DF, pp. 337-346.
- Resenes, J. L. G. (2014). Metodologia de dimensionamento da reabilitação e estudo comparativo com o catálogo de soluções de pavimentação CREMA 2ª Etapa: Estudo de caso rodovia BR-282/SC Trecho km 206,960 ao 214,345. Monografia de Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 155 p.
- Rocha Filho, N. R. (1996). Estudo de técnicas para avaliação estrutural de pavimentos por meio de levantamentos deflectométricos. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 185p.
- Rocha, M.L., Marques, G.L.O, Silva, R.C. (2021). Aplicação de parâmetros de bacia de deflexão (PBD) em análises estruturais de pavimentos flexíveis. In: 35ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, 100% Virtual, pp. 754-765.
- Santos, M. S., Specht, L. P., Pereira, D. S., Bueno, L. D., Bernucci, L. B., Mello, L. G. R, Farias, M. M., Lopes, L. N, Carvalho, J. T., Jorge, V. D., Gomes, P. L. (2022). Implantação

- de trechos experimentais com diferentes tipos de CAP e utilização de simulador de tráfego do tipo HVS na BR-116/RS. In: XXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET. Bento Gonçalves, RS, 12 p.
- Severino, A. J. (2013) Metodologia do trabalho científico. Ed. Cortez, São Paulo, SP, 274 p.
- Silva, R.C. (2021) Notas de Aula da Disciplina de Comportamento de Pavimentos Rodoviários. UnB. Brasília.
- Silva, L. A. (2014). Uso de Georadar (GPR) e retroanálise de deflexões como suporte a análise probabilística de desempenho de pavimentos. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 219 p.
- Soares, J. B., Motta, L. M.G., Soares, R. F. (2000). Análise de bacias deflectométricas para o controle de construção de pavimentos asfálticos. In: XIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET. Gramado, RS, 12 p.
- Soares, J. B. (2009). Aspectos gerais de métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos de vários países e a relação com um novo método brasileiro. Revista Pavimentação, ano IV, n 14, p.20-35.
- _____. (2020). Reflexões sobre um programa de pesquisa científica para a infraestrutura viária do Brasil. Revista Transportes, v.28, n.5, 14 p.154-168.
- Souza Junior, J. G. (2018). Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 218 p.
- Theisen, K. M., Theisen, P. M., Fonseca, O. K. (2020). Proposta de modelo em análise mecanística para cálculo da deflexão máxima obtida via falling weight deflectometer e fatores de correção de temperatura. In: XXXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, 100% Digital, pp. 805-816.
- Toffoli, C.M., Farias, M. M, Mello, L. G.R. (2020). Análise e inclusão de aderência parcial entre camadas no programa brasileiro de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos (MEDINA). In: XXXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, 100% Digital, pp. 1140-1143.

APÊNDICE A

Pavimentação – Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos pelo Método Mecanístico Empírico - Roteiro

Universidade de Brasília (UnB), Faculdade de Tecnologia (FT),
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC)
Campus Universitário Darcy Ribeiro
Brasília/DF, Brasil, 70910-900

Resumo

Este documento apresenta procedimentos para dimensionamento de pavimentos asfálticos novos ou de reforços desses para a região do Distrito Federal e entorno a partir do modelo mecanístico-empírico atribuído ao software MeDiNa. Trata-se de roteiro validado em pesquisa que avaliou a concordância do modelo matemático às observações de campo de 8 (oito) das 50 (cinquenta) unidades de amostragem adotadas pelo DNIT na calibração do seu modelo HDM-4 para toda a malha rodoviária federal. Tais informações possibilitaram verificar a adequabilidade do modelo para a previsão de vida útil de pavimentos a região do Distrito Federal e entorno, a partir de critérios de análise de fadiga (área trincada) e deformação permanente (flecha ou afundamento na trilha de roda), assim como definir diferentes níveis de precisão a depender da origem dos parâmetros utilizados nas simulações. A criação desse documento procede dos estudos e pesquisas realizados no âmbito do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Geotecnia da UnB, com ênfase no estudo de misturas asfálticas, métodos mecanístico-empíricos e controle tecnológico de obras de pavimentação.

Sumário

1. Objetivo.....	146
2. Definições.....	146
3. Avaliação da condição de integridade do pavimento	147

4. Modelagem Adotada	147
5. Sequência de Atividades para Dimensionamento de reforço de pavimentos	151
6. Referências	152

1. Objetivo

Este roteiro estabelece os procedimentos complementares à Norma DNER 11 – PRO para avaliação da integridade de pavimentos existentes e proposição de medidas corretivas. Para tanto, busca orientar o projetista atuante na região do Distrito Federal e entorno com informações sobre dados de entrada em modelo de dimensionamento mecanístico-empírico (MeDiNA) a partir do nível de precisão requerido pelo projeto.

2. Definições

Para os fins deste roteiro consideram-se as definições contidas nas normas DNIT indicadas nas referências bibliográficas (item 6), dentre outras:

2.1 Área trincada

Área do Pavimento com presença de defeitos de fissuras, trincas, painelas, buracos ou remendos, cujas definições constam na norma DNIT 005 – TER. É medida em porcentagem, conforme apresentado no item 5.2 da norma DNIT 443-PRO.

2.2 Flecha na trilha de roda

Medida em milímetros, da profundidade do sulco formado em decorrência de deformações nas trilhas de roda interna (TRI) e de roda externa (TER),

correspondente ao ponto de máxima depressão, em cada estação demarcada, sob o centro de uma régua de 1,20m.

2.3 Segmento homogêneo

Segmento de rodovia de comprimento mínimo de 400 metros e máximo de 2000 metros que apresenta, dentro dos seus limites, similaridade em termos funcionais, estruturais e de tráfego.

2.4 Bacia deflectométrica

Medidas de deslocamentos verticais elásticos ou recuperáveis em vários pontos de influência próximos ao de aplicação da carga.

2.5 Módulo de resiliência

Relação entre a tensão resultante de carga cíclica e a correspondente deformação recuperável.

2.6 Precisão do projeto

Indicativo do nível de erro ou afastamento do valor estimado em relação ao valor de referência estabelecido.

3. Avaliação da condição de integridade do pavimento

Para avaliação da condição do pavimento adota-se em complemento aos parâmetros deflectométricos estabelecidos na Norma DNER 011 – PRO (Deflexão admissível - D_{adm} e Raio de curvatura - R_c), os critérios estabelecidos na Tabela 1, bem como os limites de áreas trincada e afundamento de trilha de rodas estabelecidos na Tabela 2.

Tabela 1 – Classificação da condição estrutural de acordo com os PBDs e módulos retroanalizados

CONDIÇÃO DO PAVIMENTO	PARÂMETROS DE BACIA DE DEFLEXÃO (10^{-2} mm)			MÓDULOS RETROANALISADOS (MPa)			
	SCI	BDI	BCI	Rev.	Base	Sub-base	Subleito
Seguro	< 20	< 10	< 5	> 4000	> 200	> 200	> 250
Em alarme	20 - 40	10 - 20	5 - 10	2000 - 4000	100 - 200	80 - 150	80 - 150

Severo	> 40	> 20	> 10	< 2000	< 100	< 100	< 80
--------	------	------	------	--------	-------	-------	------

Fonte: Rocha et al. (2021)

O Índice de Curvatura da Superfície ($SCI = D_0 - D_{30}$) é o indicador mais sensível para evidenciar a situação da rigidez da camada de revestimento asfáltico. Os valores de SCI superiores a 25×10^{-2} mm indicam que a camada de revestimento é pouco rígida ou é de pequena espessura.

O Índice de Danos na Base ($BDI = D_{30} - D_{60}$) é o indicador para evidenciar a situação da rigidez da camada de base. Valores de BDI superiores a 40×10^{-2} mm indicam pavimentos pouco rígidos ou pavimentos com problemas estruturais.

E o Índice de Curvatura da Base ($BCI = D_{60} - D_{90}$) é o indicador para verificar a condição do subleito. Valores de BCI superiores a 10×10^{-2} mm indicam problemas estruturais no subleito.

Tabela 2 – Critérios de aceite e confiabilidade para cada tipo de via

TIPO DE VIA	CONFIABILIDADE	ÁREA TRINCADA	DEF. PERMANENTE
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Local	65%	30%	20mm

Fonte: MeDiNa.

4. Modelagem Adotada

Para a avaliação do pavimento segundo este roteiro, utiliza-se do método de dimensionamento mecanístico-empírico desenvolvido para o DNIT (MeDiNa), segundo modelagem elástica linear, que além de considerar o comportamento resiliente dos materiais, também analisa os efeitos do tráfego e do clima na vida de serviço e as respostas estrutural e funcional do pavimento.

4.1. Organização das Atividades

- a) Os segmentos são definidos pela união de seções homogêneas levando em consideração parâmetros como: capacidade de suporte do subleito, histórico de construção e estado de superfície do pavimento existente.
- b) O tráfego é determinado com base no número acumulado de repetições do eixo padrão para o período de projeto assumido ($N_{8,2tr}$).
- c) Com relação aos materiais das camadas a serem considerados no projeto de restauração, devem ser definidas as seguintes características:
 - Propriedades das camadas do pavimento existente;
 - Propriedades da camada de subleito;
 - Propriedades da camada de recapeamento.

4.2. Caracterização de materiais empregados

Com relação aos materiais das camadas a serem considerados no projeto de restauração, devem ser definidas as propriedades de rigidez e danificação das camadas do pavimento existente, do subleito e da camada de recapeamento a ser imposta. No caso de pavimentos novos, devem ser definidas essas mesmas propriedades para o subleito e camadas constituintes da estrutura proposta.

Essas propriedades podem ser caracterizadas a partir de ensaios laboratoriais, ensaios deflectométricos ou por meio da adoção de referência bibliográfica, devendo ser adotados conforme o nível de precisão exigido pelo projeto.

4.2.1. Ensaios laboratoriais

A validação do dimensionamento estrutural pelo MeDiNa por meio de ensaios laboratoriais de caracterização de materiais constituintes do pavimento é estabelecida conforme Tabela 3 a seguir:

Tabela 2 – Ensaios laboratoriais de caracterização de materiais

MATERIAL	PROPRIEDADE	PARÂMETRO	ENSAIO
Solos e Britas	Rigidez	Módulo de resiliência	Triaxial (k_1, k_2, k_3)
	Dano	Deformação Permanente	Triaxial ($\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4$)
	Dano	Fadiga*	Compressão Diametral (k_1, k_2)
Concreto Asfáltico	Rigidez	Módulo de resiliência	Compressão diametral
	Dano	Deformação Permanente	Creep dinâmico (flow number)
	Dano	Fadiga	Compressão Diametral (k_1, k_2)

*ensaio destinado a camadas estabilizadas quimicamente.

No que tange ao subleito, o módulo de resiliência (DNIT 134 – ME) e os parâmetros de deformação permanente (DNIT 179 – IE) são parâmetros imprescindíveis, além da caracterização básica e classificação (DNER 59 – CLA) do material constituinte. Além do subleito, os materiais naturais empregados na base, sub-base e reforço de subleito também devem ser caracterizados e ter suas propriedades resilientes e plásticas detalhadas. Para as camadas estabilizadas quimicamente, executar a curva de fadiga do material, obtida com base no ensaio à compressão diametral (DNIT 434 – ME).

Quanto à camada de revestimento, inserem-se informações como faixa granulométrica (DNIT 412 - ME), teor do asfalto (DNER 010-ME), abrasão Los Angeles do agregado mineral utilizado na mistura (DNER 035-ME), volume de vazios (DNIT 428 - ME), massa específica (DNER 411 - ME), deformação permanente obtida no ensaio de *flow number* (DNIT 184 – ME) e a curva de fadiga do material, obtida do ensaio à compressão diametral (DNIT 183 – ME).

Cabe ressaltar que mesmo se conhecendo os valores dos módulos de resiliência da época do projeto e construção, eles são variáveis com o tempo, em função das

modificações e danos da estrutura causadas pelo tráfego, clima e intempéries. A forma de contornar esse problema seria por meio da avaliação destrutiva por abertura de poços de sondagem, que permitam coletar amostras para determinação destes parâmetros em laboratório. No entanto, por este é um serviço lento e causa transtornos adicionais ao tráfego e ao pavimento, a sua execução pode ser específica aos estudos necessários a fase do projeto executivo.

4.2.2. Ensaios deflectométricos

Estimativa de módulos de resiliência por retroanálise por meio dos resultados de ensaios deflectométricos (Viga Benkelman ou FWD). Há a necessidade de conhecer a composição do pavimento assim como a espessura das camadas empregadas no segmento homogêneo avaliado. O valor do coeficiente de Poisson de cada camada pode ser aquele sugerido pelo programa MeDiNa ou atribuído pelo próprio projetista.

O manual do software indica que a retroanálise possui uma boa correlação entre a bacia medida com FWD e a calculada quando o erro for inferior a 5%, uma correlação razoável quando o erro variar de 5% a 10%, e a não existência de correlação satisfatória quando o erro for superior a 10%.

4.2.3. Adoção de parâmetros de referência

Na ausência de ensaios que possibilitem estimar os valores dos módulos de resiliência ou modelo de deformação permanente, considerar os valores apresentados nas Tabelas 4 e 5 como parâmetros de referência sugestivos para solos observados na região do DF e entorno.

Tabela 4 – Referência Bibliográfica para materiais de subleito, base e sub-base

PARÂMETRO	BASE [A]	BASE [B]	SUBLEITO [A]	SUBLEITO [B]
Tipo Material	Areia Vermelha +cascalho 3" a 4"	Silte Arenoso Vermelho +cascalho 1"	Silte Argiloso Vermelho com quartzo	Silte Vermelho com quartzo + cascalho 3/8"
Pedregulho (%)	44,9	49,92	14,54	8,87

Areia (%)	47,9	23,09	31,68	60,4
Silte (%)	7,2	15,11	23,79	30,73
Argila (%)	-	11,88	29,98	-
TRB	A-1-a	A7-6	A7-6	A4
Massa específica máxima (g/cm ³)	2,20	1,94	1,66	1,8
Umidade Ótima (%)	7,6	13	20,2	13,3
Energia de compactação Proctor	Modificada	Intermediária	Normal	Normal
Coef. de Poisson	0,35	0,4	0,45	0,45
Tipo de Contato	Não aderido	Não aderido	Não aderido	Não aderido
Modelo Constitutivo	Resiliente linear	Resiliente linear	Resiliente linear	Resiliente linear
Modulo Resiliente (MPa)	444-530	392-420	209-220	135-156
Modelo de Deformação Permanente				
Coeficiente de Regressão (K ₁)	0,128	0,31	0,244	0,244
Coeficiente de Regressão (K ₂)	-0,409	0,06	0,419	0,419
Coeficiente de Regressão (K ₃)	1,05	0,85	1,309	1,309
Coeficiente de Regressão (K ₄)	0,074	0,05	0,068	0,068

Fonte: FREITAS (2019) e MeDiNa, adaptado

Para o modelo constitutivo de comportamento resiliente linear e de fadiga para o caso das misturas asfálticas pode-se adotar os parâmetros indicados no acervo do próprio MeDiNa, pois considera-se que as características das misturas asfálticas adotadas pelo software não foram capazes de produzir distorções relevantes em relação às situações de campo utilizadas para confirmar o modelo de cálculo para a região do DF.

Tabela 5 – Referência Bibliográfica para materiais de revestimento

PARÂMETRO	CAUQ Faixa B	CAUQ Faixa C	CA Modificado Faixa B	CA Borracha Faixa B
Resistencia a Tração (MPa)	2,04	1,91	1,28	1,0
Modulo Resiliente (MPa)	9588	8289	3184	4980
Tipo de CAP	50/70	50/70	CAPFLEX 65-90 SBS	CAPFLEX B
Teor de Asfalto (%)	6,0	6,0	-	-
Volume de Vazios (%)	5,0	5,0	-	-
Massa específica (g/cm ³)	2,4	2,4	2,400	2,400

Coef. de Poisson	0,30	0,30	0,30	0,30
Modelo de Fadiga				
Coeficiente de Regressão (K ₁)	1e-12	3e-13	3e-11	4e-12
Coeficiente de Regressão (K ₂)	-3,59	-3,78	-3,535	-3,654
Classe Fadiga (Flow Number)	1	1	2	2

Fonte: MeDiNa.

No entanto, é importante mencionar que o uso dessa referência bibliográfica de misturas asfálticas somente poderá ser usado em caso de anteprojeto, devido à necessidade de validação dos dados do modelo de fadiga com dosagens de misturas reais. Nesse aspecto, não há impedimentos para que outras fontes de referência de misturas asfálticas possam ser adotadas no presente procedimento.

4.3. Precisão dos resultados

A incorporação do conceito de precisão em projetos mecanístico-empíricos permite ao projetista a consideração de várias incertezas no projeto do pavimento, auxiliando na tomada de decisões, baseado em uma solução compatível com a importância do projeto e dos níveis de acurácia dos dados de entrada. Para o cálculo da precisão do dimensionamento da estrutura em relação ao seu comportamento ao longo da vida útil, faz-se necessário agregar o fator de precisão dos resultados, de acordo com os parâmetros de entrada, aos resultados das simulações do MeDiNa.

Tendo sido confirmada a concordância do modelo de cálculo elástico linear, adotado pelo MeDiNa, com observações em oito Unidades de Amostragem do DNIT próximas ao DF, pode-se estabelecer, nos termos apresentados na Tabela 6, o grau de precisão observado nas simulações do modelo a partir de parâmetros oriundos de retroanálise e de referência bibliográfica de materiais similares objeto de estudos nesta região.

Tabela 6 – Precisão estimada de acordo com a origem dos dados

ORIGEM DE DADOS	PRECISÃO DOS RESULTADOS
Dados Laboratoriais (item 4.2.1)	100 %
Retroanálise de bacias deflectométricas (item 4.2.2)	95,5%
Parâmetros de referência (item 4.2.3)	89,2%

O grau de precisão a ser considerado na simulação será o valor resultante da multiplicação dos fatores de precisão, apresentados na Tabela 6, de cada uma das camadas da estrutura analisada, de acordo com a origem das informações.

$$P_{Simulação} = \prod_{i=1}^n P_{DOrig.Camada(i)} \quad (1)$$

Exemplo 1: no caso de projeto de recapeamento, composto por capa de CBUQ faixa C, base e subleito, em que os módulos de resiliência das camadas existentes são obtidos por retroanálise (item 4.2.2), com adoção de parâmetros da camada de recapeamento a partir da base referencial (item 4.2.3), a nova precisão dos resultados é apresentada como: $P_{Simulação} = 95,5\% \times 95,5\% \times 89,2\% = 81,3\%$.

Exemplo 2: no caso de projeto de recapeamento, composto por capa de CBUQ faixa C, base e subleito, em que os módulos de resiliência das camadas existentes são obtidos por retroanálise (item 4.2.2), com adoção de parâmetros da camada de recapeamento a partir de ensaios laboratoriais da mistura asfáltica a ser aplicada em campo (item 4.2.1), a nova precisão dos resultados é apresentada como: $P_{Simulação} = 95,5\% \times 95,5\% \times 100\% = 91,2\%$.

Exemplo 3: no caso de projeto de pavimento novo, composto por capa de CBUQ faixa C, camada de Binder, base e subleito, em que os parâmetros das camadas são obtidos a partir da base referencial (item 4.2.3), a nova precisão dos resultados é apresentada como: $P_{Simulação} = 89,2\% \times 89,2\% \times 89,2\% \times 89,2\% = 63,3\%$.

Recomenda-se a adoção dos seguintes níveis de precisão dos dados de origem para seguintes as fases de projeto.

- Acima de 70% no caso de anteprojeto;
 - Acima de 85% no caso de projeto básico; e
 - Acima de 95% no caso de projeto executivo.
- a) Para projetos executivos, recomenda-se que o projetista providencie os ensaios mecânicos das misturas asfálticas que serão utilizadas no pavimento, a fim de ajustar o projeto quanto ao módulo de resiliência e a fadiga utilizados nos cálculos do dimensionamento final.
 - b) Para o caso de obras de reforços de pavimentos, devido ao processo de degradação desse ao longo do tempo, recomenda-se a adoção de ensaios laboratoriais e levantamentos de campo não superiores a 1 (um) ano da data de aprovação do projeto.
 - c) Para o caso de utilização de módulo de referência, recomenda-se subdividir a espessura da camada para fins de retroanálise, caso a espessura de projeto seja superior a 20 cm, de acordo com a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES. Tal procedimento possibilita melhor convergência dos resultados, considerando a relação de influência da espessura da camada sobre o valor do módulo de resiliência.
 - d) Para os casos em que o módulo de resiliência médio do subleito, para um solo natural, for inferior a 50 MPa, recomenda-se um tratamento da camada por meio de estabilização química ou granulométrica.
 - e) Para volumes de tráfego maiores do que $N = 5 \times 10^7$ recomenda-se o uso de camadas cimentadas na base.

4.4. Limitações de análise

- a) A espessura máxima permitida para a análise é de 15cm para as camadas asfálticas, de 25cm para as estabilizadas e de 40cm para as demais;
- b) A deformação permanente na camada não pode ser superior a 5%;
- c) A deformação permanente no subleito não pode ser superior a 5mm;
- d) A camada de suporte da camada estabilizada não pode possuir deflexão superior a 70 (0,01mm);
- e) O Programa MeDiNa está limitado a calcular apenas a camada asfáltica de reforço. Quando for o caso de reconstruir a camada de base ou reciclar, utilize a modelagem para Pavimento Novo do programa.
- f) O MeDiNa não calcula o trincamento por reflexão de trincas da base estabilizada. Porém, quando se coloca uma camada asfáltica sobre uma base rígida, a probabilidade de ter reflexão de trincas é muito grande. Como não existem modelos de previsão de trincamento por reflexão, o MeDiNa não tem como quantificar quanto seria o trincamento final nas duas soluções, mas certamente a área trincada final (fadiga + reflexão) seria maior sem a camada de antirreflexo de trincas.

5. Sequência de Atividades para Dimensionamento de reforço de pavimentos

- i. Realizar o levantamento de bacias deflectométricas pelo menos a cada 160 metros para casos de anteprojeto e de projeto básico e a cada 80 metros para o caso de projeto executivo;
- ii. Identificar presença de segmentos homogêneos a partir do método de diferenças acumuladas da ASSHTO;
- iii. Obtenção de informações sobre a estrutura do pavimento de diferentes segmentos homogêneos por meio de poços de inspeção;

- iv. Obter informações sobre condições de trincamento e afundamento na trilha de rodas para os segmentos de projeto;
- v. Levantar as características do tráfego semanal no local do projeto;
- vi. Executar a retroanálise das bacias de deflexão no BackMeDiNa a partir das informações obtidas nos itens (i), (ii) e (iii);
- vii. Exportar análise para o MeDiNa, adotando uma estrutura inicial de reforço a partir de materiais disponíveis e dos critérios de preservação da geometria da rodovia;
- viii. Otimizar a análise por meio da comparação das condições de vida útil do pavimento quando adotadas outras composições de camadas de reforço;
- ix. Aplicar fator redutor a vida útil estimada pelo MeDiNA a partir da precisão calculada em função da origem dos dados do tipo de via (importância da obra);
- x. Se as espessuras adotadas conduzirem a valores não superiores aos critérios de fadiga e de deformação permanente, de acordo com a vida útil de projeto estabelecida, dar por concluído o dimensionamento. Porém, caso algum dos critérios não seja satisfeito, alterar composição das camadas do pavimento e refazer os cálculos.

6. Referências

Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER 011 – PRO. Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis - Procedimento.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 133 – ME. Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman – Método de ensaio.

_____. DNIT 134– ME. Pavimentação- Solos – determinação de módulo de resiliência – Método de ensaio.

_____. DNIT 135– ME. Pavimentação- Misturas Asfálticas– determinação de módulo de resiliência – Método de ensaio.

_____. DNIT 136/2018-ME. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral

_____. DNIT 179/2018-IE. Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente

_____. DNIT 181/2018-ME. Pavimentação - Material estabilizado quimicamente - Determinação do módulo de resiliência

_____. DNIT 183/2018-ME. Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada

_____. DNIT 184/2018-ME. Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente

_____. DNIT 273 – PRO. Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “falling weight deflectometer - FWD” - Procedimento.

_____. DNIT 433 – PRO. Levantamento do percentual de área trincada e de afundamento de trilha de roda de pavimento asfáltico em trechos experimentais, monitorados ou trechos homogêneos de curta extensão - Procedimento.

_____. DNIT 434/2022 – ME. Pavimentação – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em camadas estabilizadas quimicamente – Método de ensaio

_____. DNIT 247/2020 – IS. Estudos para elaboração de projetos de implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional - MeDiNa.

Rocha, M.L., Marques. G.L.O, Silva, R.C. (2021).
Aplicação de parâmetros de bacia de deflexão (PBD)
em análises estruturais de pavimentos flexíveis. In:
35ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, 100%
Virtual, pp. 754-765.

Rodrigues, A. (2023). Uso do MeDiNa em soluções
básicas de pavimentos asfálticos no Distrito Federal.
Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-
Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília,
212 p.

APÊNDICE B

Pavimentação – Controle de Execução de Pavimentos Asfálticos a partir de Levantamentos de Bacias Deflectométricas - Roteiro

Universidade de Brasília (UnB), Faculdade de Tecnologia (FT),
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC)
Campus Universitário Darcy Ribeiro
Brasília/DF, Brasil, 70910-900

Resumo

Entende-se o controle de qualidade na construção e reforço de pavimentos como a execução de ensaios de campo e de laboratório para verificação da obediência dos serviços executados às normas e especificações técnicas de projeto. O fato de adotá-lo, contribui para obtenção de uma obra uniforme em comportamento de acordo com as recomendações adotadas em projeto. Porém, quando esse controle é baseado em propriedades empíricas nos materiais a sua execução não tem sido capaz de avaliar, de forma global, as consequências das tolerâncias admitidas nas especificações técnicas. Logo, este documento propõe metodologia para o controle de qualidade estrutural de execução de camadas de um pavimento com base em bacias deflectométricas, medidas a partir do uso da viga Benkelman, do FWD ou do LWD, que são instrumentos utilizados há bastante tempo no estudo do comportamento estrutural de pavimentos. Tais procedimentos visam complementar os controles de execução já comumente empregados em obras rodoviárias. A criação deste roteiro procede dos estudos e pesquisas realizados no âmbito do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Geotecnia da UnB, com ênfase no estudo de misturas asfálticas, métodos mecanístico-empíricos e controle tecnológico de obras de pavimentação.

Sumário

1.	Objetivo	154
----	----------	-----

2.	Definições	154
3.	Aplicabilidade	155
4.	Aparelhagem	155
5.	Causas de Distorções nas Medições	156
6.	Calibração de Equipamentos	156
7.	Procedimentos de Controle	156
8.	Referências	160

1. Objetivo

Este roteiro fixa o procedimento para a determinação de deflexões recuperáveis na superfície de pavimentos com o emprego da Viga Benkelman e de deflectômetros de impacto do tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)” ou “Light Weight Deflectometer (LWD)”. O objetivo é estabelecer metodologia que permita o controle em um número maior de pontos do que os controles tradicionais de construção, em menos tempo e custo menor, possibilitando uma visão geral do pavimento no sentido transversal e longitudinal, por meio da utilização dos conhecimentos da mecânica dos pavimentos.

2. Definições

Para os fins deste roteiro consideram-se as definições contidas nas normas DNIT indicadas no item 6, dentre outras:

2.1 Deflexão

Deslocamento vertical recuperável das camadas estruturais e do subleito em decorrência da aplicação de carregamento superficial, sendo dependente diretamente

da rigidez das camadas e utilizado para diferenciar os pavimentos em bom estado estrutural, dos debilitados.

2.2 Bacia deflectométrica

Medidas dos deslocamentos elásticos ou recuperáveis em vários pontos de influência próximos ao de aplicação da carga, que se reduz à medida em que se afasta do seu ponto de aplicação.

2.3 Segmento homogêneo

Segmento de rodovia de comprimento mínimo de 200 metros e máximo de 2000 metros que apresenta, dentro dos seus limites, similaridade em termos funcionais, estruturais e de tráfego.

2.4 Módulo de resiliência

Relação entre a tensão horizontal resultante da carga cíclica e a correspondente deformação horizontal resultante do deslocamento horizontal recuperável (resiliente), por ciclo.

2.5 Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa)

Programa de computador que realiza a verificação e o dimensionamento mecanístico-empírico de estruturas de pavimentos asfálticos, por meio da rotina AEMC de análise de camadas elásticas de múltiplas camadas. É capaz de realizar, por meio da ferramenta BackMeDiNa, a retroanálise dos módulos de resiliência das camadas de um pavimento a partir das bacias deflectométricas levantadas em campo.

3. Aplicabilidade

O processo de controle de qualidade estrutural baseia-se na determinação das características de deformabilidade das camadas do pavimento por meio de ensaios deflectométricos que são confrontados com os parâmetros adotados em projeto concebido por processos analíticos de cálculo. O acompanhamento da capacidade estrutural do pavimento durante a fase de construção permite levantar inferências acerca de sua capacidade de suportar os efeitos das cargas do tráfego a partir do

atendimento aos módulos de resiliência das camadas definidos em projeto. Assim, torna-se mais fácil a previsão de seu desempenho ao longo de sua vida de serviço.

O controle de qualidade estrutural de pavimentos funciona como processo complementar aos serviços de supervisão já estabelecidos no meio técnico, que possibilita dentre outros aspectos:

- o fornecimento de elementos que permite a correção das falhas que tenham ocorrido em alguma camada já construída, ou mesmo incorreções no projeto, podendo-se analisar a possibilidade de alteração do projeto, durante a execução, reforçando-se as camadas subsequentes;
- a possibilidade de reavaliação dos parâmetros adotados no dimensionamento, em função das propriedades elásticas determinadas in-situ;
- a possibilidade da execução de um controle mais detalhado, pois tem um custo relativamente baixo e de rápida execução;
- a facilitação na utilização de novos materiais e técnicas construtivas, dado que a análise é baseada na mecânica dos pavimentos;
- o fornecimento de elementos para que, após a conclusão da obra, se possível: prever o desempenho do pavimento, estimar as necessidades de restauração preventiva, considerar o efeito destrutivo do tráfego considerando os diversos tipos de eixos solicitantes e estabelecer um programa de monitoramento para manutenção de um banco de dados, visando o desenvolvimento e a implantação de um Sistema de Gerência de Pavimentos.

4. Aparelhagem

Para o levantamento das bacias deflectométrica estabelece o presente documento o uso da viga Benkelman (deflexões estáticas) e dos deflectômetros de impacto FWD e LWD.

4.1 Viga Benkelman

Consiste em uma viga articulada com distância determinada da ponta de prova à articulação e da articulação ao extensômetro, esta viga é solidarizada à outra viga, por meio de articulação, que se apoia no terreno.

4.2 Falling Weight Deflectometer (FWD)

Trata-se de um equipamento de alta precisão, utilizado para medir as deflexões dos pavimentos, quando submetidos a carregamentos de impacto. O equipamento foi projetado para que o pulso produzido pelo impacto da carga no pavimento possa simular uma deflexão na superfície do mesmo, de modo semelhante ao efeito causado pela passagem de uma carga de roda a uma velocidade entre 70 e 80 km/h.

4.3 Light Weight Deflectometer (LWD)

Trata-se de um equipamento com princípio de operação semelhante ao FWD quando adicionado como acessório o chamado “kit de geofones”, composto por um feixe de sensores composto por 2 (dois) geofones adicionais. Porém, devido às dimensões pode ser significativamente afetado pela rigidez do material e pela espessura da camada ensaiada, sendo recomendado para análise de camadas granulares e de solo, dada a sua praticidade, facilidade operacional e rapidez de ensaios e resultados.

5. Causas de Distorções nas Medições

- a) Posicionamento inadequado do equipamento ao solo, leitura incorreta ou avaria no equipamento. Nestes casos, a repetição do processo ou troca do equipamento são suficientes para corrigi-las;
- b) Geometria do segmento, quando se trata de rampas longitudinais, abaulamento transversal da plataforma, cortes e aterros. A presença de bueiros de greide, drenos sub-superficiais sob os pontos avaliados também podem contribuir para esta questão;
- c) Natureza dos materiais, onde durante os processos de exploração, mistura, transporte, distribuição e confecção, há alterações em suas características; e

- d) Excessos de umidade, má compactação ou a presença de solos saturados nas camadas subjacentes, induzem deflexões elevadas na medida em que reduzem a sua capacidade de suporte.

Para a tomada de decisão quanto à aceitação ou rejeição dos serviços, são necessárias amostragens no campo e ensaios laboratoriais para que se possa confirmar as anomalias e seu grau de severidade.

6. Calibração de Equipamentos

Durante a utilização da Viga Benkelman é necessário adotar medidas para eliminar situações que provoquem distorções no levantamento deflectométrico. Assim deve-se:

- Verificar, pela manhã, a pressão dos pneus;
- Ao lastrear o caminhão, fazê-lo com material seco e distribuí-lo em toda a área da caçamba ou carroceria. Cobri-lo permanentemente com lona;
- Verificar semanalmente a carga no eixo traseiro;
- Aferir a viga, no início das obras; e
- Atentar para que o cursor do extensômetro funcione livremente.

Já o cuidado básico a ser tomado com o FWD é a aferição do equipamento, principalmente dos sensores de carga e dos sismômetros / geofones. Tendo em vista a conversão dos deslocamentos em pulsos elétricos, para novamente serem interpretados como deslocamentos na central eletrônica.

7. Procedimentos de Controle

Com base na revisão bibliográfica e nos demais estudos realizados sugere-se a adoção das seguintes etapas para o controle deflectométrico da infraestrutura do pavimento.

7.1. Definição dos parâmetros de controle de Deflexão Máxima (D_0)

A definição dos parâmetros de controle de deflexão máxima aceitável deve ser realizada observando-se basicamente as hipóteses fixadas em projeto (D_{0C}), além

de aspectos inerentes ao processo de controle, como por exemplo, as incertezas envolvidas nos procedimentos dos ensaios. Por não ser considerado a deflexão máxima um critério de ruptura, trabalha-se o seu parâmetro de controle por meio de um intervalo de confiança para a aceitação de serviço, estabelecido de acordo com nível de confiabilidade exigido no projeto e a margem de erro pertinente ao tamanho da amostra utilizada em um trecho homogêneo. A inequação a seguir define o critério estatístico de aceitação, no qual a deflexão característica definida em projeto deve estar presente no intervalo de confiança obtido a partir do levantamento de campo.

$$\bar{D}_0 - \frac{Z \cdot \sigma}{\sqrt{n}} < D_{0c} < \bar{D}_0 + \frac{Z \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

onde:

- D_{0c} é a deflexão máxima característica de projeto em um ponto;
- \bar{D}_0 é a deflexão máxima média amostral;
- σ é o desvio padrão amostral; e
- Z é o coeficiente de desvio padrão adotado a partir do nível de confiabilidade desejado.

7.2. Seleção do nível de confiabilidade

Os critérios de confiabilidade a ser aplicado no controle de qualidade estrutural seguem mesmos critérios adotados pelo MeDiNa para cada tipo de via, cujo valor, no programa, é aplicado sobre o erro padrão dos dados utilizados na calibração das funções fadiga e de deformação permanente. Recomenda-se a adoção dos coeficientes apresentados na Tabela 1 para a determinação da margem de erro da deflexão máxima do pavimento a partir do ensaio deflectométrico executado.

Tabela 1 – Desvio padrão permitido para o nível de confiabilidade exigido

TIPO DE VIA	NÍVEL DE CONFIABILIDADE	COEFICIENTE SUGERIDO PARA DESVIO PADRÃO (Z)
Sistema Arterial Principal	95%	1,645
Sistema Arterial Primário	85%	1,037

Sistema Arterial Secundário	75%	0,674
Sistema Coletor Primário	85%	1,037
Sistema Coletor Secundário	75%	0,674
Sistema Local	65%	0,385

Fonte: Adaptado de ASSHTO (1993) e MeDiNa

7.3. Definição da amostra

Selecionar um local de ensaio de acordo com o projeto executado, que seja representativo do material total e esteja livre de possíveis interferências. Deve-se garantir que os ensaios sejam realizados em condições de aceite similares aos estabelecidos em ensaios convencionais de controle de execução.

Para cada segmento homogêneo, recomenda-se aplicar uma amostra de tamanho $n=12$, conforme valor de referência estabelecido na Norma DNER 277-PRO. Tal condição implica na adoção de um distanciamento de pontos de medição variando de 20 a 150 metros, a ser definido em conjunto com o agente fiscalizador da obra.

A título de exemplo, na Tabela 2 é possível verificar qual seria o intervalo de confiança das deflexões máximas medidas em determinado ponto de um segmento homogêneo com 12 amostras. Caso a deflexão máxima característica de projeto (D_{0c}) não esteja no intervalo obtido, medidas de correção no pavimento deverão ser adotadas para o aceite do segmento homogêneo, a exceção de quando o limite superior do intervalo for inferior a (D_{0c}).

Tabela 2 – Margem de erro permitido para o nível de confiabilidade exigido

NÍVEL DE CONFIABILIDADE	INTERVALO DE CONFIANÇA PARA AMOSTRA (n=12)
65%	$\bar{D}_0 - 0,111\sigma < D_{0c} < \bar{D}_0 + 0,111\sigma$
75%	$\bar{D}_0 - 0,195\sigma < D_{0c} < \bar{D}_0 + 0,195\sigma$
85%	$\bar{D}_0 - 0,299\sigma < D_{0c} < \bar{D}_0 + 0,299\sigma$
95%	$\bar{D}_0 - 0,475\sigma < D_{0c} < \bar{D}_0 + 0,475\sigma$

Fonte: ASSHTO (1993)

7.4. Medição em Campo

A seguir são apresentados procedimentos a serem observados para a execução das leituras das bacias deflectométricas em campo, de acordo como o equipamento adotado (viga Benkelman, FWD ou LWD).

7.4.1. Viga Benkelman

O posicionamento do caminhão obedecerá à tabela preconizada no item 5.2 do método DNER 024 – ME, com esse percorrendo a via sempre em rampa ascendente, de forma a considerar a concentração de cargas no eixo traseiro do veículo. Após definido os pontos para as medidas das deflexões, deve o operador executar as seguintes etapas sucessivas:

- i. Remover todo o material solto ou que não seja representativo do material a ser ensaiado.
- ii. Posicionar o ponto de prova da viga entre os pneus da roda dupla, tomando-se o cuidado de centrá-lo exatamente sob o eixo. Adota-se o sistema de referência, acoplado ao para-choque traseiro do caminhão, cuja distância ao eixo é marcada na viga, garantindo assim a perfeita centralização;
- iii. Soltar a trava da viga;
- iv. Ligar o vibrador e ajustar o pé traseiro da viga até que o extensômetro fique próximo do meio do curso;
- v. Fazer a leitura inicial; e
- vi. Deslocar o caminhão à frente pelas distâncias a serem computadas na bacia (e.g. 0, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 cm) e posteriormente, pelo menos, 10 metros do ponto inicial, para ajustes de valores.

As deflexões de ensaios DF1, DF2, DF3 ... DF_n são computadas em centésimo de milímetros (0,01mm).

7.4.2. FWD

O posicionamento do equipamento obedecerá à tabela preconizada no item 4.3 do método DNER 273 – PRO.

Após definido os pontos para as medidas das deflexões, deve o operador executar as seguintes etapas sucessivas:

- i. Remover todo o material solto ou que não seja representativo do material a ser ensaiado;
- ii. Soltar as travas de transporte;
- iii. Ligar todo o sistema;
- iv. Abrir arquivo no computador para armazenar os dados;
- v. Executar as operações de medidas na superfície do pavimento;
- vi. Fechar arquivo no computador utilizado para armazenar os dados;
- vii. Desligar todo o sistema; e
- viii. Acionar as travas de transportes.

As deflexões de ensaios DF1, DF2, DF3 ... DF_n (e.g. 0, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 cm) são computadas em milésimo de milímetros (0,001mm).

7.4.3. LWD

Após definido os pontos para as medidas das deflexões, deve o operador executar as seguintes etapas sucessivas:

- i. Remover todo o material solto ou que não seja representativo do material a ser ensaiado;
- ii. Ligar todo o sistema;
- ix. Abrir arquivo no computador para armazenar os dados;
- x. Liberar o pino de travamento para permitir o deslocamento do peso na haste;
- xi. Executar as operações de medidas na superfície do pavimento;
- xii. Fechar arquivo no computador utilizado para armazenar os dados;
- xiii. Desligar todo o sistema; e
- xiv. Travar o pino de deslocamento do peso na haste.

As deflexões de ensaios DF1, DF2 e DF3 (e.g. 0, 30 e 60 cm) são computadas em centésimos de milímetros (0,01mm).

7.4.4. Anotações Complementares

Além das leituras, algumas observações devem ser anotadas para auxiliar a interpretação dos valores calculados, tais como:

- Posicionamento da estação (seção em corte / aterro, ou seção mista).
- Trilha de roda interna ou externa.
- Temperatura do pavimento (em caso de revestimento betuminoso) e temperatura do ar.
- Umidade das camadas granulares

Estas anotações deverão constar da ficha de campo.

7.5. Retroanálise de bacias deflectométricas e previsão de desempenho do pavimento

A retroanálise por meio do BackMeDiNa constitui uma ferramenta de grande utilidade para obtenção do conjunto de módulos referentes às camadas do pavimento a partir de bacias de deflexão medidas em campo. Para estimar os módulos faz-se necessário a caracterização de cada camada do pavimento assim como as suas respectivas espessuras no segmento homogêneo avaliado. Na ausência de ensaios que possibilitem atribuir o valor do coeficiente de Poisson, pode-se optar por seguir valores sugeridos pelo próprio MeDiNa ou atribuídos pelo próprio projetista.

O manual do software indica que a retroanálise possui uma boa correlação entre a bacia medida e a calculada quando o erro for inferior a 5%, uma correlação razoável quando o erro variar de 5% a 10%, e a não existência de correlação satisfatória quando o erro for superior a 10%.

Obtidos os módulos resilientes de cada bacia deflectométrica retroanalizada é possível estimar o desempenho do pavimento de acordo com a vida útil de projeto estabelecida. No que se refere ao controle de execução da estrutura, observar que o MeDiNa somente considera a análise do pavimento finalizado. O programa emite alerta de necessidade de ajuste da composição do pavimento quando durante a análise qualquer camada do

pavimento apresentar deformação permanente acima do limite de 5% ou trincamento superior a 30% da área do pavimento, a partir da definição da previsão de tráfego de veículos e de vida útil de projeto. O MeDiNa também apresenta condição de aceite específica para o caso de presença de camada estabilizada na estrutura do pavimento, na qual a camada que oferece suporte a essa não deve possuir uma deflexão superior a 0,70 mm.

7.5.1. Principais limitações na retroanálise

A seguir são apresentadas algumas considerações com relação as principais limitações no emprego do BackMeDiNa.

a) Não Unicidade do conjunto de Módulos

Devido ao emprego de técnicas diferentes e dos diversos critérios de convergência adotados para obtenção das soluções, podem existir várias combinações de módulos que levem a uma bacia de deflexões, de modo que o conjunto de módulos obtido no BackMeDiNa para cada situação pode não ser os mesmos obtidos por outros programas de retroanálise.

b) Modelagem Teórica

Existem várias simplificações adotadas pelo BackMeDiNa na modelagem da estrutura que induz a erros na análise. Considera-se o pavimento como um sistema multicamadas, composto por materiais isotrópicos, homogêneos e perfeitamente elásticos. Entretanto estas condições ideais não representam o comportamento real do pavimento em campo já que além das formações elásticas, acontecem deformações viscosas, viscoelásticas e plásticas. O subleito, em geral, torna-se mais rígido com aumento da profundidade e geralmente é tratado como camada de módulo constante. Além disso, o programa trata uma carga aplicada dinamicamente como se fosse estática.

c) Não Linearidade

A não linearidade no comportamento tensão versus deformação resulta em variações do módulo de resiliência

com o estado de tensões, o que ocorre geralmente ao longo da distância horizontal e vertical a partir da área carregada (Macêdo, 1996, apud Mahoney et al., 1989).

d) Espessura das Camadas

Vários estudos de sensibilidade têm demonstrado que a consideração de espessura incorreta para as camadas do pavimento pode levar a erros nos módulos retroanalizados. Segundo Macêdo (1996), citando Ullidtz & Stubstad (1985), a espessura de cada camada é muito importante para o cálculo dos módulos, acrescentando os autores que nos casos em que a espessura é superestimada os módulos correspondentes obtidos serão subestimados, mesmo que a rigidez permaneça razoavelmente correta.

e) Posição da Camada Rígida no Subleito

O BackMeDiNa considera o subleito como semi-infinito. Em situações locais em que existam camadas rochosas ou de argilas rígidas a poucos metros de sua superfície, os módulos retroanalizados podem resultar em valores incorretos para as camadas superiores (Camarini et al., 2019).

f) Efeitos Dinâmicos

A análise de dados deflectométricos obtidos com equipamentos dinâmicos envolve formulação empírica ou utilização de modelos elásticos e/ou viscoelásticos numa análise estática dentro do processo de retroanálise. As correlações empíricas são limitadas às condições para as quais foram desenvolvidas ao passo que a análise estática não leva em consideração a inércia, ou seja, admite que a resposta dinâmica não é diferente da resposta do mesmo pavimento submetido a carregamento estático.

8. Referências

- AASHTO. American Association of State Highway and Transportation Officials (1993) Guide for Design of Pavement Structures: Appendix J – Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences. AASHTO, Washington, D.C., USA.
- Camarini, G. C., Silva Junior, C. A. P., Fontenele, H. B. (2019). Avaliação de bacias de deflexão retroanalizadas pelo programa BackMeDiNa. In: XXXIII Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte, ANPET. Balneário Camboriú, SC, pp. 1133-1144.
- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER 277 – PRO. Metodologia para controle estatístico de obras e serviços. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. DNER 024 – PRO. Requisitos para a qualidade na execução de obras rodoviárias. Rio de Janeiro, 2004.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 11 – PRO. Gestão de qualidade em obras rodoviárias. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. DNIT 013 – ME. Pavimento – determinação das deflexões pela Viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. DNIT 133 – ME. Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman. Rio de Janeiro, 2010.
- _____. DNIT 273 – PRO. Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “falling weight deflectometer - FWD” - Procedimento.
- _____. DNIT 405 – ME. Controle de compactação em aterros com o equipamento gamadensímetro. Rio de Janeiro, 2017.
- _____. DNIT 417 – ME. Solos – Controle de compactação com equipamento densímetro eletromagnético. Rio de Janeiro, 2019.
- Ferri, S. (2014). Critérios de aceitação e controle da qualidade da execução de camadas de fundação de pavimentos novos através de métodos deflectométricos. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 331 p.
- Macêdo, J. A. G. (1996). Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 478 p.
- Preussler, L. A. (2007). Contribuição ao estudo da deformabilidade de camadas de pavimento. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 129 p.
- Rodrigues, A. (2023). Uso do MeDiNa em soluções básicas de pavimentos asfálticos no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 212 p.
- Silva, C.A.R. (1999). Controle Deflectométrico na Execução de Camadas de Pavimento. In: 3º Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço. Belém, PA, pp.85-89.

ANEXOS

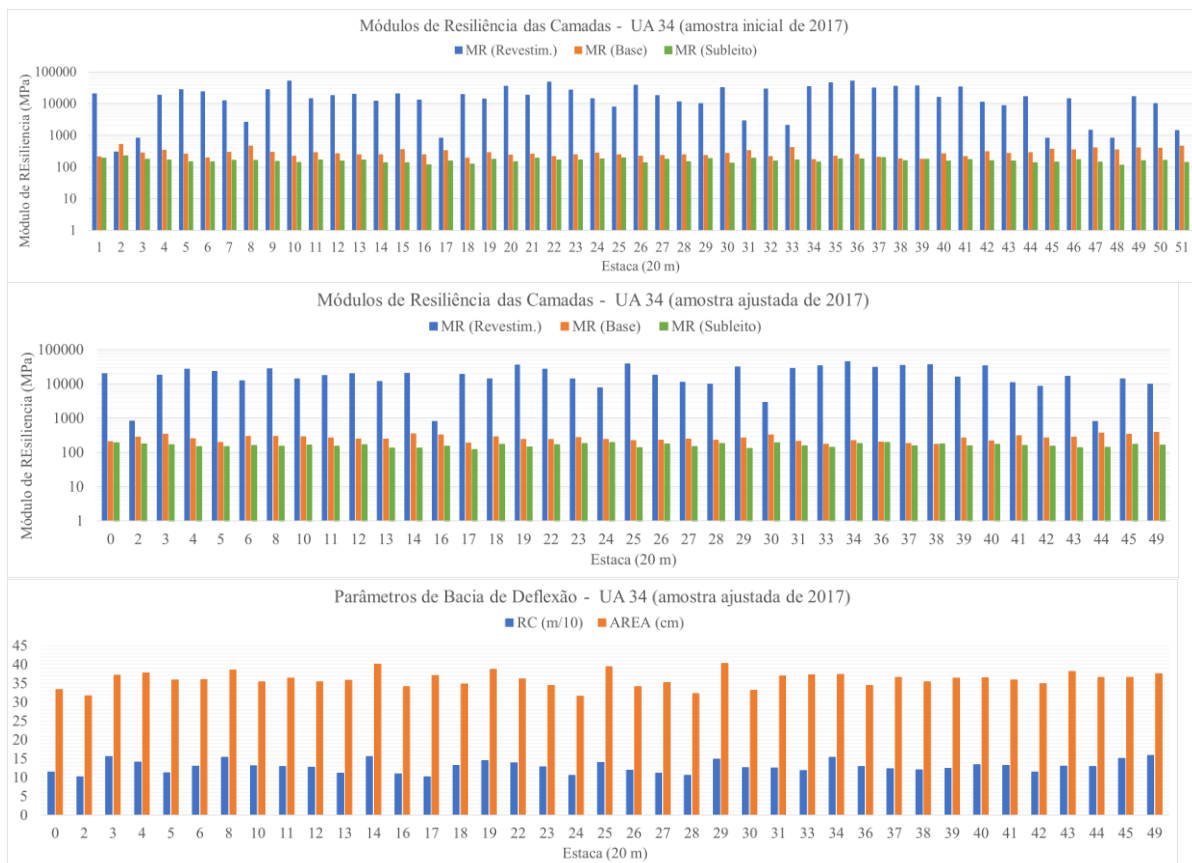
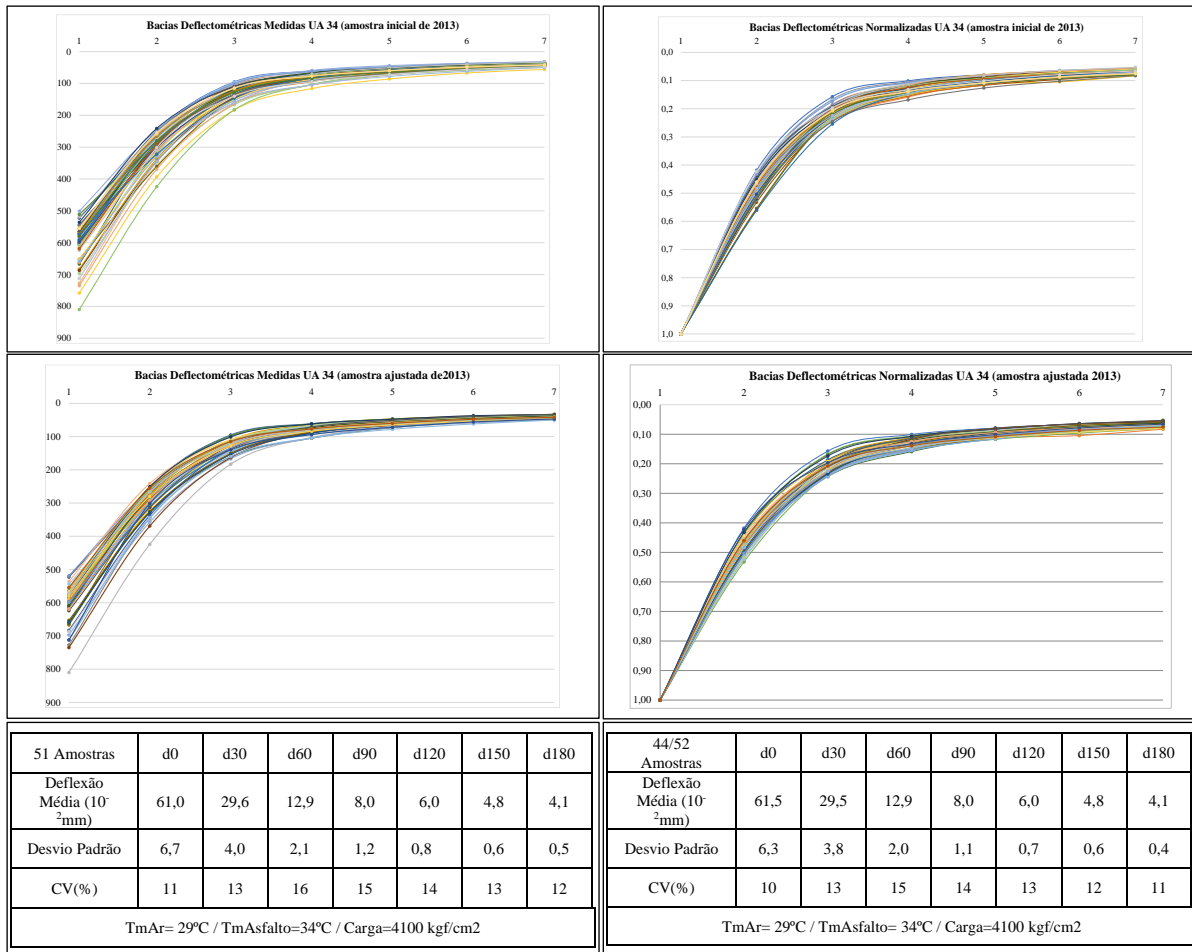
Anexo I – Parâmetros da Unidade de Amostragem 34

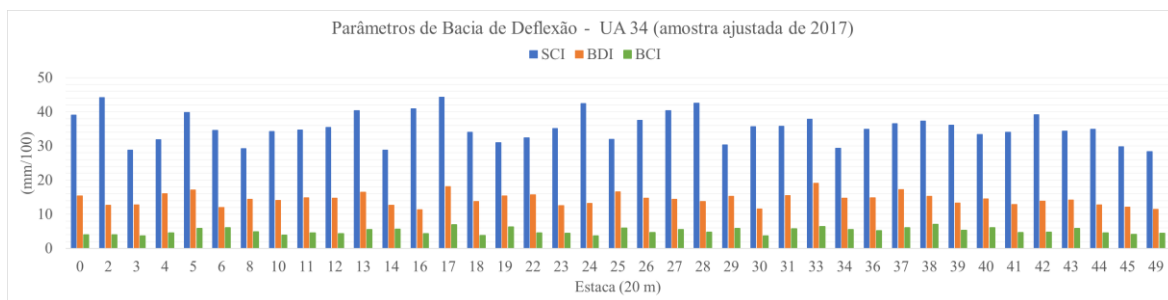


ESTRUTURA DO PAVIMENTO (2013)						
Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo Médio (MPa) camada granular única	Módulo Médio (MPa) camada granular dividida ¹	Coef. Poisson	Aderência
1	Cam. Asf.	3	31263	4151	0,30	Não Aderido
2	Cam. Gran	37	235	480	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	152	148	0,45	-
Limite de Erro (RMS) tolerável = 10% (outliers excluídos para nível de confiança de 95% - Media +/- 2 DP)						
Amostra 44/52 Para amostras de 30 ou mais valores, em geral, a aproximação já será suficiente boa, para se poder utilizar este resultado (estacas excluídas da amostra são as em vermelho na tabela abaixo)						

1- limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES

Est.	Data de Execução	Temp. do Ar (° C)	Temp. do Pav. (° C)	Carga (KN)	MR (Rev.)	MR (Base)	MR (Subleito)	RMS (%)	RC (m/10)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
0	30/08/2013	26,8	31,3	4100	23329	223	193	9,3	12,78	33,77	35,2	15,8	3,4
1	29/08/2013	34,3	40,8	4100	30092	260	163	14,2	15,46	37,13	29,1	17,3	3,5
2	30/08/2013	26,2	31,3	4100	19903	303	169	10,1	14,80	36,19	30,4	14,6	3,3
3	29/08/2013	32,5	40,8	4100	25107	322	145	9,9	16,19	39,12	27,8	15,1	4,3
4	30/08/2013	26,3	31,3	4100	33609	252	157	7,1	15,25	38,06	29,5	16,5	4,2
5	29/08/2013	31,9	40,8	4100	38121	181	156	3,2	12,97	37,14	34,7	18,3	5,6
6	30/08/2013	26,6	31,3	4100	26042	269	152	6,4	14,47	37,65	31,1	15,5	4,6
7	29/08/2013	31,8	40,8	4100	38581	276	143	7,6	17,05	40,40	26,4	16,5	5
8	30/08/2013	26,9	31,3	4100	19293	312	157	7,9	14,85	37,25	30,3	14,4	4
9	29/08/2013	31,6	40,8	4100	18527	301	141	5,5	14,20	38,20	31,7	14,9	4,7
10	30/08/2013	27,2	31,3	4100	45780	260	173	6,9	17,51	38,66	25,7	15,5	4
11	29/08/2013	31,4	40,8	4100	19541	229	152	5,3	11,97	35,64	37,6	16,3	4,8
12	30/08/2013	27,6	31,3	4100	23686	237	167	6,2	13,08	35,60	34,4	15,7	4,3
13	29/08/2013	31,4	40,8	4100	26245	251	126	3	13,43	39,49	33,5	16,6	5,6
14	30/08/2013	28	31,3	4100	30792	331	157	5,3	17,31	39,39	26	13,6	4,3
15	29/08/2013	31,4	40,8	4100	30701	199	109	4,1	12,33	40,09	36,5	21	6,7
16	30/08/2013	28,5	31,3	4100	19855	288	157	6,9	14,15	36,83	31,8	14,9	4
17	29/08/2013	31,1	40,8	4100	48624	129	120	1,5	11,66	39,39	38,6	24,1	8
18	30/08/2013	28,7	31,3	4100	36744	223	167	6,3	14,75	37,26	30,5	16,9	4,6
19	29/08/2013	31	40,8	4100	32829	270	135	4,2	15,15	39,89	29,7	16,1	5,3
20	30/08/2013	28,9	31,3	4100	26573	223	188	7,4	13,27	34,61	33,9	16	3,7
21	29/08/2013	31,1	40,8	4100	48655	151	159	3,2	13,01	37,45	34,6	20,1	6
22	30/08/2013	28,8	31,3	4100	34545	231	161	6,2	14,56	37,37	30,9	16,7	4,5
23	29/08/2013	31,1	40,8	4100	69286	227	171	6,3	19,91	40,71	22,6	16,8	4,5
24	30/08/2013	28,7	31,3	4100	51088	240	203	5,9	17,65	37,43	25,5	14,7	4
25	29/08/2013	31,1	40,8	4100	35869	167	141	1,1	11,81	37,35	38,1	19,5	6,2
26	30/08/2013	27,5	28,2	4100	46896	195	188	3,4	14,80	36,66	30,4	16,4	4,7
27	29/08/2013	31	35,6	4100	38581	234	141	3,2	14,90	39,41	30,2	16,9	5,4
28	30/08/2013	25,3	28,2	4100	28225	234	193	8,7	13,98	34,86	32,2	15,5	3,5
29	29/08/2013	30,5	35,6	4100	38120	200	124	2	13,24	39,79	34	19	6,3
30	30/08/2013	25,6	28,2	4100	20014	318	173	6,3	15,25	36,63	29,5	13,1	3,9
31	29/08/2013	30,6	35,6	4100	47482	159	149	1,7	13,12	38,08	34,3	20,1	6
32	30/08/2013	25,9	28,2	4100	17716	299	169	8	14,24	35,96	31,6	14,1	3,6
33	29/08/2013	30,5	35,6	4100	68462	148	147	2,1	15,46	40,35	29,1	21,4	6,1
34	30/08/2013	26	28,2	4100	64416	203	177	3,5	17,24	39,15	26,1	16,2	5,3
35	29/08/2013	30,4	35,6	4100	54967	191	175	5,8	16,13	38,25	27,9	17,7	5,1
36	30/08/2013	26,2	28,2	4100	28077	229	193	6,2	13,64	34,78	33	15	3,9
37	29/08/2013	30,6	35,6	4100	63631	125	145	2,1	12,30	38,47	36,6	20,6	7,7
38	30/08/2013	26,3	28,2	4100	57715	160	173	0,9	14,47	37,81	31,1	18,7	5,5
38	29/08/2013	30,6	35,6	4100	50346	180	147	1,3	13,72	38,84	32,8	17,4	6,5
39	29/08/2013	30,7	35,6	4100	44663	192	141	0,9	13,68	39,07	32,9	17,5	6,4
40	30/08/2013	26,8	28,2	4100	30854	231	161	4,7	13,72	36,92	32,8	15,4	5,3
41	29/08/2013	30,9	35,6	4100	37663	239	147	6,5	15,15	38,85	29,7	16,7	5,3
42	30/08/2013	27	28,2	4100	31997	225	157	6,4	13,80	37,12	32,6	16,8	4,8
43	29/08/2013	30,9	35,6	4100	24689	352	138	7	16,98	40,33	26,5	14,7	4,2
44	30/08/2013	27,2	28,2	4100	18394	314	152	8,3	14,71	37,50	30,6	14,3	4,3
45	29/08/2013	31	35,6	4100	79204	187	149	2,4	17,86	41,63	25,2	17,6	6,3
46	30/08/2013	27,4	28,2	4100	21434	307	145	8,6	15,00	38,28	30	15,2	4,4
47	29/08/2013	31	35,6	4100	21110	235	121	5	12,23	38,43	36,8	18,4	5,6
48	30/08/2013	27,5	28,2	4100	20109	316	159	9,3	15,20	37,24	29,6	14,5	3,7
49	29/08/2013	31	35,6	4100	6586	267	133	6,9	10,95	35,56	41,1	16,1	4,6
50	30/08/2013	27,6	28,2	4100	17282	327	159	9,2	12,78	37,12	29,9	14	3,8





ESTRUTURA DO PAVIMENTO (2017)						
Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo Médio (Mpa) camada granular única	Módulo Médio (Mpa) camada granular dividida¹	Coef. Poisson	Aderência
1	Cam. Asf.	3	17827	2854	0,30	Não Aderido
2	Cam. Gran.	37	259	460	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	156	152	0,45	-

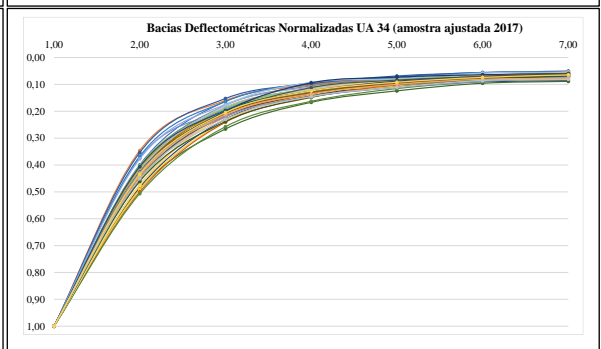
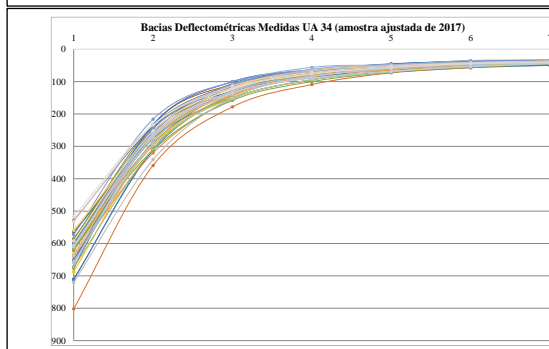
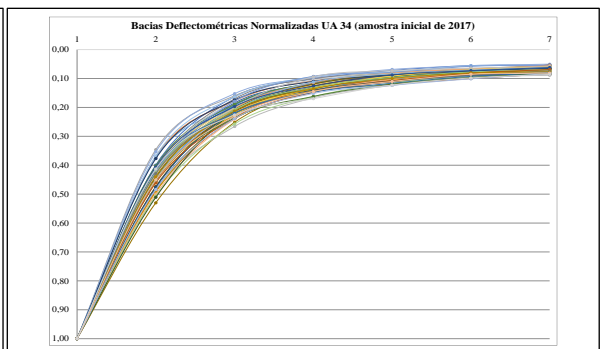
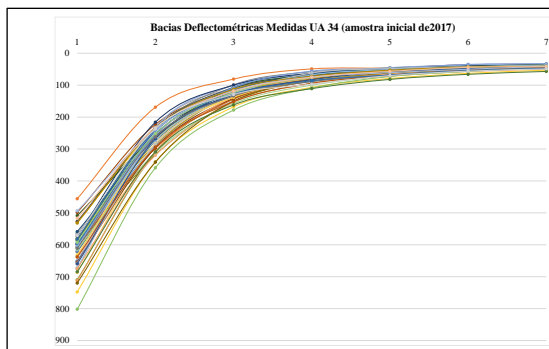
Limite de Erro (RMS) tolerável = 10%
(outliers excluídos para nível de confiança de 95% - Média +/- 2 DP)

Amostra 39/51
Para amostras de 30 ou mais valores, em geral, a aproximação já será suficiente boa, para se poder utilizar este resultado (estacas excluídas da amostra são as em vermelho na tabela abaixo)

2- limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES

Est.	Data de Execução	Temp. do Ar (° C)	Temp. do Pav. (° C)	Carga (KN)	MR (Rev.)	MR (Base)	MR (Subleito)	RMS (%)	RC (m/10)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
0	12/06/2017	25,1	34	4100	20153	208	188	5,1	11,51	33,39	39,1	15,4	4
1	12/06/2017	22,9	30,3	4100	297	517	226	14,8	15,68	33,06	28,7	8,8	3,2
2	12/06/2017	25	34	4100	827	279	175	7,8	10,18	31,69	44,2	12,6	4
3	12/06/2017	23	30,3	4100	18285	340	167	6,2	15,63	37,23	28,8	12,8	3,7
4	12/06/2017	24,9	34	4100	27364	257	148	7,7	14,15	37,82	31,8	16	4,5
5	12/06/2017	23	30,3	4100	23622	196	148	2,6	11,31	35,89	39,8	17,1	5,8
6	12/06/2017	24,9	34	4100	12473	294	161	5,9	13,01	36,07	34,6	12	6
7	12/06/2017	22,7	29,7	4100	2610	455	163	10,1	16,30	37,42	27,6	10,9	4,2
8	12/06/2017	24,8	34	4100	27558	292	150	9,5	15,41	38,56	29,2	14,4	4,9
9	12/06/2017	22,6	29,7	4100	51089	224	139	4,4	15,96	40,60	28,2	16,7	6,5
10	12/06/2017	25,4	34	4100	14180	286	165	7,3	13,12	35,39	34,3	14,1	3,9
11	12/06/2017	22,2	29,7	4100	17822	267	153	4,6	12,97	36,37	34,7	14,8	4,5
12	12/06/2017	25,2	34	4100	19928	247	167	4,1	12,71	35,47	35,4	14,7	4,3
13	12/06/2017	21,9	29,7	4100	11966	246	134	8,5	11,14	35,86	40,4	16,5	5,5
14	12/06/2017	25,5	34	4100	20370	356	134	6,1	15,63	40,16	28,8	12,6	5,6
15	12/06/2017	21,9	29,7	4100	12797	243	117	4,7	11,06	37,56	40,7	17,3	6,1
16	12/06/2017	25,6	34	4100	816	328	153	3,5	11,00	34,16	40,9	11,3	4,3
17	12/06/2017	21,9	25,3	4100	19292	188	122	3,1	10,16	37,13	44,3	18,1	6,9
18	12/06/2017	25,6	34	4100	14010	288	173	8,8	13,24	34,90	34	13,7	3,8
19	12/06/2017	21,5	25,3	4100	35432	241	145	4,8	14,52	38,81	31	15,4	6,3
20	12/06/2017	24,9	37,5	4100	18516	257	190	11,5	13,12	33,90	34,3	13,9	4,1
21	12/06/2017	21,6	25,3	4100	48069	216	165	1,5	15,25	38,49	29,5	15,6	5,2
22	12/06/2017	25,1	37,5	4100	26890	244	167	7,7	13,89	36,24	32,4	15,7	4,5
23	12/06/2017	21,6	25,3	4100	14182	276	181	8,3	12,82	34,45	35,1	12,5	4,4
24	12/06/2017	25	37,5	4100	7800	243	195	5	10,61	31,65	42,4	13,2	3,6
25	12/06/2017	21,6	25,3	4100	38582	222	137	1,2	14,06	39,45	32	16,6	5,9
26	12/06/2017	25,5	37,5	4100	18167	232	175	7,5	12,00	34,20	37,5	14,7	4,6
27	12/06/2017	21	25,3	4100	11388	247	148	2,1	11,14	35,26	40,4	14,4	5,5
28	12/06/2017	25,8	37,5	4100	10077	231	183	7,2	10,59	32,34	42,5	13,7	4,7
29	12/06/2017	20,7	25,3	4100	31742	270	131	1,6	14,85	40,36	30,3	15,3	5,8
30	12/06/2017	25,5	37,5	4100	2904	328	188	9	12,61	33,19	35,7	11,6	3,7

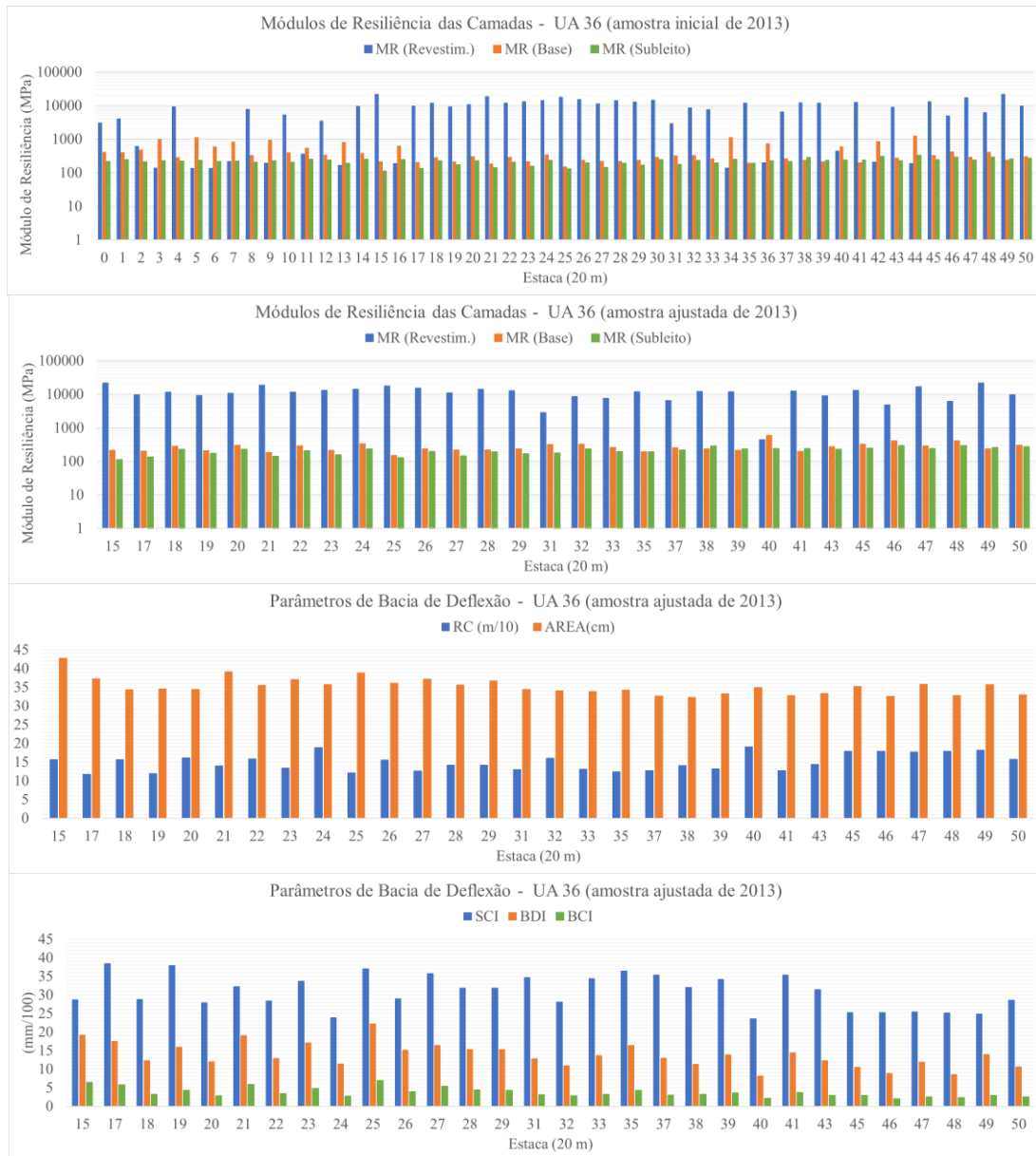
31	12/06/2017	21,4	25,3	4100	28692	214	155	3	12,57	36,97	35,8	15,5	5,7
32	12/06/2017	25,6	37,5	4100	2094	411	165	11,5	15,25	36,52	29,5	12,3	3,5
33	12/06/2017	21,3	25,3	4100	34147	173	141	3,1	11,87	37,25	37,9	19,1	6,4
34	12/06/2017	26	37,5	4100	45222	222	179	6,2	15,36	37,38	29,3	14,7	5,5
35	12/06/2017	20,9	25,3	4100	51704	254	181	5,7	18,07	38,78	24,9	15,1	4
36	12/06/2017	26	37,5	4100	30986	203	197	7	12,89	34,44	34,9	14,8	5,2
37	12/06/2017	20,3	27	4100	34995	183	157	2,5	12,33	36,57	36,5	17,2	6
38	12/06/2017	26,9	37,5	4100	36307	176	175	9,1	12,06	35,43	37,3	15,3	7
39	12/06/2017	20,1	27	4100	16031	264	155	1,6	12,47	36,43	36,1	13,3	5,3
40	12/06/2017	25,7	37,5	4100	33683	216	171	5	13,47	36,50	33,4	14,5	6
41	12/06/2017	21,5	27	4100	11110	308	159	6,3	13,24	35,95	34	12,9	4,6
42	12/06/2017	26,8	37,5	4100	8643	270	153	4,1	11,48	34,98	39,2	13,8	4,7
43	12/06/2017	21,4	27	4100	16666	282	136	2,2	13,08	38,18	34,4	14,2	5,8
44	12/06/2017	26,5	37,5	4100	816	370	141	6,6	12,89	36,63	34,9	12,8	4,5
45	12/06/2017	21,2	27	4100	14289	344	171	7,8	15,10	36,60	29,8	12,1	4,1
46	12/06/2017	26,6	37,5	4100	1461	409	143	8,7	13,16	36,19	34,2	11,2	4,2
47	12/06/2017	21,6	27	4100	816	352	115	6,6	11,97	38,06	37,6	14,7	5,1
48	12/06/2017	26,7	37,5	4100	16682	409	159	8,3	17,65	38,96	25,5	12,1	4,3
49	12/06/2017	21,5	27	4100	10038	391	163	7	15,85	37,60	28,4	11,4	4,4
50	12/06/2017	26,2	37,5	4100	1430	453	139	9,3	13,43	36,73	33,5	10,7	3,2



51 Amostras	d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
Deflexão Média (10 ⁻² mm)	61,3	26,9	12,7	7,8	5,9	4,7	4,1
Desvio Padrão	6,8	3,6	2,0	1,3	0,9	0,7	0,5
CV(%)	11	13	15	17	15	14	13
TmAr= 24°C / TmAsfalto= 32°C / Carga=4100 kgf/cm2							

39/51 Amostras	d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
Deflexão Média (10 ⁻² mm)	62,6	27,2	12,8	7,8	5,8	4,6	4,0
Desvio Padrão	5,7	3,2	1,8	1,2	0,8	0,5	0,4
CV(%)	9	12	14	15	13	12	10
TmAr= 24°C / TmAsfalto= 32°C / Carga=4100 kgf/cm2							

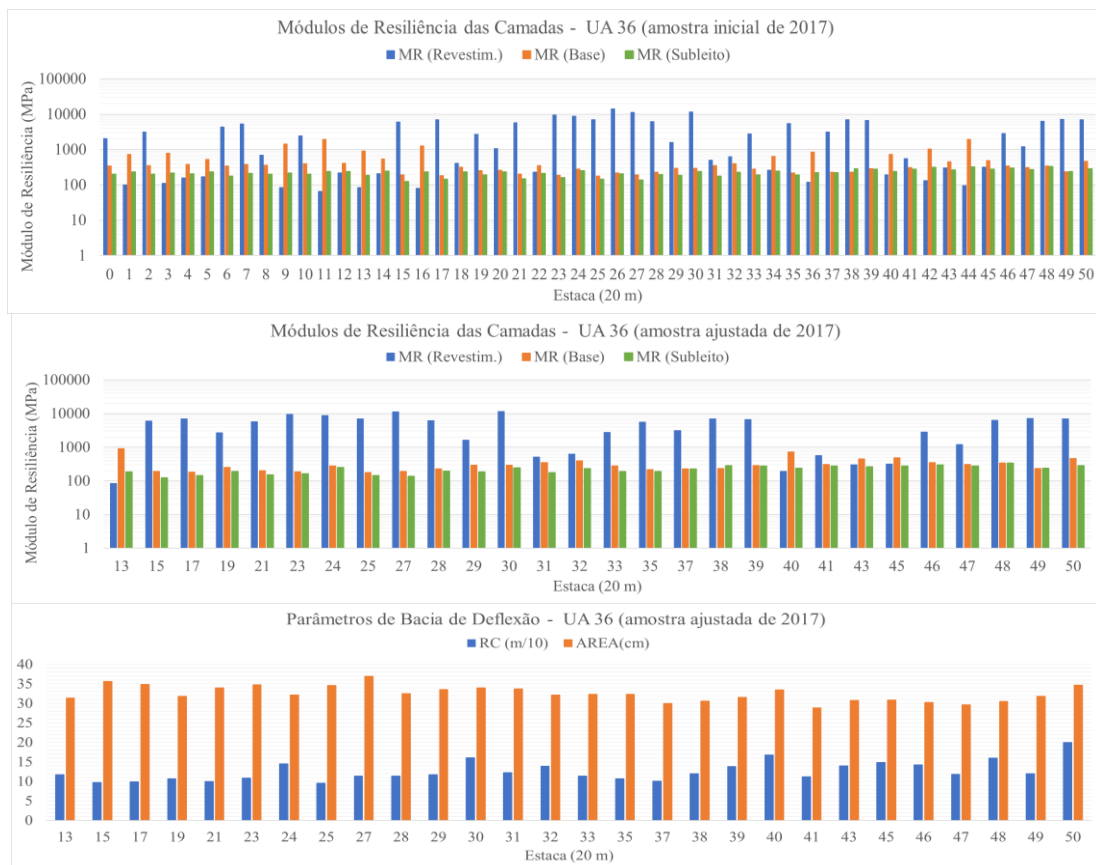
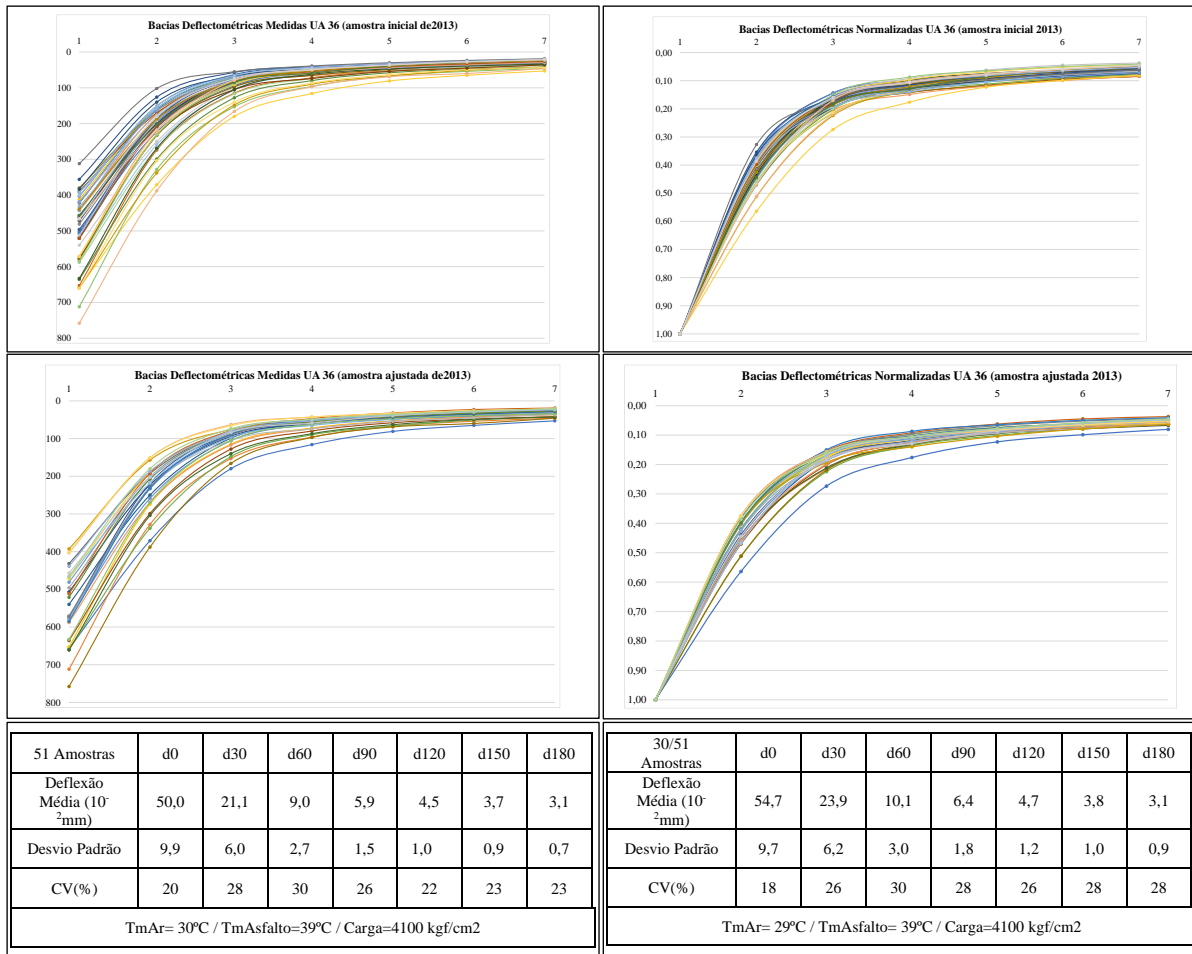
Anexo II – Parâmetros da Unidade de Amostragem 36

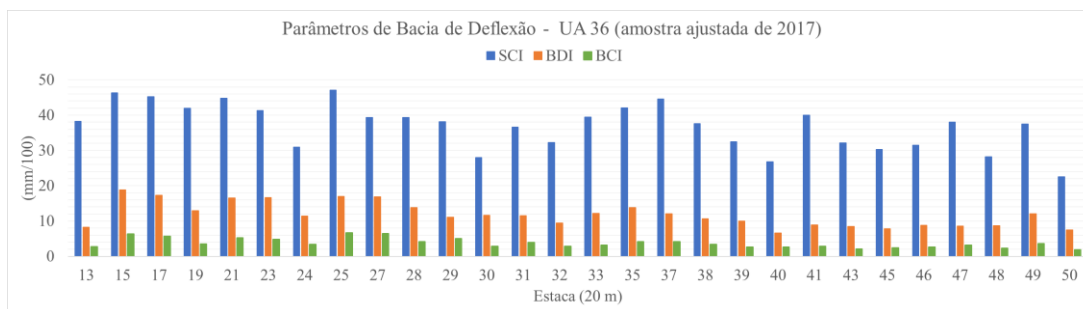


ESTRUTURA DO PAVIMENTO (2013)						
Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo Médio (Mpa) camada granular única	Módulo Médio (Mpa) camada granular dividida ¹	Coef. Poisson	Aderência
1	Cam. Asf.	4	12348	5693	0,30	Não Aderido
2	Cam. Gran	41	250	410	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	197	190	0,45	-
Limite de Erro (RMS) tolerável = 10% (outliers excluídos para nível de confiança de 95% - Média +/- 2 DP)						
Amostra 30/51 Para amostras de 30 ou mais valores, em geral, a aproximação já será suficiente boa, para se poder utilizar este resultado (estacas excluídas da amostra são as em vermelho na tabela abaixo)						

3- limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES

Est.	Data de Execução	Temp. do Ar (° C)	Temp. do Pav. (° C)	Carga (KN)	MR (Rev.)	MR (Base)	MR (Subleito)	RMS (%)	RC (m/10)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
0	05/09/2013	33,2	37,5	4100	3086	405	217	11,1	16,36	34,30	27,5	10,3	2,8
1	05/09/2013	38	40,3	4100	4022	400	244	12,8	16,73	33,29	26,9	10,1	2,3
2	05/09/2013	30,1	37,5	4100	609	470	212	10,4	16,61	34,80	27,1	10,4	2,2
3	05/09/2013	33,5	40,3	4100	139	977	229	12,4	17,72	33,86	25,4	8,4	2
4	05/09/2013	29,2	37,5	4100	9164	280	222	10,9	14,66	33,57	30,7	12,7	2,9
5	05/09/2013	32,9	40,3	4100	137	1112	232	13,9	19,15	34,47	23,5	8,7	1,9
6	05/09/2013	28,9	37,5	4100	134	590	217	16,1	13,55	31,81	33,2	11,4	1,9
7	05/09/2013	32,6	40,3	4100	216	827	222	13,7	20,55	36,09	21,9	9,4	2,1
8	05/09/2013	28,6	37,5	4100	7727	324	203	10,5	15,52	34,73	29	12,2	3
9	05/09/2013	32,4	40,3	4100	191	936	225	13,4	20,83	35,92	21,6	9	2
10	05/09/2013	28,4	37,5	4100	5358	400	206	10,9	17,18	35,58	26,2	10,6	3
11	05/09/2013	32,4	40,3	4100	361	543	253	13,9	17,24	32,99	26,1	9,3	2
12	05/09/2013	28	37,5	4100	3492	331	238	14,1	14,02	31,78	32,1	11,2	2,3
13	05/09/2013	32,3	40,3	4100	164	811	188	11,1	17,72	36,20	25,4	9,8	2,5
14	05/09/2013	27,8	37,5	4100	9393	380	253	14,2	18,52	34,12	24,3	10,9	1,9
15	05/09/2013	32,2	40,3	4100	21529	212	113	3,2	15,68	42,77	28,7	19,1	6,4
16	05/09/2013	27,7	37,5	4100	189	631	247	13,3	15,85	32,17	28,4	8,9	2,1
17	05/09/2013	32,1	40,3	4100	9727	204	135	3,5	11,72	37,29	38,4	17,5	5,7
18	05/09/2013	27,6	37,5	4100	11695	279	228	8,2	15,63	34,32	28,8	12,3	3,2
19	05/09/2013	31,8	40,3	4100	9164	210	173	5,1	11,87	34,53	37,9	15,9	4,3
20	05/09/2013	27,5	37,5	4100	10741	304	228	8,1	16,13	34,40	27,9	12	2,8
21	05/09/2013	31,6	40,3	4100	18813	184	141	3,1	13,98	39,14	32,2	19	5,8
22	05/09/2013	27,4	37,5	4100	11695	287	203	8,7	15,85	35,53	28,4	12,9	3,4
23	05/09/2013	31,4	40,3	4100	13216	211	155	6,7	13,35	37,03	33,7	17,1	4,8
24	05/09/2013	27,3	37,5	4100	14047	339	235	9,8	18,83	35,69	23,9	11,4	2,7
25	05/09/2013	31,2	40,3	4100	17712	149	129	4,5	12,16	38,85	37	22,2	6,9
26	05/09/2013	27,1	37,5	4100	15300	238	195	8,8	15,52	36,06	29	15,1	3,9
27	05/09/2013	31,2	40,3	4100	11138	217	145	3,8	12,61	37,13	35,7	16,4	5,3
28	05/09/2013	27	37,5	4100	14047	220	190	7,7	14,15	35,59	31,8	15,3	4,4
29	05/09/2013	29,6	38,7	4100	12894	235	169	5,2	14,15	36,63	31,8	15,3	4,3
30	05/09/2013	27	37,5	4100	14389	284	247	10	17,11	34,47	26,3	12,4	2,7
31	05/09/2013	30,3	38,5	4100	2868	316	175	8,3	12,97	34,40	34,7	12,8	3,1
32	05/09/2013	26,9	37,5	4100	8624	326	232	7,1	16,01	34,07	28,1	10,9	2,8
33	05/09/2013	30,2	38,5	4100	7580	260	195	6,3	13,08	33,85	34,4	13,6	3,2
34	05/09/2013	26,9	37,5	4100	139	1111	253	11	18,52	33,13	24,3	7,3	1,8
35	05/09/2013	30	38,5	4100	11841	194	192	7	12,36	34,19	36,4	16,4	4,3
36	05/09/2013	26,8	37,5	4100	198	734	225	10	17,65	34,33	25,5	8,6	2,2
37	05/09/2013	29,7	38,5	4100	6512	257	217	6	12,75	32,70	35,3	13	3
38	05/09/2013	26,8	37,5	4100	12280	236	287	4	14,06	32,26	32	11,3	3,2
39	05/09/2013	29,6	38,5	4100	11987	214	232	1,6	13,16	33,26	34,2	13,8	3,6
40	05/09/2013	26,8	37,5	4100	442	602	241	6,5	19,07	34,89	23,6	8,1	2,1
41	05/09/2013	29,5	38,5	4100	12434	198	241	1,8	12,75	32,72	35,3	14,4	3,7
42	05/09/2013	26,8	37,5	4100	208	848	305	10,7	19,57	32,15	23	6,9	1,6
43	05/09/2013	29,4	38,5	4100	9055	274	228	6,1	14,33	33,34	31,4	12,3	2,9
44	05/09/2013	26,8	37,5	4100	188	1227	330	7	21,43	31,97	21	4,7	1,6
45	05/09/2013	29,4	38,5	4100	13055	329	244	3,5	17,86	35,19	25,2	10,5	2,9
46	05/09/2013	26,8	37,5	4100	4860	415	291	8,9	17,86	32,53	25,2	8,8	2
47	05/09/2013	29,3	38,5	4100	17074	285	241	5,8	17,72	35,78	25,4	11,9	2,5
48	05/09/2013	26,8	37,5	4100	6129	405	291	6,5	17,93	32,80	25,1	8,5	2,3
49	05/09/2013	29,3	38,5	4100	21792	238	256	4,5	18,15	35,73	24,8	13,9	2,9
50	05/09/2013	26,7	37,5	4100	9742	304	268	5,4	15,73	32,93	28,6	10,6	2,5





ESTRUTURA DO PAVIMENTO (2017)						
Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo Médio (Mpa) camada granular única	Módulo Médio (Mpa) camada granular dividida ⁴	Coef. Poisson	Aderência
1	Cam. Asf.	4	4479	1554	0,30	Não Aderido
2	Cam. Gran	41	272	400	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	203	198	0,45	-

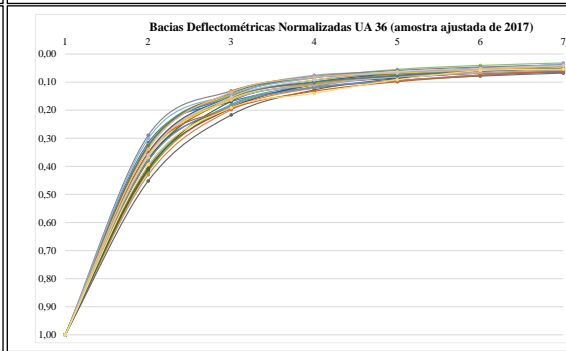
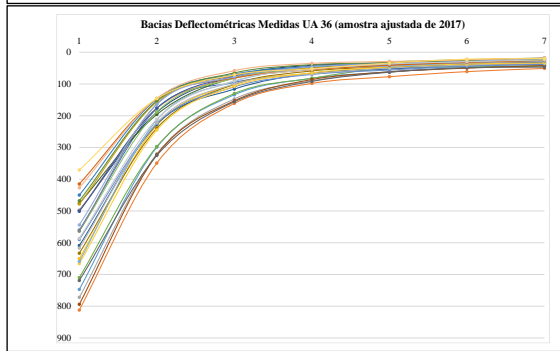
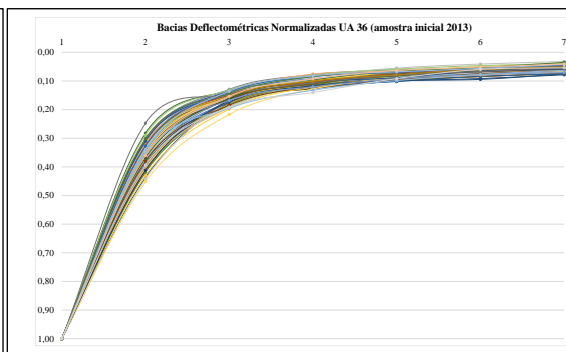
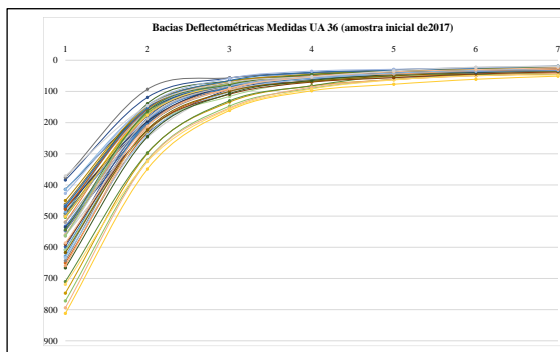
Limite de Erro (RMS) tolerável = 10%
(outliers excluídos para nível de confiança de 95% - Média +/- 2 DP)

Amostra 28/51
Para amostras de 30 ou mais valores, em geral, a aproximação já será suficiente boa, para se poder utilizar este resultado (estacas excluídas da amostra são as em vermelho na tabela abaixo)

4- limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES

Est.	Data de Execução	Temp. do Ar (° C)	Temp. do Pav. (° C)	Carga (KN)	MR (Rev.)	MR (Base)	MR (Subleito)	RMS (%)	RC (m/10)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
0	14/06/2017	23,9	30	4100	2036	346	201	12,4	13,68	33,21	32,9	11,2	3,3
1	14/06/2017	22,3	26,2	4100	100	728	234	10,2	12,43	30,03	36,2	8,1	2,2
2	14/06/2017	23,5	30	4100	3131	350	198	11,7	14,38	33,95	31,3	11,6	3
3	14/06/2017	22,9	26,2	4100	110	777	215	11,9	13,68	31,72	32,9	8,7	2,5
4	14/06/2017	24	30	4100	156	383	206	12,4	10,37	29,95	43,4	10,4	3,2
5	14/06/2017	22,8	26,2	4100	171	530	231	14,7	13,51	31,22	33,3	9,4	2,8
6	14/06/2017	24,2	30	4100	4342	346	176	16	14,90	35,26	30,2	14	2,6
7	14/06/2017	22,8	27,1	4100	5307	377	211	13,5	16,42	34,62	27,4	11,5	2,4
8	14/06/2017	24,8	30	4100	696	362	198	12,3	13,35	33,04	33,7	12,2	2,6
9	14/06/2017	23,1	27,1	4100	85	1438	215	10,9	14,47	31,75	31,1	7,3	2
10	14/06/2017	24,2	33,2	4100	2418	394	198	13,8	15,57	34,49	28,9	11,5	2,7
11	14/06/2017	22,6	27,1	4100	66	1940	239	13,2	12,75	29,09	35,3	7,3	1,4
12	14/06/2017	25,5	33,2	4100	216	411	237	14,2	12,16	30,08	37	10,4	2,3
13	14/06/2017	23	27,1	4100	83	905	185	8,8	11,75	31,39	38,3	8,2	2,7
14	14/06/2017	26,1	33,2	4100	207	542	242	14,8	14,66	31,59	30,7	9,2	2,3
15	14/06/2017	23,1	27,1	4100	6048	191	123	6,2	9,72	35,65	46,3	18,8	6,3
16	14/06/2017	25,3	33,2	4100	80	1251	234	13,4	13,39	30,31	33,6	8	1,8
17	14/06/2017	22,8	27,1	4100	7001	183	145	2,8	9,96	34,90	45,2	17,3	5,7
18	14/06/2017	24,8	33,2	4100	405	315	232	10,3	10,90	29,62	41,3	10,4	3
19	14/06/2017	22,7	27,1	4100	2663	254	191	6,1	10,71	31,80	42	12,9	3,5
20	14/06/2017	26,3	33,2	4100	1069	257	232	10,4	10,11	29,28	44,5	11,5	3,3
21	14/06/2017	22,4	27,1	4100	5692	201	149	5,5	10,04	34,04	44,8	16,5	5,2
22	14/06/2017	25,4	33,2	4100	229	355	209	11,9	10,98	30,42	41	11,2	2,9
23	14/06/2017	22,2	27,1	4100	9383	186	161	8,7	10,90	34,77	41,3	16,7	4,8
24	14/06/2017	26	33,2	4100	8733	280	251	17	14,56	32,14	30,9	11,4	3,4
25	14/06/2017	21,9	27,1	4100	6918	177	143	3	9,55	34,61	47,1	17	6,7
26	14/06/2017	27,1	33,2	4100	14210	219	204	11,4	14,38	34,84	31,3	15,2	4,2
27	14/06/2017	21,6	26,7	4100	11134	190	138	4,8	11,42	36,99	39,4	16,9	6,4
28	14/06/2017	25,9	33,2	4100	6124	229	196	9,4	11,42	32,51	39,4	13,8	4,2
29	14/06/2017	21,5	26,7	4100	1603	292	183	5,8	11,78	33,52	38,2	11,1	5
30	14/06/2017	25,6	33,2	4100	11405	294	241	8,2	16,07	34,03	28	11,6	2,8
31	14/06/2017	21,1	26,7	4100	504	353	174	7,8	12,30	33,71	36,6	11,5	3,9

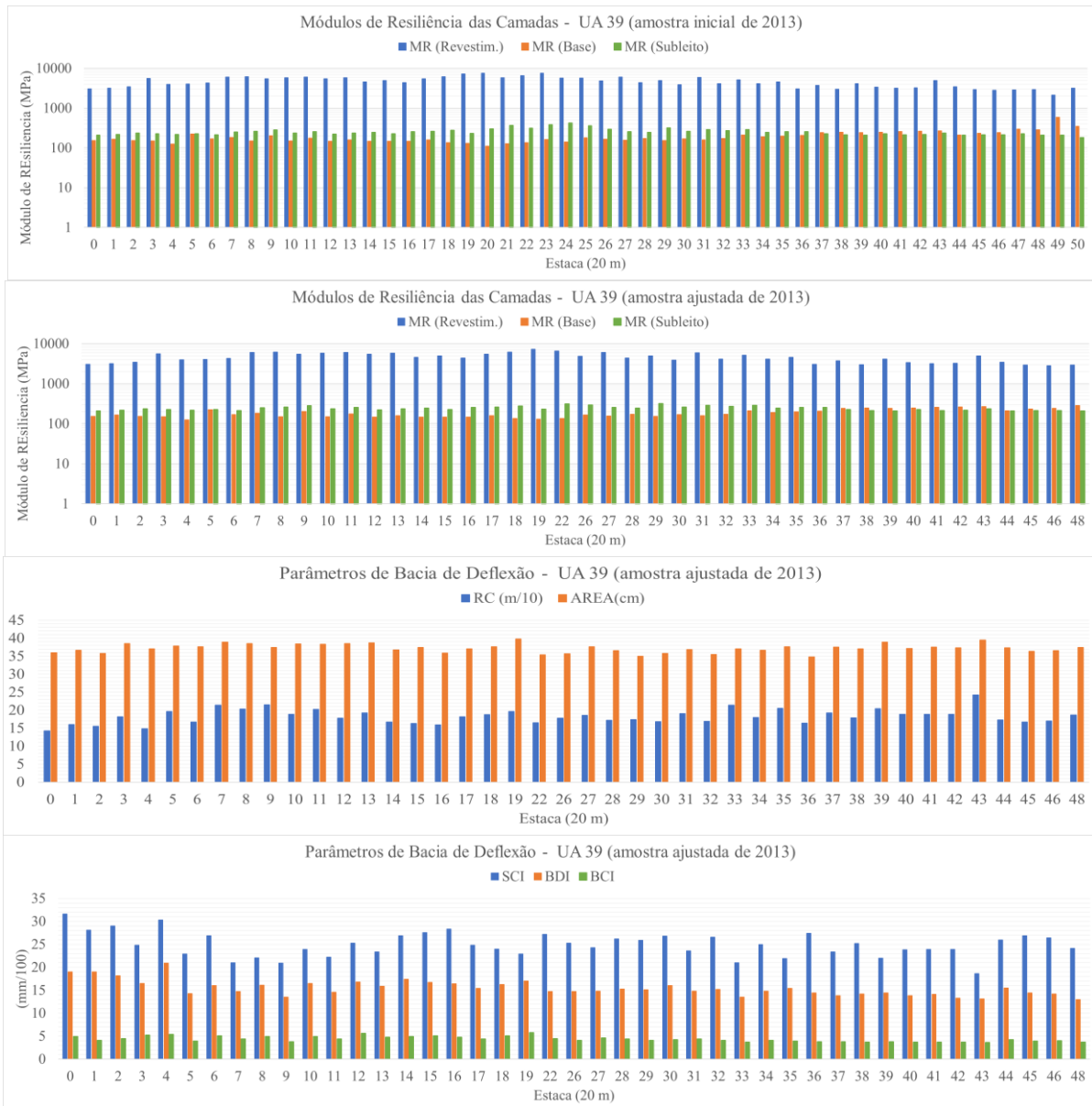
32	14/06/2017	26,1	33,2	4100	629	394	229	8,8	13,93	32,13	32,3	9,5	2,9
33	14/06/2017	21,1	26,7	4100	2756	280	189	7,1	11,39	32,31	39,5	12,2	3,2
34	14/06/2017	26	33,2	4100	258	638	242	16,2	17,86	33,70	25,2	9	2,4
35	14/06/2017	21	26,7	4100	5486	218	191	5,4	10,69	32,32	42,1	13,8	4,2
36	14/06/2017	25,8	33,2	4100	118	849	223	11,2	14,75	32,16	30,5	8,2	2,2
37	14/06/2017	20,2	26,7	4100	3130	227	223	8	10,09	30,02	44,6	12,1	4,2
38	14/06/2017	26,2	33,2	4100	6918	232	286	6,2	11,97	30,64	37,6	10,6	3,4
39	14/06/2017	19,9	26,7	4100	6668	287	276	5,7	13,85	31,59	32,5	10	2,6
40	14/06/2017	26,7	36,4	4100	193	734	237	3,9	16,79	33,47	26,8	6,6	2,6
41	14/06/2017	19,3	26,7	4100	558	311	276	3,7	11,25	28,83	40	8,9	2,9
42	14/06/2017	26,8	36,4	4100	132	1026	310	10,2	16,98	30,31	26,5	6,2	1,7
43	14/06/2017	19,5	26,7	4100	302	450	264	7,3	13,98	30,82	32,2	8,5	2,1
44	14/06/2017	26,6	36,4	4100	94	1917	324	5,4	15,90	28,48	28,3	3,7	1,6
45	14/06/2017	19,1	26,7	4100	314	484	276	6,6	14,85	30,90	30,3	7,8	2,4
46	14/06/2017	26,9	36,4	4100	2800	346	298	9	14,29	30,22	31,5	8,8	2,6
47	14/06/2017	19,4	26,7	4100	1209	311	273	6,5	11,84	29,61	38	8,6	3,2
48	14/06/2017	26,7	36,4	4100	6264	344	333	8,1	15,96	30,49	28,2	8,7	2,3
49	14/06/2017	19,3	26,7	4100	7089	233	237	1,8	12,00	31,79	37,5	12,1	3,6
50	14/06/2017	25,8	39	4100	7001	458	286	7,4	20,00	34,65	22,5	7,5	1,9



51 Amostras	d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
Deflexão Média (10 ⁻² mm)	55,2	19,9	9,0	5,8	4,4	3,7	3,2
Desvio Padrão	10,6	5,5	2,5	1,4	1,0	0,8	0,8
CV(%)	19	28	28	24	21	22	24
TmAr= 24°C / TmAsfalto= 30°C / Carga=4100 kgf/cm2							

28/51 Amostras	d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
Deflexão Média (10 ⁻² mm)	58,5	21,6	9,8	6,1	4,5	3,6	3,1
Desvio Padrão	12,0	6,3	3,0	1,7	1,2	1,0	1,0
CV(%)	21	29	30	28	27	28	31
TmAr= 23°C / TmAsfalto= 29°C / Carga=4100 kgf/cm2							

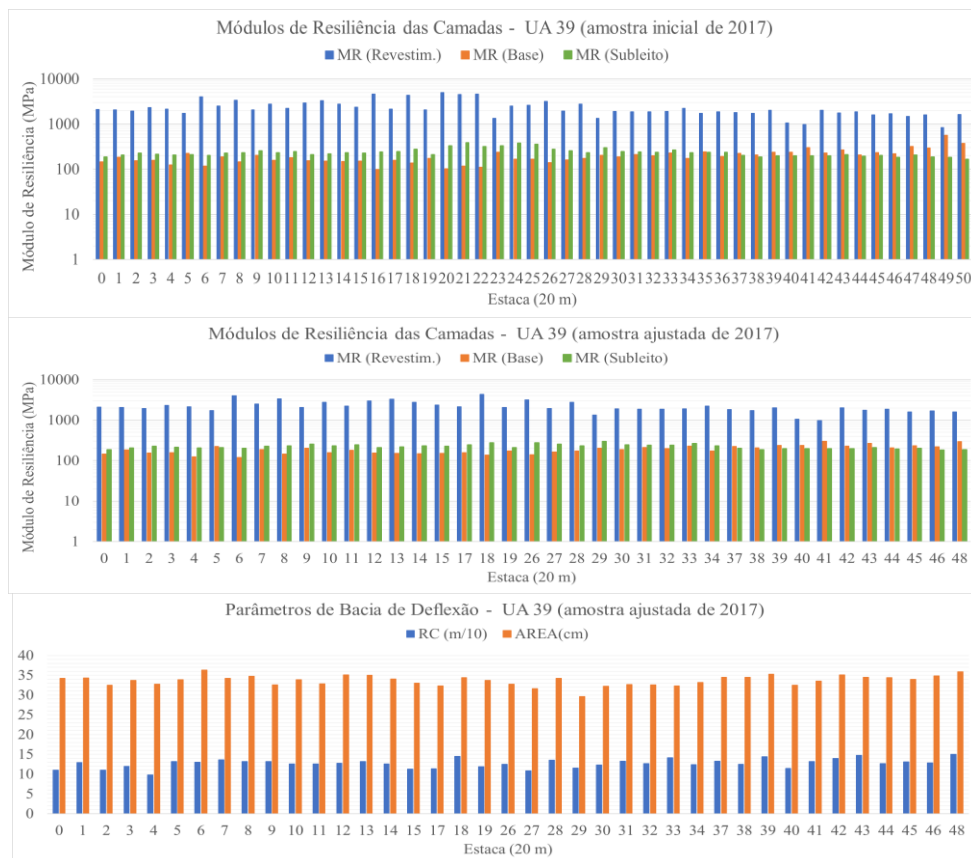
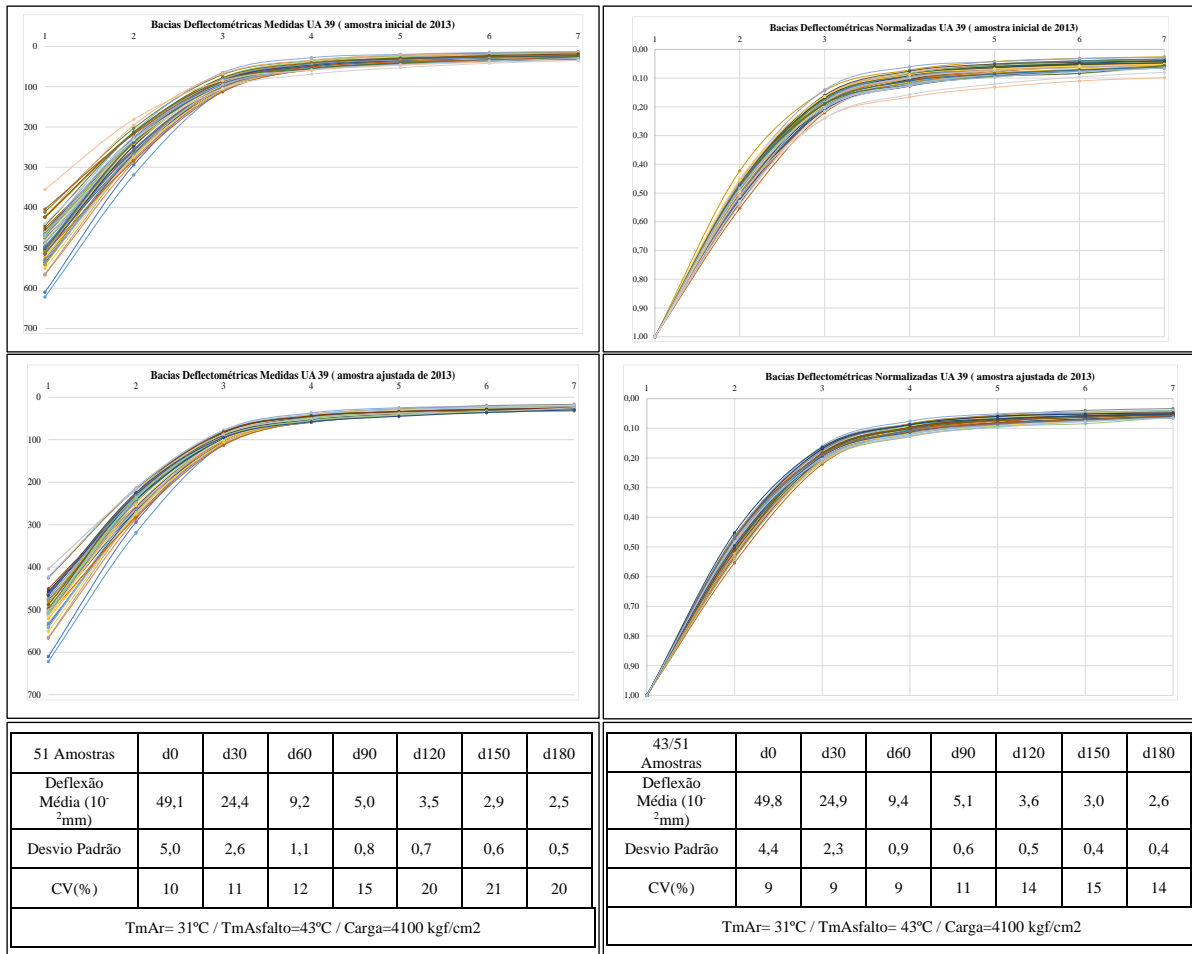
Anexo III – Parâmetros da Unidade de Amostragem 39

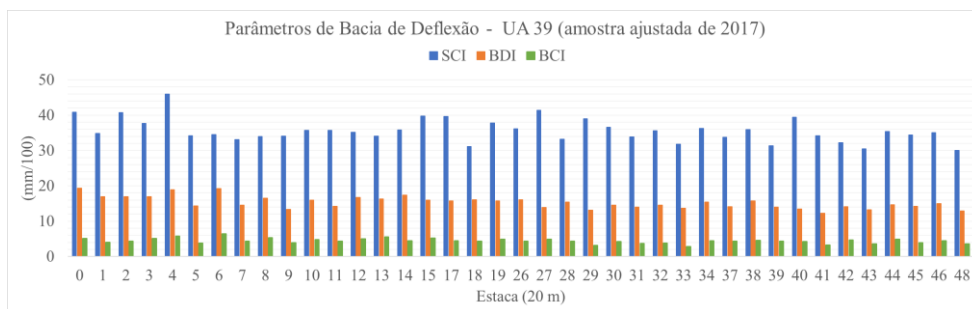


ESTRUTURA DO PAVIMENTO (2013)						
Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo Médio (Mpa) camada granular única	Módulo Médio (Mpa) camada granular dividida ¹	Coef. Poisson	Aderência
1	Cam. Asf.	8	4290	4388	0,30	Não Aderido
2	Cam. Gran	41	185	250	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	239	228	0,45	-
Limite de Erro (RMS) tolerável = 10% (outliers excluídos para nível de confiança de 95% - Média +/- 2 DP)						
Amostra 43/51 Para amostras de 30 ou mais valores, em geral, a aproximação já será suficiente boa, para se poder utilizar este resultado (estacas excluídas da amostra são as em vermelho na tabela abaixo)						

5- limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES

Est.	Data de Execução	Temp. do Ar (° C)	Temp. do Pav. (° C)	Carga (KN)	MR (Rev.)	MR (Base)	MR (Subleito)	RMS (%)	RC (m/10)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
0	12/09/2013	33,9	42,8	4100	3069	153	209	6,6	14,24	35,93	31,6	19	4,9
1	12/09/2013	38,5	43,2	4100	3222	168	217	6,6	16,01	36,67	28,1	19	4,1
2	12/09/2013	34,1	42,8	4100	3453	155	238	6,8	15,52	35,81	29	18,2	4,5
3	12/09/2013	32,9	43,2	4100	5597	151	226	3,2	18,15	38,55	24,8	16,5	5,2
4	12/09/2013	33,6	42,8	4100	3999	125	217	4,3	14,85	37,04	30,3	20,9	5,4
5	12/09/2013	31,9	43,2	4100	4028	227	229	5,2	19,65	37,86	22,9	14,3	3,9
6	12/09/2013	33,5	42,8	4100	4326	170	214	3,6	16,73	37,60	26,9	16	5,1
7	12/09/2013	31,4	43,2	4100	6097	183	251	2,8	21,43	38,95	21	14,7	4,4
8	12/09/2013	33,5	42,8	4100	6248	151	264	4	20,36	38,52	22,1	16,1	4,9
9	12/09/2013	31,2	43,2	4100	5531	204	283	4,5	21,53	37,48	20,9	13,5	3,8
10	12/09/2013	33,5	42,8	4100	5807	151	238	3,5	18,83	38,45	23,9	16,5	4,9
11	12/09/2013	31,1	43,2	4100	6024	176	254	2	20,27	38,31	22,2	14,6	4,4
12	12/09/2013	33,7	42,8	4100	5463	147	222	3,2	17,79	38,54	25,3	16,8	5,6
13	12/09/2013	30,9	43,2	4100	5877	160	235	1,8	19,23	38,74	23,4	15,9	4,8
14	12/09/2013	33,6	42,8	4100	4595	146	248	4	16,73	36,78	26,9	17,4	4,9
15	12/09/2013	30,8	43,2	4100	4955	147	226	1,6	16,30	37,40	27,6	16,7	5,1
16	12/09/2013	33,3	42,8	4100	4431	147	258	3,8	15,90	35,89	28,3	16,4	4,8
17	12/09/2013	30,4	43,2	4100	5463	160	261	1,5	18,15	37,09	24,8	15,4	4,4
18	12/09/2013	33,1	42,8	4100	6248	137	276	2,3	18,75	37,59	24	16,3	5,1
19	12/09/2013	30	43,2	4100	7323	131	232	4,9	19,65	39,81	22,9	17	5,8
20	12/09/2013	32,9	42,8	4100	7595	112	302	5,4	17,11	36,79	26,3	17	4,8
21	12/09/2013	29,8	43,2	4100	5838	127	366	9,2	14,38	33,07	31,3	15,1	3,9
22	12/09/2013	32,7	42,8	4100	6642	135	314	5,4	16,54	35,38	27,2	14,7	4,5
23	12/09/2013	29,5	43,2	4100	7638	163	380	3,2	21,63	36,20	20,8	13,3	3,5
24	12/09/2013	32,7	42,8	4100	5730	143	427	3,2	18,00	33,90	25	14,7	3,7
25	12/09/2013	28,6	43,2	4100	5737	182	364	1,8	19,82	34,93	22,7	12,8	3,4
26	12/09/2013	32,6	42,8	4100	4834	168	294	4	17,79	35,63	25,3	14,7	4,1
27	12/09/2013	28,3	43,2	4100	6097	158	257	4,5	18,52	37,59	24,3	14,8	4,6
28	12/09/2013	32,5	42,8	4100	4388	174	247	4,6	17,18	36,57	26,2	15,3	4,4
29	12/09/2013	28,2	43,2	4100	5015	153	322	3,2	17,37	35,01	25,9	15,1	4,1
30	12/09/2013	32,5	42,8	4100	3932	170	261	5,1	16,79	35,77	26,8	16	4,2
31	12/09/2013	27,9	43,2	4100	5950	160	291	3,2	19,07	36,88	23,6	14,8	4,4
32	12/09/2013	32,4	42,8	4100	4167	172	271	5,9	16,92	35,52	26,6	15,2	4,1
33	12/09/2013	27,8	43,2	4100	5139	210	287	6,3	21,43	37,09	21	13,5	3,7
34	12/09/2013	32,3	42,8	4100	4167	193	248	3,7	18,00	36,67	25	14,8	4,1
35	12/09/2013	27,6	43,2	4100	4546	198	258	7,2	20,55	37,61	21,9	15,4	3,9
36	12/09/2013	32,1	42,8	4100	3069	207	258	8,1	16,42	34,80	27,4	14,4	3,8
37	12/09/2013	27,4	43,2	4100	3714	242	226	5,9	19,23	37,56	23,4	13,8	3,8
38	12/09/2013	32,1	42,8	4100	2999	251	212	7,8	17,86	37,04	25,2	14,2	3,7
39	12/09/2013	27,3	43,2	4100	4155	245	209	5,4	20,45	38,92	22	14,4	3,8
40	12/09/2013	32,2	42,8	4100	3419	248	226	7,4	18,91	37,18	23,8	13,8	3,7
41	12/09/2013	27,2	43,2	4100	3207	257	214	7,1	18,83	37,52	23,9	14,1	3,7
42	12/09/2013	32,1	42,8	4100	3266	263	219	6,9	18,83	37,39	23,9	13,3	3,7
43	12/09/2013	27	43,2	4100	5011	270	238	7,5	24,19	39,54	18,6	13,1	3,6
44	12/09/2013	32	42,8	4100	3453	210	209	5,9	17,31	37,37	26	15,5	4,2
45	12/09/2013	26,9	43,2	4100	2916	233	214	6,6	16,73	36,38	26,9	14,4	3,9
46	12/09/2013	32	42,8	4100	2843	242	212	8,1	17,05	36,53	26,4	14,2	4
47	12/09/2013	26,5	43,2	4100	2902	299	226	8,6	19,48	37,01	23,1	12,9	3
48	12/09/2013	32	42,8	4100	2948	284	209	6	18,67	37,47	24,1	13	3,7
49	12/09/2013	26,4	43,2	4100	2118	585	209	11,7	25,86	39,97	17,4	9,6	2,6
50	12/09/2013	31,9	42,8	4100	3192	352	181	7	21,74	40,39	20,7	12,7	3,6





ESTRUTURA DO PAVIMENTO (2017)						
Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo Médio (Mpa) camada granular única	Módulo Médio (Mpa) camada granular dividida ¹	Coef. Poisson	Aderência
1	Cam. Asf.	8	2116	2110	0,30	Não Aderido
2	Cam. Gran	41	185	250	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	219	211	0,45	-

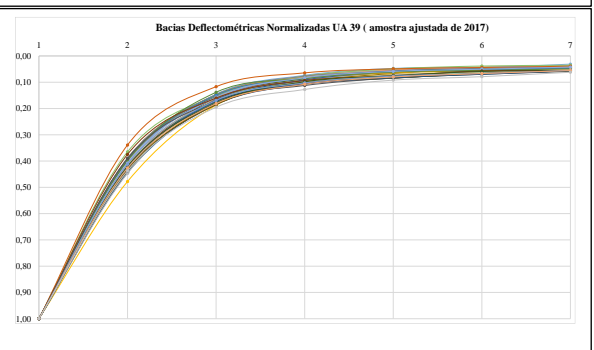
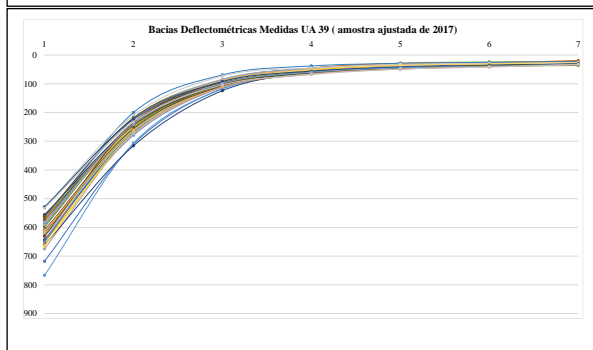
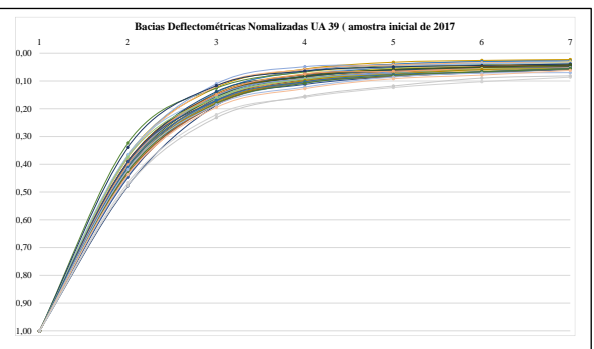
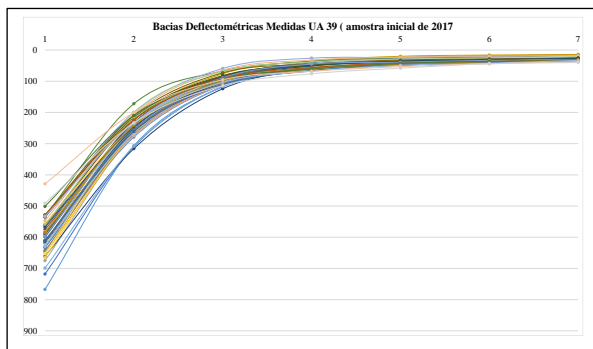
Limite de Erro (RMS) tolerável = 10%
(outliers excluídos para nível de confiança de 95% - Media +/- 2 DP)

Amostra 39/51
Para amostras de 30 ou mais valores, em geral, a aproximação já será suficiente boa, para se poder utilizar este resultado (estacas excluídas da amostra são as em vermelho na tabela abaixo)

6- limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES

Est.	Data de Execução	Temp. do Ar (° C)	Temp. do Pav. (° C)	Carga (KN)	MR (Rev.)	MR (Base)	MR (Subleito)	RMS (%)	RC (m/10)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
0	19/06/2017	32,3	47	4100	2107	145	186	5,9	11,03	34,22	40,8	19,3	5,1
1	19/06/2017	35,4	47	4100	2081	186	206	5,7	12,93	34,31	34,8	16,9	4
2	19/06/2017	31,8	47	4100	1956	156	227	3,9	11,06	32,53	40,7	16,9	4,4
3	19/06/2017	33,4	47	4100	2323	157	214	4,4	11,94	33,73	37,7	17	5,1
4	19/06/2017	31,9	47	4100	2160	125	206	3,3	9,78	32,80	46	18,9	5,8
5	19/06/2017	33,8	47	4100	1731	226	209	6	13,16	33,89	34,2	14,3	3,8
6	19/06/2017	32,2	47	4100	4036	119	204	3,4	13,04	36,33	34,5	19,2	6,4
7	19/06/2017	33,4	47,3	4100	2502	190	227	6,4	13,60	34,25	33,1	14,6	4,4
8	19/06/2017	32,4	47	4100	3360	147	230	5,7	13,24	34,72	34	16,5	5,3
9	19/06/2017	33,5	47,3	4100	2081	204	256	5,6	13,20	32,60	34,1	13,3	3,9
10	19/06/2017	32	47	4100	2801	157	233	2,4	12,61	33,86	35,7	16	4,8
11	19/06/2017	33,4	47,3	4100	2252	183	246	2,8	12,61	32,86	35,7	14,2	4,4
12	19/06/2017	32,1	47	4100	2977	155	209	4,8	12,78	35,06	35,2	16,7	5
13	19/06/2017	33,4	47,3	4100	3314	151	219	5,2	13,20	35,06	34,1	16,3	5,5
14	19/06/2017	32,6	47	4100	2786	150	230	1,2	12,57	34,06	35,8	17,4	4,5
15	19/06/2017	34,3	47,3	4100	2377	151	227	4,4	11,31	33,03	39,8	16	5,2
16	19/06/2017	32,4	47	4100	4670	99	242	6,5	11,51	34,38	39,1	19,2	6,1
17	19/06/2017	33,5	47,3	4100	2145	158	246	2,7	11,36	32,31	39,6	15,7	4,5
18	19/06/2017	31,3	47	4100	4342	139	279	3,9	14,47	34,43	31,1	16,1	4,4
19	19/06/2017	33,1	47,3	4100	2058	174	209	5,4	11,90	33,71	37,8	15,8	4,9
20	19/06/2017	32,2	46,8	4100	5054	103	329	7	11,78	32,47	38,2	16,8	5,6
21	19/06/2017	32,9	47,3	4100	4519	119	389	9	11,57	30,59	38,9	15	4,1
22	19/06/2017	32,2	46,8	4100	4670	112	320	7,2	11,87	32,27	37,9	16,4	4,9
23	19/06/2017	33,8	47,3	4100	1343	237	333	5,8	12,50	29,49	36	10,5	3,1
24	19/06/2017	32,3	46,8	4100	2536	167	379	12,9	13,39	30,22	33,6	14,1	3,3
25	19/06/2017	33,8	47,3	4100	2613	168	358	5,1	13,20	30,74	34,1	14,1	3,3
26	19/06/2017	31,8	46,8	4100	3161	141	279	6,7	12,47	32,75	36,1	16,1	4,4
27	19/06/2017	33,1	47	4100	1960	163	256	6,3	10,87	31,66	41,4	13,9	4,9
28	19/06/2017	32	46,8	4100	2766	174	233	3,8	13,55	34,27	33,2	15,4	4,4
29	19/06/2017	32,8	47	4100	1350	204	297	9,3	11,54	29,64	39	13,1	3,1
30	19/06/2017	32,2	46,8	4100	1902	188	246	6,3	12,30	32,23	36,6	14,5	4,2

31	19/06/2017	33,6	47	4100	1878	212	243	8,3	13,27	32,66	33,9	14	3,7
32	19/06/2017	31,9	46,8	4100	1867	199	239	6,9	12,64	32,62	35,6	14,5	3,8
33	19/06/2017	34,1	47	4100	1902	229	265	9,2	14,15	32,36	31,8	13,7	2,8
34	19/06/2017	32,5	46,8	4100	2240	174	233	3,6	12,40	33,18	36,3	15,4	4,5
35	19/06/2017	33,4	47	4100	1739	246	236	10,4	14,11	33,08	31,9	13,4	3,3
36	19/06/2017	33	46,8	4100	1890	192	236	13,3	12,53	32,56	35,9	14,9	4,4
37	19/06/2017	32,5	47	4100	1821	226	201	4,5	13,31	34,50	33,8	14,1	4,4
38	19/06/2017	31,6	46,8	4100	1742	207	186	8,5	12,53	34,51	35,9	15,7	4,6
39	19/06/2017	33,5	47	4100	2032	238	199	5,9	14,38	35,29	31,3	14	4,3
40	19/06/2017	33,1	48,8	4100	1060	238	199	8,5	11,42	32,45	39,4	13,5	4,2
41	19/06/2017	33,6	47	4100	989	305	198	7,7	13,16	33,53	34,2	12,3	3,3
42	19/06/2017	33,1	48,8	4100	2028	229	199	7,2	13,98	35,07	32,2	14,1	4,7
43	19/06/2017	32,3	47	4100	1770	267	211	8,3	14,75	34,51	30,5	13,2	3,6
44	19/06/2017	33,8	48,8	4100	1867	207	195	6,8	12,71	34,43	35,4	14,7	4,9
45	19/06/2017	31,9	47	4100	1602	235	201	7	13,08	33,97	34,4	14,2	3,9
46	19/06/2017	32,8	48,8	4100	1708	221	184	5,7	12,82	34,85	35,1	15	4,5
47	19/06/2017	33,1	47	4100	1484	323	206	9,4	15,46	34,97	29,1	11,7	3,2
48	19/06/2017	33,4	48,8	4100	1603	297	186	6,1	15,00	35,88	30	12,9	3,6
49	19/06/2017	33,1	47	4100	842	567	185	10,5	19,65	38,01	22,9	10,5	2,7
50	19/06/2017	34,6	48,8	4100	1652	377	167	6,9	17,51	38,58	25,7	12	3,8



51 Amostras	d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
Deflexão Média (10 ⁻² mm)	59,8	24,6	9,6	5,3	3,8	3,2	2,8
Desvio Padrão	5,9	3,0	1,4	1,0	0,8	0,7	0,6
CV(%)	0	12	15	19	22	21	21
TmAr= 33°C / TmAsfalto= 47°C / Carga=4100 kgf/cm2							

39/51 Amostras	d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
Deflexão Média (10 ⁻² mm)	60,9	25,2	9,9	5,5	3,9	3,3	2,9
Desvio Padrão	4,9	2,6	1,1	0,7	0,6	0,5	0,4
CV(%)	8	10	11	12	16	14	14
TmAr= 33°C / TmAsfalto= 47°C / Carga=4100 kgf/cm2							

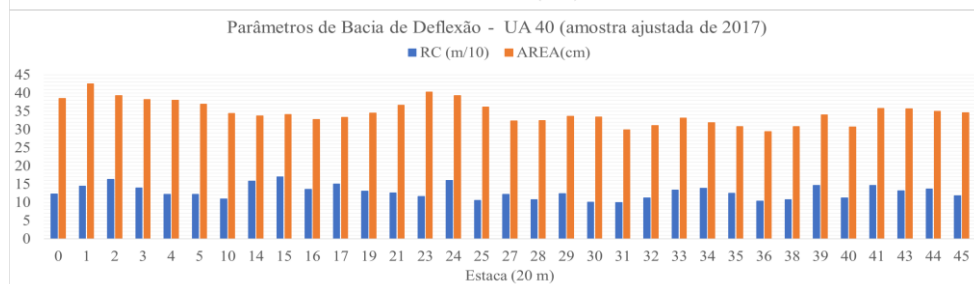
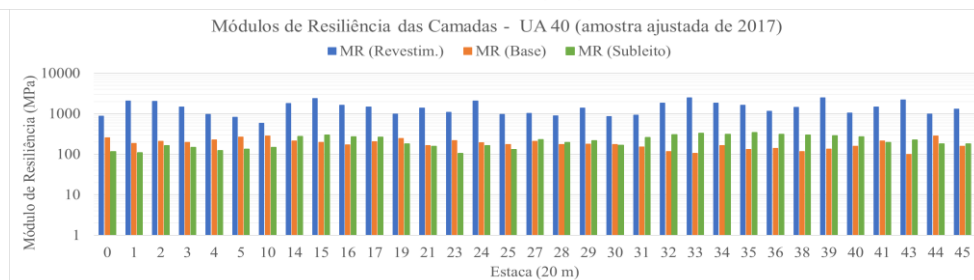
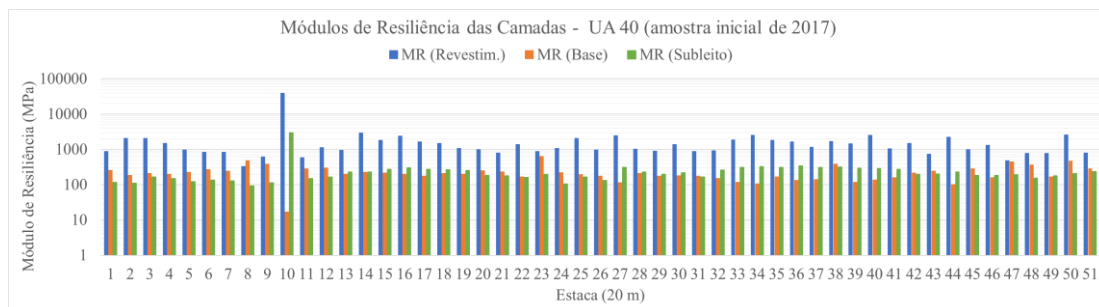
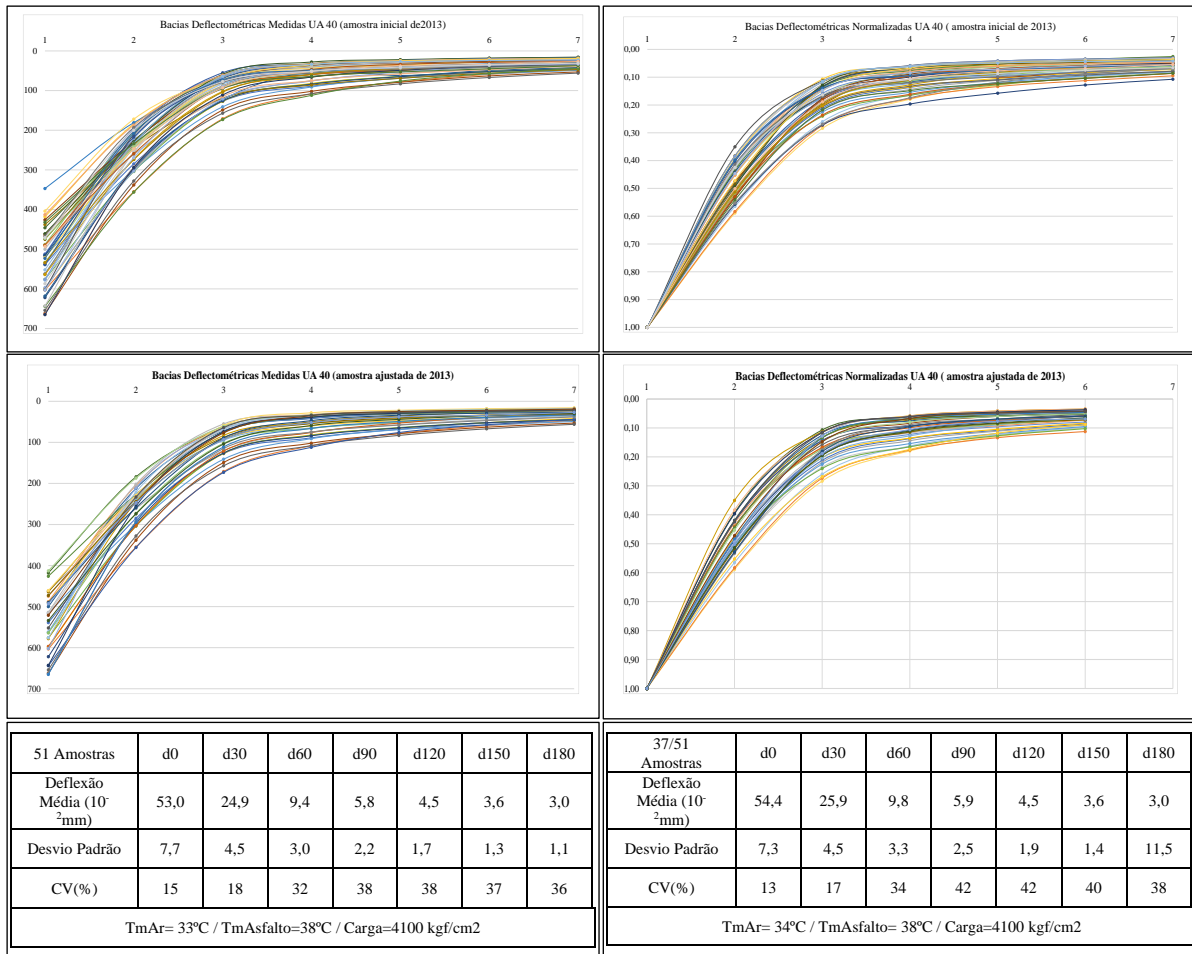
Anexo IV – Parâmetros da Unidade de Amostragem 40

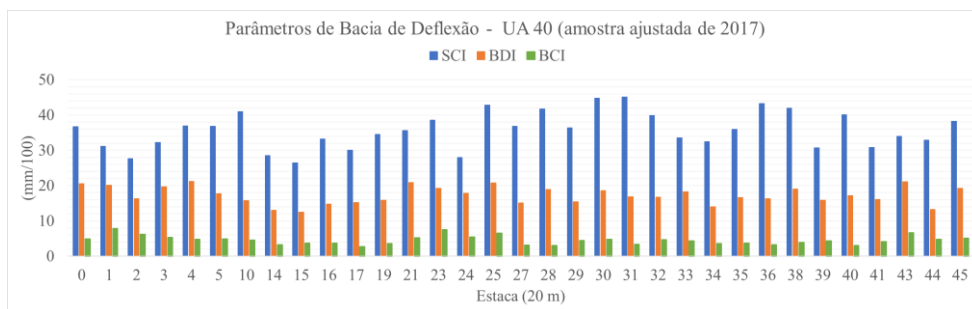


ESTRUTURA DO PAVIMENTO (2013)						
Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo Médio (Mpa) camada granular única	Módulo Médio (Mpa) camada granular dividida ¹	Coef. Poisson	Aderência
1	Cam. Asf.	10	1658	1894	0,30	Não Aderido
2	Cam. Gran	35	216	280	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	203	196	0,45	-
Limite de Erro (RMS) tolerável = 10% (outliers excluídos para nível de confiança de 95% - Média +/- 2 DP)						
Amostra 37/51 Para amostras de 30 ou mais valores, em geral, a aproximação já será suficiente boa, para se poder utilizar este resultado (estacas excluídas da amostra são as em vermelho na tabela abaixo)						

7- limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES

Est.	Data de Execução	Temp. do Ar (° C)	Temp. do Pav. (° C)	Carga (KN)	MR (Rev.)	MR (Base)	MR (Subleito)	RMS (%)	RC (m/10)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
0	12/09/2013	39,7	44,2	4100	1299	361	143	8,1	17,72	40,41	25,4	15,8	3,8
1	12/09/2013	26,9	32,9	4100	2427	231	120	2,8	18,15	43,86	24,8	18,4	6,3
2	12/09/2013	38,1	44,2	4100	2457	326	165	5,4	22,39	42,18	20,1	14,1	4,5
3	12/09/2013	26,2	32,9	4100	1299	264	147	8	15,15	38,54	29,7	17,5	4,5
4	12/09/2013	38,5	44,2	4100	1995	344	134	8,2	20,93	43,34	21,5	16	5
5	12/09/2013	26,3	32,9	4100	1479	271	147	8,8	16,54	39,56	27,2	17,8	4,3
6	12/09/2013	39	44,2	4100	1027	277	145	8,5	13,89	37,48	32,4	17,2	4,2
7	12/09/2013	26,4	32,9	4100	1013	285	122	8,6	13,89	39,38	32,4	18,9	4,7
8	12/09/2013	39,5	44,2	4100	741	362	116	8,3	13,80	39,72	32,6	17,1	4,9
9	12/09/2013	27,4	34,3	4100	786	766	145	10,3	23,20	42,81	19,4	12,5	3,3
10	12/09/2013	39,8	44,2	4100	1680	167	179	19,3	13,89	36,50	32,4	17,1	7,1
11	12/09/2013	27,6	34,3	4100	1624	361	197	11,6	20,36	38,31	22,1	13,3	3,3
12	12/09/2013	40	44,2	4100	1137	231	296	12,1	14,24	31,11	31,6	13,6	2,2
13	12/09/2013	28	34,3	4100	2678	206	249	2,2	18,99	36,98	23,7	13,9	3,8
14	12/09/2013	40,1	44,2	4100	1791	198	292	3,1	15,63	33,30	28,8	14	3
15	12/09/2013	28,3	34,3	4100	2084	257	311	2,9	19,23	34,34	23,4	11,8	2,7
16	12/09/2013	40,5	44,2	4100	1703	158	289	1,8	13,76	32,66	32,7	16,1	3,4
17	12/09/2013	28,4	34,3	4100	1524	211	311	6,8	15,90	32,49	28,3	14,4	2,4
18	12/09/2013	40,7	44,2	4100	1171	213	311	14	14,42	31,02	31,2	14,7	2
19	12/09/2013	28,9	34,3	4100	1516	300	197	9,9	17,79	37,04	25,3	14,4	3,3
20	12/09/2013	40,6	44,2	4100	896	304	186	9,8	14,02	34,67	32,1	14,6	3
21	12/09/2013	29,6	34,3	4100	1479	226	186	6,1	15,46	36,70	29,1	17,1	3,6
22	12/09/2013	40,3	44,2	4100	1850	590	220	9,8	27,11	40,16	16,6	9,9	2,6
23	12/09/2013	30	34,3	4100	2067	214	122	3,4	15,63	42,25	28,8	18,3	6,1
24	12/09/2013	39	44,2	4100	1925	186	172	3,5	15,31	38,22	29,4	18,2	4,5
25	12/09/2013	30,5	34,3	4100	937	226	161	7,3	12,13	35,13	37,1	17,8	4
26	12/09/2013	38,8	44,2	4100	2311	124	311	13,3	13,55	33,27	33,2	17,5	3,5
27	12/09/2013	30,9	34,3	4100	1837	320	300	10,8	19,40	34,64	23,2	10,1	2,8
28	12/09/2013	38,7	44,2	4100	1151	215	220	8	13,51	33,43	33,3	16,2	2,9
29	12/09/2013	31	34,3	4100	2508	152	272	10,7	15,41	34,84	29,2	15,3	4,1
30	12/09/2013	38,3	44,2	4100	1194	179	181	3,3	12,13	34,76	37,1	18,3	4,5
31	12/09/2013	31	34,3	4100	2997	188	289	7,2	22,61	37,61	19,9	15,2	3,7
32	12/09/2013	38,3	44,2	4100	1272	160	327	2,1	11,51	29,78	39,1	14,3	3,3
33	12/09/2013	31,1	34,3	4100	2360	156	339	6	18,37	34,58	24,5	16,6	3,2
34	12/09/2013	38,7	44,2	4100	2478	138	343	3	15,73	33,40	28,6	16,1	3,4
35	12/09/2013	31,1	34,3	4100	2577	146	385	5,5	19,31	34,59	23,3	16,9	3,1
36	12/09/2013	39,1	44,2	4100	1686	144	339	2,7	12,68	30,89	35,5	15,4	3,3
37	12/09/2013	31,3	34,3	4100	2388	222	339	5,7	19,91	34,21	22,6	12,6	2,8
38	12/09/2013	28	35,4	4100	1372	134	289	2,4	11,60	31,26	38,8	18,1	3,5
39	12/09/2013	31,4	34,3	4100	2720	127	319	3,3	16,36	34,61	27,5	16,9	4,2
40	12/09/2013	27,8	35,4	4100	1524	158	311	9,1	14,11	32,07	31,9	16,9	3
41	12/09/2013	31,6	34,3	4100	2311	228	218	6,3	19,74	38,09	22,8	15,3	3,8
42	12/09/2013	27,6	35,4	4100	963	275	226	11,7	14,02	32,79	32,1	14,1	2,4
43	12/09/2013	32,4	34,3	4100	2675	168	243	6,1	19,48	37,74	23,1	17	4,2
44	12/09/2013	27,4	35,4	4100	761	457	215	12,3	16,42	34,27	27,4	11,4	2,3
45	12/09/2013	33,7	34,3	4100	2197	189	201	3,9	17,31	37,89	26	17	4,5
46	12/09/2013	27,1	35,4	4100	993	277	239	12,2	14,29	32,52	31,5	13,5	2,4
47	12/09/2013	34	34,3	4100	1786	401	186	12,8	22,73	40,00	19,8	14	3
48	12/09/2013	26,9	35,4	4100	1315	181	212	10,8	13,47	34,08	33,4	18	3,8
49	12/09/2013	34,1	34,3	4100	2253	207	223	5,2	18,29	37,27	24,6	15,4	4,1
50	12/09/2013	26,6	35,4	4100	1109	343	229	12,3	16,61	34,27	27,1	12,3	2,6





ESTRUTURA DO PAVIMENTO (2017)						
Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo Médio (Mpa) camada granular única	Módulo Médio (Mpa) camada granular dividida ¹	Coef. Poisson	Aderência
1	Cam. Asf.	10	1299	1320	0,30	Não Aderido
2	Cam. Gran.	35	184	260	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	188	183	0,45	-

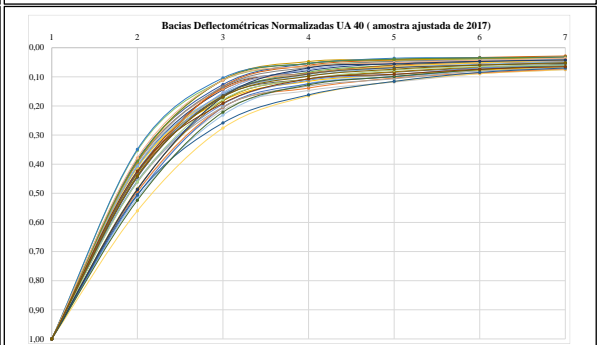
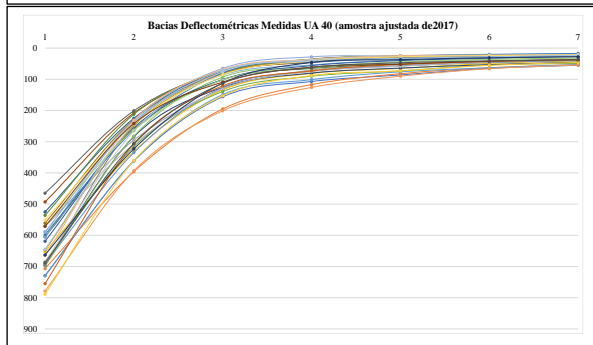
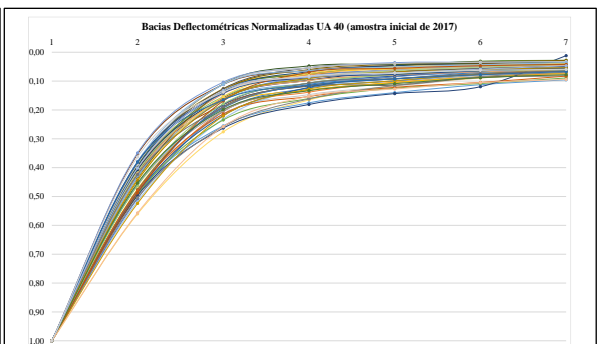
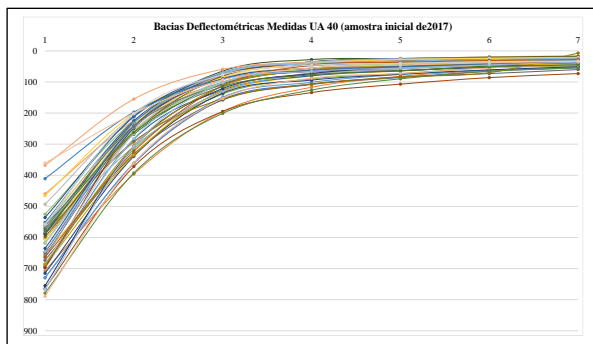
Limite de Erro (RMS) tolerável = 10%
(outliers excluídos para nível de confiança de 95% - Média +/- 2 DP)

Amostra 33/51
Para amostras de 30 ou mais valores, em geral, a aproximação já será suficiente boa, para se poder utilizar este resultado (estacas excluídas da amostra são as em vermelho na tabela abaixo)

8- limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES

Est.	Data de Execução	Temp. do Ar (° C)	Temp. do Pav. (° C)	Carga (KN)	MR (Rev.)	MR (Base)	MR (Subleito)	RMS (%)	RC (m/10)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
0	19/06/2017	25,8	35,2	4100	874	254	116	8,7	12,26	38,52	36,7	20,6	4,9
1	19/06/2017	26,4	30,2	4100	2060	184	110	1	14,47	42,56	31,1	20,1	7,8
2	19/06/2017	25,9	35,2	4100	2035	209	162	5,6	16,30	39,27	27,6	16,3	6,2
3	19/06/2017	26,2	30,2	4100	1461	198	147	5,8	13,98	38,22	32,2	19,7	5,3
4	19/06/2017	26,2	35,2	4100	963	226	122	8,9	12,20	38,03	36,9	21,2	4,8
5	19/06/2017	23,8	30,2	4100	824	265	134	8,2	12,23	36,93	36,8	17,7	4,9
6	19/06/2017	26,7	35,2	4100	833	244	129	10,7	11,97	36,90	37,6	20,3	4,2
7	19/06/2017	25,5	31,2	4100	324	476	92	8,9	11,48	39,90	39,2	17,7	6,1
8	19/06/2017	26,7	35,2	4100	608	380	113	10,3	13,20	39,25	34,1	17,4	5
9	19/06/2017	24,3	31,2	4100	39008	17	2967	32,4	15,25	40,49	29,5	13,7	4,8
10	19/06/2017	26,2	35,2	4100	580	282	147	9	10,98	34,45	41	15,8	4,6
11	19/06/2017	23,7	31,2	4100	1130	294	166	15,8	15,31	36,73	29,4	16,2	4
12	19/06/2017	26	35,2	4100	950	200	230	11,2	11,90	31,65	37,8	16,1	3,1
13	19/06/2017	23,4	31,2	4100	2940	226	226	2	19,07	38,02	23,6	12,3	4,5
14	19/06/2017	26,1	35,2	4100	1803	215	274	3,1	15,79	33,77	28,5	13	3,3
15	19/06/2017	23,2	31,2	4100	2365	199	299	2,6	17,05	34,13	26,4	12,5	3,7
16	19/06/2017	26	35,2	4100	1640	173	268	4,2	13,55	32,75	33,2	14,8	3,7
17	19/06/2017	22,1	30	4100	1470	206	264	6,6	15,00	33,34	30	15,2	2,7
18	19/06/2017	26	35,2	4100	1064	198	254	11,7	12,47	31,41	36,1	15,1	3,1
19	19/06/2017	22,5	30	4100	982	248	181	9,3	13,04	34,51	34,5	15,9	3,6
20	19/06/2017	26,4	36,4	4100	787	232	179	11,1	11,45	33,13	39,3	16,3	3,7
21	19/06/2017	21,9	30	4100	1377	165	158	6,2	12,64	36,62	35,6	20,9	5,2
22	19/06/2017	26	36,4	4100	879	626	196	11,7	21,03	38,10	21,4	10,9	2,5
23	19/06/2017	22,4	30	4100	1079	219	105	1,6	11,66	40,30	38,6	19,2	7,5
24	19/06/2017	26,6	36,4	4100	2060	193	162	4,3	16,07	39,26	28	17,8	5,5
25	19/06/2017	22,7	30	4100	964	176	131	5,4	10,51	36,22	42,8	20,8	6,5
26	19/06/2017	26,9	36,4	4100	2467	113	308	11,1	12,57	32,73	35,8	17,5	3,7
27	19/06/2017	22,5	30,8	4100	1021	208	229	4	12,23	32,36	36,8	15,1	3,2
28	19/06/2017	27,2	36,4	4100	885	176	197	7	10,79	32,45	41,7	18,9	3
29	19/06/2017	22	30,8	4100	1373	178	218	0,8	12,36	33,61	36,4	15,4	4,5
30	19/06/2017	27,3	38,7	4100	864	174	166	3,3	10,04	33,46	44,8	18,6	4,8

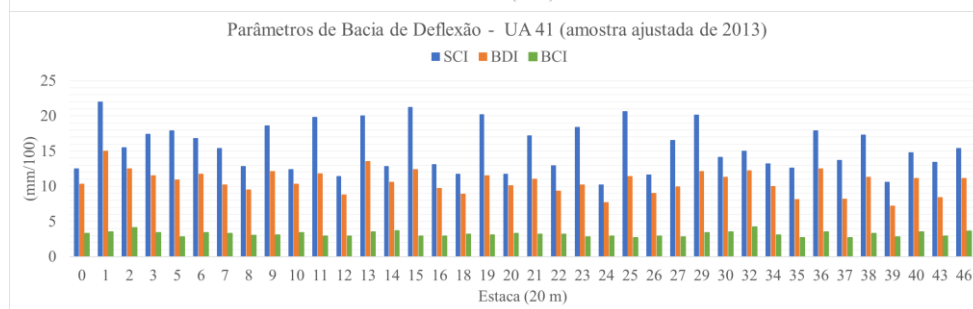
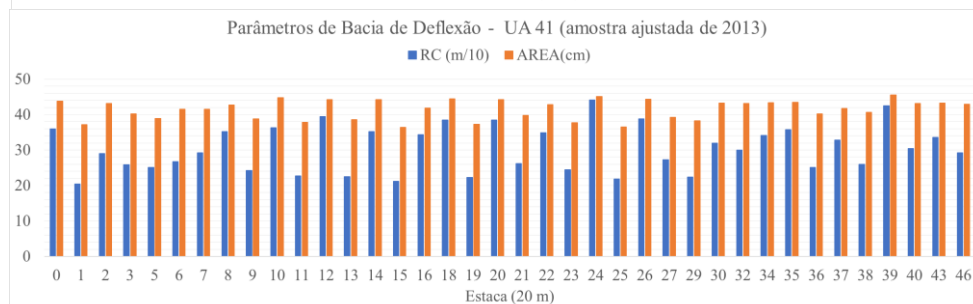
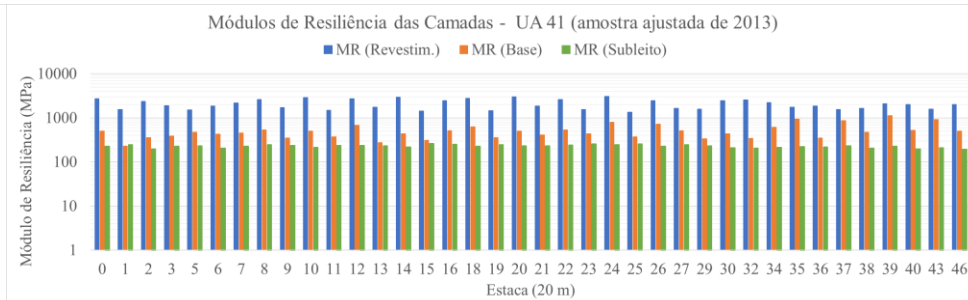
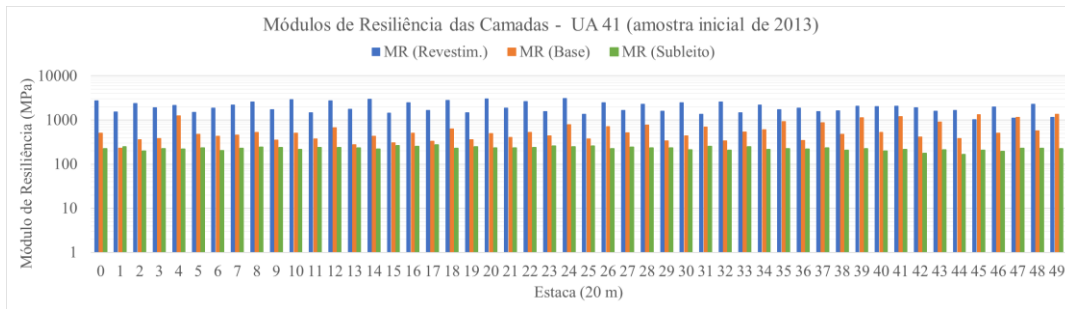
31	19/06/2017	21,6	30,8	4100	923	152	261	5,2	9,98	29,89	45,1	16,8	3,4
32	19/06/2017	28,1	38,7	4100	1846	116	304	5,7	11,28	31,13	39,9	16,7	4,7
33	19/06/2017	21,9	30,8	4100	2490	106	327	3,7	13,43	33,11	33,5	18,3	4,4
34	19/06/2017	28,4	38,7	4100	1820	166	311	5,5	13,89	31,90	32,4	14	3,6
35	19/06/2017	21,3	30,8	4100	1627	131	342	9,7	12,53	30,76	35,9	16,6	3,7
36	19/06/2017	27,6	38,7	4100	1154	139	311	7,3	10,39	29,39	43,3	16,3	3,3
37	19/06/2017	21,2	32	4100	1665	382	315	10,7	21,13	33,91	21,3	9,6	2,3
38	19/06/2017	28	38,7	4100	1429	116	295	4,2	10,74	30,79	41,9	19	3,9
39	19/06/2017	21,3	32	4100	2480	136	284	2,5	14,66	34,03	30,7	15,9	4,4
40	19/06/2017	29	40,4	4100	1042	159	268	5,8	11,22	30,65	40,1	17,2	3,1
41	19/06/2017	21,2	32	4100	1461	215	194	6,1	14,61	35,78	30,8	16,1	4,1
42	19/06/2017	28,8	40,4	4100	739	240	198	12,5	11,45	32,01	39,3	15,2	3,4
43	19/06/2017	21,4	32	4100	2222	100	226	6,7	13,24	35,72	34	21,1	6,6
44	19/06/2017	29,2	40,4	4100	982	285	181	9,1	13,68	35,04	32,9	13,3	4,8
45	19/06/2017	21,5	32	4100	1295	157	181	7,3	11,78	34,62	38,2	19,3	5,1
46	19/06/2017	28,4	40,4	4100	473	441	191	12,5	13,16	33,07	34,2	11,9	2,8
47	19/06/2017	21,4	32	4100	775	362	154	11,1	14,24	36,57	31,6	14,7	3,8
48	19/06/2017	28,3	40,4	4100	765	167	176	10,2	9,80	32,33	45,9	20,6	3,6
49	19/06/2017	21,2	32	4100	2578	464	208	10,5	28,13	41,72	16	10,8	3,8
50	19/06/2017	28,6	43,2	4100	779	278	236	15	12,68	31,27	35,5	12,5	3,1



51 Amostras	d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
Deflexão Média (10 ⁻² mm)	61,8	27,2	10,7	6,4	5,0	4,1	3,4
Desvio Padrão	9,9	5,6	3,5	2,6	2,1	1,6	1,3
CV(%)	16	21	33	40	41	39	38
TmAr= 29°C / TmAsfalto= 34°C / Carga=4100 kgf/cm2							

33/51 Amostras	d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
Deflexão Média (10 ⁻² mm)	63,8	28,1	10,8	6,2	4,7	3,8	3,3
Desvio Padrão	8,1	5,4	3,6	2,6	2,0	1,4	1,2
CV(%)	13	19	33	41	43	37	36
TmAr= 25°C / TmAsfalto= 34°C / Carga=4100 kgf/cm2							

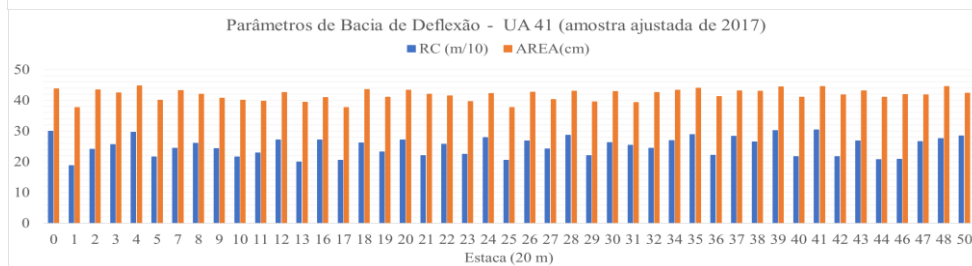
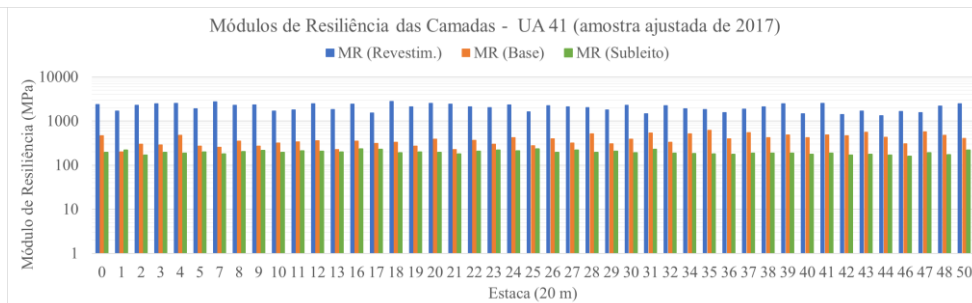
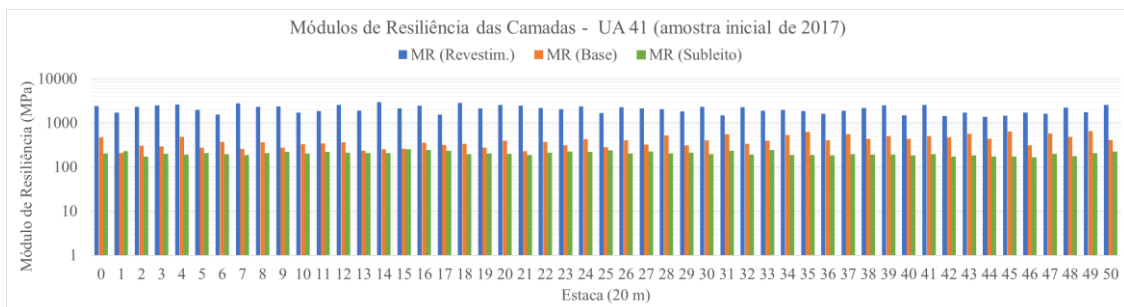
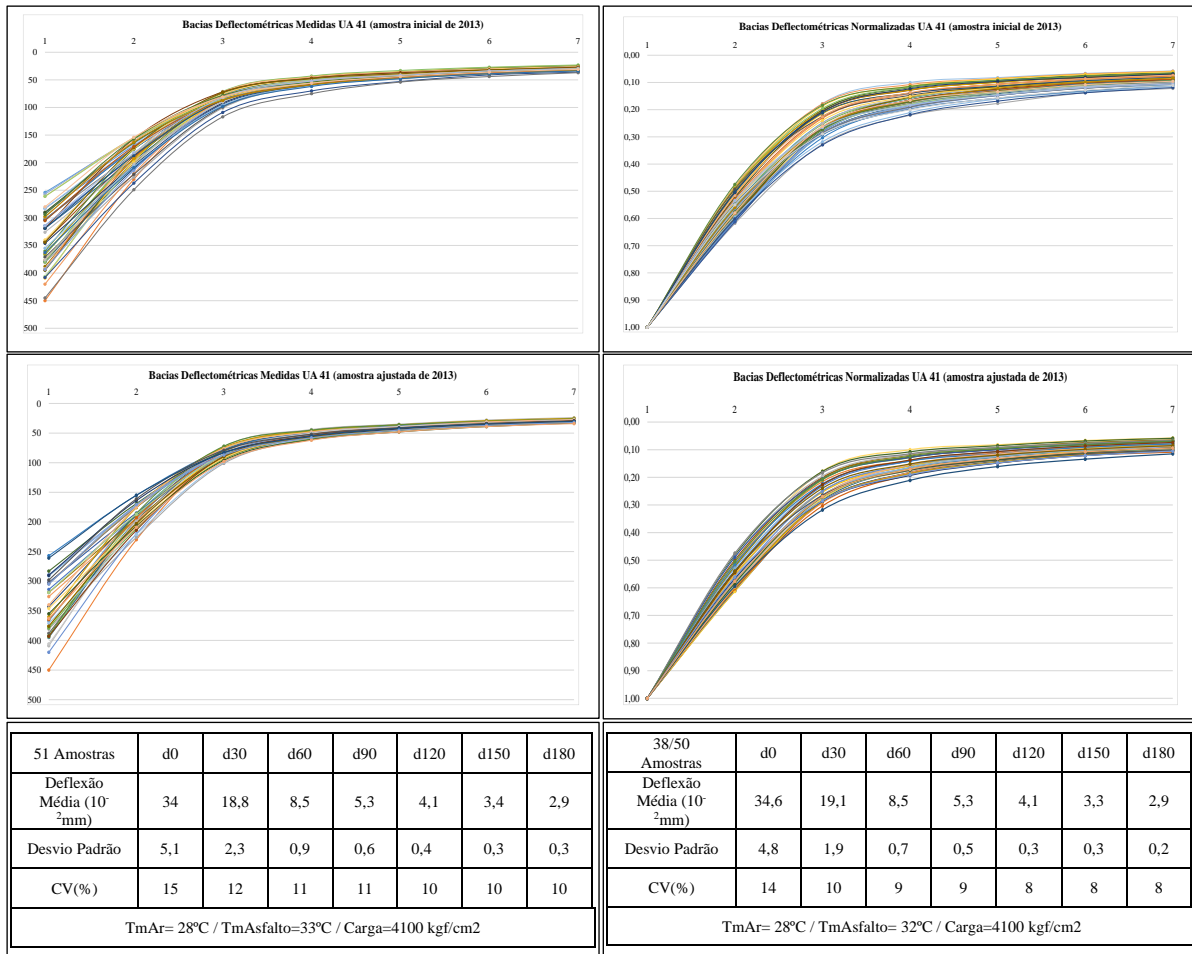
Anexo V – Parâmetros da Unidade de Amostragem 41

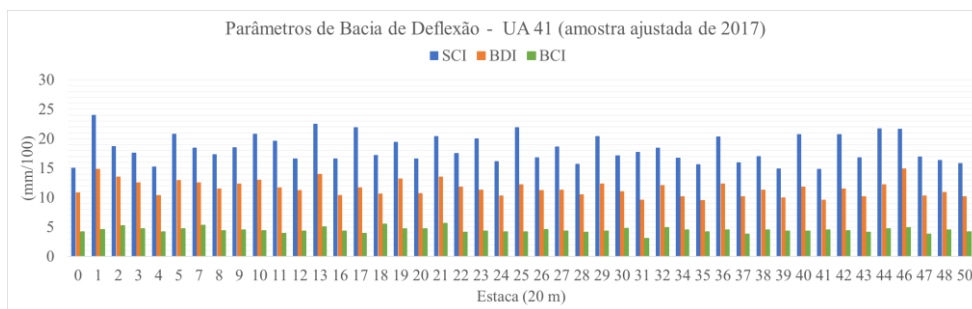


ESTRUTURA DO PAVIMENTO (2013)						
Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo Médio (Mpa) camada granular única	Módulo Médio (Mpa) camada granular dividida ¹	Coef. Poisson	Aderência
1	Cam. Asf.	12	2011	2830	0,30	Não Aderido
2	Cam. Gran	33	473	560	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	225	188	0,45	-
Limite de Erro (RMS) tolerável = 10% (outliers excluídos para nível de confiança de 95% - Média +/- 2 DP)						
Amostra 38/50 Para amostras de 30 ou mais valores, em geral, a aproximação já será suficiente boa, para se poder utilizar este resultado (estacas excluídas da amostra são as em vermelho na tabela abaixo)						

9- limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES

Est.	Data de Execução	Temp. do Ar (° C)	Temp. do Pav. (° C)	Carga (KN)	MR (Rev.)	MR (Base)	MR (Subleito)	RMS (%)	RC (m/10)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
0	20/09/2013	23,3	27,1	4100	2725	504	225	7,8	36,00	43,81	12,5	10,3	3,3
1	20/09/2013	37,4	38,3	4100	1541	230	247	8	20,45	37,17	22	15	3,5
2	20/09/2013	23,3	27,1	4100	2354	359	199	6,2	29,03	43,11	15,5	12,5	4,1
3	20/09/2013	30,2	38,3	4100	1893	383	225	6,6	25,86	40,17	17,4	11,5	3,4
4	20/09/2013	23,4	27,1	4100	2149	1237	219	8,5	46,39	46,65	9,7	7,4	2,7
5	20/09/2013	29,6	38,3	4100	1503	473	231	9,9	25,14	38,91	17,9	10,9	2,8
6	20/09/2013	23,4	27,1	4100	1868	430	204	7,6	26,79	41,52	16,8	11,7	3,4
7	20/09/2013	29,6	38,3	4100	2180	458	228	5,8	29,22	41,50	15,4	10,2	3,3
8	20/09/2013	23,6	27,1	4100	2589	529	244	6,6	35,16	42,72	12,8	9,5	3
9	20/09/2013	29,8	38,3	4100	1722	350	236	8,1	24,19	38,81	18,6	12,1	3,1
10	20/09/2013	23,9	27,1	4100	2884	504	214	6,2	36,29	44,72	12,4	10,3	3,4
11	20/09/2013	29,9	38,3	4100	1480	374	237	8	22,73	37,86	19,8	11,8	2,9
12	20/09/2013	24	27,1	4100	2727	674	236	7,2	39,47	44,26	11,4	8,8	2,9
13	20/09/2013	30,1	38,3	4100	1741	277	233	6,1	22,50	38,57	20	13,5	3,5
14	20/09/2013	24,2	27,1	4100	2958	433	219	7,4	35,16	44,22	12,8	10,6	3,7
15	20/09/2013	30,2	38,3	4100	1431	307	262	7,1	21,23	36,42	21,2	12,4	2,9
16	20/09/2013	24,4	27,1	4100	2473	510	253	7,8	34,35	41,89	13,1	9,7	2,9
17	20/09/2013	30,4	38,3	4100	1639	331	274	6,3	23,08	36,91	19,5	11,4	2,8
18	20/09/2013	24,6	27,1	4100	2793	630	228	7,8	38,46	44,43	11,7	8,9	3,2
19	20/09/2013	30,6	38,3	4100	1467	359	247	9,2	22,28	37,23	20,2	11,5	3,1
20	20/09/2013	24,8	27,1	4100	3006	499	233	7,4	38,46	44,25	11,7	10,1	3,3
21	20/09/2013	30,8	38,3	4100	1855	409	233	7,1	26,16	39,78	17,2	11	3,2
22	20/09/2013	24,9	27,1	4100	2629	529	240	6,8	34,88	42,83	12,9	9,3	3,2
23	20/09/2013	30,8	38,3	4100	1557	435	256	7,1	24,46	37,75	18,4	10,2	2,8
24	20/09/2013	25	27,1	4100	3066	794	247	8	44,12	45,06	10,2	7,7	2,9
25	20/09/2013	30,7	38,3	4100	1346	373	256	10	21,84	36,47	20,6	11,4	2,7
26	20/09/2013	25,2	27,1	4100	2473	718	225	8,3	38,79	44,38	11,6	9	2,9
27	20/09/2013	30,9	38,3	4100	1660	516	244	8,7	27,27	39,26	16,5	9,9	2,8
28	20/09/2013	25,3	27,1	4100	2265	775	233	10,9	38,46	43,57	11,7	8,8	2,7
29	20/09/2013	31,1	38,3	4100	1578	337	231	7,9	22,39	38,20	20,1	12,1	3,4
30	20/09/2013	25,5	27,1	4100	2460	438	211	7,8	31,91	43,22	14,1	11,3	3,5
31	20/09/2013	31,3	38,3	4100	1363	693	253	10,3	27,78	38,75	16,2	8,5	2,5
32	20/09/2013	25,7	27,1	4100	2566	341	207	6,9	30,00	43,18	15	12,2	4,2
33	20/09/2013	31,5	38,3	4100	1479	537	247	11,3	26,32	38,55	17,1	10	2,5
34	20/09/2013	25,8	27,1	4100	2209	610	214	9,4	34,09	43,40	13,2	10	3,1
35	20/09/2013	31,6	38,3	4100	1731	932	222	8,5	35,71	43,45	12,6	8,1	2,7
36	20/09/2013	25,9	27,1	4100	1869	348	219	6,9	25,14	40,19	17,9	12,5	3,5
37	20/09/2013	31,7	38,3	4100	1562	866	231	10	32,85	41,78	13,7	8,2	2,7
38	20/09/2013	26	27,1	4100	1638	473	207	8,7	26,01	40,65	17,3	11,3	3,3
39	20/09/2013	31,8	38,3	4100	2074	1121	225	8	42,45	45,52	10,6	7,2	2,8
40	20/09/2013	26,1	27,1	4100	2018	523	197	8,3	30,41	43,18	14,8	11,1	3,5
41	20/09/2013	31,8	38,3	4100	2073	1190	216	7,9	43,27	46,21	10,4	7,1	2,9
42	20/09/2013	26,2	27,1	4100	1900	413	177	6	26,32	43,01	17,1	12,8	3,9
43	20/09/2013	31,9	38,3	4100	1582	909	211	8,5	33,58	43,23	13,4	8,4	2,9
44	20/09/2013	26,4	27,1	4100	1639	383	167	4,7	22,96	42,20	19,6	13,2	4,2
45	20/09/2013	31,8	38,3	4100	1029	1333	207	9	33,33	43,14	13,5	7,6	2,8
46	20/09/2013	26,5	27,1	4100	1993	504	195	8	29,22	42,93	15,4	11,1	3,6
47	20/09/2013	31,8	38,3	4100	1107	1162	228	10,1	32,85	41,73	13,7	7,9	2,4
48	20/09/2013	26,6	27,1	4100	2265	574	228	10,2	34,09	42,71	13,2	10	3
49	20/09/2013	31,8	38,3	4100	1142	1364	222	8,9	35,71	43,18	12,6	7,3	2,5





ESTRUTURA DO PAVIMENTO (2017)						
Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo Médio (Mpa) camada granular única	Módulo Médio (Mpa) camada granular dividida ¹	Coef. Poisson	Aderência
1	Cam. Asf.	12	1960	2216	0,30	Não Aderido
2	Cam. Gran	33	372	560	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	191	188	0,45	-

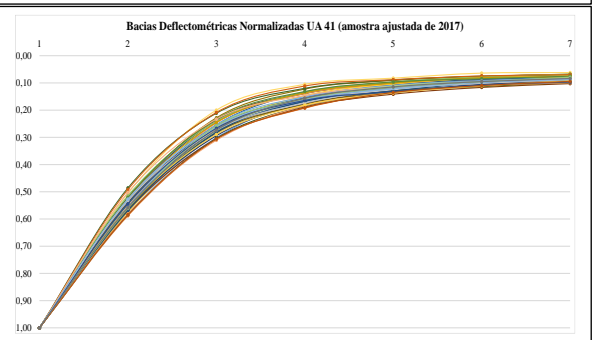
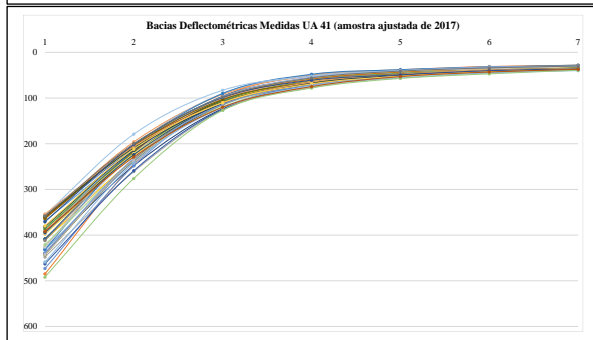
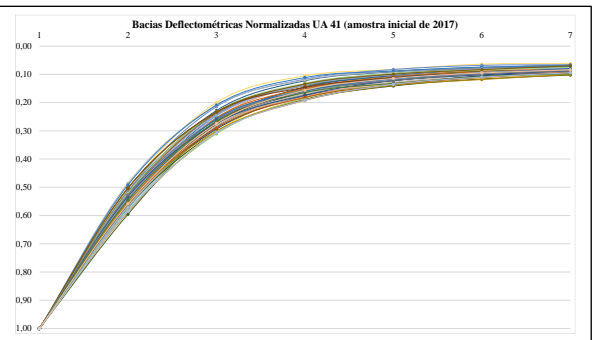
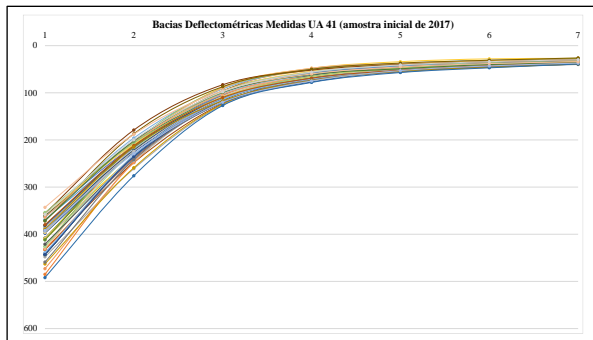
Limite de Erro (RMS) tolerável = 10%
(outliers excluídos para nível de confiança de 95% - Média +/- 2 DP)

Amostra 45/51
Para amostras de 30 ou mais valores, em geral, a aproximação já será suficiente boa, para se poder utilizar este resultado (estacas excluídas da amostra são as em vermelho na tabela abaixo)

10- limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES

Est.	Data de Execução	Temp. do Ar (° C)	Temp. do Pav. (° C)	Carga (KN)	MR (Rev.)	MR (Base)	MR (Subleito)	RMS (%)	RC (m/10)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
0	23/06/2017	20	31,7	4180,84	2375	467	196	8,1	30,00	43,76	15	10,8	4,2
1	23/06/2017	24,5	36,6	4100	1678	203	221	6,6	18,75	37,73	24	14,8	4,6
2	23/06/2017	19,5	31,7	4180,84	2284	299	170	4,3	24,06	43,39	18,7	13,5	5,2
3	23/06/2017	24,4	36,6	4100	2464	288	194	4,6	25,57	42,48	17,6	12,5	4,7
4	23/06/2017	19,8	31,7	4180,84	2548	473	186	1,9	29,61	44,72	15,2	10,4	4,2
5	23/06/2017	23,7	37,5	4100	1917	270	201	5,1	21,63	40,09	20,8	12,9	4,7
6	23/06/2017	20,5	31,7	4180,84	1521	363	189	10	21,53	40,06	20,9	12,9	4,3
7	23/06/2017	23,5	37,5	4100	2750	256	181	3,9	24,46	43,19	18,4	12,5	5,3
8	23/06/2017	20,3	31,7	4180,84	2292	356	203	7	26,01	42,02	17,3	11,5	4,4
9	23/06/2017	24,7	37,5	4100	2321	271	215	3,5	24,32	40,77	18,5	12,3	4,5
10	23/06/2017	19,9	31,7	4180,84	1697	321	196	7,1	21,63	40,09	20,8	13	4,4
11	23/06/2017	24,8	37,5	4100	1806	338	213	6,4	22,96	39,76	19,6	11,7	3,9
12	23/06/2017	20,6	31,7	4180,84	2496	361	206	2,8	27,11	42,53	16,6	11,2	4,3
13	23/06/2017	25,1	37,5	4100	1848	228	201	5,1	20,00	39,42	22,5	14	5
14	23/06/2017	20,8	31,7	4180,84	2888	247	203	5,2	27,27	43,27	16,5	13,1	5,3
15	23/06/2017	23,6	40,5	4100	2090	252	245	6,6	22,50	38,56	20	12,2	4
16	23/06/2017	21,6	31,7	4180,84	2434	354	236	8	27,11	40,90	16,6	10,4	4,3
17	23/06/2017	24,2	40,5	4100	1536	312	227	7,6	20,55	37,71	21,9	11,7	3,9
18	23/06/2017	21,5	31,7	4180,84	2801	330	191	4,1	26,16	43,53	17,2	10,6	5,5
19	23/06/2017	23,2	40,5	4100	2103	270	198	5,6	23,20	41,05	19,4	13,2	4,7
20	23/06/2017	20,4	31,7	4180,84	2506	387	194	5,2	27,11	43,32	16,6	10,7	4,7
21	23/06/2017	23,7	40,5	4100	2435	225	181	2,9	22,06	42,02	20,4	13,5	5,6
22	23/06/2017	21,2	31,7	4180,84	2122	364	207	6,4	25,71	41,53	17,5	11,8	4,1
23	23/06/2017	25,7	40,5	4100	2025	303	218	3,2	22,50	39,68	20	11,3	4,3
24	23/06/2017	21,5	31,7	4180,84	2316	424	213	6,5	27,95	42,23	16,1	10,3	4,2
25	23/06/2017	24,5	40,5	4100	1636	277	232	8,4	20,55	37,69	21,9	12,2	4,2
26	23/06/2017	22,2	31,7	4180,84	2237	399	196	6,6	26,79	42,64	16,8	11,2	4,6
27	23/06/2017	22,8	40,5	4100	2116	319	218	6,9	24,19	40,30	18,6	11,3	4,3
28	23/06/2017	22,7	31,7	4180,84	2026	518	196	8,5	28,66	42,98	15,7	10,5	4,1
29	23/06/2017	23,3	40,5	4100	1780	306	207	7,2	22,06	39,58	20,4	12,3	4,3
30	23/06/2017	22,2	33,2	4180,84	2290	392	191	4,7	26,32	42,94	17,1	11	4,8

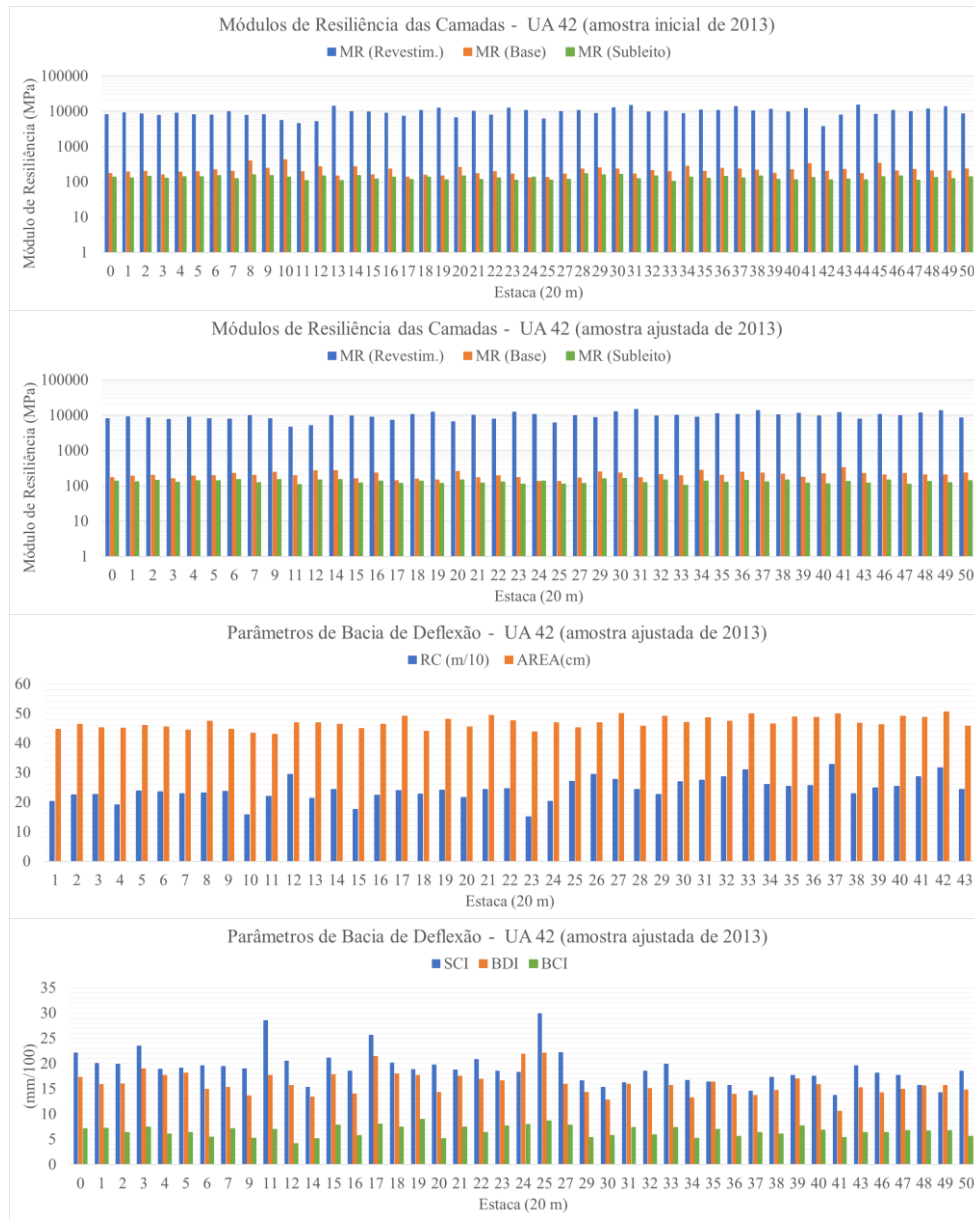
31	23/06/2017	23,4	40,5	4100	1463	541	229	9	25,42	39,27	17,7	9,6	3,1
32	23/06/2017	21,4	33,2	4180,84	2233	331	186	5,5	24,46	42,54	18,4	12,1	4,9
33	23/06/2017	23,2	40,5	4100	1852	386	239	4,6	24,32	39,11	18,5	10	3,7
34	23/06/2017	21,6	33,2	4180,84	1925	521	184	5,8	26,95	43,31	16,7	10,2	4,5
35	23/06/2017	23	40,5	4100	1826	618	181	7,1	28,85	44,00	15,6	9,5	4,2
36	23/06/2017	21,6	33,2	4180,84	1577	399	178	6,3	22,17	41,28	20,3	12,3	4,5
37	23/06/2017	22,4	40,5	4100	1870	551	189	8	28,30	43,06	15,9	10,2	3,8
38	23/06/2017	22	33,2	4180,84	2122	425	187	5,7	26,47	43,02	17	11,3	4,5
39	23/06/2017	22	40,5	4100	2464	490	186	5,2	30,20	44,41	14,9	10	4,3
40	23/06/2017	22,2	33,4	4180,84	1463	427	178	5,3	21,74	41,07	20,7	11,8	4,3
41	23/06/2017	23,8	40,5	4100	2538	490	189	5,7	30,41	44,53	14,8	9,6	4,5
42	23/06/2017	23,3	33,4	4180,84	1410	467	168	5,2	21,74	41,78	20,7	11,5	4,4
43	23/06/2017	24,5	40,5	4100	1692	562	178	5,4	26,79	43,14	16,8	10,2	4,1
44	23/06/2017	22,5	33,4	4180,84	1340	429	168	6,5	20,74	41,05	21,7	12,2	4,7
45	23/06/2017	25,1	35,3	4100	1445	634	168	6,5	25,86	43,46	17,4	9,8	4,3
46	23/06/2017	22,4	33,4	4180,84	1671	306	161	4,7	20,83	41,95	21,6	14,9	4,9
47	23/06/2017	25,5	35,3	4100	1577	569	192	9,6	26,63	41,81	16,9	10,3	3,8
48	23/06/2017	22,7	33,4	4180,84	2200	479	172	4,3	27,61	44,58	16,3	10,9	4,5
49	23/06/2017	24,7	35,3	4100	1714	642	201	8,1	29,03	42,46	15,5	9,2	3,6
50	23/06/2017	21,9	35,8	4180,84	2494	404	218	5,1	28,48	42,32	15,8	10,2	4,2



51 Amostras	d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
Deflexão Média (10 ⁻² mm)	40,4	22,2	10,6	6,2	4,6	3,8	3,4
Desvio Padrão	3,7	1,9	1,1	0,8	0,5	0,4	0,3
CV(%)	9	9	10	12	12	11	10
TmAr= 23°C / TmAsfalto= 36°C / Carga=4100 kgf/cm2							

45/51 Amostras	d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
Deflexão Média (10 ⁻² mm)	40,6	22,3	10,7	6,3	4,6	3,8	3,4
Desvio Padrão	3,8	1,9	1,0	0,7	0,5	0,4	0,3
CV(%)	9	8	10	12	11	11	9
TmAr= 23°C / TmAsfalto= 36°C / Carga=4100 kgf/cm2							

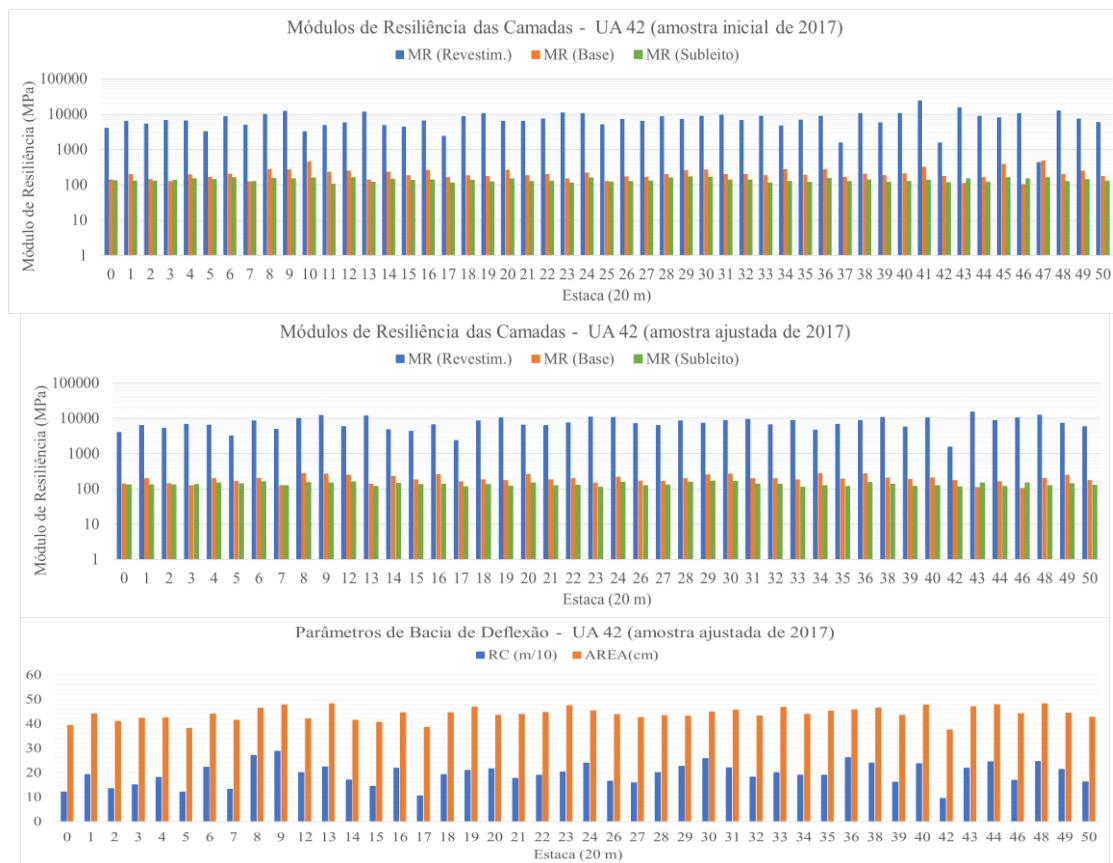
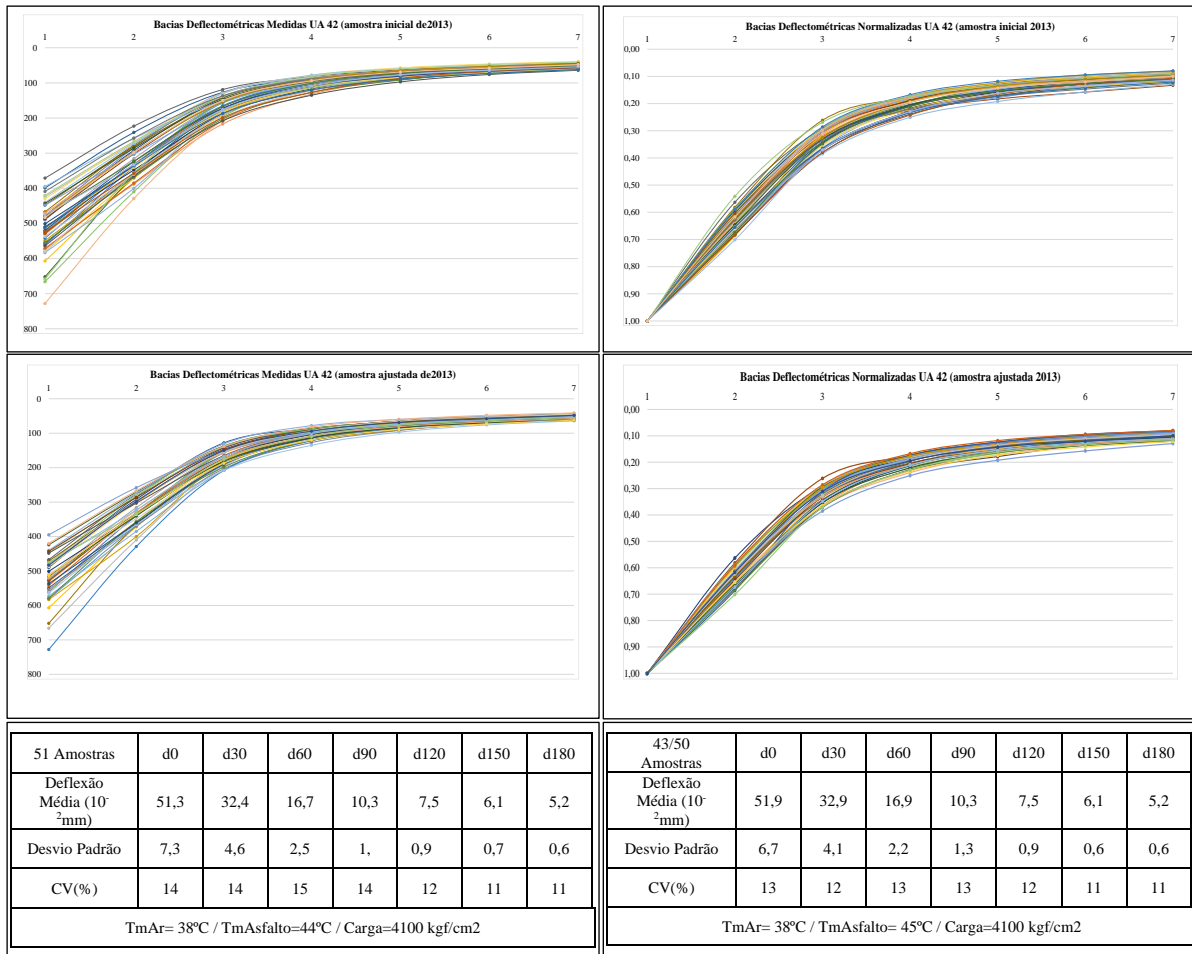
Anexo VI – Parâmetros da Unidade de Amostragem 42

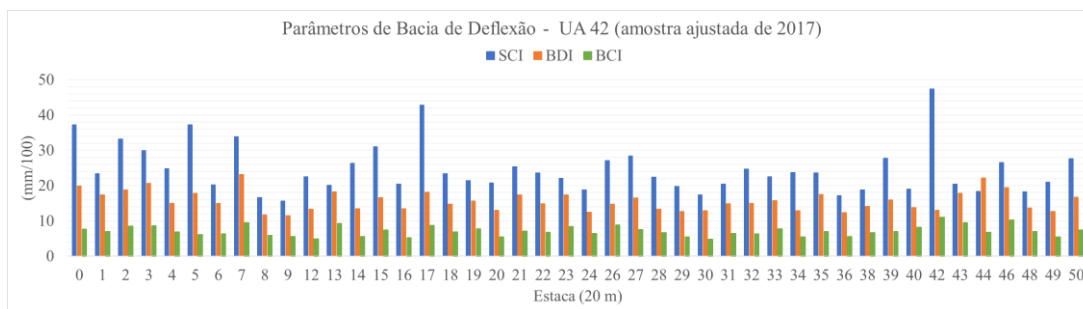


ESTRUTURA DO PAVIMENTO (2013)						
Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo Médio (Mpa) camada granular única	Módulo Médio (Mpa) camada granular dividida ¹	Coef. Poisson	Aderência
1	Cam. Asf.	7	9230	4586	0,30	Não Aderido
2	Cam. Gran.	58	201	560	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	128	120	0,45	-
Limite de Erro (RMS) tolerável = 10% (outliers excluídos para nível de confiança de 95% - Média +/- 2 DP)						
Amostra 43/50 Para amostras de 30 ou mais valores, em geral, a aproximação já será suficiente boa, para se poder utilizar este resultado (estacas excluídas da amostra são as em vermelho na tabela abaixo)						

11- limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES

Est.	Data de Execução	Temp. do Ar (° C)	Temp. do Pav. (° C)	Carga (KN)	MR (Rev.)	MR (Base)	MR (Subleito)	RMS (%)	RC (m/10)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
0	23/09/2013	37,8	39,4	4100	8075	173	136	5,1	20,36	44,68	22,1	17,3	7,1
1	21/09/2013	36,1	49,7	4100	9163	191	129	7,8	22,50	46,33	20	15,8	7,2
2	23/09/2013	38	39,4	4100	8487	199	141	5,4	22,61	45,20	19,9	16	6,3
3	21/09/2013	38,3	49,7	4100	7698	158	125	4,4	19,15	45,05	23,5	19	7,4
4	23/09/2013	38,3	39,4	4100	8903	188	138	6,2	23,81	45,95	18,9	17,7	6
5	21/09/2013	38,9	49,7	4100	8075	193	139	7,3	23,56	45,48	19,1	18,1	6,3
6	23/09/2013	39	39,4	4100	7873	224	149	5,7	22,96	44,48	19,6	14,9	5,4
7	21/09/2013	39,1	49,7	4100	9836	198	122	5,2	23,20	47,39	19,4	15,3	7,1
8	23/09/2013	39,3	39,4	4100	7690	391	158	6,7	30,41	45,97	14,8	10,4	3,7
9	21/09/2013	39,1	49,7	4100	8075	244	149	4,5	23,68	44,71	19	13,6	5,2
10	23/09/2013	39,2	39,4	4100	5448	424	137	9,1	28,48	46,05	15,8	11,4	3,7
11	21/09/2013	38,9	49,7	4100	4561	193	108	5,6	15,79	43,41	28,5	17,7	6,9
12	23/09/2013	39,4	39,4	4100	5110	270	147	9,5	21,95	42,95	20,5	15,7	4,1
13	21/09/2013	38,6	49,7	4100	14002	148	108	4,2	24,73	50,32	18,2	17,1	8,5
14	23/09/2013	39,8	39,4	4100	9892	273	149	6,3	29,41	46,91	15,3	13,4	5,1
15	21/09/2013	37,8	49,7	4100	9645	161	119	6,1	21,33	46,96	21,1	17,8	7,8
16	23/09/2013	39,8	39,4	4100	8970	235	134	4,1	24,32	46,37	18,5	14	5,7
17	21/09/2013	37,2	49,7	4100	7287	139	117	3,7	17,58	44,91	25,6	21,4	8
18	23/09/2013	40	39,4	4100	10548	155	134	4,8	22,39	46,40	20,1	18	7,4
19	21/09/2013	36,7	49,7	4100	12417	147	115	4,5	23,94	49,16	18,8	17,7	8,9
20	23/09/2013	40,3	39,4	4100	6546	259	145	7,9	22,84	44,03	19,7	14,3	5,1
21	21/09/2013	36,8	49,7	4100	10125	173	118	4,9	24,06	48,09	18,7	17,5	7,4
22	23/09/2013	40,7	39,4	4100	7772	197	129	5,6	21,63	45,44	20,8	16,9	6,3
23	21/09/2013	37,2	49,7	4100	12269	170	110	2	24,32	49,41	18,5	16,6	7,6
24	23/09/2013	40,8	39,4	4100	10548	132	134	4,9	24,59	47,52	18,3	21,9	7,9
25	21/09/2013	37,6	49,7	4100	6041	133	110	4,3	15,05	43,76	29,9	22,1	8,6
27	21/09/2013	36,4	46,1	4100	9743	169	116	4,2	20,27	46,87	22,2	15,9	7,8
28	23/09/2013	35,7	42,5	4100	10599	232	170	5,7	27,61	45,42	16,3	13,7	5,2
29	21/09/2013	38,6	46,1	4100	8691	253	159	9,1	27,11	45,27	16,6	14,3	5,3
30	23/09/2013	35,9	42,5	4100	12719	233	162	5	29,41	46,93	15,3	12,8	5,7
31	21/09/2013	39,2	46,1	4100	14724	170	122	4,1	27,78	50,00	16,2	15,9	7,3
32	23/09/2013	36,6	42,5	4100	9519	208	145	5	24,32	45,74	18,5	15,1	5,9
33	21/09/2013	39,2	46,1	4100	10094	195	102	2,9	22,61	49,07	19,9	15,7	7,3
34	23/09/2013	36,7	42,5	4100	8768	279	134	6,3	26,95	47,04	16,7	13,2	5,2
35	21/09/2013	38,9	46,1	4100	10996	200	125	5,7	27,44	48,65	16,4	16,4	6,9
36	23/09/2013	36,8	42,5	4100	10599	247	143	6,1	28,66	47,40	15,7	13,9	5,6
37	21/09/2013	38,8	46,1	4100	13522	233	129	4,3	31,03	49,85	14,5	13,7	6,3
38	23/09/2013	37	42,5	4100	10246	216	145	6,6	26,01	46,50	17,3	14,7	6
39	21/09/2013	38,7	46,1	4100	11507	177	118	5,3	25,42	48,91	17,7	17	7,6
40	23/09/2013	36,6	42,5	4100	9619	221	114	6,8	25,71	48,73	17,5	15,8	6,8
41	21/09/2013	38,4	46,1	4100	12029	332	131	4,4	32,85	49,90	13,7	10,6	5,3
42	23/09/2013	36,6	42,5	4100	3692	200	113	6,6	14,90	41,90	30,2	17,9	6,3
43	21/09/2013	38,2	46,1	4100	7889	229	119	6	22,96	46,76	19,6	15,2	6,3
44	23/09/2013	37,2	42,5	4100	14908	171	113	2	26,95	50,47	16,7	15,8	7,2
45	21/09/2013	37,9	46,1	4100	8228	340	139	7,7	29,61	47,20	15,2	12	4,7
46	23/09/2013	38	42,5	4100	10659	207	145	5,7	24,86	46,26	18,1	14,2	6,3
47	21/09/2013	38,2	46,1	4100	9815	229	110	5,2	25,42	49,09	17,7	14,9	6,7
48	23/09/2013	38,4	42,5	4100	11801	207	131	6,6	28,66	48,78	15,7	15,6	6,6
49	21/09/2013	38,3	46,1	4100	13689	203	123	5,6	31,69	50,59	14,2	15,7	6,7
50	23/09/2013	38,7	42,5	4100	8479	232	139	6,1	24,32	45,75	18,5	14,8	5,6





ESTRUTURA DO PAVIMENTO (2017)						
Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo Médio (Mpa) camada granular única	Módulo Médio (Mpa) camada granular dividida ¹	Coef. Poisson	Aderência
1	Cam. Asf.	7	7063	1954	0,30	Não Aderido
2	Cam. Gran	58	185	550	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	131	122	0,45	-

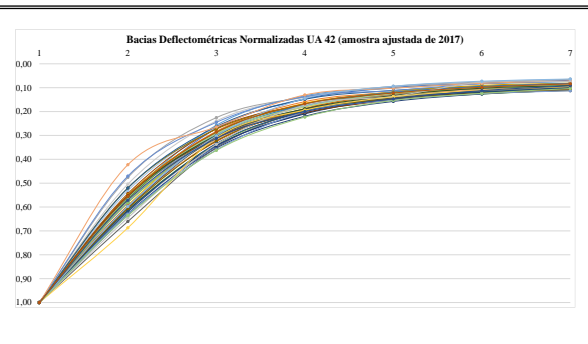
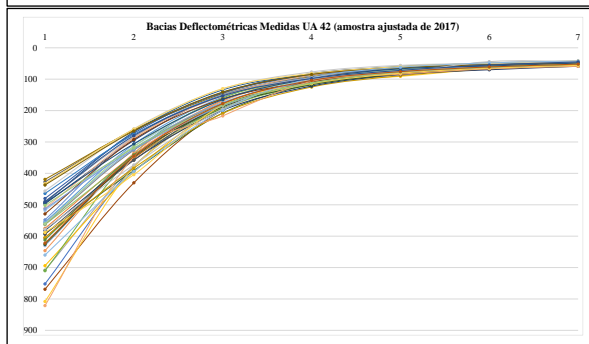
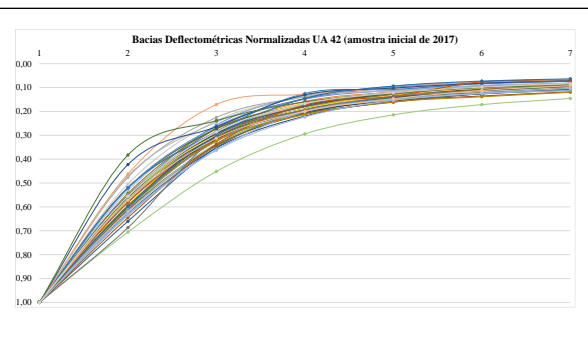
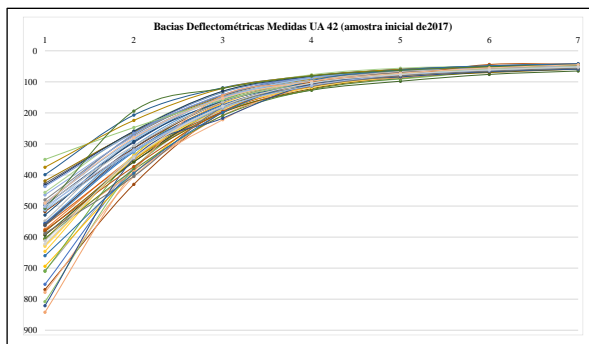
Limite de Erro (RMS) tolerável = 10%
(outliers excluídos para nível de confiança de 95% - Média +/- 2 DP)

Amostra 44/51
Para amostras de 30 ou mais valores, em geral, a aproximação já será suficiente boa, para se poder utilizar este resultado (estacas excluídas da amostra são as em vermelho na tabela abaixo)

12- limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES

Est.	Data de Execução	Temp. do Ar (° C)	Temp. do Pav. (° C)	Carga (KN)	MR (Rev.)	MR (Base)	MR (Subleito)	RMS (%)	RC (m/10)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
0	24/06/2017	20,4	36	4100	4004	139	130	5	12,06	39,38	37,3	19,9	7,6
1	24/06/2017	18,2	23,8	4100	6227	195	128	9,1	19,23	44,03	23,4	17,4	7
2	24/06/2017	20,3	36	4100	5231	141	128	6,1	13,55	41,08	33,2	18,8	8,5
3	24/06/2017	18,1	23,8	4100	6693	125	133	4,7	15,05	42,41	29,9	20,7	8,6
4	24/06/2017	20,5	36	4100	6464	193	146	6,5	18,15	42,46	24,8	15	6,9
5	24/06/2017	18,8	23,8	4100	3163	164	139	3,6	12,10	38,13	37,2	17,8	6,1
6	24/06/2017	20,7	36	4100	8450	202	157	6,5	22,28	44,03	20,2	15	6,3
7	24/06/2017	18,7	26,2	4100	4867	123	122	8,7	13,27	41,51	33,9	23,2	9,5
8	24/06/2017	20,5	36	4100	9783	274	149	7,4	27,11	46,44	16,6	11,7	5,9
9	24/06/2017	18,3	26,2	4100	12040	264	146	4,6	28,85	47,72	15,6	11,5	5,6
10	24/06/2017	21,1	33,6	4100	3221	446	156	8,3	23,44	42,52	19,2	8,8	3,9
11	24/06/2017	18,3	26,2	4100	4771	228	103	4,1	17,24	44,93	26,1	15	6,9
12	24/06/2017	21,1	33,6	4100	5752	245	157	5,9	20,00	42,05	22,5	13,4	4,9
13	24/06/2017	17,7	26,2	4100	11608	139	118	4,7	22,39	48,27	20,1	18,3	9,3
14	24/06/2017	21,1	33,6	4100	4721	227	144	5,3	17,11	41,39	26,3	13,5	5,6
15	24/06/2017	17,5	26,2	4100	4280	181	132	8,1	14,52	40,73	31	16,6	7,4
16	24/06/2017	21	33,6	4100	6525	260	135	6	21,95	44,54	20,5	13,5	5,2
17	24/06/2017	17,5	23,6	4100	2378	160	113	6,5	10,51	38,52	42,8	18,2	8,7
18	24/06/2017	21,3	33,6	4100	8556	181	133	2,6	19,23	44,60	23,4	14,8	6,9
19	24/06/2017	18,4	23,6	4100	10272	173	119	2,7	21,03	46,97	21,4	15,6	7,7
20	24/06/2017	21,6	33,6	4100	6356	260	146	6,8	21,63	43,59	20,8	13	5,5
21	24/06/2017	17,4	23,6	4100	6227	180	122	6	17,72	43,89	25,4	17,4	7,1
22	24/06/2017	21,8	33,6	4100	7391	196	125	3,1	19,07	44,76	23,6	14,9	6,8
23	24/06/2017	18	23,6	4100	10921	148	112	1,5	20,36	47,51	22,1	17,4	8,4
24	24/06/2017	21,8	33,6	4100	10524	218	153	7,5	23,94	45,42	18,8	12,5	6,4
25	24/06/2017	17,2	23,6	4100	4989	125	120	11,3	12,06	41,05	37,3	18,3	12,5
26	24/06/2017	22,3	33,6	4100	7126	170	124	4,7	16,61	43,75	27,1	14,8	8,8
27	24/06/2017	17,9	23,4	4100	6306	164	128	4,5	15,85	42,62	28,4	16,5	7,5
28	24/06/2017	22,1	33,6	4100	8556	196	155	4,9	20,09	43,39	22,4	13,4	6,6
29	24/06/2017	18	23,4	4100	7213	254	165	9,1	22,73	43,13	19,8	12,7	5,4
30	24/06/2017	22	33,6	4100	8661	264	161	5,6	25,86	44,79	17,4	12,9	4,8

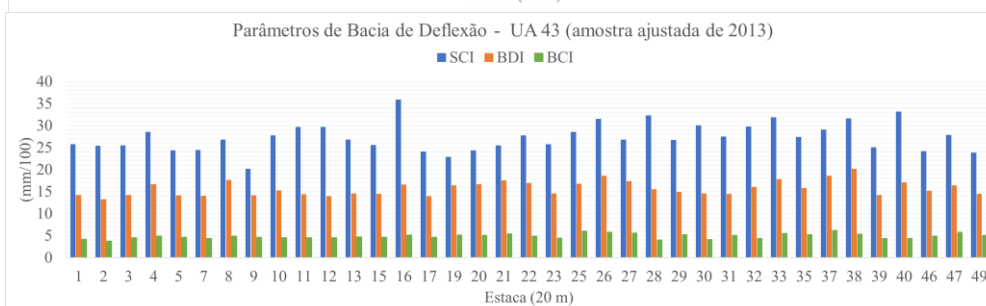
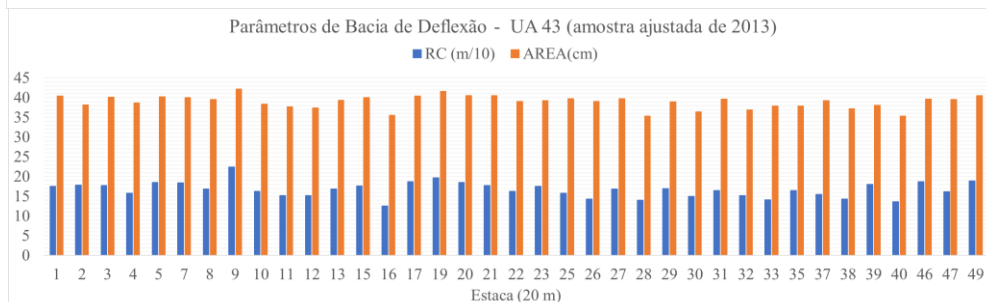
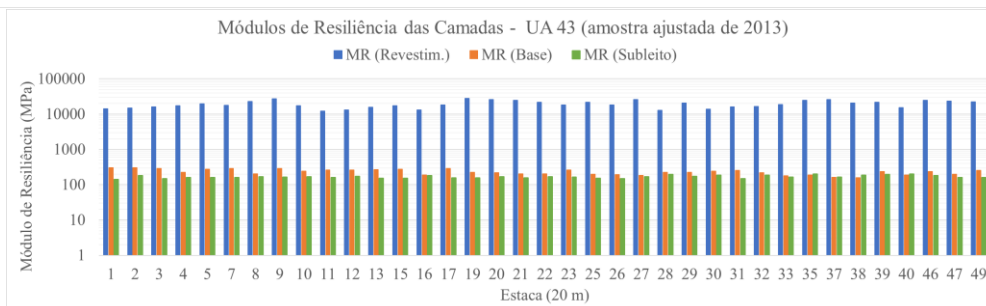
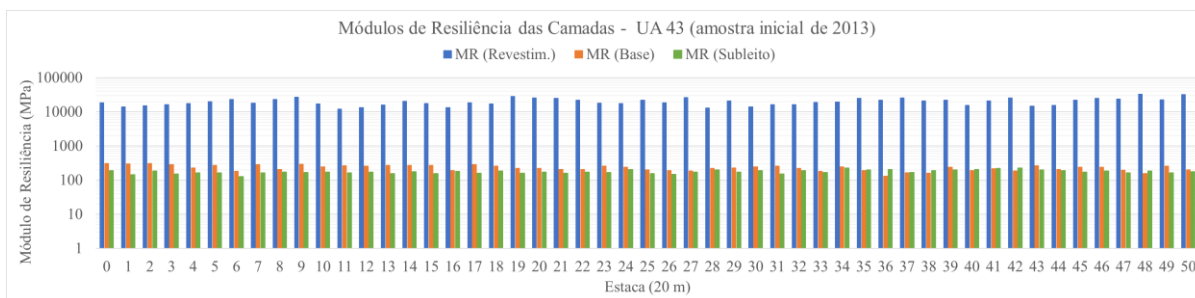
31	24/06/2017	17,8	23,4	4100	9317	196	135	6,5	22,06	45,67	20,4	14,9	6,4
32	24/06/2017	21,8	33,6	4100	6542	197	135	5,3	18,22	43,26	24,7	15	6,3
33	24/06/2017	18,5	23,4	4100	8661	183	111	4,2	20,00	46,80	22,5	15,8	7,7
34	24/06/2017	21,9	33,6	4100	4684	270	122	4,8	18,99	43,87	23,7	12,9	5,5
35	24/06/2017	17,4	23,4	4100	6704	189	116	5	19,07	45,18	23,6	17,5	7
36	24/06/2017	22	33,6	4100	8661	274	149	8,4	26,16	45,79	17,2	12,4	5,6
37	24/06/2017	17,8	23,4	4100	1549	166	124	12	9,93	35,91	45,3	24,5	3,6
38	24/06/2017	21,8	33,6	4100	10529	203	137	6	23,94	46,58	18,8	14,1	6,7
39	24/06/2017	17	23,4	4100	5712	184	117	3,8	16,19	43,51	27,8	16	7
40	24/06/2017	22,5	33,8	4100	10397	206	122	7,7	23,68	47,72	19	13,8	8,2
41	24/06/2017	16,6	23,4	4100	24108	320	132	3,7	43,69	54,13	10,3	8,9	5,5
42	24/06/2017	22	33,8	4100	1549	173	115	9,1	9,49	37,56	47,4	13	11
43	24/06/2017	16,7	23,4	4100	15177	110	146	7,9	21,95	47,08	20,5	17,8	9,5
44	24/06/2017	22	33,8	4100	8661	160	118	6,4	24,46	47,81	18,4	22,2	6,8
45	24/06/2017	17	23,4	4100	7820	378	160	7,6	29,80	45,80	15,1	10,3	4,1
46	24/06/2017	22	33,8	4100	10400	103	148	4,4	16,92	44,14	26,6	19,5	10,3
47	24/06/2017	16,9	23,4	4100	432	471	157	6,3	14,38	36,04	31,3	7,3	4
48	24/06/2017	22,7	33,8	4100	12337	198	124	3,7	24,59	48,29	18,3	13,7	7
49	24/06/2017	16,2	23,4	4100	7300	245	139	1,9	21,43	44,51	21	12,7	5,5
50	24/06/2017	22,7	34,7	4100	5856	174	127	5,1	16,25	42,73	27,7	16,7	7,4



51 Amostras	d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
Deflexão Média (10 ⁻² mm)	57,1	32,3	16,9	10,0	7,3	5,8	5,1
Desvio Padrão	11,6	5,4	2,6	1,2	1,0	0,7	0,5
CV(%)	20	17	15	12	13	12	11
TmAr= 20°C / TmAsfalto= 29°C / Carga=4100 kgf/cm2							

44/51 Amostras	d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
Deflexão Média (10 ⁻² mm)	57,4	32,8	17,2	10,1	7,3	5,8	5,0
Desvio Padrão	10,0	4,6	2,3	1,1	0,9	0,6	0,5
CV(%)	17	14	13	11	12	11	10
TmAr= 20°C / TmAsfalto= 30°C / Carga=4100 kgf/cm2							

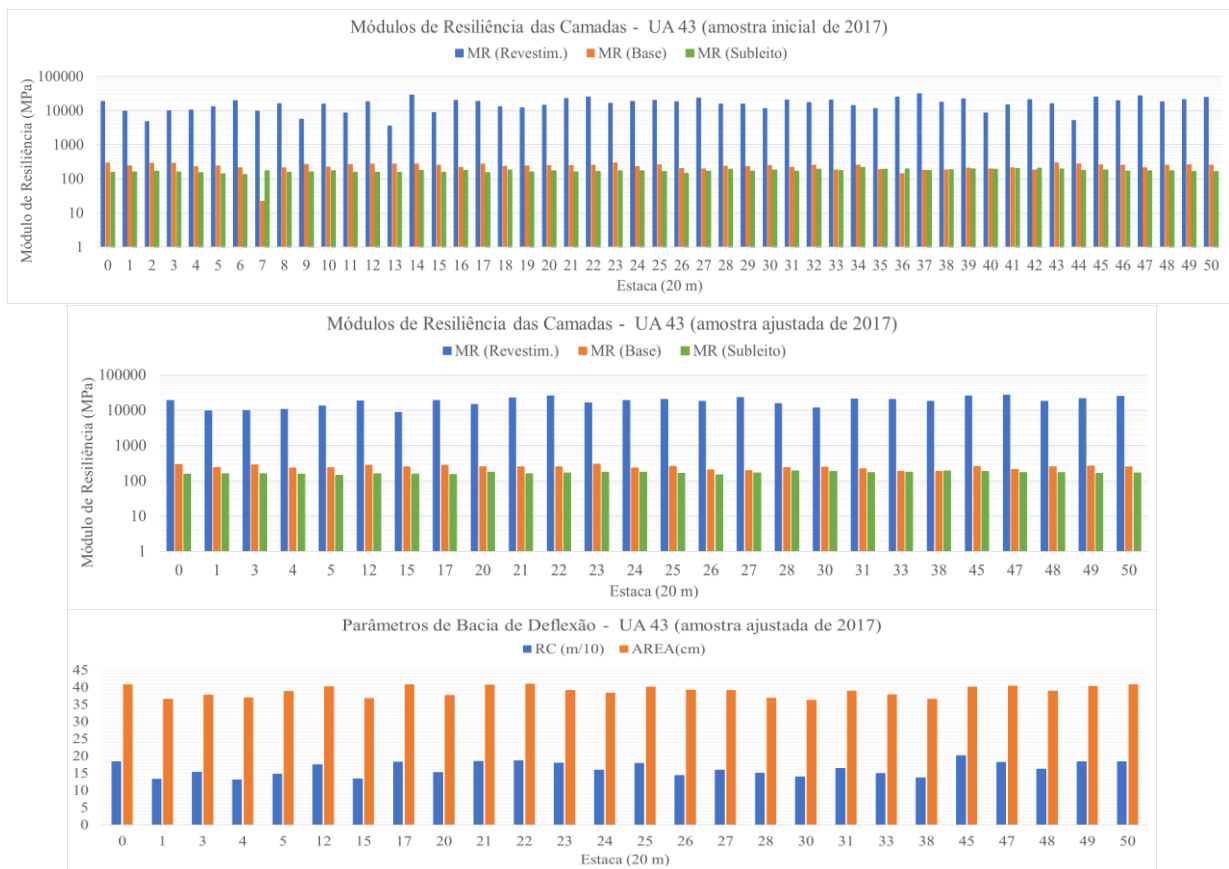
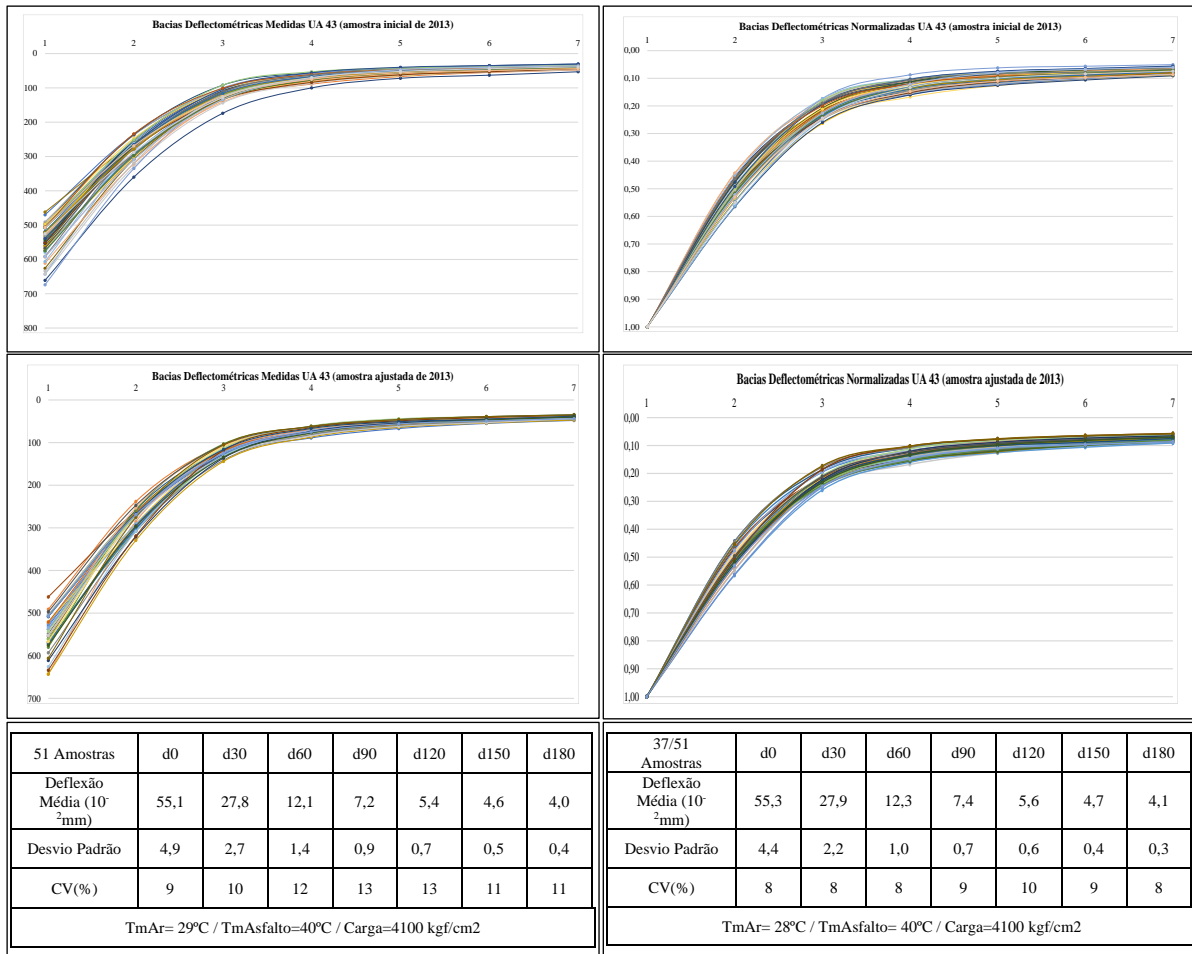
Anexo VII – Parâmetros da Unidade de Amostragem 43

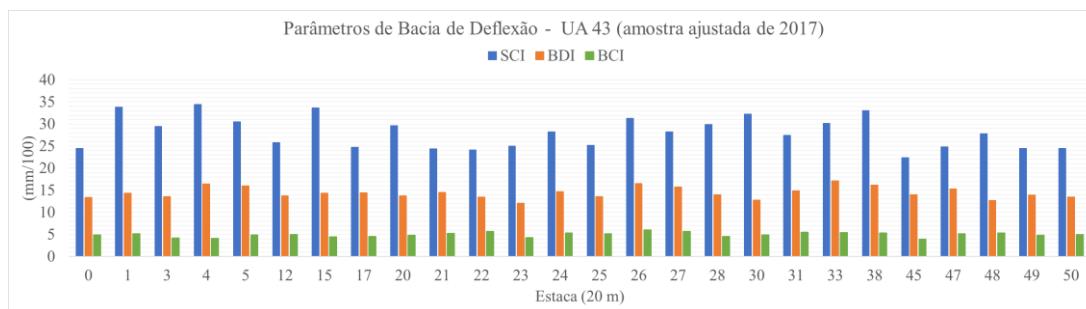


ESTRUTURA DO PAVIMENTO (2013)						
Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo Médio (Mpa) camada granular única	Módulo Médio (Mpa) camada granular dividida ¹	Coef. Poisson	Aderência
1	Cam. Asf.	4	18956	6483	0,30	Não Aderido
2	Cam. Gran	48	227	550	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	165	156	0,45	-
Limite de Erro (RMS) tolerável = 10% (outliers excluídos para nível de confiança de 95% - Média +/- 2 DP)						
Amostra 37/51 Para amostras de 30 ou mais valores, em geral, a aproximação já será suficiente boa, para se poder utilizar este resultado (estacas excluídas da amostra são as em vermelho na tabela abaixo)						

13- limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES

Est.	Data de Execução	Temp. do Ar (° C)	Temp. do Pav. (° C)	Carga (KN)	MR (Rev.)	MR (Base)	MR (Subleito)	RMS (%)	RC (m/10)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
0	19/09/2013	30,3	40,7	4180,84	18255	309	186	10,3	19,23	38,97	23,4	13	3,9
1	19/09/2013	29,2	40,1	4100	14087	302	143	8,4	17,51	40,39	25,7	14,2	4,2
2	19/09/2013	30,9	40,7	4180,84	14906	306	183	9,8	17,79	38,13	25,3	13,2	3,7
3	19/09/2013	29,2	40,1	4100	16059	287	150	8,3	17,72	40,16	25,4	14,2	4,5
4	19/09/2013	31,1	40,7	4180,84	17470	227	162	9,5	15,79	38,65	28,5	16,6	4,9
5	19/09/2013	29,1	40,1	4100	19696	273	160	7,5	18,52	40,28	24,3	14,1	4,6
6	19/09/2013	31	40,7	4180,84	23112	182	127	6,8	14,95	41,51	30,1	18,6	7,4
7	19/09/2013	28,9	40,1	4100	17843	287	160	7,9	18,44	40,01	24,4	14	4,3
8	19/09/2013	30,7	40,7	4180,84	22836	205	168	8,4	16,85	39,51	26,7	17,6	4,9
9	19/09/2013	28,7	40,1	4100	27089	289	164	9,3	22,39	42,14	20,1	14,1	4,6
10	19/09/2013	30,5	40,7	4180,84	17175	245	170	8,6	16,25	38,38	27,7	15,2	4,5
11	19/09/2013	28,4	40,1	4100	12083	263	160	9,2	15,20	37,66	29,6	14,3	4,5
12	19/09/2013	30,5	40,7	4180,84	13213	260	172	8	15,20	37,42	29,6	13,9	4,5
13	19/09/2013	28,2	40,1	4100	15806	270	154	9,4	16,85	39,34	26,7	14,5	4,7
14	19/09/2013	30,4	40,7	4180,84	20196	269	176	12,4	18,37	39,35	24,5	14	5
15	19/09/2013	28	40,1	4100	17386	273	154	8	17,65	40,01	25,5	14,4	4,6
16	19/09/2013	30,4	40,7	4180,84	13310	191	181	8,2	12,57	35,51	35,8	16,5	5,1
17	19/09/2013	27,8	40,1	4100	18301	287	158	8,4	18,75	40,41	24	13,9	4,6
18	19/09/2013	30,2	40,7	4180,84	17252	260	183	10,6	17,18	38,01	26,2	15	3,9
19	19/09/2013	27,6	40,1	4100	28093	224	158	7,6	19,74	41,63	22,8	16,3	5,1
20	19/09/2013	29,8	40,7	4180,84	25800	221	168	8,4	18,52	40,48	24,3	16,6	5
21	19/09/2013	27,5	40,1	4100	24863	204	158	7,4	17,72	40,56	25,4	17,5	5,4
22	19/09/2013	29,6	40,7	4180,84	22011	204	170	6,4	16,25	39,10	27,7	16,9	4,9
23	19/09/2013	27,3	40,1	4100	18072	260	166	8	17,51	39,21	25,7	14,5	4,4
24	19/09/2013	29,5	40,7	4180,84	17688	236	204	10,5	16,36	36,73	27,5	15,1	4
25	19/09/2013	27,2	40,1	4100	21749	198	152	7,3	15,79	39,76	28,5	16,7	6
26	19/09/2013	29,2	40,7	4180,84	18201	192	147	7,7	14,33	39,10	31,4	18,5	5,7
27	19/09/2013	27	40,1	4100	26118	185	168	6,9	16,85	39,74	26,7	17,3	5,6
28	19/09/2013	29,1	40,7	4180,84	12977	223	196	9,1	13,98	35,30	32,2	15,5	4
29	19/09/2013	26,9	40,1	4100	20963	226	172	7,8	16,92	39,01	26,6	14,9	5,2
30	19/09/2013	28,9	40,7	4180,84	13987	244	188	7,5	15,00	36,40	30	14,5	4,1
31	19/09/2013	26,8	40,1	4100	16311	257	150	7,3	16,42	39,67	27,4	14,4	5
32	19/09/2013	28,8	40,7	4180,84	16381	221	186	9,5	15,15	36,88	29,7	16	4,3
33	19/09/2013	26,7	40,1	4100	18803	179	164	8,1	14,15	37,86	31,8	17,7	5,5
34	19/09/2013	28,9	40,7	4180,84	19216	242	223	9,1	17,24	36,49	26,1	14,4	3,6
35	19/09/2013	26,6	40,1	4100	24875	190	199	8,3	16,48	37,85	27,3	15,7	5,2
36	19/09/2013	28,9	40,7	4180,84	22011	131	204	8,9	13,27	36,43	33,9	21,8	5,8
37	19/09/2013	26,5	40,1	4100	25800	163	166	6,7	15,52	39,26	29	18,5	6,2
38	19/09/2013	28,8	40,7	4180,84	20681	159	188	8,2	14,29	37,22	31,5	20,1	5,3
39	19/09/2013	26,4	40,1	4100	21749	239	197	9	18,00	38,12	25	14,2	4,3
40	19/09/2013	28,8	40,7	4180,84	15348	191	201	8,9	13,60	35,35	33,1	17	4,3
41	19/09/2013	26,6	40,1	4100	20714	218	218	13,8	17,58	36,88	25,6	16	3,9
42	19/09/2013	28,7	40,7	4180,84	25800	185	223	7,3	16,42	37,10	27,4	16,1	4,8
43	19/09/2013	26,2	40,1	4100	14787	266	196	11,2	16,54	36,67	27,2	13,3	4
44	19/09/2013	28,7	40,7	4180,84	15536	207	188	12,8	14,20	36,19	31,7	16,2	4,9
45	19/09/2013	26,1	40,1	4100	21716	238	168	10,5	18,37	39,75	24,5	16	4,7
46	19/09/2013	28,9	40,7	4180,84	24875	236	183	9,4	18,67	39,60	24,1	15,1	4,9
47	19/09/2013	26,1	40,1	4100	23401	197	162	6	16,19	39,50	27,8	16,3	5,7
48	19/09/2013	29,1	40,7	4180,84	32522	155	183	5,6	15,90	39,27	28,3	17,5	6,2
49	19/09/2013	26	40,1	4100	22561	257	162	9,8	18,91	40,53	23,8	14,4	5
50	19/09/2013	29,2	40,7	4180,84	31747	202	176	7,6	18,99	40,77	23,7	16	5,8





ESTRUTURA DO PAVIMENTO (2017)						
Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo Médio (Mpa) camada granular única	Módulo Médio (Mpa) camada granular dividida ¹	Coef. Poisson	Aderência
1	Cam. Asf.	4	16988	6265	0,30	Não Aderido
2	Cam. Gran	48	240	560	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	163	154	0,45	-

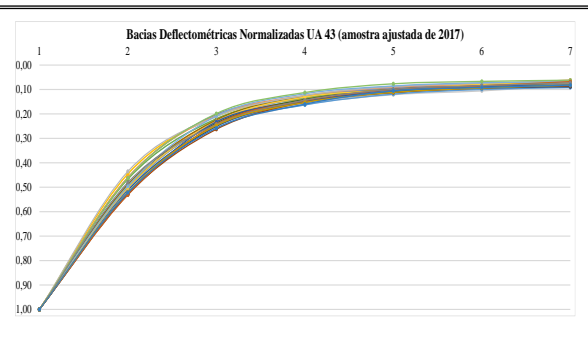
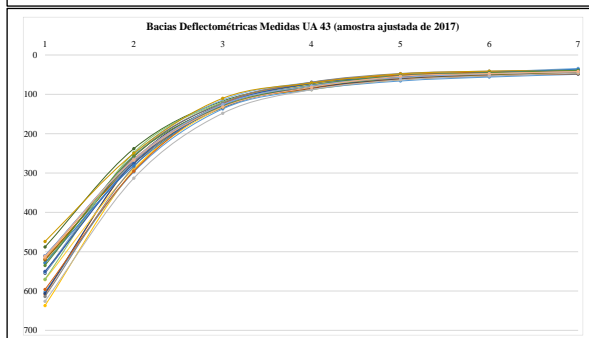
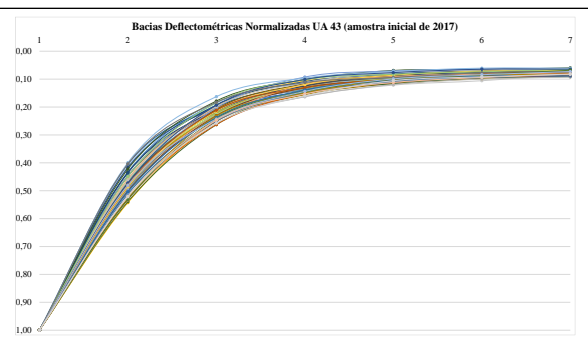
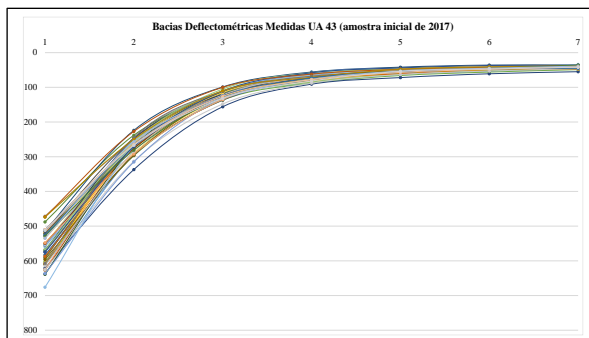
Limite de Erro (RMS) tolerável = 10%
(outliers excluídos para nível de confiança de 95% - Média +/- 2 DP)

Amostra 26/51
Para amostras de 30 ou mais valores, em geral, a aproximação já será suficiente boa, para se poder utilizar este resultado (estacas excluídas da amostra são as em vermelho na tabela abaixo)

14- limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES

Est.	Data de Execução	Temp. do Ar (° C)	Temp. do Pav. (° C)	Carga (KN)	MR (Rev.)	MR (Base)	MR (Subleito)	RMS (%)	RC (m/10)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
0	21/06/2017	23,5	31,2	4100	18730	293	154	6,8	18,37	40,80	24,5	13,4	4,9
1	21/06/2017	22,9	33,2	4100	9595	240	158	9,2	13,31	36,55	33,8	14,3	5,1
2	21/06/2017	23,6	31,2	4100	4749	290	167	10,1	12,89	35,15	34,9	12,9	4
3	21/06/2017	22,7	33,2	4100	9833	286	158	9,8	15,31	37,73	29,4	13,6	4,2
4	21/06/2017	23,9	31,2	4100	10565	231	152	6,9	13,08	36,95	34,4	16,4	4,1
5	21/06/2017	22,8	33,2	4100	13229	240	142	9,1	14,75	38,82	30,5	16	4,9
6	21/06/2017	23,7	31,2	4100	19667	212	133	10,2	15,85	41,01	28,4	18,1	6,5
7	21/06/2017	22,8	33,2	4100	9599	22	171	9,6	12,64	35,24	35,6	15,5	4,4
8	21/06/2017	23,1	31,2	4100	16069	214	156	10,3	14,33	38,21	31,4	15,9	5,9
9	21/06/2017	22,6	33,2	4100	5538	268	160	10	12,68	35,39	35,5	13,2	4,6
10	21/06/2017	24	33,2	4100	15774	223	171	10,8	14,66	37,46	30,7	15	5,7
11	21/06/2017	22,3	33,2	4100	8563	265	154	10,2	13,85	36,92	32,5	13,9	4,6
12	21/06/2017	23,3	33,2	4100	18294	275	156	7,3	17,44	40,16	25,8	13,7	5
13	21/06/2017	21,9	33,2	4100	3582	277	156	9,9	12,10	34,94	37,2	12,9	4,7
14	21/06/2017	23,1	33,2	4100	28459	272	175	11,2	20,74	41,21	21,7	13	5,7
15	21/06/2017	22,3	33,2	4100	8675	253	154	8,2	13,39	36,71	33,6	14,3	4,4
16	21/06/2017	23,6	33,2	4100	20030	220	175	10,8	15,85	38,35	28,4	14,9	5,8
17	21/06/2017	22,4	31,2	4100	18778	276	150	9	18,22	40,71	24,7	14,4	4,5
18	21/06/2017	23,8	33,2	4100	13023	237	179	15,8	14,47	36,31	31,1	15	5,3
19	21/06/2017	21,8	31,2	4100	12253	241	158	11,1	14,47	37,36	31,1	15,2	4,9
20	21/06/2017	23,7	34,3	4100	14575	250	173	7,3	15,20	37,59	29,6	13,7	4,8
21	21/06/2017	21,6	31,2	4100	22678	250	158	9,4	18,44	40,66	24,4	14,5	5,2
22	21/06/2017	23,9	34,3	4100	25506	253	164	8,2	18,67	40,97	24,1	13,5	5,7
23	21/06/2017	21,9	31,2	4100	16389	297	173	7,5	18,00	39,10	25	12,1	4,3
24	21/06/2017	23,9	34,3	4100	18778	231	173	8,7	15,96	38,35	28,2	14,7	5,3
25	21/06/2017	21	27,2	4100	20281	259	162	7,8	17,86	40,03	25,2	13,6	5,1
26	21/06/2017	24	34,3	4100	18117	204	146	6,2	14,38	39,20	31,3	16,5	6
27	21/06/2017	21	28,4	4100	23243	197	167	7,5	15,96	39,09	28,2	15,7	5,7
28	21/06/2017	24	34,3	4100	15457	237	188	5,4	15,05	36,84	29,9	14	4,5
29	21/06/2017	20,9	28,4	4100	15774	228	169	10,3	15,00	37,75	30	13,9	5,8
30	21/06/2017	24	35,1	4100	11560	246	182	6,9	13,98	36,24	32,2	12,8	4,9

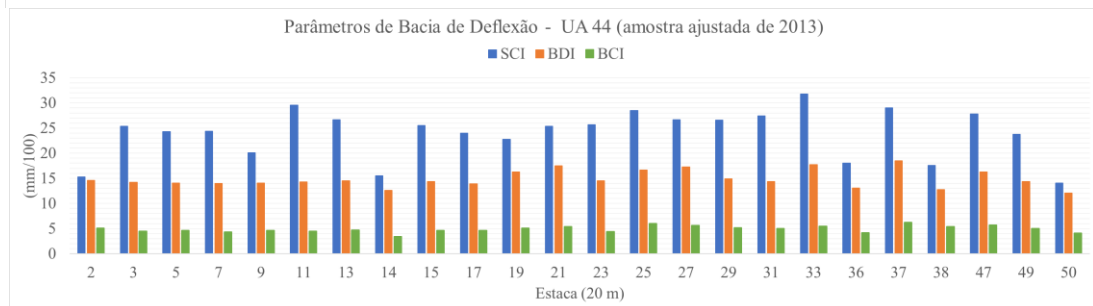
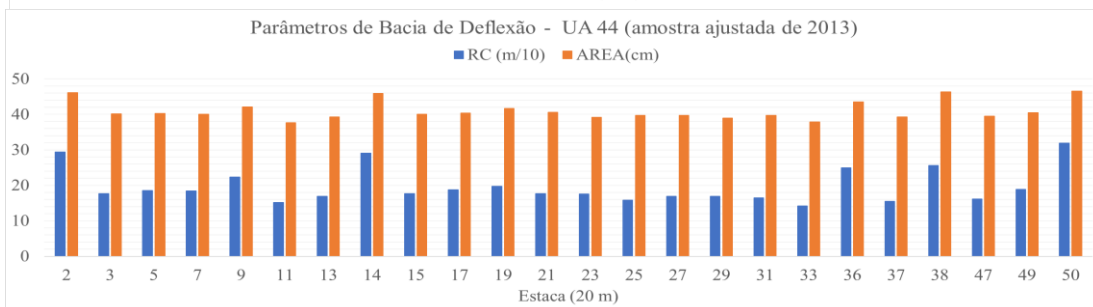
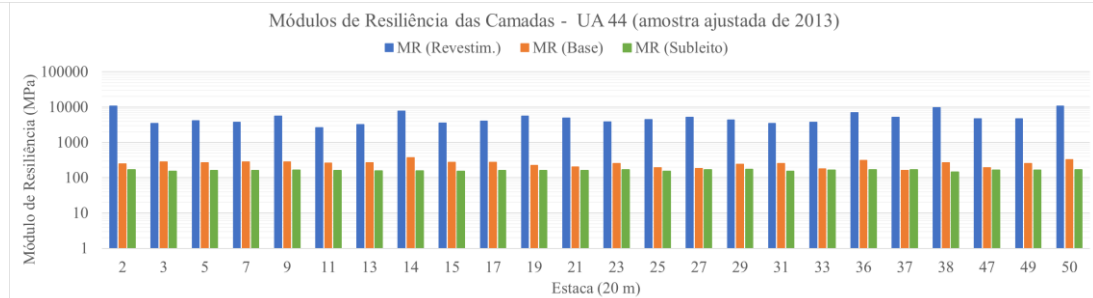
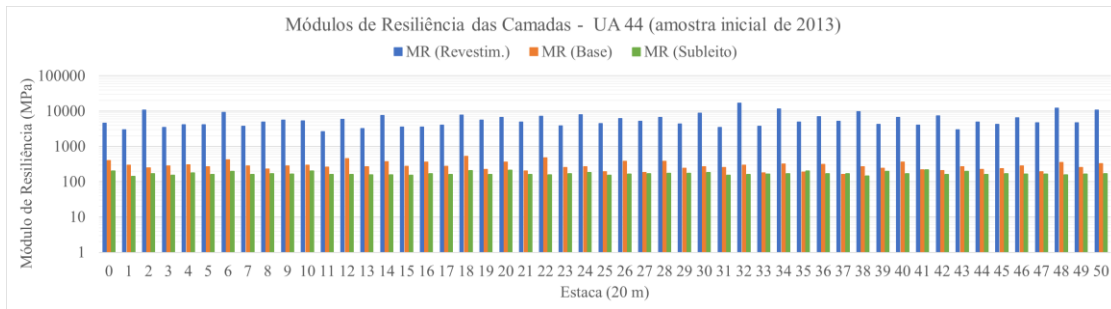
31	21/06/2017	20,7	28,4	4100	20808	220	169	7,7	16,42	38,95	27,4	14,9	5,5
32	21/06/2017	23,8	35,1	4100	17208	253	188	10,1	16,36	37,47	27,5	13,5	4,8
33	21/06/2017	20,4	28,4	4100	20544	183	175	9,1	14,95	37,85	30,1	17,1	5,4
34	21/06/2017	23,9	35,1	4100	14224	256	217	11,6	15,52	35,49	29	12,5	4,3
35	21/06/2017	20,6	28,4	4100	11699	190	189	10,1	12,20	34,55	36,9	15,6	4,9
36	21/06/2017	23,7	35,1	4100	25506	143	193	12,6	13,98	37,30	32,2	18,6	7
37	21/06/2017	20,4	27,9	4100	31749	179	175	12,6	17,58	40,16	25,6	15,7	7
38	21/06/2017	23,9	35,1	4100	17794	185	186	7,6	13,64	36,52	33	16,2	5,3
39	21/06/2017	19,7	27,9	4100	22402	209	193	8,2	16,36	37,82	27,5	14,5	5,1
40	21/06/2017	24,1	35,3	4100	8456	197	188	11,4	11,08	33,31	40,6	16	4,5
41	21/06/2017	20,5	27,9	4100	14750	212	198	12,1	14,33	35,53	31,4	15,1	4,7
42	21/06/2017	24,6	35,3	4100	21071	185	207	10,9	14,85	36,48	30,3	16	5,3
43	21/06/2017	20,2	27,9	4100	15982	297	193	11,7	18,29	37,71	24,6	12,7	3,8
44	21/06/2017	23,8	35,3	4100	5195	271	175	12,8	12,43	34,28	36,2	13,4	4,3
45	21/06/2017	20,5	27,9	4100	25432	259	183	8,8	20,09	40,03	22,4	14	3,9
46	21/06/2017	23,9	35,3	4100	19432	256	169	10,6	17,24	39,33	26,1	14	5,2
47	21/06/2017	19,9	27,9	4100	27042	212	171	4,1	18,15	40,38	24,8	15,3	5,1
48	21/06/2017	25,1	35,3	4100	18068	253	171	5,7	16,19	38,86	27,8	12,7	5,3
49	21/06/2017	20,2	27,9	4100	21177	262	162	7,3	18,37	40,29	24,5	13,9	4,8
50	21/06/2017	24,2	39,1	4100	24584	253	164	6,8	18,37	40,78	24,5	13,5	5



51 Amostras	d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
Deflexão Média (10 ⁻² mm)	56,4	26,9	12,4	7,3	5,5	4,6	4,2
Desvio Padrão	4,9	2,1	1,1	0,8	0,6	0,5	0,4
CV(%)	9	8	9	11	11	10	9
TmAr= 23°C / TmAsfalto= 32°C / Carga=4100 kgf/cm2							

26/51 Amostras	d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
Deflexão Média (10 ⁻² mm)	55,2	27,1	12,7	7,8	5,6	4,7	4,2
Desvio Padrão	4,5	1,7	0,8	0,6	0,5	0,4	0,4
CV(%)	8	6	6	8	9	9	9
TmAr= 23°C / TmAsfalto= 32°C / Carga=4100 kgf/cm2							

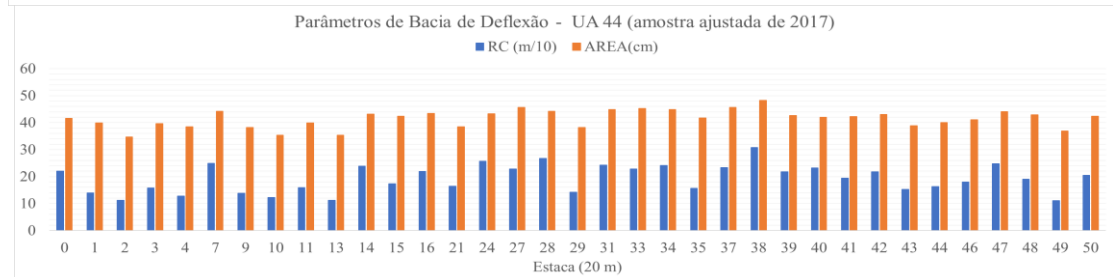
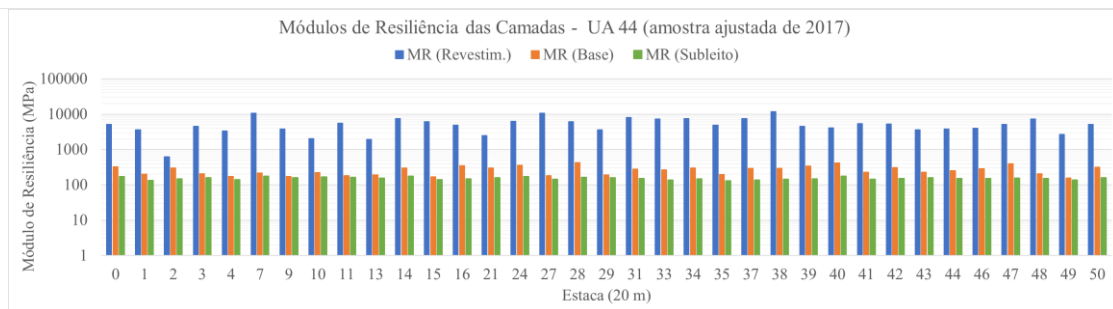
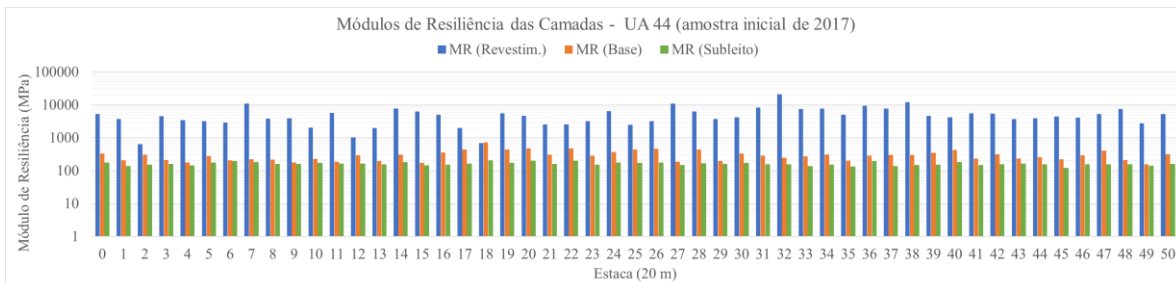
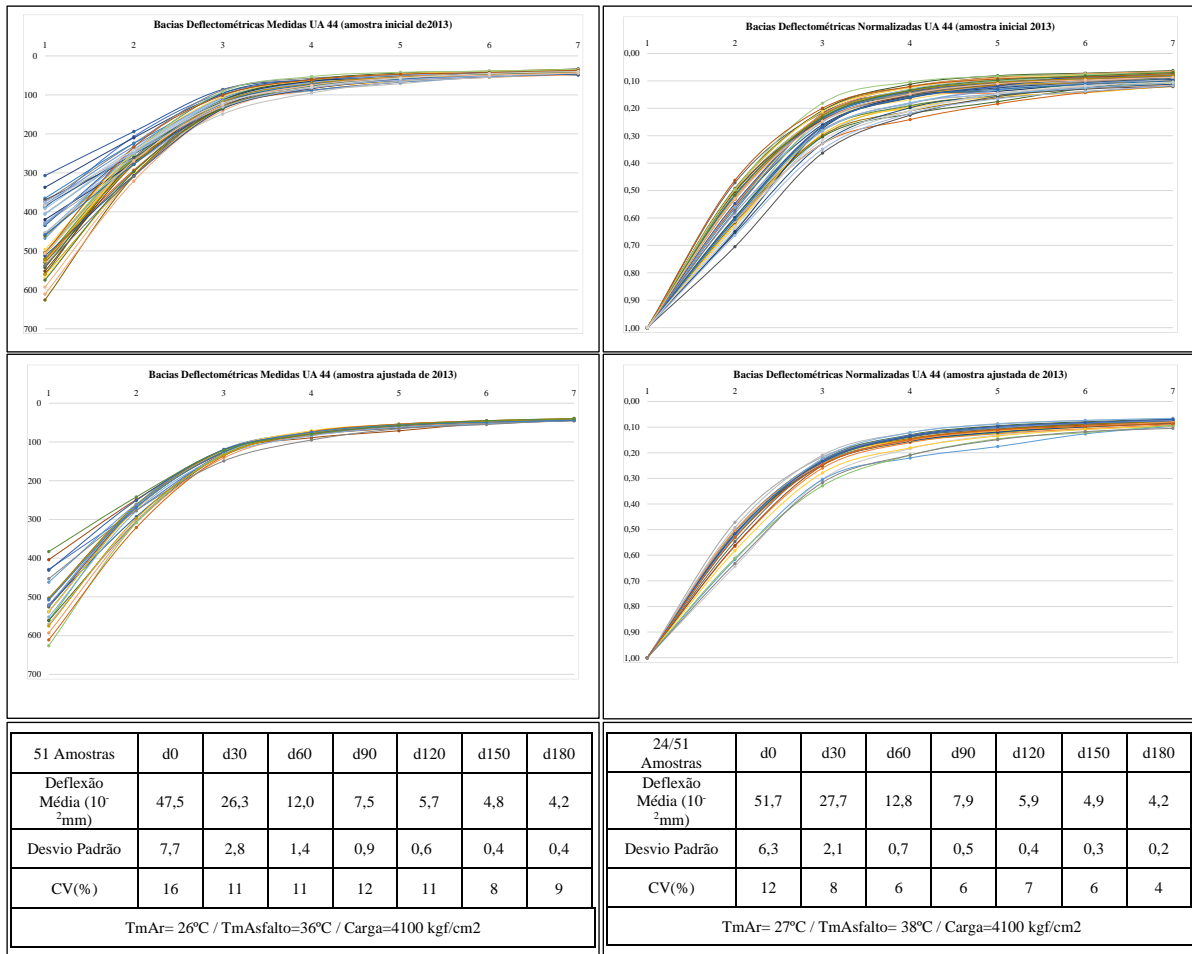
Anexo VIII – Parâmetros da Unidade de Amostragem 44

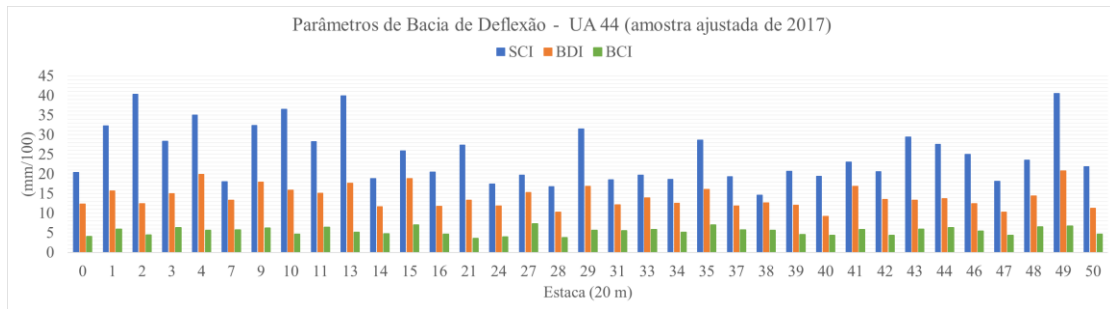


ESTRUTURA DO PAVIMENTO (2013)						
Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo Médio (Mpa) camada granular única	Módulo Médio (Mpa) camada granular dividida ¹	Coef. Poisson	Aderência
1	Cam. Asf.	7	4933	3357	0,30	Não Aderido
2	Cam. Gran	50	243	540	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	160	152	0,45	-
Limite de Erro (RMS) tolerável = 10% (outliers excluídos para nível de confiança de 95% - Média +/- 2 DP)						
Amostra 24/51 Para amostras de 30 ou mais valores, em geral, a aproximação já será suficiente boa, para se poder utilizar este resultado (estacas excluídas da amostra são as em vermelho na tabela abaixo)						

15- limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES

Est.	Data de Execução	Temp. do Ar (° C)	Temp. do Pav. (° C)	Carga (KN)	MR (Rev.)	MR (Base)	MR (Subleito)	RMS (%)	RC (m/10)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
0	18/09/2013	26,5	31,3	4100	4594	400	201	10,7	24,73	40,72	18,2	11,2	3,2
1	19/09/2013	29,2	40,1	4100	3015	296	143	7,8	17,51	40,39	25,7	14,2	4,2
2	18/09/2013	25,8	31,3	4100	10826	250	167	6,8	29,41	46,15	15,3	14,6	5,1
3	19/09/2013	29,2	40,1	4100	3490	281	151	8,2	17,72	40,16	25,4	14,2	4,5
4	18/09/2013	25,5	31,3	4100	4200	308	178	10,6	20,36	40,00	22,1	13,9	3,8
5	19/09/2013	29,1	40,1	4100	4188	268	161	7,6	18,52	40,28	24,3	14,1	4,6
6	18/09/2013	25,3	31,3	4100	9236	424	195	9,3	35,43	45,40	12,7	11,1	3,4
7	19/09/2013	28,9	40,1	4100	3799	282	161	8	18,44	40,01	24,4	14	4,3
8	18/09/2013	25,4	31,3	4100	4952	230	167	10,8	19,31	40,72	23,3	17,6	4,5
9	19/09/2013	28,7	40,1	4100	5686	282	165	9,3	22,39	42,14	20,1	14,1	4,6
10	18/09/2013	25,5	31,3	4100	5297	300	200	12,7	23,32	40,41	19,3	14,6	3,5
11	19/09/2013	28,4	40,1	4100	2621	261	161	9,2	15,20	37,66	29,6	14,3	4,5
12	18/09/2013	25,6	31,3	4100	5982	457	159	9,9	30,20	45,39	14,9	11,8	3,4
13	19/09/2013	28,2	40,1	4100	3274	268	155	9,3	16,85	39,34	26,7	14,5	4,7
14	18/09/2013	25,6	31,3	4100	7693	371	155	5,9	29,03	45,93	15,5	12,6	3,4
15	19/09/2013	28	40,1	4100	3577	274	153	7,8	17,65	40,01	25,5	14,4	4,6
16	18/09/2013	25,6	31,3	4100	3568	363	169	15,8	22,06	40,76	20,4	14,7	3,6
17	19/09/2013	27,8	40,1	4100	4089	277	159	8,3	18,75	40,41	24	13,9	4,6
18	18/09/2013	25,2	31,3	4100	7883	536	206	13	39,82	45,34	11,3	10,8	2,5
19	19/09/2013	27,6	40,1	4100	5654	223	159	7,6	19,74	41,63	22,8	16,3	5,1
20	18/09/2013	25,1	31,3	4100	6649	361	211	13,6	30,00	42,31	15	13,6	3,1
21	19/09/2013	27,5	40,1	4100	4974	203	159	7,8	17,72	40,56	25,4	17,5	5,4
22	18/09/2013	25,2	31,3	4100	7236	481	155	5,3	31,91	46,89	14,1	10,4	3,2
23	19/09/2013	27,3	40,1	4100	3869	256	167	8,1	17,51	39,21	25,7	14,5	4,4
24	18/09/2013	25,3	31,3	4100	8078	271	183	12,7	27,11	43,74	16,6	14,7	4,6
25	19/09/2013	27,2	40,1	4100	4537	195	153	7,3	15,79	39,76	28,5	16,7	6
26	18/09/2013	25,4	31,3	4100	6222	382	165	9,3	27,61	44,22	16,3	12,8	3,7
27	19/09/2013	27	40,1	4100	5192	185	169	7	16,85	39,74	26,7	17,3	5,6
28	18/09/2013	25,5	31,3	4100	6788	382	172	12,2	29,22	44,43	15,4	12,7	4
29	19/09/2013	26,9	40,1	4100	4377	244	172	8,2	16,92	39,01	26,6	14,9	5,2
30	18/09/2013	25,6	31,3	4100	8796	269	180	12,3	30,61	45,04	14,7	15,8	5
31	19/09/2013	26,8	40,1	4100	3489	253	151	7,2	16,42	39,67	27,4	14,4	5
32	18/09/2013	25,6	31,3	4100	16793	295	161	7,3	41,28	50,41	10,9	12,6	5,1
33	19/09/2013	26,7	40,1	4100	3800	179	165	8,2	14,15	37,86	31,8	17,7	5,5
34	18/09/2013	25,7	31,3	4100	11648	318	167	8,6	34,09	47,50	13,2	12,6	5
35	19/09/2013	26,6	40,1	4100	5005	190	201	8,4	16,48	37,85	27,3	15,7	5,2
36	18/09/2013	25,7	31,3	4100	6976	311	169	6,7	25,00	43,54	18	13,1	4,2
37	19/09/2013	26,5	40,1	4100	5156	162	167	7,1	15,52	39,26	29	18,5	6,2
38	18/09/2013	25,6	31,3	4100	9698	270	147	3,3	25,57	46,36	17,6	12,8	5,4
39	19/09/2013	26,4	40,1	4100	4221	241	198	9	18,00	38,12	25	14,2	4,3
40	18/09/2013	25,6	31,3	4100	6719	363	167	10,8	28,13	44,37	16	13,1	4,2
41	19/09/2013	26,6	40,1	4100	4096	221	220	14,7	17,58	36,88	25,6	16	3,9
42	18/09/2013	25,7	31,3	4100	7423	209	159	10,6	21,84	43,33	20,6	17,1	5,3
43	19/09/2013	26,2	40,1	4100	3032	270	196	11,5	16,54	36,67	27,2	13,3	4
44	18/09/2013	25,8	31,3	4100	4948	226	161	10,7	19,65	41,32	22,9	18,7	4
45	19/09/2013	26,1	40,1	4100	4221	238	169	10,6	18,37	39,75	24,5	16	4,7
46	18/09/2013	25,8	31,3	4100	6616	280	163	12,3	24,86	43,59	18,1	15,5	5
47	19/09/2013	26,1	40,1	4100	4764	195	163	6	16,19	39,50	27,8	16,3	5,7
48	18/09/2013	25,8	31,3	4100	12230	352	157	7,2	35,71	48,68	12,6	11,8	4,9
49	19/09/2013	26	40,1	4100	4762	253	163	9,7	18,91	40,53	23,8	14,4	5
50	18/09/2013	25,6	31,3	4100	10826	329	171	6	31,91	46,57	14,1	12,1	4,1





ESTRUTURA DO PAVIMENTO (2017)						
Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo Médio (Mpa) camada granular única	Módulo Médio (Mpa) camada granular dividida ¹	Coef. Poisson	Aderência
1	Cam. Asf.	7	4651	3259	0,30	Não Aderido
2	Cam. Gran.	50	247	550	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	150	143	0,45	-

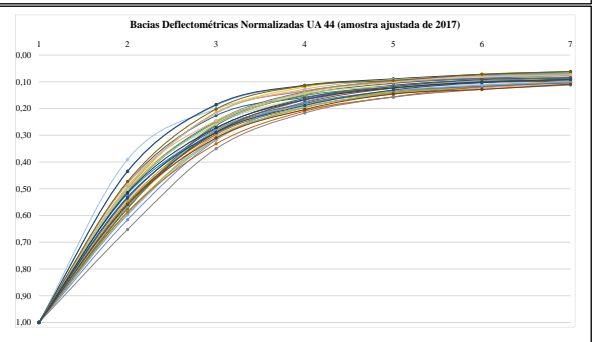
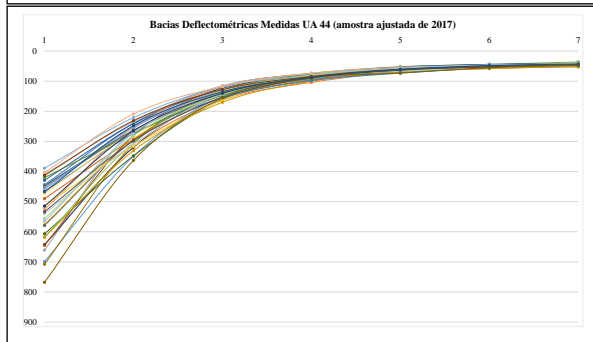
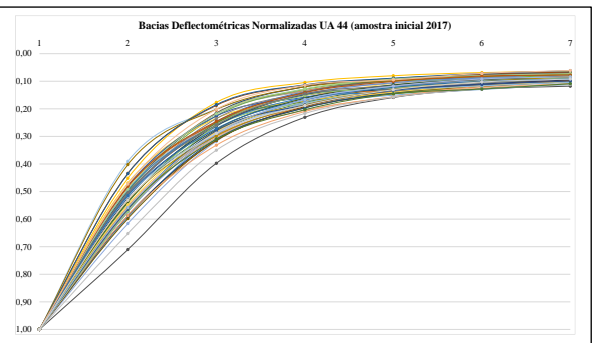
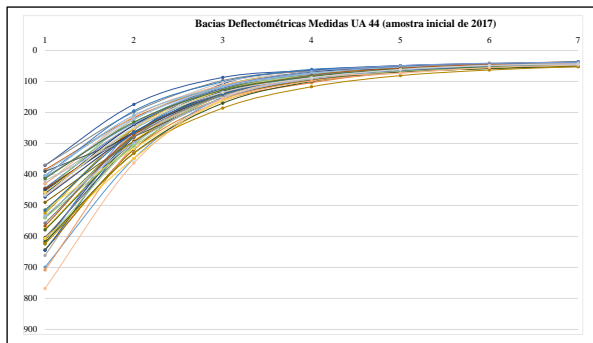
Limite de Erro (RMS) tolerável = 10%
(outliers excluídos para nível de confiança de 95% - Média +/- 2 DP)

Amostra 35/51
Para amostras de 30 ou mais valores, em geral, a aproximação já será suficiente boa, para se poder utilizar este resultado (estacas excluídas da amostra são as em vermelho na tabela abaixo)

16- limitando a espessura de cada camada granular a 20cm de espessura, considerando a espessura limite de compactação de materiais estabelecida pela Norma DNIT 098/2007-ES

Est.	Data de Execução	Temp. do Ar (° C)	Temp. do Pav. (° C)	Carga (KN)	MR (Rev.)	MR (Base)	MR (Subleito)	RMS (%)	RC (m/10)	AREA (cm)	SCI (mm/100)	BDI (mm/100)	BCI (mm/100)
0	21/06/2017	26,4	39,3	4100	5128	325	173	7,8	22,06	41,59	20,4	12,4	4,1
1	21/06/2017	25	33,3	4100	3608	200	133	2,9	13,93	39,96	32,3	15,7	5,9
2	21/06/2017	26,1	39,3	4100	619	304	147	7,4	11,17	34,74	40,3	12,5	4,5
3	21/06/2017	24,7	33,3	4100	4487	206	157	8,4	15,85	39,66	28,4	15	6,3
4	21/06/2017	25,8	39,3	4100	3341	173	141	6,3	12,86	38,43	35	19,9	5,6
5	21/06/2017	24,5	33,3	4100	3116	274	171	10,3	16,79	38,16	26,8	13,8	4,3
6	21/06/2017	25,6	39,3	4100	2827	203	191	11,1	13,43	35,43	33,5	16,8	4,4
7	21/06/2017	24	35,5	4100	10567	220	175	5,3	24,86	44,23	18,1	13,3	5,7
8	21/06/2017	25,9	39,3	4100	3702	211	157	10,3	14,95	38,73	30,1	16,6	5,8
9	21/06/2017	23,7	35,5	4100	3800	175	157	8,6	13,89	38,16	32,4	18	6,2
10	21/06/2017	26,6	39,3	4100	2010	224	167	9,7	12,33	35,37	36,5	15,9	4,7
11	21/06/2017	23,9	35,5	4100	5590	184	161	6	15,90	39,95	28,3	15,1	6,4
12	21/06/2017	26,5	39,3	4100	1019	288	160	10,4	12,06	34,93	37,3	12,5	5,1
13	21/06/2017	23,9	35,5	4100	1934	192	153	8,6	11,25	35,30	40	17,7	5,1
14	21/06/2017	26,9	39,3	4100	7500	298	175	8,2	23,94	43,18	18,8	11,7	4,8
15	21/06/2017	24	35,5	4100	6088	170	139	9,2	17,37	42,33	25,9	18,8	7
16	21/06/2017	27,1	39,3	4100	4885	349	147	5,8	21,95	43,40	20,5	11,8	4,7
17	21/06/2017	24,4	37,3	4100	1959	424	159	10	19,57	39,97	23	10,8	3,7
18	21/06/2017	27,7	39,3	4100	680	707	200	11,7	22,84	38,69	19,7	8,7	2,3
19	21/06/2017	24,2	37,3	4100	5481	426	167	10	26,79	43,83	16,8	10	4,5
20	21/06/2017	26,9	42,4	4100	4568	459	193	8,3	26,32	41,68	17,1	10,2	3,1
21	21/06/2017	24,2	37,3	4100	2466	305	157	8,4	16,42	38,53	27,4	13,3	3,6
22	21/06/2017	26,5	42,4	4100	2468	458	193	11,6	21,53	39,25	20,9	9,4	4
23	21/06/2017	24,4	37,3	4100	3085	280	149	12,2	17,18	39,66	26,2	15	4,9
24	21/06/2017	26,5	42,4	4100	6360	356	173	7,9	25,71	43,35	17,5	11,9	4
25	21/06/2017	24	37,3	4100	2406	426	169	10,9	20,64	40,02	21,8	10,1	4,3
26	21/06/2017	26,1	42,4	4100	3125	453	171	13	23,68	41,37	19	11,9	3,2
27	21/06/2017	23,8	39,1	4100	10567	182	145	8	22,84	45,64	19,7	15,3	7,3
28	21/06/2017	25,8	42,4	4100	6090	426	164	6,3	26,79	44,23	16,8	10,3	3,8
29	21/06/2017	24,2	39,1	4100	3621	193	157	8,8	14,29	38,19	31,5	16,9	5,6
30	21/06/2017	25,6	39,4	4100	4156	329	169	11,9	20,36	40,75	22,1	12	5,2

31	21/06/2017	24,4	39,1	4100	8178	280	151	5,8	24,32	44,93	18,5	12,2	5,5
32	21/06/2017	25,4	39,4	4100	20413	243	151	6,6	39,82	51,69	11,3	12,2	6,5
33	21/06/2017	24,4	39,1	4100	7333	264	135	6,1	22,84	45,31	19,7	13,9	5,8
34	21/06/2017	26	39,4	4100	7596	298	149	5,5	24,19	44,90	18,6	12,6	5,1
35	21/06/2017	24,5	39,1	4100	4888	195	130	6,3	15,68	41,75	28,7	16,1	7
36	21/06/2017	27	39,4	4100	9239	283	188	7,6	25,71	43,46	17,5	11,5	5,2
37	21/06/2017	25	41,3	4100	7517	293	135	3,1	23,32	45,71	19,3	11,9	5,7
38	21/06/2017	26,9	39,4	4100	11791	293	145	6,1	30,82	48,32	14,6	12,7	5,6
39	21/06/2017	25,5	41,3	4100	4512	341	149	7,9	21,74	42,71	20,7	12,1	4,6
40	21/06/2017	26,6	38,6	4100	4142	421	175	8,5	23,20	41,99	19,4	9,2	4,4
41	21/06/2017	26,1	41,3	4100	5360	227	145	9,7	19,48	42,22	23,1	16,9	5,8
42	21/06/2017	27,2	38,6	4100	5324	309	151	7,6	21,84	43,10	20,6	13,5	4,4
43	21/06/2017	26,2	41,3	4100	3665	229	159	7,2	15,31	38,90	29,4	13,3	5,9
44	21/06/2017	27,2	38,6	4100	3846	250	151	8,1	16,30	40,07	27,6	13,7	6,3
45	21/06/2017	26,7	41,3	4100	4350	217	117	1,9	15,41	42,72	29,2	14,6	6,9
46	21/06/2017	27,1	38,6	4100	4038	288	151	7,1	18,00	41,10	25	12,5	5,4
47	21/06/2017	25,7	42	4100	5192	396	153	7,5	24,73	44,13	18,2	10,3	4,4
48	21/06/2017	26,5	38,6	4100	7398	208	151	4,9	19,07	42,89	23,6	14,4	6,5
49	21/06/2017	25,8	42	4100	2661	155	137	7,6	11,11	36,95	40,5	20,8	6,7
50	21/06/2017	27,2	41,4	4100	5188	313	157	4,1	20,55	42,43	21,9	11,3	4,7



51 Amostras	d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
Deflexão Média (10 ⁻² mm)	51,4	26,8	13,3	8,2	6,1	5,1	4,4
Desvio Padrão	10,1	4,2	2,0	1,1	0,6	0,5	0,4
CV(%)	20	16	15	13	11	9	8
TmAr= 26°C / TmAsfalto= 39°C / Carga=4100 kgf/cm2							

35/51 Amostras	d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
Deflexão Média (10 ⁻² mm)	53,1	28,0	13,9	8,5	6,2	5,1	4,5
Desvio Padrão	10,0	3,7	1,5	0,8	0,5	0,4	0,3
CV(%)	19	13	10	9	9	7	7
TmAr= 26°C / TmAsfalto= 39°C / Carga=4100 kgf/cm2							