



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS PALMAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**SUÉDEN FERREIRA OLIVEIRA DA MOTA**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PROJETOS DE REFORÇO  
OBTIDOS POR MEIO DE RETRONÁLISES**

Palmas/TO  
2021

**SUÉDEN FERREIRA OLIVEIRA DA MOTA**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PROJETOS DE REFORÇO  
OBTIDOS POR MEIO DE RETRANSMISSÕES**

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Civil para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora.

Orientadora: Me. Janaina Lima de Araújo.

Palmas/TO  
2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

- M917a Mota, Suéden Ferreira Oliveira da.  
Análise comparativa de projetos de reforço obtidos por meio de retroanálises. / Suéden Ferreira Oliveira da Mota. – Palmas, TO, 2021.  
113 f.
- Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus  
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Civil, 2021.  
Orientadora : Janaina Lima de Araújo
1. Reforço de pavimento. 2. Retroanálise. 3. Método MeDiNa. 4. Módulo  
de resiliência. I. Título

**CDD 624**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

# FOLHA DE APROVAÇÃO


SUÉDEN FERREIRA OLIVEIRA DA MOTA

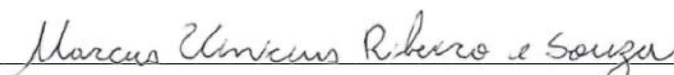
## ANÁLISE COMPARATIVA DE PROJETOS DE REFORÇO OBTIDOS POR MEIO DE RETROANÁLISES


Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Civil para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 20 / 12 / 2021

Banca Examinadora

  
Prof. Me. Janaina Lima de Araujo, UFT

  
Prof. Dr. Marcus Vinicius Ribeiro e Souza, UFT

  
Prof. Me. Flávio Vieira da Silva Júnior, UniCatólica

Palmas, 2021

## RESUMO

O presente estudo tem como objetivo analisar o método mecanístico-empírico de dimensionamento de camada de reforço de pavimento (MeDiNa), que realiza o dimensionamento do reforço com base na curva de fadiga do material e na previsão de trincas, e compará-lo com o método empírico de dimensionamento apresentado pela norma do DNER-PRO 011/79 que é voltado para a deflexão máxima. Para isso, utilizou-se os dados defletoométricos apresentados no relatório descritivo do projeto executivo de recuperação da Rodovia Federal BR-406/RN obtidos por meio de avaliação estrutural não destrutiva com o equipamento Falling Weight Deflectometer (FWD). Assim, foi realizada a retroanálise de bacias defletoométricas de dois segmentos homogêneos no *software* BackMeDiNa e em seguida importado os valores de módulos elásticos retroanalizados para o *software* MeDiNa, onde foi avaliada a estrutura proposta pelo projeto de recuperação da rodovia e dimensionado uma nova proposta de intervenção para o segmento, comparando os resultados apresentados pelo método mecanístico-empírico MeDiNa e o método empírico PRO 011. Verificou-se que ao realizar a retroanálise das bacias defletoométricas dos segmentos no *software* BackMeDiNa, observou-se que os segmentos analisados não são homogêneos, pois as deflexões medidas na bacia do poço de sondagem são muito distintas das demais bacias. Além disso, ao analisar a proposta de reforço apresentada pelo método PRO-011 a partir da retroanálise das bacias defletoométricas dos segmentos, observou-se que as espessuras de reforço apresentadas não suportam as solicitações dos segmentos apresentando ruptura da estrutura antes de findar o período de projeto de 10 anos. Quando dimensionado uma nova proposta de reforço, as espessuras obtidas para os segmentos foram superiores as apresentadas pelo método empírico.

**Palavras-chaves:** Método MeDiNa, Retroanálise, Módulo de resiliência, BackMeDiNa. Reforço de pavimento.

## ABSTRACT

The present study aims to analyze the mechanistic-empirical method of pavement reinforcement layer design (MeDiNa), which performs the reinforcement design based on the fatigue curve of the material and the prediction of cracks, and compare it with the empirical method of design presented by the DNER-PRO 011/79 standard which is aimed at maximum deflection. For this, we used the deflectometric data presented in the descriptive report of the executive project for the recovery of the Federal Highway BR-406/RN obtained through non-destructive structural assessment with the Falling Weight Deflectometer (FWD) equipment. Thus, a backcalculation of deflectometric basins of two homogeneous segments was carried out in the BackMeDiNa software, and then imported the values of elastic modules backcalculated into the MeDiNa software, where the structure proposed by the highway recovery project was evaluated and a new intervention proposal was designed. For the segment, comparing the results presented by the MeDiNa mechanistic-empirical method and the PRO 011 empirical method. It was found that when performing the backcalculation of the deflectometric basins of the segments in the BackMeDiNa software, it was observed that the analyzed segments are not homogeneous because the deflections measured in the survey basin are very different from the other basins. In addition, when analyzing the reinforcement proposal presented by the PRO-011 method from the backcalculation of the deflection basins of the segments, it was observed that the reinforcement thicknesses presented do not support the requests of the segments presenting structure rupture before the end of the period of the 10 year project. When dimensioning a new reinforcement proposal, the thicknesses obtained for the segments were higher than those presented by the empirical method.

**Key-words:** MeDiNa Method, Backcalculation, Resilience Module, BackMeDiNa. Pavement reinforcement.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Método destrutivo de avaliação estrutural do pavimento .....	20
Figura 2: Esquematização da Viga Benkelman .....	23
Figura 3: Deflectômetro de impacto - FWD.....	24
Figura 4: Esquematização do FWD.....	24
Figura 5: Representação da Bacia de deflexão.....	25
Figura 6 - Bacias deflectométricas distintas com mesma deflexão máxima .....	26
Figura 7 - Esquema de medida e cálculo do raio de curvatura.....	27
Figura 8: Ábaco para dimensionamento da espessura de reforço de pavimento em concreto betuminoso .....	41
Figura 9: Tela do <i>software</i> MeDiNa.....	45
Figura 10: Delimitação dos segmentos homogêneos pelo método das diferenças acumuladas da AASHTO .....	50
Figura 11 - Interface do <i>software</i> BackMeDiNa .....	61
Figura 12: Matriz de solução para pista da BR em estudo .....	65
Figura 13: Bacias deflectométricas do SH02 avaliadas neste estudo.....	70
Figura 14: RETRO1 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH02 – Não aderência entre camadas .....	73
Figura 15: RETRO2 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH02 – Condição de não aderência entre as camadas – Processo interrompido admitindo $RMS > 5\%$ .....	74
Figura 16: RETRO3 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH02 – Condição de aderência entre as camadas.....	75
Figura 17: RETRO4 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH02 – Condição de não aderência entre as camadas e MRrev e MRbase congelados a partir dos dados da RETRO2 .....	76
Figura 18: RETRO5 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH02 – Condição de não aderência entre as camadas e MRrev e MRbase congelados a partir dos dados da RETRO1 e RETRO2, respectivamente. ....	77
Figura 19: RETRO6 - Retroanálise da Bacia deflectométrica medida no ponto de abertura do poço de sondagem do SH02 – Não aderência entre camadas.....	79
Figura 20: RETRO7 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH02 – Condição de não aderência entre as camadas – Processo interrompido admitindo $RMS = 44,7\%$ .....	80

Figura 21: RETRO8 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH02 – Condição de aderência entre as camadas.....	81
Figura 22: Bacias deflectométricas do SH05 avaliadas neste estudo.....	83
Figura 23: RETRO9 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH05 - Não aderência entre camadas .....	85
Figura 24: RETRO10 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH05 – Condição de não aderência entre as camadas – Processo interrompido com $RMS > 10\%$ .....	86
Figura 25: RETRO11 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH05 – Condição de aderência entre as camadas.....	87
Figura 26: RETRO12 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH05 – Condição de não aderência entre as camadas e MRsubleito congelado com dados da RETRO9.....	88
Figura 27: RETRO13 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH05 – Condição de não aderência entre as camadas e MRsubleito congelado com dados da RETRO9 - processo interrompido .....	89
Figura 28: RETRO14 - Retroanálise da Bacia deflectométrica medida no poço de sondagem do SH05 – Não aderência entre camadas .....	91
Figura 29: RETRO15 - Retroanálise da Bacia deflectométrica medida no ponto de abertura do poço de sondagem do SH05 – Condição de não aderência entre as camadas – Processo interrompido. ....	92
Figura 30: RETRO16 - Retroanálise da Bacia deflectométrica medida no ponto de sondagem do SH05 – Condição de aderência entre as camadas.....	93
Figura 31: RETRO17 - Retroanálise da Bacia deflectométrica medida no ponto de sondagem do SH05 – Não aderência entre as camadas com MRbase congelado dado RETRO14 ..	94
Figura 32: RETRO18 - Retroanálise da Bacia deflectométrica medida no ponto de sondagem do SH05 – Não aderência entre as camadas com MRbase MRsubleito congelado dado RETRO15.....	95
Figura 33: Período previsto para ruptura da estrutura proposta pelo método PRO-011 analisa no <i>software</i> MeDiNa .....	107



**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1: Critérios para estabelecimento de diretrizes de projeto da norma DNER PRO-010/79	
- Procedimento A.....	39
Quadro 2: Critérios para avaliação estrutural - DNER PRO-011/79.....	40
Quadro 3: Estrutura do Pavimento existente .....	57
Quadro 4: Estrutura do Pavimento existente modificado.....	58
Quadro 5: Valores adotados para o Coeficiente de Poisson.....	60
Quadro 6: Número N definido nos postos de contagem volumétrica.....	63
Quadro 7: Espessura da camada de reforço pelo DNER PRO 011/79 .....	64
Quadro 8: Número de retroanálise por bacia estudada – SH02.....	71
Quadro 9: Número de retroanálise por bacia estudada – SH05.....	84
Quadro 10: Dados necessários para dimensionamento de camada de reforço - MeDiNa.....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores típicos de Coeficiente de Poisson.....	19
Tabela 2: Posicionamento das estações de ensaio com o FWD .....	25
Tabela 3: Faixas de parâmetro AREA .....	29
Tabela 4: Classificação dos solos pelo método DNER PRO-269/94 .....	43
Tabela 5: Dados do estudo de tráfego da rodovia .....	48
Tabela 6: Divisão dos Segmentos Homogêneos e as bacias de deformação média.....	51
Tabela 7: Bacias de deformação medida no ponto do poço de sondagem .....	52
Tabela 8: Parâmetros de curvatura - bacia de deformação média .....	53
Tabela 9: Parâmetros de curvatura - bacia de deformação no ponto de sondagem.....	54
Tabela 10: Bacias de deformação média a serem retroanalizadas.....	60
Tabela 11: Bacias de deformação medida no ponto do poço de sondagem a serem retroanalizadas .....	61
Tabela 12: Soluções de restauração para os segmentos SH2 e SH5 apresentado pelo Projeto Executivo de Engenharia para Restauração de Rodovia - CREMA 2ª Etapa .....	66
Tabela 13: Soluções de restauração para os segmentos SH2 e SH5 .....	66
Tabela 14: Módulos Retroanalizados a partir das 32 bacias do SH02 e CV% .....	69
Tabela 15: Resumo dos parâmetros das bacias deflectométrica estudadas do SH02.....	70
Tabela 16: Módulos retroanalizados (MPa) a partir da bacia média do SH02.....	78
Tabela 17: Módulos retroanalizados (MPa) a partir da bacia medida no ponto de abertura do poço se sondagem do SH 02.....	81
Tabela 18: Módulos Retroanalizados a partir das 85 bacias do SH05 e CV% .....	82
Tabela 19: Resumo dos parâmetros das bacias deflectométrica estudadas do SH05.....	83
Tabela 20: Módulos retroanalizados (MPa) a partir da bacia média do SH05.....	90
Tabela 21: Módulos retroanalizados (MPa) a partir da bacia medida no ponto de abertura do poço de sondagem do SH05 .....	96
Tabela 22: Resumo das retroanálises das bacias de deformação.....	97
Tabela 23: Análise da estrutura proposta pelo Método PRO-011 – 32 bacias do SH02.....	99
Tabela 24: Dimensionamento da camada de reforço - 32 bacias do SH02 .....	99
Tabela 25: Análise da estrutura proposta pelo Método PRO-011 – bacia média do SH02 (RETRO2) .....	100
Tabela 26: Dimensionamento da camada de reforço - Bacia média do SH02 (RETRO2) ....	101
Tabela 27: Análise da estrutura proposta pelo Método PRO-011 – 85 bacias do SH05.....	101

Tabela 28: Dimensionamento da camada de reforço – 85 bacias do SH05 .....	102
Tabela 29: Análise da estrutura proposta pelo Método PRO-011 – Bacia média do SH05 (RETRO13) .....	103
Tabela 30: Dimensionamento da camada de reforço – Bacia média do SH05 (RETRO13)..	103
Tabela 31: Análise da estrutura proposta pelo Método PRO-011 – Bacia do poço de sondagem do SH05 (RETRO18) .....	104
Tabela 32: Dimensionamento da camada de reforço – Bacia medida no ponto de abertura do poço de sondagem do SH05 (RETRO18).....	104
Tabela 33: Resumo das espessuras calculadas de reforço para os segmentos SH02 e SH05.	105
Tabela 34: Tráfego suportado pelas estruturas propostas no projeto de restauração da rodovia para os segmentos SH2 e SH5.....	106

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of Highway and Transportation Officials</i>
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
AT	Área Trincada
BCI	<i>Base Curvature Index</i> (Índice de Curvatura de Base)
BDI	<i>Base Damage Index</i> (Índice de Dano de Base)
CA	Concreto Asfáltico
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CCP	Concreto de Cimento Portland
CF	<i>Curvature Factor</i> (Fator de Curvatura)
CV	Coefficiente de Variação
D <sub>0</sub>	Deflexão medida no ponto de aplicação da carga
D <sub>20</sub>	Deflexão medida à 20 cm do ponto de aplicação da carga, em 0,01 mm
D <sub>25</sub>	Deflexão medida à 25 cm do ponto de aplicação da carga, em 0,01 mm
D <sub>30</sub>	Deflexão medida à 30 cm do ponto de aplicação da carga, em 0,01 mm
D <sub>45</sub>	Deflexão medida à 45 cm do ponto de aplicação da carga, em 0,01 mm
D <sub>60</sub>	Deflexão medida à 60 cm do ponto de aplicação da carga, em 0,01 mm
D <sub>65</sub>	Deflexão medida à 65 cm do ponto de aplicação da carga, em 0,01 mm
D <sub>90</sub>	Deflexão medida à 90 cm do ponto de aplicação da carga, em 0,01 mm
D <sub>120</sub>	Deflexão medida à 120 cm do ponto de aplicação da carga, em 0,01 mm
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
ELMOD	<i>Evaluation of Layer Moduli and Overlay design</i>
ELSYM5	<i>Elastic Layered System 5</i>
EUA	<i>United States of America</i> (Estados Unidos da América)
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
IGG	Índice de Gravidade Global
IPR	Instituto de Pesquisa Rodoviárias
IRI	Índice de Irregularidade Longitudinal
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
MEF	Método dos Elementos Finitos
MR	Módulo de Resiliência

RC	Raio de Curvatura
RMS	Raiz média quadrática de valor absoluto
SCI	<i>Surface Curvature Index</i> (Índice de curvatura da Superfície)
SH	Segmento Homogêneo
TME	Teoria de Multicamadas Elásticas
TSD	Tratamento Superficial Duplo
VMD	Volume Médio Diário

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Problema de pesquisa .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>17</b>
1.2.1	Objetivo Geral .....	17
1.2.2	Objetivos Específicos .....	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Avaliação estrutural do pavimento.....</b>	<b>19</b>
2.1.1	Método Destrutivo.....	20
2.1.2	Método não destrutivo.....	21
<b>2.2</b>	<b>Equipamentos para realização de ensaios deflectométricos.....</b>	<b>22</b>
2.2.1	Viga Benkelman .....	22
2.2.2	<i>Falling Weight Deflectometer</i> (FWD).....	23
<b>2.3</b>	<b>Bacia de deflexão .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4</b>	<b>Programas de retroanálise de módulos de resiliência .....</b>	<b>32</b>
2.4.1	Fatores de Influência na retroanálise .....	33
<b>2.5</b>	<b>Programa backmedina.....</b>	<b>35</b>
2.5.1	Utilizando dados da VB na rotina de retroanálise no BackMeDiNa.....	36
<b>2.6</b>	<b>Métodos de dimensionamento de reforço de pavimento.....</b>	<b>37</b>
2.6.1	Métodos empírico .....	37
2.6.2	Método mecanístico-empírico – MeDiNa .....	44
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>47</b>
<b>3.1</b>	<b>Planejamento de pesquisa.....</b>	<b>47</b>
<b>3.2</b>	<b>Análise do banco de dados do projeto .....</b>	<b>48</b>
3.2.1	Segmentos homogêneos e os dados deflectométricos obtidos com o FWD.....	49
3.2.2	Parâmetros de curvatura .....	53
<b>3.3</b>	<b>Caracterização dos segmentos estudados.....</b>	<b>57</b>
3.3.1	Segmento homogêneo SH02 .....	58
3.3.2	Segmento homogêneo SH05 .....	58
<b>3.4</b>	<b>Análise dos módulos de resiliência retroanalizados pelo programa BackMeDiNa. 59</b>	
<b>3.5</b>	<b>Análise da espessura de reforço calculada pelo método PRO-011 nos segmentos estudado. ....</b>	<b>62</b>

<b>3.6</b>	<b>Análise da espessura de reforço calculada pelo método medina no segmento estudado. ....</b>	<b>67</b>
<b>3.7</b>	<b>Verificação das espessuras da camada de reforço obtidas com o Método PRO-011 e Método MeDiNa.....</b>	<b>67</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>68</b>
<b>4.1</b>	<b>Retroanálise da bacia de deformação BackMeDiNa.....</b>	<b>68</b>
4.1.1	Segmento Homogêneo SH02.....	68
4.1.2	Segmento Homogêneo SH05.....	82
<b>4.2</b>	<b>Dimensionamento da camada de reforço .....</b>	<b>96</b>
4.2.1	Segmento Homogêneo SH02 – 32 bacias deflectométricas .....	98
4.2.2	Segmento Homogêneo SH02 – Bacia média (RETRO2).....	100
4.2.3	Segmento Homogêneo SH05 – 85 Bacias deflectométricas .....	101
4.2.4	Segmento Homogêneo SH05 – Bacia média (RETRO13).....	102
4.2.5	Segmento Homogêneo SH05 – Bacia medida no exato ponto de abertura do poço de sondagem (RETRO18) .....	103
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>108</b>
<b>5.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>110</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>111</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Mesmo após muitos anos, o Brasil ainda vem utilizando como métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis modelos fenomenológicos obtidos a partir de observações de campo, como é o caso do método empírico CBR (método DNER/DNIT), o qual é uma adaptação efetuada pelo Eng. Murillo Lopes de Sousa em 1966 do método desenvolvido pelo USACE que utiliza algumas conclusões da pista experimental AASHTO (1958 a 1960).

Com o desenvolvimento de métodos mecanístico-empíricos para dimensionamento de pavimento novo e reforço de pavimentos já existentes, é possível obter um detalhamento mais preciso na obtenção das características das várias camadas que constituem o pavimento. Nessa abordagem a estrutura do pavimento passa a ser tratado como qualquer outra na engenharia, onde as tensões e as deformações são analisadas e limitadas variando-se dimensões e características dos materiais utilizados na composição das camadas estruturais do pavimento, ou seja, passa-se a usar a Mecânica dos Pavimentos baseada na Teoria da Elasticidade para caracterizar esses materiais, que utiliza como base para descrever os materiais das camadas do pavimento os parâmetros mecanístico: Coeficiente de Poisson e Módulo de Resiliência.

Segundo Nobrega (2003) o Coeficiente de Poisson trata-se da razão entre as deformações radial e axial dos materiais, apresentando influência significativa apenas em casos de deformações radiais. Já o Módulo de Resiliência consiste na razão entre a tensão aplicada e a deformação recuperável. No caso de pavimentos já existentes e que necessitam de restauração, a partir desses parâmetros é possível determinar a capacidade de operação do pavimento para a realização do projeto de reforço.

Essa capacidade de operação é reduzida no decorrer da vida de projeto devido as ações a qual o pavimento é exposto (clima e tráfego) tornando-se necessário garantir o controle das degradações provenientes dessas ações a partir da avaliação das condições funcionais e estruturais do pavimento. Segundo Medina *et al.* (1994) a avaliação funcional consiste na classificação das condições de conforto ao rolamento, segurança, custo do usuário das vias, influência do meio ambiente e aspectos estéticos a partir de medições das irregularidades superficiais, da resistência a derrapagem e contagem de defeitos que aparecem na superfície de rolamento.

Do ponto de vista estrutural, se faz necessário uma avaliação estrutural o qual se baseia na realização de procedimentos mais detalhados para determinar as características das camadas do pavimento, pois segundo Bernucci *et al.* (2008), a avaliação estrutural está relacionada com a capacidade de carga do pavimento e as patologias resultantes são provenientes das repetições



de cargas aplicada sobre o pavimento que provocam deformações plásticas (permanentes) e elásticas (recuperáveis), que por sua vez são avaliadas por equipamentos próprios que medem os deslocamentos verticais denominados de deflexões. Essas deformações são responsáveis pelo surgimento de grande parte do trincamento presente na superfície do pavimento e o afundamento da trilha de roda, respectivamente.

Quando se faz necessária a realização da restauração do pavimento, existem duas principais maneiras de se obter o módulo de resiliência dos materiais *in situ* da estrutura original, a primeira maneira é a partir de um método destrutivo da estrutura existente, por meio de abertura de poços de inspeção, o qual consiste na retirada de material das camadas da estrutura, e na realização de ensaios laboratoriais em corpos de prova moldados em laboratório ou retirado do pavimento (no caso das amostras de material da camada de revestimento), que para as camadas granulares do pavimento são realizados ensaios triaxial dinâmico e compressão diametral para misturas asfálticas. Já a segunda maneira, é pelo método não destrutivo que consiste na obtenção dos módulos de resiliência das camadas do pavimento e do subleito por meio do método de retroanálise a partir das bacias deflectométricas.

## **1.1 Problema de pesquisa**

Manter a qualidade do pavimento das rodovias é de grande importância pois interfere diretamente no transporte rodoviário e na economia do Brasil, visto que a presença de defeitos ou más condições de uso numa rodovia aumentam o custo de operação e reduz a segurança e conforto dos passageiros. Segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2020) a malha rodoviária brasileira abrange 1.720.700,00 km de extensão, sendo que apenas 12,4% desse total é pavimentada. Para garantir o desempenho satisfatório do pavimento é necessário conhecer as características elásticas dos materiais que compõem as camadas do pavimento, que estão relacionados com a capacidade de suporte de carga. De acordo com Balbo (2007), a manutenção periódica de pavimentos é geralmente realizada por meio de reforço que é o nome dado à nova camada de rolamento aplicada sobre a superfície de um pavimento existente, quando este necessita de serviços de restauração ou reabilitação, sua designação popular é o recapeamento.

Segundo Motta (1991) e Franco (2007), os métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos tradicionais, como o método PRO 011/79 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT têm uma forte dose de empirismo e muitos trabalhos científicos vêm sendo produzidos buscando reduzir ou até mesmo eliminar a parcela de empirismo. Já a determinação das espessuras de reforço por meio de métodos mecanicistas

depende da inserção de dados referentes aos materiais existentes no local da execução do reforço e uma dessas características é o módulo de resiliência, que pode ser obtido por meio de retroanálise das bacias de deflexão, cujo principal objetivo é sua determinação (MEDINA; MOTTA, 2005).

Em abril de 2018, o DNIT lançou o programa BackMeDiNa desenvolvido por Filipe Augusto Cinque de Proença Franco, D.Sc., fruto de um convênio entre o DNIT e a Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Basicamente o programa realiza a retroanálise dos módulos de resiliência das camadas de um pavimento a partir das bacias deflectométricas levantadas em campo por equipamentos do tipo *Falling Weight Deflectometer* - FWD. Juntamente a este, foi lançado também o programa MeDiNa, que corresponde a um programa de computador que realiza a verificação e o dimensionamento mecanístico-empírico de estruturas de pavimentos asfálticos novos e projeto de reforço, por meio da rotina de análise de camadas elásticas de múltiplas camadas – AEMC. Esses três programas computacionais fazem parte do novo Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa.

Diante do exposto, qual será a espessura necessária de reforço de uma estrutura de pavimento a ser restaurado, para uma mesma estimativa de vida útil, a partir do método PRO 011/79 e o Novo Método de Dimensionamento Nacional - MeDiNa?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa de dimensionamento de reforço de pavimentos flexível realizados pelo método empírico PRO-011/79 e o método mecanístico-empírico MeDiNa a partir da retroanálise das bacias de deflexão medidas com o FWD junto à uma Rodovia Federal a partir do *software* de retroanálise BackMeDiNa.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral deste estudo, se faz necessário traçar os seguintes objetivos específicos.

- Analisar as características estruturais e os dados obtidos nos ensaios deflectométricos realizados com o FWD e apresentados pelo projeto executivo de recuperação da Rodovia em estudo.
- Analisar o comportamento das camadas do pavimento ao ser solicitado por meio da retroanálise realizada pelo programa BackMeDiNa.

- Correlacionar os valores dos módulos retroanalizados com os parâmetros de curvatura das bacias deflectométricas.
- Analisar as espessuras da camada de reforço obtidas pelo Método PRO-011 e pelo Método MeDiNa nos segmentos estudados.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na mecânica do pavimento são utilizados dois parâmetros elásticos para descrever as características dos materiais que compõem as camadas do pavimento, são eles o módulo de resiliência (ou módulo de elasticidade) e o coeficiente de Poisson. O coeficiente de Poisson é o parâmetro que relaciona as deformações horizontais e verticais dos materiais quando submetidos a um carregamento. Nobrega (2003) afirma que o Coeficiente de Poisson apresenta relevância quando em casos de trabalho com materiais com deformações horizontais, apresentando baixa relevância em bacias de deflexão, sendo comumente adotados valores constantes. Na Tabela 1 são apresentados valores típicos de Coeficiente de Poisson exposto por BALBO (2007)

Tabela 1: Valores típicos de Coeficiente de Poisson

<b>Material</b>	<b>Faixa de Variação</b>
Concretos Asfálticos	0,30 - 0,48
Concreto de Cimento Portland	0,15 - 0,20
Brita Graduada Simples, Macadame Hidráulico, Brita Corrida	0,35 - 0,40
Concreto Compactado à Rolo, Brita Graduada Tratada com Cimento	0,15 - 0,20
Solo-Cimento, Solo Melhorado com Cimento	0,20 - 0,30
Solo-Cal	0,25 - 0,30
Solos Arenosos	0,30 - 0,35
Areias Compactadas	0,35 - 0,40
Solos Finos	0,40 - 0,45

Fonte: BALBO (2007)

O módulo de resiliência é o parâmetro elástico que relaciona a carga aplicada sobre o material com a deformação vertical recuperável sofrida pelo mesmo. De acordo com Rocha (2020), o módulo de resiliência representa a resistência intrínseca do material para a deformação imposta. Na teoria, o termo resiliência corresponde à energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações, no qual corresponderia à energia potencial de deformação.

### 2.1 Avaliação estrutural do pavimento

A expressão avaliação estrutural, em seu sentido mais amplo, abrange a caracterização completa de elementos e variáveis estruturais dos pavimentos que possibilite uma descrição

objetiva de seu modo de comportamento em face das cargas do tráfego e ambiental de modo a possibilitar a emissão de julgamento abalizado sobre a capacidade portante de um pavimento existente diante das futuras demandas do tráfego (BALBO, 2007).

A avaliação estrutural é realizada para se conhecer as características das várias camadas que compõem o pavimento, quanto à sua resistência e deformabilidade sob a ação do tráfego, que são função das propriedades dos materiais e das espessuras das camadas (MEDINA *et al.* 1994). Ou seja, para conhecer as características do pavimento, é necessário determinar as características dos materiais que compõem cada camada do pavimento e do subleito, dados que são obtidos a partir da retroanálise, e suas espessuras. Sendo a caracterização da capacidade portante do pavimento determinada a partir da medição das deformações recuperáveis sofridas pelo pavimento depois de submetido à aplicação de uma carga conhecida. Na prática, essa avaliação pode ser obtida por método destrutivo ou não destrutivo, métodos esses apresentados a seguir.

### 2.1.1 Método Destrutivo

Segundo Bernucci *et. al.* (2008), o método destrutivo de avaliação estrutural é o método que avalia as condições estruturais das camadas do pavimento a partir da abertura de trincheiras ou poços de sondagem que permitem coletar amostras de material das camadas, incluindo o subleito, para a realização de ensaios de capacidade de carga *in situ*. Na Figura 1, está apresentada a abertura de poço de sondagem, a esquerda, onde é possível determinar a espessura e o tipo de material que compõem cada camada do pavimento, e a direita esta apresentado o ensaio de densidade das camadas granulares.

Figura 1: Método destrutivo de avaliação estrutural do pavimento



Fonte: Bernucci *et. al.* (2008)

Os ensaios *in situ* permitem conhecer a umidade e a densidade dos materiais e os ensaios em laboratório permitem realizar a caracterização dos materiais e determinar seu módulo de resiliência. Segundo Nobrega (2003), o módulo de resiliências dos materiais é obtido em laboratório por meio do ensaio triaxial de carga repetida, para as camadas granulares, e por meio do ensaio de compressão diametral para as misturas asfálticas. Atualmente também começam a ser usados, com mais propriedade, equipamentos portáteis para avaliação expedita do módulo de elasticidade do pavimento, por meio de pulsos, aplicados na superfície, e medições do retorno dos mesmos (BERNUCCI *et al.* 2008).

### 2.1.2 Método não destrutivo

O método não destrutivo de obtenção das características das camadas que compõem o pavimento é denominado de retroanálise. Segundo Albernaz (1997) a retroanálise consiste num procedimento analítico de obtenção dos módulos elásticos *in situ* das camadas do pavimento e do subleito e corresponde a resposta conjunta de todas as camadas do pavimento juntamente com o subleito ao serem submetidos a um carregamento externo. Vale ressaltar que a retroanálise não representa o valor real das características do pavimento, mas sim um valor equivalente ao real, pois depende de vários fatores como a homogeneidade dos materiais, a umidade, o grau de compactação, temperatura e outros. Por não ser necessária a retirada de corpos de provas da rodovia e análise laboratorial das características estruturais do pavimento, a retroanálise apresenta rapidez na obtenção dos dados.

Existem dois métodos para a obtenção da retroanálise: método iterativo e método simplificado. Albernaz (1997) descreve o método simplificado como um método no qual a estrutura real do pavimento é transformada em um sistema de duas ou três camadas, buscando estimar os módulos do sistema pavimento/subleito por meio de métodos gerados a partir da Teoria da Elasticidade aplicada aos meios homogêneos, isotrópicos e linearmente elásticos. Já os métodos iterativos são aqueles que busca obter os módulos de todas as camadas do sistema pavimento/subleito, independentemente da quantidade de camada existentes. Com esses módulos, juntamente com as espessuras das camadas e as cargas atuantes, é possível determinar as tensões, deformações e deslocamentos em qualquer ponto da estrutura do pavimento.

Destaca-se que o método simplificado apresenta rapidez e pouca acurácia na obtenção dos resultados enquanto o método iterativo apresenta grande acurácia na obtenção dos resultados, porém demanda muito tempo para isso por ser gerado a partir de formulações matemáticas complexas.

## 2.2 Equipamentos para realização de ensaios deflectométricos

Os métodos de obtenção das deflexões do pavimento por métodos não destrutivos são divididos em quatro categorias de carregamento, são elas:

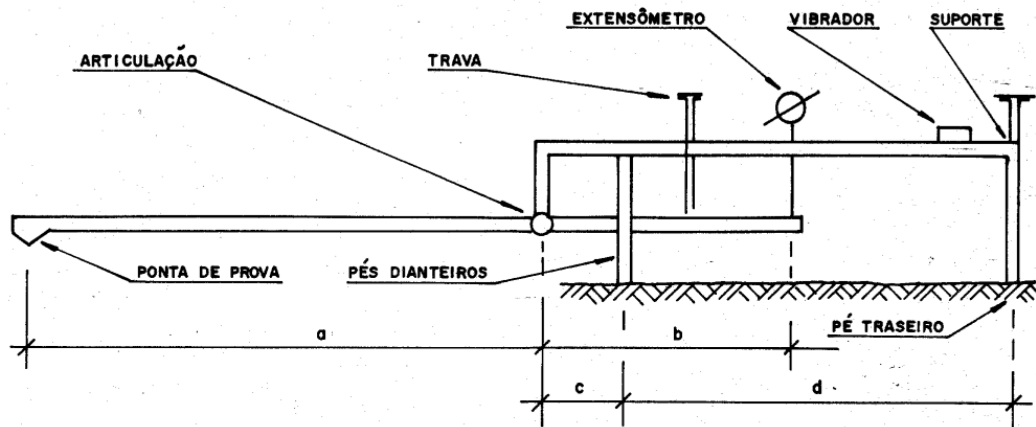
- CARREGAMENTO ESTÁTICO – Ensaio de Placa
- CARREGAMENTO QUASE ESTÁTICO – Viga Benkelman
- CARREGAMENTO VIBRATÓRIO – Dynaflect
- CARREGAMENTO POR IMPACTO – Falling Weight Deflectometer (FWD).

Os equipamentos utilizados para a obtenção de deflexões são distribuídos nessas categorias de acordo com a forma de aplicação da carga no pavimento durante a realização do ensaio. Dentre os equipamentos apresentados nas categorias acima, os mais populares na mecânica do pavimento para retroanálise são a Viga Benkelman e o FWD.

### 2.2.1 Viga Benkelman

A viga Benkelman é um equipamento de operação lenta e demorada, porém de fácil manuseio. Esse equipamento foi desenvolvido com a finalidade de medir deflexões no pavimento quanto submetido ao carregamento estático das rodas do veículo de teste. Em função de ter seu uso muito difundido, trata-se do teste de campo mais familiar aos engenheiros e projetistas de pavimentos (DNER-ME 024/94). Sendo composta por um conjunto de sustentação em que se articula uma alavanca interfixa, que formam dois braços com comprimento  $a$  e  $b$  que seguem a relação de 2/1, 3/1 ou 4/1, onde a extremidade do braço maior fica a ponta de prova da viga e na extremidade do braço menor aciona um extensômetro com precisão de 0,01mm, como apresenta a Figura 2.

Figura 2: Esquematização da Viga Benkelman



Fonte: DNER-ME 024/94

O funcionamento desse equipamento consiste no posicionamento da haste de ponta de prova entre as rodas do caminhão (de eixo simples e roda dupla) fazendo a leitura inicial no extensômetro. Em seguida, é feito o deslocamento do caminhão para frente de modo que o mesmo não tenha mais influência sobre a viga e assim fazendo a leitura final. A deflexão é calculada multiplicando a diferença entre as leituras pela relação de articulação da viga por semelhança de triângulos.

É importante ressaltar que a bacia de deformação levantada com a viga Benkelman representa a linha de influência, em um determinado ponto, da aplicação da carga em pontos afastados situados sobre uma linha paralela ao eixo da pista. No entanto, para fins práticos, considera-se que não há diferença significativa entre a bacia real e a bacia formada pela linha de influência da carga, considerando-se que, em pequenas extensões, as camadas do pavimento podem ser consideradas homogêneas e isotrópicas. (ALBERNAZ, 1997)

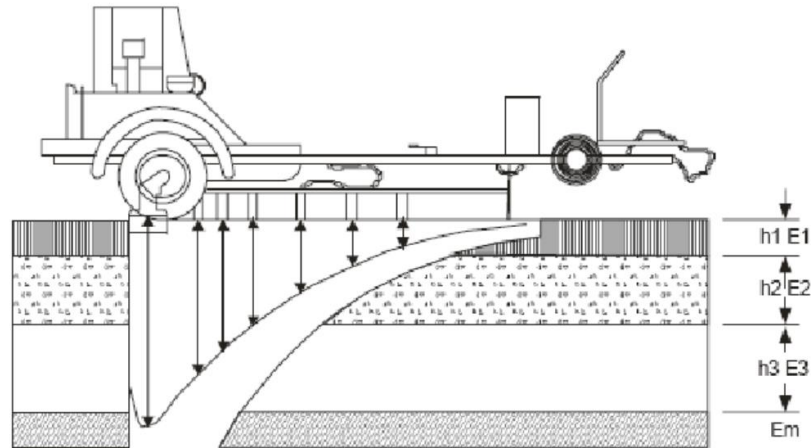
### 2.2.2 Falling Weight Deflectometer (FWD)

O equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD) é um equipamento de impacto que simula a passagem de carga de roda a partir da aplicação de cargas por impulso no pavimento. Marques (2002) afirma que o pulso de carga varia de 0,25 a 0,30 segundos, o que corresponde a passagem de um veículo a 70 km/h. Isso é obtido pela queda de um conjunto de massas, a partir de alturas pré-fixadas, sobre um sistema de amortecedores de borracha, que transmitem a força aplicada a uma placa circular apoiada no pavimento. O ensaio do FWD é normatizado pelo DNER-PRO 273/96. O ensaio consiste em se aplicar a carga de impacto e ler os deslocamentos em vários sensores colocados ao longo de um suporte em posições



convenientemente escolhidas para se obter a linha de deslocamentos. (BERNUCCI *et al.*, 2008), como mostra a Figura 3.

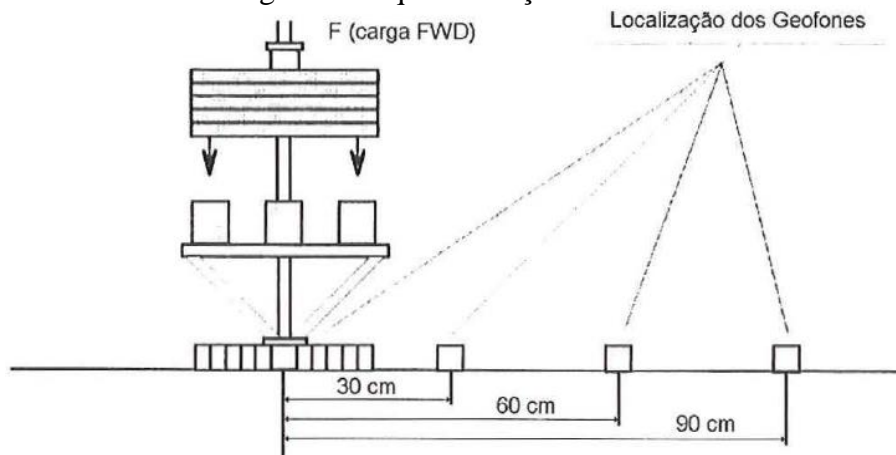
Figura 3: Deflectômetro de impacto - FWD



Fonte: DNIT (2006)

As deflexões geradas no pavimento são obtidas por meio de sensores que ficam instalados ao longo de uma placa metálica, sendo um deles no centro da placa e os outros posicionados a distâncias predefinidas, como representado na Figura 4. Juntamente com as leituras de deslocamentos verticais é feito o registro da temperatura do revestimento, a força aplicada e a distância percorrida com os sensores, termômetros, cédula de carga e odômetro de precisão que ficam acoplados no equipamento.

Figura 4: Esquemática do FWD



Fonte: Marques (2002)

Segundo Marques (2002), o equipamento é montado sobre um reboque que é conduzido por um automóvel para a realização das medições e em cada estação de ensaio é obtido a variação das deflexões lidas por cada geofone ao longo do tempo, a forma do pulso de carga aplicada sobre a placa e as temperaturas ambientes na superfície do pavimento. Na Tabela 2, são indicados a localização das estações de ensaio em função da largura da baixa de rolamento.

Tabela 2: Posicionamento das estações de ensaio com o FWD

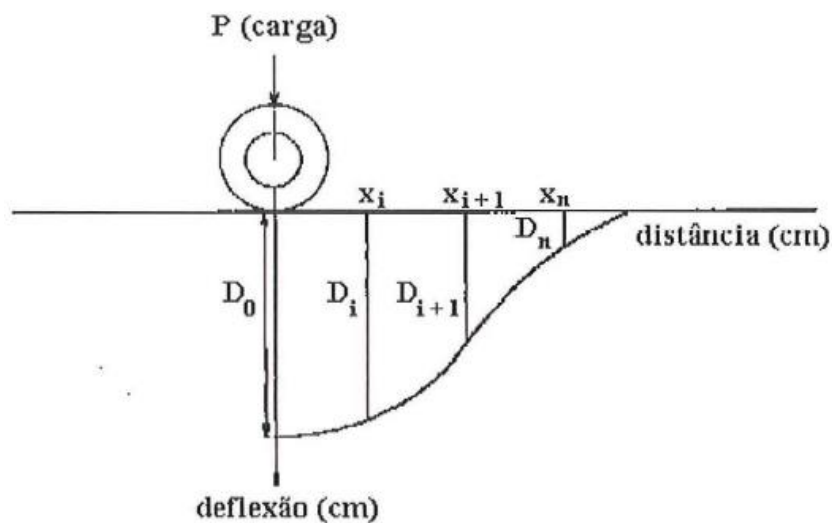
Largura da faixa de tráfego (m)	Distância ao bordo do revestimento (m)
2,7	0,45
3,0	0,60
3,3	0,75
3,50 ou mais	0,90

Fonte: DNER-PRO 273/96

### 2.3 Bacia de deflexão

A bacia de deflexão consiste basicamente na medição, em vários pontos ao longo da zona de influência da carga, dos deslocamentos verticais sofridas pelo pavimento que se dissipam à medida que se afasta do ponto de aplicação dessa carga. A Figura 5, a seguir representa a bacia de deflexão de um pavimento quando solicitado, onde  $D_0$  é a deflexão máxima medida no pavimento.

Figura 5: Representação da Bacia de deflexão

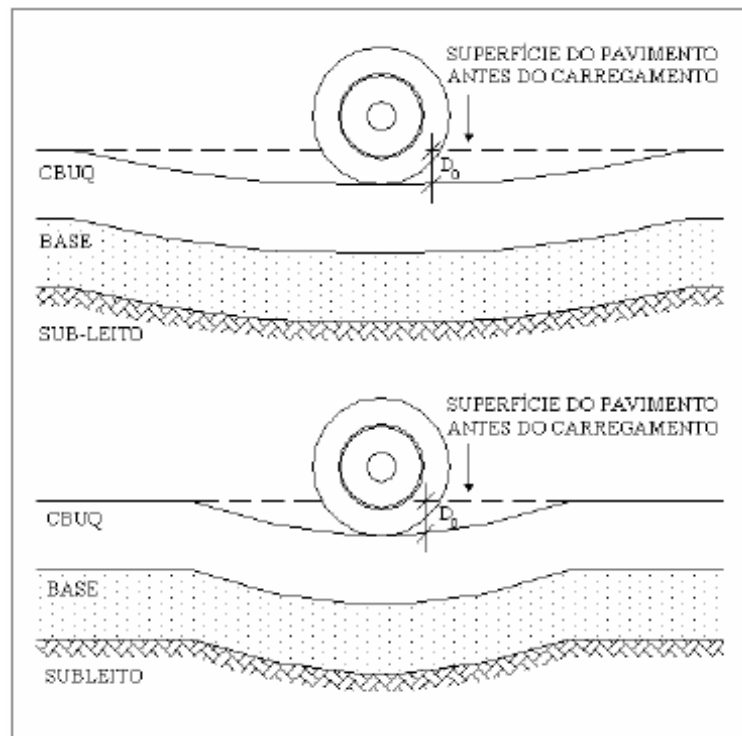


Fonte: Marques (2002)

A deflexão máxima ( $D_0$ ) possibilita a determinação dos locais onde o pavimento apresenta variações nas deformações verticais reversíveis quando sofre as solicitações do tráfego. Entretanto, um mesmo valor de deflexão reversível máxima pode representar inúmeros níveis de solicitação, tanto mais severas quanto maior a concentração dos esforços externada pela zona de concentração do carregamento, dependendo também da resposta oferecida pelos arranjos estruturais existentes. (NOBREGA, 2003).

A leitura somente da deflexão máxima não é suficiente para representar a resposta do pavimento ao ser solicitado, pois bacias deflectométricas distintas podem apresentar o mesmo valor de deflexão máxima, como é representado na Figura 6. Quando é feita a medição da deflexão em vários pontos na bacia de deflexão, segundo Marques (2002), é possível obter uma melhor caracterização da resposta do pavimento ao ser solicitado.

Figura 6 - Bacias deflectométricas distintas com mesma deflexão máxima



Fonte: Nobrega (2003)

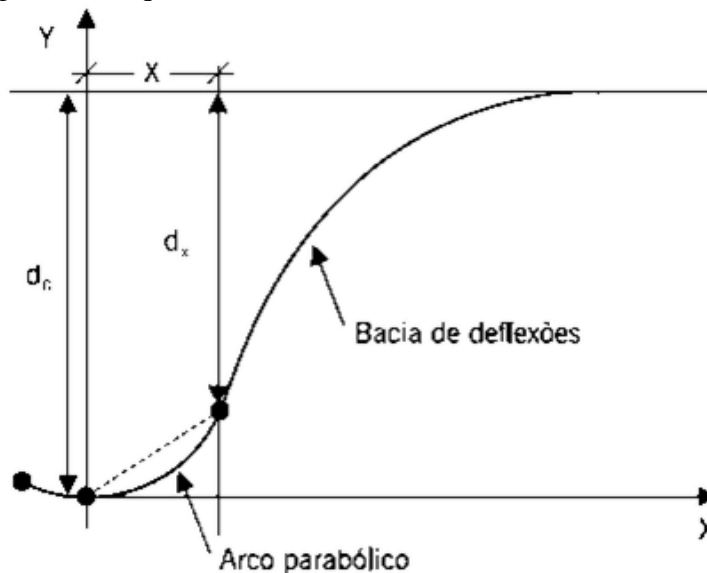
Segundo Nobrega (2003), o formato da bacia deflectométrica depende tanto da carga que é aplicada sobre o pavimento quanto das características geométricas e elásticas dos materiais que compõem cada camada do pavimento. Sendo assim, conhecer o formato da bacia de deformação apresenta grande relevância na determinação das características estruturais do pavimento e do subleito, pois as deflexões medidas nos pontos mais distantes do ponto de aplicação da carga são respostas das condições do subleito enquanto as deflexões medidas nos

pontos mais próximos do ponto de aplicação da carga são respostas de contribuição de todas as camadas incluindo o subleito.

O DNER PRO-011/79b define dois fatores como pontos importantes para determinação das características estruturais do pavimento, são estes: deflexão máxima recuperável e raio de curvatura. A deflexão máxima é a deflexão recuperável medida no ponto de aplicação da carga. Ela é uma resposta das condições estruturais à aplicação de carga de todas as camadas do pavimento, incluindo o subleito. Quanto maior for a deflexão medida nesse ponto, maior é a elasticidade do pavimento, e conseqüentemente, maior é o estado de degradação da estrutura do pavimento.

O raio de curvatura é o ponto de arqueamento da bacia de deflexão. Ele indica a capacidade da estrutura em distribuir os esforços e tem ligação direta com os módulos de elasticidade das camadas do pavimento, principalmente da base e sub-base. Ou seja, quanto maior o raio de curvatura, melhor é a capacidade do pavimento em distribuir os esforços solicitantes entre as camadas. Na Figura 7 a seguir, é representado o esquema de medida e cálculo do raio de curvatura da bacia deflectométrica do pavimento quando solicitado.

Figura 7 - Esquema de medida e cálculo do raio de curvatura



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

Para que o pavimento apresente boas condições estruturais evitando trincas, por exemplo, o DNER-ME 024/94 afirma que o pavimento deve apresentar valores de deflexão máxima abaixo de um valor máximo admissível e valores de raio de curvatura acima de um valor mínimo admissível. A norma estabelece ainda a utilização da Equação 1 para o cálculo do raio de curvatura da bacia deflectométrica, sendo necessário o conhecimento de apenas dois

pontos da bacia de deformação: a deflexão no ponto de aplicação da carga e a deflexão a uma distância de 25cm do ponto de aplicação da carga.

$$R = \frac{6250}{2 \cdot (D_0 - D_{25})} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

R – raio de curvatura, em metros;

D<sub>0</sub> – deflexão sob a aplicação da carga, em 0,01 mm;

D<sub>25</sub> – deflexão a 25 cm do ponto de aplicação da carga, em 0,01 mm.

Para a maioria dos equipamentos de levantamento deflectométricos, não se mede as deflexões afastadas à 25 cm, no qual são dados de entrada na equação do raio. Convencionou-se então a utilização do valor da deflexão à 25 cm do ponto de aplicação da carga como sendo a interpolação linear entre as deflexões à 20 e 30 cm de distâncias do ponto central.

Embora no Brasil a utilização do deflectômetro de impacto do tipo FWD para levantamento deflectométrico objetivando a caracterização estrutural de pavimentos urbanos e rodoviários seja bastante disseminado, visto que uma das grandes vantagens em relação à Viga Benkelman tradicional seja principalmente a rapidez da obtenção dos dados, e ainda da facilidade e segurança de operação independente das condições climáticas, confiabilidade dos resultados quanto à repetibilidade e principalmente pela possibilidade de caracterizar com precisão a forma completa da bacia deflectométrica, as informações obtidas pelo levantamento deflectométrico da bacia de deformação não têm sido totalmente utilizadas para fins de avaliação estrutural de pavimentos existentes e conseqüentemente diagnosticar sua real condição.

Além dos parâmetros apresentados pelo DNER-ME 024/94 (raio de curvatura e deflexão máxima) outros parâmetros representados pelas demais deflexões distantes do ponto de aplicação da carga são importantes para interpretar a bacia de deflexão obtidas por meio do equipamento de carregamento de impacto do tipo FWD, tais como:

- AREA

O parâmetro AREA foi originalmente desenvolvido para pavimentos rígidos, tendo sua operação normatizada pela AASHTO (1993) combinando as deflexões medidas em vários sensores e assim minimizando os efeitos de um mau funcionamento em um dos sensores. Sua formulação matemática está apresentada na Equação 2.

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

Onde:

AREA: Parâmetro AREA em cm;

D0, D30, D60 e D90: Deflexões às distâncias 0, 30, 60 e 90 cm respectivamente, do ponto de aplicação da carga, em 0,01 mm.

O parâmetro AREA tem valores limites mínimo e máximo de 28 cm e 90 cm, respectivamente. Sendo o limite máximo característica de pavimento muito rígido ou de grande espessura que apresentam valores de deflexões D0, D30, D60 e D90 iguais. Já o valor limite mínimo (28 cm) é característica de pavimento muito flexível que corresponde ao valor determinado para um sistema elástico construído de apenas uma camada. Na Tabela 3 a seguir, está apresentada a faixa de valores do parâmetro AREA para cada tipo de pavimento.

Tabela 3: Faixas de parâmetro AREA

<b>Tipo de Pavimento</b>	<b>Parâmetro AREA (cm)</b>
Pavimentos Rígidos (CCP)	60-90
CBUQ espesso (>12 cm)	55-75
CBUQ fino (<12 cm)	40-55
Pavimento muito flexível	28-40

Fonte: Lopes (2012)

Segundo Lopes (2012), uma estrutura constituída de três camadas elásticas que apresenta valor de área próxima do valor mínimo corresponde a uma estrutura onde os módulos do revestimento, da base e do subleito são praticamente iguais, situação esta indesejável para o bom desempenho dos pavimentos.

- Índice de curvatura da superfície (SCI)

O Parâmetro SCI (Surface Curvature Index), corresponde ao Índice de curvatura da Superfície é o índice mais sensível para indicar a situação elástica da camada de revestimento, sendo seu valor inversalmente proporcional à rigidez do pavimento, ou seja, quanto menor for o valor de SCI maior é a rigidez do revestimento. Esse parâmetro é definido a partir da diferença

entre as deflexões medidas no ponto de aplicação da carga e a deflexão medida à 30 cm do ponto de aplicação da carga, como mostra a Equação 3 a seguir.

$$SCI = D_0 - D_{30} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

SCI: Índice de curvatura da superfície;

D0 e D30: Deflexões medidas no ponto de aplicação da carga e à 30cm, respectivamente, em 0,01 mm

ROCHA (2020) afirma que valores superiores à 25 (0,01 mm) podem indicar que o pavimento apresenta camada de revestimento pouco resistente ou de pequena espessura apresentando-se muito deformável. Em seus estudos, Kim (2002) chegou em uma boa relação linear em escala logarítmica entre o parâmetro SCI, a espessura e o módulo de elasticidade da camada asfáltica, representada na Equação 4.

$$\log E_{ac} = -1,103 \cdot \log(SCI) - 1,183 \cdot \log(H_{ac}) + 6,1199 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

Eac: Módulo de Elasticidade da camada asfáltica, em MPa

SCI: Índice da Curvatura da Superfície, em 0,01mm;

Hac: Altura da camada asfáltica, em cm.

- Índice de dano de base (BDI)

O parâmetro BDI (*Base Damage Index*), denominado no Brasil como Índice de Dano de Base é o melhor indicador da condição da camada de base do pavimento, que quando apresenta valores superiores a 40 (0,01 mm) indica que o pavimento apresenta-se pouco resistente ou com problemas estruturais. Ele é determinado a partir da diferença entre as deflexões medidas à 30cm e 60 cm do ponto de aplicação da carga, como mostra a Equação 5.

$$BDI = D_{30} - D_{60} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

BDI: Índice de Danos à Base, em 0,01 mm;

D30 e D60: Deflexões às distâncias 30 e 60 cm respectivamente, do ponto de aplicação da carga, em 0,01 mm.

- Índice de curvatura de base (BCI)

O parâmetro BCI (Base Curvature Index), que em português é Índice de Curvatura da Base, é o parâmetro que indica a condição do subleito, determinado a partir da diferença entre as deflexões medidas à 60 cm e 90 cm do ponto de aplicação da carga, como mostra a Equação 6, onde valores superiores a 10 (0,01 mm) indicam que o subleito apresenta problemas estruturais e CBR menor do que 10%.

$$BCI = D_{60} - D_{90} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

BCI: Índice da Curvatura da Base, em 0,01mm;

D60 e D90: Deflexões às distâncias 60 e 90 cm respectivamente, do ponto de aplicação da carga, em 0,01mm.

- Fator de curvatura (CF)

O parâmetro CF (Curvature Function), traduzido como Fator de Curvatura, é o parâmetro que melhor representa a deformação horizontal máxima de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico indicando a previsão de fissuração dessa camada, sendo determinado pela diferença entre as deflexões medidas no ponto de aplicação da carga e à 20cm, como mostra a Equação 7.

$$FC = D_0 - D_{20} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

CF: Fator de Curvatura, em 0,01 mm;

D0 e D20 = Deflexões às distâncias 0 e 20 cm respectivamente, do ponto de aplicação da carga, em 0,01mm.



## 2.4 Programas de retroanálise de módulos de resiliência

Nas últimas décadas, visando agilizar o processo de realização de retroanálise de módulo de elasticidade das camadas do pavimento, foram desenvolvidos diversos programas computacionais baseados no princípio da Teoria da Elasticidade. Esses programas apresentam singularidade entre si, ou seja, cada um apresenta métodos de cálculos diferentes que variam desde métodos numéricos e de diferenças finitas até as mais simples, como por exemplo, por camadas equivalentes, além de permitir analisar o comportamento linear e não linear dos materiais.

Os programas computacionais proporcionaram um grande desenvolvimento à Mecânica dos Pavimentos. Através deles, foram superadas as dificuldades matemáticas para a aplicação das teorias de Boussinesq, Burmister, Westergaard, Odemark e outros, que estabeleceram as bases teóricas dos modelos elásticos aplicados aos pavimentos (TRICHÊS *et al.* 2010). Dentre os programas computacionais utilizados na retroanálise estão ELMOD, Elsym 5, BackMeDiNa.

O *software* ELMOD (*Evaluation of Layer Moduli and Overlay design*) é um programa usado na avaliação estrutural de todos os tipos de estruturas. De acordo com DYNATEST (2013, apud ROCHA, 2020) permite calcular até 4 camadas, mais a camada de subleito, e diferente da maioria dos programas, o *software* oferece diferentes métodos de cálculo de retroanálise. Esses incluem: *Radius of Curvature* (baseado na teoria de Odemark-Boussinesq); *Deflection Basin Fit* (DBF) (utiliza-se um método de integração numéricas); e as opções de FEM/LET/MET, que permite ao usuário escolher entre o método dos elementos finitos, análise elástica linear ou método da camada equivalente.

Os dados de deflexão são incorporados no programa diretamente através dos arquivos provindos do FWD, em formato .fwd. O programa incorpora todos os dados de deflexão, assim como os carregamentos e temperaturas. O *software* ainda fornece a opção de se entrar com diferentes aplicações de carregamentos para o mesmo ponto, a fim de realizar-se uma análise não-linear mais acurada. (MARCOS, 2020)

Segundo TRICHÊS *et al.* (2010) o *software* Elsym5 (*Elastic Layered System 5*) foi desenvolvido na Universidade da Califórnia, em Berkeley no ano de 1970 para computadores de grande porte e 15 anos depois foi adaptado para computadores pessoais. Esse programa permite o cálculo de estruturas flexíveis e semirrígidas de até cinco camadas de pavimentos flexíveis e semi-rígidos e utiliza como base teórica a formulação da Teoria da Elasticidade desenvolvida por Burmister de meios semi-infinitos estratificados.

Segundo Darous (2003), essas camadas são consideradas horizontalmente infinitas e com espessuras uniformes e finitas, exceto o subleito que possui espessura considerada semi-infinita, sendo necessário informar, como dados de entrada no programa, a quantidade de camadas, suas espessuras, módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson.

O *software* BackMeDiNa foi desenvolvido a partir da evolução do SisPav, desenvolvido por Filipe Augusto C. P. Franco, D.Sc. Nele é possível realizar a retroanálise das bacias deflectométricas obtidas com o FDW. A obtenção dos módulos de resiliência é feita utilizando o módulo AEMC para a análise elástica linear, a partir da variação dos valores dos módulos em torno de um valor central, até se obter uma bacia teórica próxima da bacia de deflexão de campo medida.

#### 2.4.1 Fatores de Influência na retroanálise

Vários fatores podem influenciar os resultados de um dimensionamento mecânico. Rocha (2020) afirma que o processo de retroanálise apresenta sensibilidade a diversos fatores que podem intervir no resultado do processo de retroanálise. A seguir são destacados os principais elementos que podem interferir nesse processo.

1. Modelagem matemática;
2. Não consideração da elasticidade não-linear dos materiais granulares;
3. Espessuras das camadas;
4. Natureza dos materiais constituintes das camadas;
5. Confinamento das camadas;
6. Número excessivo de camadas;
7. Critérios adotados para a convergência;
8. Condição de aderência entre as camadas;
9. Módulos iniciais e faixa de valores de módulos adotados.

Observa-se que há uma variedade de fatores que podem influenciar no processo de retroanálise de módulos de resiliência, ainda não existindo o procedimento que seja possível reproduzir fielmente as condições de campo, pois são feitas muitas simplificações para tornar possível o processo de retroanálise. Rocha (2020) destaca cinco variáveis que mais interferem no resultado final, são elas:

a) Comportamento elástico das camadas granulares

Segundo Medina *et al.* (1994) a não linearidade no comportamento tensão *versus* deformação de solos e materiais granulares resulta em variações relativamente grandes nos módulos finais desses materiais. Em razão disso, foram desenvolvidos, dentro de programas de elementos finitos ou de camadas elásticas, modelos que utilizam a técnica de divisão de camada de comportamento não linear em subcamadas através de processos iterativo.

Por esses serem baseados no método dos elementos finitos, a consideração da não linearidade das camadas granulares do pavimento, o procedimento de retroanálise é mais lento, porém com elevada acurácia.

b) Presença de camada rígida

Segundo Pereira (2007) a presença de camada rígida possivelmente é o problema mais comum encontrado na estimativa das bacias de deflexões, e essa camada consiste na camada em que abaixo dela há pouca ou nenhuma contribuição para as deflexões da superfície medidas, podendo ser elas reais ou aparentes

A presença de uma camada rígida pode alterar os valores de deflexões, pois as deflexões medidas na superfície do pavimento consistem na resposta conjunta de todas as camadas do pavimento, incluindo o subleito, e a camada rígida apresenta pouca ou nenhuma deformação. Quando essas camadas rígidas não são consideradas no *software*, podem resultar na superestimação ou subestimação dos valores dos módulos reais.

c) Aderência entre as camadas

No dimensionamento de pavimentos novos e de reforços que se utilizam da teoria da elasticidade, considera-se que as camadas tenham propriedades constantes, carregamento distribuído uniformemente e, ainda uma interface entre camadas totalmente aderidas. No entanto, para construções de pavimentos asfálticos, a estrutura é construída em camadas, criando-se zonas de fragilidade na estrutura, justamente nas interfaces. (SILVA, BASTOS e SOARES, 2015)

Quando há aderência nessa interface das camadas do pavimento, os esforços solicitados são mais amenos em comparação a situações onde não há a presença dessa interface, onde as camadas passam a trabalhar de forma independente apresentando zonas de fragilidade entre elas, que resultam em valores de módulo de resiliência maiores.

Alguns problemas podem ser decorrentes dessa falta de aderência entre as camadas do pavimento tais como: falhas por deslizamentos entre as camadas, trincas por deslizamento e deformações horizontais na superfície do pavimento.

d) Espessura das camadas

Nos processos de retroanálise, as espessuras das camadas do pavimento são assumidas como constante, como na maioria dos programas de pavimentos. Entretanto, o que ocorre na prática são variações de espessura ao longo das seções do pavimento (NÓBREGA, 2003).

Segundo Rocha (2020), mesmo que um pavimento apresente uma seção uniforme e bem construída, é possível que ocorra variações em sua espessura. Essas variações resultarão em dispersões nas deflexões que são capazes de serem discriminados nas variações de cada módulo retroanalisado, no entanto podem acabar sendo significantes quando somados na análise de todas as camadas em conjunto.

e) Módulos iniciais

Albernaz et al. (1995) afirma que os *softwares* de retroanálise apresentam grande sensibilidade aos valores iniciais de módulos de resiliência (*seed values*) e à faixa de variação dos módulos de resiliência das camadas, devido as características das formulações matemáticas e as metodologias de convergência adotadas no processo de retroanálise.

Por se tratar de métodos iterativos e matemáticos, em alguns casos é possível obter diferentes módulos de uma mesma bacia de deflexões, utilizando diferentes módulos iniciais ou limites, caracterizando a não unicidade da solução. Para tentar minimizar essa sensibilidade são utilizadas duas soluções: utilização de equações que arbitram valores de módulos iniciais para as camadas para que os valores finais não se distanciem tanto dos iniciais ou adoção de tabelas como valores limites de materiais empregados no Brasil, para que se possa dar entrada nos *softwares* de retroanálise.

## 2.5 Programa BackMeDiNa

O *software* BackNeDiNa é um programa computacional desenvolvido para auxiliar na retroanálise de bacia deflectométrica obtidas com o equipamento FWD, que foi desenvolvido como uma evolução do programa SisPav. O cálculo para se achar os Módulos de Resiliência é feito de forma iterativa, utilizando o módulo AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas)

para a análise elástica linear, a partir da variação dos valores dos módulos em torno de um valor central, até se obter uma bacia teórica mais próxima da bacia de deflexões de campo medida pelo FWD. Para isso, o programa compara a raiz do valor quadrático médio das diferenças entre as medidas de deflexão de campo e as calculadas. (DNIT, 2020)

DNIT (2020) ainda afirma que por esse método é possível obter resultados de tensões, deformações e deslocamentos em qualquer ponto da estrutura sem que seja necessário dividir o meio contínuo em Elementos Finitos. As hipóteses fundamentais computacionais baseiam-se nas soluções de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos:

1. Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
2. A lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
3. As camadas são ilimitadas na direção horizontal;
4. Todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
5. A superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
6. Na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
7. A carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
8. A grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
9. As condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

#### 2.5.1 Utilizando dados da VB na rotina de retroanálise no BackMeDiNa

Apesar de apresentar possibilidade apenas para dados obtidos pelo FDW, é possível utilizar dados obtidos pela Viga Benkelman no *software* BackMeDiNa. Hermes *et al.* (2016) descreve a conversão dos dados baseado no estudo elaborado por Theisen *et al.* (2009) onde é considerado as camadas do pavimento com espessura constante, somente um módulo de elasticidade, um coeficiente de Poisson e o carregamento das placas simétrico e constante. Sendo assim, a carga e as deflexões medidas em campo podem ser divididas por 2, e com isso são calculadas novas distâncias de pontos de aplicação de carga.

## 2.6 Métodos de dimensionamento de reforço de pavimento

Com o decorrer da vida de projeto de uma rodovia, juntamente com as ações a qual o pavimento é exposto (clima e tráfego) sua capacidade de operação é reduzida tornando necessário desenvolver ações de conservação, nas quais se incluem as ações de reabilitação estrutural, para uma circulação rodoviária segura, cômoda e econômica. De acordo com Fonseca (2013), as características estruturais e funcionais de um pavimento podem ser recuperadas através da aplicação de uma camada betuminosa adicional sobre o revestimento remanescente prolongando a vida útil do pavimento, este procedimento é chamado de reforço.

Os métodos de dimensionamento dessa camada de reforço podem ser dividido em dois métodos: método empíricos, que se baseia em pistas experimentais e método mecanístico-empírico que usa a Teoria da Elasticidade para descrever as características dos materiais constituintes das camadas do pavimento.

### 2.6.1 Métodos empírico

A metodologia empírica de dimensionamento de reforço de pavimentos asfálticos no Brasil, segundo Franco (2007), se baseia em regras que foram desenvolvidas para tipos de materiais de pavimentação e condições climáticas específicas, limitando esse método apenas às condições as quais ele foi desenvolvido. Têm-se hoje quatro métodos homologados pelo DNIT para dimensionamento de reforço de pavimentos:

1. DNER PRO-010/79 – Procedimento A;
2. DNER PRO-011/79 – Procedimento B;
3. DNER PRO-159/85
4. DNER PRO- 269/94

Segundo Pereira (2013), esses quatro métodos analisam parâmetros estruturais e funcionais e fazem o projeto de restauração seguindo critérios para cálculo da espessura de reforço estrutural de pavimentos. Os métodos DNER PRO-10/79 e DNER PRO 11/79, foram normatizados pelo DNER a partir de métodos que utiliza a Viga Benkelman para levantamento deflectométrico para cálculo da espessura de camada de reforço, na década de 60, usados na Califórnia, EUA e Argentina, respectivamente, ambos com pequenas modificações em relação aos originais. O método DNER PRO-159/85 foi baseado em curvas de desempenho obtidas em

estradas brasileiras, sendo mais adequado as condições brasileiras. Já o método DNER PRO 269/94 denominado Método da Resiliência - TECNAPAV, foi desenvolvido considerando provenientes da Mecânica dos Pavimentos, sendo uma simplificação do verdadeiro método mecanístico de reforço. A prática atual de projeto de reforço das rodovias federais está associada à utilização mais corrente de dois métodos: o PRO 11/79 e o PRO 269/94, ambos baseados na análise do valor da deflexão característica atual do segmento como elemento principal de decisão de espessura de reforço, conforme resume a seguir.

- DNER PRO-010/79 – Procedimento A;

A norma DNER PRO - 010/79 estabelece os procedimentos necessários para a avaliação dos pavimentos flexíveis existentes, apontando as causas das deficiências e fornecendo elementos para o cálculo da vida restante ou do reforço necessário para um novo número de solicitações (número N). Ela foi desenvolvida com base nos critérios de deformabilidade visto que há razoável relação entre a grandeza das deformações recuperáveis e o desempenho dos pavimentos flexíveis.

A norma estabelece que para a realização do dimensionamento do reforço de pavimento existente é necessário, primeiramente, realizar o levantamento histórico do pavimento existente para conhecimento do número N de projeto, tráfego atual e futuro, características das camadas do pavimento, características geológicas e climáticas da região, estado de conservação e prospecção preliminar do pavimento por abertura de poços de sondagem. Em seguida é feita a determinação das deflexões recuperáveis, divisão dos segmentos homogêneos e determinado o Índice de Gravidade Global (IGG), porcentagem de estações que apresentam afundamentos plásticos (AP%), valor médio das flexas nas trilhas de roda (T) e deflexões de projeto e características, para assim determinar o tipo de intervenção a ser realizada, como apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Critérios para estabelecimento de diretrizes de projeto da norma DNER PRO-010/79 - Procedimento A

IGG	F e AP %	$d_0$ e $d_{adm}$	Decisão quanto ao aproveitamento da estrutura existente e quanto às medidas corretivas a serem levadas em conta no Projeto.
IGG ≤ 180	F ≤ 30 mm e AP% ≤ 33%	$d_0 \leq d_{adm}$	1- Aproveitamento total do valor residual do pavimento existente 2- Programação de reparos locais, se necessário 3- Programação de tratamento de rejuvenescimento, se necessário.
		$3d_{adm} \geq d_a > d_{adm}$	1- Aproveitamento total do valor residual do pavimento existente 2- Programação de reparos locais, se necessário 3- Projeto de reforço com base no critério de deformabilidade
		$d_0 > d_{adm}$	1- Aproveitamento total ou parcial do valor residual do pavimento existente 2- Programação de reparos locais, se necessário 3- Projeto de reforço com base no critério de deformabilidade e Projeto de reforço com base no critério de resistência, no caso de aproveitamento total do valor residual do pavimento existente. Projeto de nova estrutura com base no critério de resistência, no caso de aproveitamento total do valor residual do pavimento existente.
	F > 30 mm e AP% > 33%	-	1. Aproveitamento total do valor residual do pavimento existente 2. Programação de reparos locais 3. Projeto de reforço com base no critério de resistência no caso de aproveitamento total do valor residual do pavimento existente. Projeto de nova estrutura com base no critério de resistência, no caso de aproveitamento total do valor residual do pavimento existente.
IGG > 180	-	-	Remoção parcial ou total do pavimento existente e sua substituição parcial ou total por nova estrutura projetada com base no critério de resistência

Fonte: DNER PRO-010/97

- DNER PRO-011/79 – Procedimento B;

A norma PRO-011/79 do DNER estabelece os procedimentos necessários para a avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis existentes, apontar as causas de suas deficiências e fornecer elementos para o cálculo da vida restante ou do reforço necessário para o novo número de solicitações durante o período considerado (número N). Os procedimentos de dimensionamento de reforço foram baseados no critério de deformabilidade dos pavimentos flexíveis visto que existe correlação entre a magnitude das deflexões e do raio de curvatura correspondente e o aparecimento de falhas no pavimento.



Com os dados de deflexão de projeto, raio de curvatura e deflexão admissível, avalia-se as condições estruturais do pavimento e as medidas corretivas necessárias como apresentado no Quadro 2.

Quadro 2: Critérios para avaliação estrutural - DNER PRO-011/79

Hipótese	Dados deflectométricos obtidos	Qualidade estrutural	Necessidade de estudos Complementares	Critério para Cálculo de Reforço	Medidas Corretivas
I	$D_p \leq D_{adm} R \geq 100$	BOA	NÃO		Apenas correções de superfície
II	$D_p > D_{adm} R \geq 100$	se $D_p > 3 D_{adm}$ MÁ	NÃO	Deflectométrico	Reforço
III	$D_p \leq D_{adm} R < 100$	se $D_p \leq 3 D_{adm}$ REGULAR	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou reconstrução
IV	$D_p > D_{adm} R < 100$	MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou reconstrução
V	-	MÁ O pavimento apresenta deformações permanentes e rupturas plásticas generalizadas (IGG>180)	SIM	Resistência	Reforço ou reconstrução

Fonte: DNER PRO-011/79

A espessura necessária de reforço do pavimento pode ser determinada pela Equação 8 ou pelo ábaco fornecido pelo manual do DNER, onde é necessário conhecimento da deflexão de projeto e o número de repetições de carga de eixo padrão (8,2 tf), representado na Figura 8.

$$h = K \cdot \log \frac{D_p}{D_{adm}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

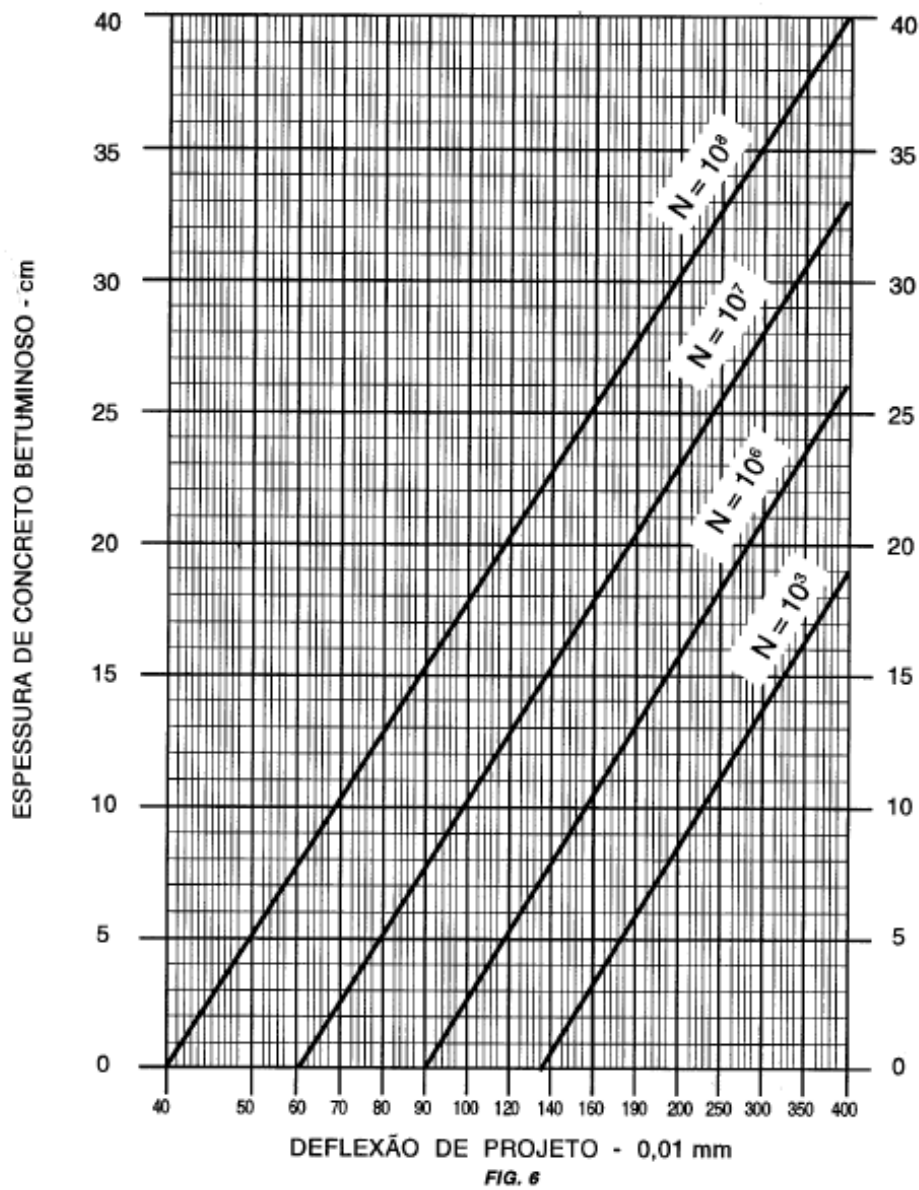
H: espessura do reforço do pavimento em centímetros;

K: fator de redução de deflexão, próprio do material usado no reforço;

D<sub>p</sub>: deflexão de projeto determinada para o subtrecho homogêneo, objeto do dimensionamento, em 0,01 mm;

D<sub>adm</sub>: deflexão admissível após a execução do reforço do pavimento, em 0,01 mm.

Figura 8: Ábaco para dimensionamento da espessura de reforço de pavimento em concreto betuminoso



Fonte: DNER PRO 011/79

Para calcular a espessura do reforço quando se tratar de concreto betuminoso adota-se o valor 40 para K. Para corrigir o valor de K, é utilizado a Equação 9, e quando encontrado um valor para K muito distinto de 40, corrige-se a espessura do reforço do pavimento com a Equação 10.

$$K = \frac{h}{\log \frac{D_0}{Dr}}$$

Equação 9

$$h_r = \frac{K}{40} \cdot h_{40} \quad \text{Equação 10}$$

- DNER PRO-159/85

A norma DNER PRO-159/85 define o procedimento de restauração de pavimentos flexíveis e semi-rígidos, apresentando alternativas de restauração em concreto asfáltico, em tratamento superficial e em lama asfáltica. Para realizar o procedimento de restauração faz-se o levantamento dos dados do pavimento existente e levantamento de campo, onde são determinadas as deflexões recuperáveis as condições do pavimento existente, realização de sondagem e caracterização do tráfego.

O estudo das alternativas de restauração é em função dos parâmetros definidos e a escolha do tipo de restauração é feita com base nos seguintes critérios:

- a) Para a correção da irregularidade: restauração em concreto asfáltico
- b) Para a correção do trincamento ou do desgaste: restauração em lama asfáltica ou tratamento superficial ou concreto asfáltico. Entretanto, o projetista deverá considerar, em detalhe a conveniência da execução de tratamento superficiais em rodovias com volumes de tráfego relativamente elevado.

A restauração em Concreto Asfáltico deve ser analisada a partir da adoção da espessura mínima fixada de 3 cm recomendada pela norma. Primeiramente é determinada a irregularidade do pavimento antes da aplicação do concreto asfáltico utilizando e em seguida é determinada a previsão de irregularidades imediatamente após a aplicação do concreto asfáltico e a previsão de trincamento para a restauração.

A restauração em Tratamento Superficial Duplo é utilizada para correção de trincamento a partir da determinação da irregularidade e do desgaste. Na restauração em Lama Asfáltica é determinada a irregularidade e o trincamento da superfície do pavimento.

- DNER PRO- 269/94

A norma DNER PRO – 269/94 define os procedimentos a serem adotados na aplicação do método de projeto de restauração de pavimentos flexíveis, desenvolvido pelos Engenheiros Salomão Pinto e Ernesto S. Preussler.

Para o dimensionamento da camada de reforço é necessário realizar primeiramente o levantamento dos dados do pavimento existente, em seguida, faz-se o levantamento de campo,

determinando as deflexões recuperáveis; levantamento da condição do pavimento, sondagem e retirada de corpos de prova e caracterização do tráfego.

A partir dos corpos de prova retirados na sondagem é feito os ensaios de laboratório para determinar o módulo de resiliência e o CBR, que juntamente com a porcentagem de silte, é possível realizar a classificação dos solos baseando na Tabela 4 apresentada pela norma.

Tabela 4: Classificação dos solos pelo método DNER PRO-269/94

CBR %	S %		
	≤ 35	35 a 65	> 65
≥ 10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

Fonte: DNER PRO-269/94

A partir dessa classificação aplica-se a Equação 11 para cálculo da espessura de reforço em concreto asfáltico e a partir dela determina-se a solução de recapeamento.

$$HR = -19,015 + \frac{238,14}{\sqrt{D}} - 1,357 \cdot hef + 1,016 \cdot I_1 + 3,893 \cdot I_2 \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

HR: estrutura da camada de reforço em concreto asfáltico, em cm;

hef: espessura efetiva;

$I_1$  e  $I_2$ : constantes relacionadas as características resilientes da terceira camada da estrutura de referência;

D: Deflexão máxima admissível, em 0,01 mm.

Ao analisar a metodologias empíricas de dimensionamento de pavimento flexível normatizadas pelo DNIT, observa-se que apresentam uma grande limitação na obtenção de soluções de recuperação da camada de revestimento visto que analisam apenas a deflexão máxima recuperável do pavimento e o raio de curvatura, no caso do método PRO-011, que permitem conhecer o comportamento da estrutura do pavimento até 25 cm do ponto de aplicação da carga, e como apresentado acima. Ressalta-se que o conhecimento apenas das deflexões medidas nesses pontos não é suficiente para caracterizar o comportamento de toda a

estrutura do pavimento e assim os métodos empíricos adotados no Brasil não permitem ao engenheiro apresentar propostas de soluções mais adequadas as rodovias em estudo

### 2.6.2 Método mecanístico-empírico – MeDiNa

Buscando reduzir a parcela de empirismo no dimensionamento de pavimentos novos e reforço de pavimento existentes, foram desenvolvidos métodos mecanísticos-empírico que utiliza a Teoria da Elasticidade para caracterizar os materiais constituintes das camadas do pavimento, analisando tensões e deformações e variando dimensões e características desses materiais. Essa metodologia faz uso de métodos analíticos como a Teoria de Multicamadas Elásticas (TME) ou métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos (MEF).

Franco (2007) desenvolveu em sua tese de doutorado um método mecanístico-empírico brasileiro de dimensionamento de pavimentos asfáltico, na COPPE/UFRJ que foi consolidado em *software* denominado de SisPav. Com um Termo de Execução Descentralizada celebrado de 2015 a 2018 entre o Instituto de Pesquisa Rodoviárias -IPR e o Instituto de Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro -COPPE, o *software* passou a ser denominado de MeDiNa.

Segundo o Manual de Utilização do programa MeDiNa apresentado pelo DNIT, o MeDiNa é um *software* que realiza a verificação e dimensionamento de estruturas de pavimento mecanístico-empírico por meio da rotina AEMC de Análise Elásticas de Múltiplas Camadas, onde é possível fazer o dimensionamento de pavimentos novos e reforços de estruturas já existentes, basta apenas mudar a configuração de MODO e mudar de Pavimento Novo (Nível A) para PROJETO DE REFORÇO. Na Figura 9 é apresentado a interface do *software* com as características das camadas do pavimento em estudo, e destacado em amarelo, a camada de reforço a ser dimensionada.

Figura 9: Tela do *software* MeDiNa

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA    MODELAGEM    RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Sueden    EMPRESA: Universidade Federal do Tocantins

PROJETO:    MODO: Projeto de Reforço

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	10,0	9000	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE	Camada Asfáltica Superficial	4,0	3363	0,30
3	CAMADA EXISTENTE	Camada Granular	35,0	321	0,35
SL	SUBLEITO	Subleito	0,0	306	0,45

**EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO**

**DADOS DO TRÁFEGO**

Tipo de Via: Sistema Arterial Primário

VMD (1º ano): 3342

FV: 1.000

N anual (1º ano): **1,22e+06**

% Veículos na faixa de projeto: 100

N Anual da faixa: 1,22e+06

Taxa de crescimento (%): **3,0**

Período de projeto (anos): 10

N Total: 1,40e+07

**Taxa de crescimento (%):**  
Taxa de crescimento do tráfego

C:\Users\junio\OneDrive\Área de Tra... \85 BACIAS - MRrev menor 10.000 MPa.pv MODO REFORÇO

Fonte: Elaborada pela autora

Na opção de reforço são fornecidas ao usuário duas opções: Dados novos e importar retroanálise. Na primeira opção os dados iniciais são inseridos pelo próprio projetista no programa. Já na segunda opção, os dados são inseridos no programa por meio da importação de um arquivo de bacia deflectométrica do BackMeDiNa. Para realizar a importação é necessário que o seguimento de rodovia a ser analisado apresente a mesma quantidade de camadas e o mesmo tipo de condição de aderência entre as camadas, e a menor variação possível de Módulos, deflexões e espessuras, e principalmente que o segmento seja homogêneo. Durante a importação dos dados, o *software* realiza o cálculo da média, desvio padrão, os valores mínimo e máximo dos módulos retroanalisados e o valor da deflexão característica. Depois de finalizada a importação, deve ser finalizado o preenchimento dos dados da camada asfáltica inserindo a área trincada, IRI e a idade do pavimento.

Com base nestes valores, o programa emite avisos para que o projetista tome decisões para o projeto final. E ainda, na camada asfáltica superficial existente, o projetista pode informar qual espessura deseja fresar e o programa calcula automaticamente a espessura remanescente para o projeto de reforço. As espessuras se ajustam automaticamente quando o projetista digita os valores de Espessura de Fresagem, Espessura de Campo e Espessura da

camada final. E espessura da camada final será sempre igual à espessura de campo menos a espessura de fresagem.

Ressalta-se que o projetista pode escolher entre realizar uma *Análise* pura de como a estrutura lançada se comporta com o tráfego ou *Dimensionar* uma estrutura. Na *análise* é realizado os cálculos e verifica os critérios de Área Trincada e/ou Deformação Permanente, sem alterar a espessura da camada marcada e no fim, é apresentado um resumo que pode ser avaliado pelo projetista. No *dimensionamento*, o programa irá realizar diversas análises, alterando a espessura da camada visando atender primeiramente o critério de fadiga. O *software* realizará o aumento e diminuição das espessuras para definir qual a melhor espessura para o máximo de Área Trincada permitida. Lembrando que o MeDiNa não tem elementos nem modelos para avaliar a reflexão de trincas do pavimento antigo no novo. Caso o grau de trincamento atual seja muito elevado, cabe ao projetista elaborar estratégias e soluções para evitar ou adiar o processo de reflexão de trincas, independente do resultado do programa.

É importante frisar que, no modo Reforço apenas uma camada asfáltica nova pode ser dimensionada. O programa altera a espessura da camada até atender o critério da fadiga: espessura para o máximo permitido de Área Trincada. No Reforço a Área Trincada é o único critério considerado visto que a camada a ser acrescida à estrutura é de concreto asfáltico. Admite-se espessura máxima de 15 cm, e caso não satisfaça, o projetista deve rever os dados e a estrutura, verificando se não é necessário adotar outra estratégia de restauração, por exemplo, fresagem, etc. No programa tem uma seção de alertas que pode ajudar o projetista a rever a situação daquele segmento.

### **3 METODOLOGIA**

No presente capítulo é apresentado os dados dos segmentos estudados incluindo as características estruturais e de tráfego de cada segmento e a metodologia do estudo. Primeiramente é apresentado o planejamento de cada etapa do trabalho e em seguida é apresentado os trechos escolhidos para realização do estudo e, por fim, é feita a descrição das etapas de planejamento para alcance dos objetivos do estudo.

#### **3.1 Planejamento de pesquisa**

Para alcançar os objetivos desse estudo foram analisados os dados apresentados no Projeto Executivo de Engenharia para Restauração da rodovia -CREMA 2ª Etapa, realizado em 2011, da BR-406/RN no subtrecho entre o Entroncamento da BR-104 com as RN-118 e RN-221 em Macau-RN e o Entroncamento da BR-101 com a RN-160, com extensão total de 171,2 km, visto que o objetivo desse estudo é unicamente de cunho acadêmico e científico e por questões éticas não será divulgado o nome da Empresa que realizou o projeto.

Dito isso, a metodologia utilizada para o alcance dos objetivos do estudo constitui as seguintes etapas:

- i. Com o projeto de restauração da rodovia definido, foram escolhidos dois segmentos homogêneos.
- ii. Após, foi verificado em projeto, qual a estrutura tipo do pavimento existente de cada segmento (número de camadas, espessuras, material existente)
- iii. Verificação do Número N de projeto para cada segmento escolhido.
- iv. Após a separação desses dois segmentos, foram escolhidas a bacia média de deflexão e a bacia medida no exato ponto de abertura do poço de sondagem dentro de cada trecho.
- v. Em seguida foi realizada a retroanálise das bacias selecionadas para os dois segmentos.
- vi. Analisou o dimensionamento realizado pelo método PRO 011/79 e pelo método MeDiNa.



### 3.2 Análise do banco de dados do projeto

Os dados trabalhados aqui nesta pesquisa foram extraídos de um Projeto Executivo de Engenharia para Restauração de Rodovia - CREMA 2ª Etapa da Rodovia BR-406/RN, de extensão: 171,2 km, datado de 2011. Por questões éticas o nome da empresa que elaborou o projeto não será divulgado, haja vista que o presente trabalho tem objetivo de cunho puramente acadêmico e científico de apresentar o estudo de retroanálise de módulos elásticos das camadas de uma estrutura de pavimento flexível. Assim, este trabalho apresenta uma retroanálise de bacias de deflexão medidas com equipamento FWD junto à uma Rodovia Federal a partir do *software* de retroanálise BackMeDiNa - DNIT, e utiliza os módulos retroanalizados em uma análise mecanística-empírica para cálculo de reforço de pavimento no *software* MeDiNa-DNIT.

A análise do estudo de tráfego foi realizada observando a metodologia utilizada, a partir da contagem volumétrica e classificatório de veículos, a fim de se determinar o Volume Médio Diário (VMD), a projeção do tráfego e o Número N de cada posto, como mostra a Tabela 5 a seguir.

Tabela 5: Dados do estudo de tráfego da rodovia

Posto	Estaca inicial	Estaca final	Extensão (km)	VMD	Projeção do Tráfego (%)	Número N
1	0	1706	34,12	569	3	1,11E+07
2	1706	3794	41,76	1143	3	1,40E+07
3	3794	5766	39,44	1539	3	1,99E+07
4	5766	8560	55,88	2260	3	2,03E+07

Fonte: elaborada pela autora

Na análise dos dados dos estudos geotécnicos, foi observado os procedimentos utilizados para a divisão dos segmentos homogêneos. E ainda, a localização da realização dos poços de sondagens, observando o tipo de poços de inspeção e coleta de amostras para definição e caracterização das diferentes camadas que constituem o pavimento e do subleito, além da avaliação objetiva da superfície do pavimento onde foi determinado o Índice de Gravidade Global (IGG), que reflete no estado de deterioração do pavimento.

Foi realizado também, a avaliação do banco de dados do comportamento estrutural do pavimento existente a partir dos resultados obtidos do levantamento deflectométrico utilizando o *Falling Weight Deflectometer* (FWD).

No Projeto Executivo de Engenharia para Restauração de Rodovia – CREMA 2ª Etapa, foram considerados como parâmetros de curvatura da bacia deflectométrica apenas a Deflexão máxima recuperável e o raio de curvatura, apresentados pelo DNER PRO-011/79b, no entanto, para melhor determinar o comportamento do pavimento foi realizado o cálculo dos demais parâmetros (AREA, SCI, BDI, BCI e CF).

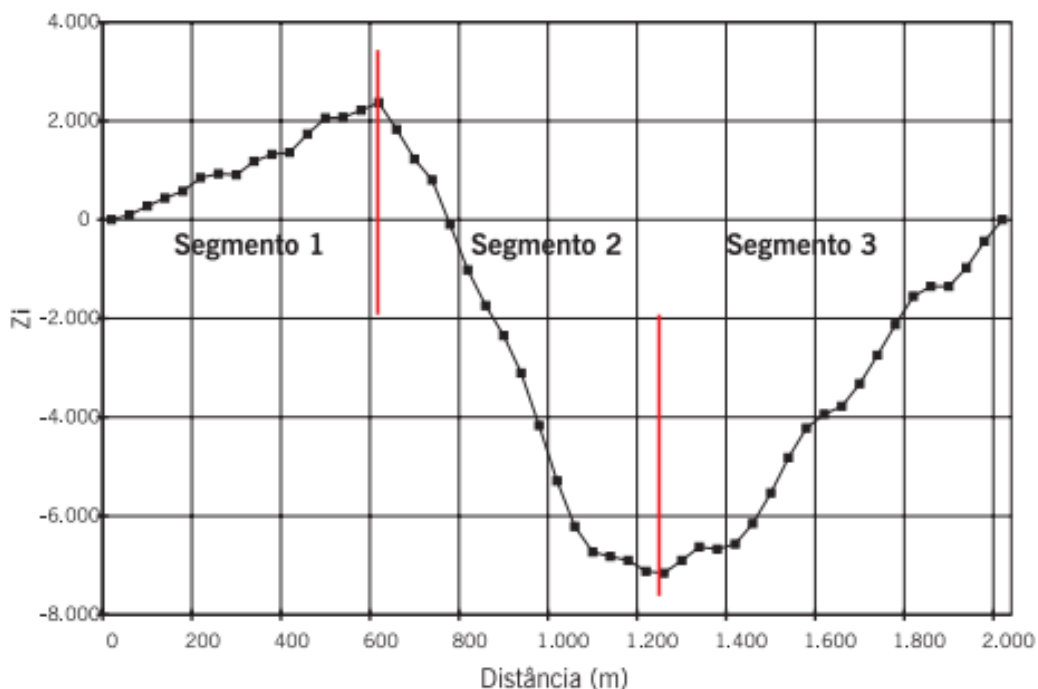
### 3.2.1 Segmentos homogêneos e os dados deflectométricos obtidos com o FWD

O projeto de restauração do pavimento foi realizado em conformidade com a metodologia de determinação das necessidades de recuperação/restauração preconizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de transporte - DNIT, separadamente para cada um dos segmentos homogêneos (SH), divididos a fim de se permitir o estudo de soluções diferenciadas em função das condições locais. Assim, o primeiro passo da pesquisa foi de avaliar esses segmentos determinado em projeto. Verificou-se que a segmentação homogênea do projeto em questão foi realizada considerando-se como parâmetro de referência a condição estrutural do pavimento como um todo, representada pela deflexão sob a ação da carga. Observou-se que para divisão do trecho em segmento homogêneo (SH) foi utilizado o método das diferenças acumuladas, preconizado pela AASHTO, que consiste na seguinte sequência de cálculo:

- 1°. Calcula-se o valor médio para toda a rodovia do parâmetro a ser analisado;
- 2°. Calcula-se a diferença entre o valor pontual e o valor médio;
- 3°. Calculam-se os valores acumulados das diferenças;
- 4°. Plota-se um gráfico onde a abscissa e a posição na rodovia e a ordenada apresenta os valores acumulados das diferenças.

Sabe-se que, a variação do coeficiente angular da curva assim obtida indica uma mudança do comportamento médio de um determinado segmento para outro, caracterizando matematicamente as extremidades dos segmentos homogêneos. A seguir a Figura 10, ilustra um exemplo do procedimento e a divisão em três segmentos homogêneos.

Figura 10: Delimitação dos segmentos homogêneos pelo método das diferenças acumuladas da AASHTO



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

Cabe ressaltar que, ainda em projeto os SH obtidos pelo parâmetro de deflexão sob a ação da carga, foram reavaliados e reajustados em função dos aspectos superficiais e funcionais observados nos demais levantamentos realizados, bem como dos limites estabelecidos pelos parâmetros de construção e de tráfego. E ainda, os SH consecutivos que exigiram o mesmo tipo de solução de recuperação dentro do âmbito do Catálogo de Soluções de Restauração do Programa - CREMA 2ª Etapa também sofreram um reagrupamento. Após esses ajustes a projetista definiu a separação dos SH final de projeto, e para cada um dos SH obtidos, os parâmetros deflectométricos médios e característicos para efeito de dimensionamento da restauração, bem como os dados de caracterização superficial e funcional foram determinados tanto para a pista da direita como a da pista da esquerda.

A Tabela 6, a seguir, apresenta a divisão dos SH e as bacias de deformação média calculadas nos estudos do projeto da Pista Esquerda, visto que os poços de sondagem foram realizados nesta faixa de tráfego. Ressalta-se que os dados das deflexões  $D_{25}$ ,  $D_{40}$  e  $D_{60}$  foram obtidos por meio de interpolação linear, uma vez que os dados de deflexões originais foram obtidos seguindo os seguintes afastamentos dos geofones no aparelho FWD do tipo Dynatest 8000: Df1 – valor médio da deflexão medida sob a ação da carga, em 0,01 mm ( $D_0$ ); Df2 – valor médio da deflexão medida a 20 cm da carga, em 0,01 mm ( $D_{20}$ ); Df3 – valor médio da deflexão medida a 30 cm da carga, em 0,01 mm ( $D_{30}$ ); Df4 – valor médio da deflexão medida

a 45 cm da carga, em 0,01 mm ( $D_{45}$ );  $Df5$  – valor médio da deflexão medida a 65 cm da carga, em 0,01 mm ( $D_{65}$ );  $Df6$  – valor médio da deflexão medida a 90 cm da carga, em 0,01 mm ( $D_{90}$ );  $Df7$  – valor médio da deflexão medida a 120 cm da carga, em 0,01 mm ( $D_{120}$ ).

Tabela 6: Divisão dos Segmentos Homogêneos e as bacias de deformação média

Segmento Homogêneo				Bacia de Deformação média (0,01 mm)									
SH	Estaca Inicial	Estaca Final	Ext. (km)	D <sub>0</sub>	D <sub>20</sub>	D <sub>25</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>40</sub>	D <sub>45</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>65</sub>	D <sub>90</sub>	D <sub>120</sub>
1	0	500	10,00	43,8	26,5	22,1	17,7	13,4	11,3	7,9	6,8	4,9	3,8
2	500	982	9,64	48,2	25,4	20,5	15,6	15,6	10,5	7,9	7,0	5,1	3,8
3	982	1565	11,66	31,6	16,2	12,8	9,4	9,4	6,2	4,7	4,2	3,1	2,4
4	1565	2146	11,62	37,6	18,6	14,6	10,5	10,5	6,6	4,8	4,2	3,1	2,2
5	2146	2500	7,08	56,7	28,4	22,8	17,2	17,2	11,2	8,2	7,2	5,0	3,0
6	2500	3794	25,88	47,9	27,3	23,1	18,9	18,9	12,9	9,5	8,3	5,7	4,1
7	3794	4418	12,48	41,2	23,1	19,4	15,6	15,6	10,7	7,9	6,9	4,4	3,4
8	4418	4494	1,52	43,1	27,3	23,2	19,0	19,0	13,0	9,3	8,1	5,5	3,9
9	4494	5066	11,44	58,5	35,9	30,4	24,9	24,9	16,1	11,4	9,8	6,6	4,7
10	5066	5766	14,00	50,4	32,3	27,3	22,2	22,2	14,2	9,9	8,4	5,5	3,9
11	5766	6324	11,16	43,0	25,2	21,3	17,4	17,4	10,9	7,7	6,6	4,4	3,2
12	6324	6449	2,50	37,5	22,4	18,9	15,4	15,4	9,6	6,5	5,5	3,6	2,4
13	6449	6744	5,90	66,3	40,9	36,0	31,0	31,0	20,0	13,5	11,3	6,6	4,2
14	6744	6909	3,30	36,6	22,3	18,5	14,6	14,6	9,1	6,6	5,7	4,2	3,2
15	6909	7039	2,60	47,2	29,7	25,3	20,8	20,8	13,2	8,9	7,5	4,9	3,5
16	7039	7670	12,62	26,5	15,2	12,4	9,6	9,6	5,5	3,8	3,2	2,2	1,6
17	7670	8390	14,40	34,0	21,6	18,6	15,6	15,6	9,9	6,5	5,3	2,9	1,9
18	8390	8560	3,40	44,4	26,8	23,2	19,5	19,5	12,2	7,7	6,2	3,2	1,9

Fonte: Elaborada pela autora

Já a Tabela 7, a seguir, apresenta as bacias de deformações medidas no ponto exato da abertura do poço de sondagem de cada segmento, e a localização dentro do SH. Essa apresentação se fez necessária para avaliar a homogeneidade dos dados dentro da segmentação homogênea.

Tabela 7: Bacias de deformação medida no ponto do poço de sondagem

Segmento Homogêneo		Bacia de Deformação - Sondagem (0,01mm)									
SH	Estaca Poço Sondagem	D <sub>0</sub>	D <sub>20</sub>	D <sub>25</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>40</sub>	D <sub>45</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>65</sub>	D <sub>90</sub>	D <sub>120</sub>
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	737	120,8	38,4	23,0	7,6	6,5	6,0	5,1	4,8	4,3	3,1
3	1037	86,1	52,2	40,6	29,0	18,9	13,8	8,5	6,7	3,6	2,3
4	2145	104,4	69,7	59,6	49,5	39,6	34,6	25,5	22,5	15,2	0,0
5	2461	90,6	47,3	40,8	34,3	27,5	24,1	17,1	14,8	9,0	5,5
6	3120	151,3	106,8	93,9	81,0	61,1	51,2	33,9	28,1	15,0	8,5
7	4193	79,7	50,9	43,9	36,9	28,8	24,8	17,3	14,8	9,2	6,5
8	4529	111,1	77,6	65,3	52,9	40,0	33,5	22,2	18,4	12,0	8,1
9	5065	83,6	52,4	43,3	34,2	25,3	20,8	13,5	11,0	6,4	4,0
10	5265	115,6	82,9	65,3	47,7	33,0	25,7	13,9	9,9	5,3	3,3
11	6201	92,1	39,4	36,7	33,9	28,9	26,4	19,7	17,4	11,3	6,8
12	6443	24,2	14,0	11,8	9,6	7,3	6,2	4,3	3,7	2,6	2,0
13	6488	205,1	93,1	80,8	68,4	58,6	53,7	42,9	39,3	27,3	18,9
14	6908	24,3	10,8	8,8	6,8	5,1	4,2	3,3	3,0	2,6	2,0
15	7000	80,9	53,7	47,4	41,1	30,2	24,8	16,6	13,8	7,4	4,3
16	7140	61,0	23,7	22,1	20,4	14,2	11,1	6,6	5,1	2,4	1,5
17	8253	66,9	40,3	34,5	28,6	20,9	17,0	9,9	7,5	3,4	1,7
18	8509	105,4	47,6	36,8	25,9	19,2	15,8	11,8	10,4	5,6	5,0

Fonte: Elaborada pela autora

Em primeira análise entre os dados das duas tabelas, observa-se que as bacias medidas no ponto exato da abertura do poço de sondagem apresentam valores muito diferentes em comparação com as bacias médias, principalmente a deflexão sob a ação da carga, ou seja, a deflexão máxima (D<sub>0</sub>), comprometendo assim a correta interpretação da condição estrutural do pavimento como um todo. Ressalta-se que o desvio padrão ( $\sigma$ ) da deflexão medida sob a ação da carga, em 0,01 mm e a deflexão característica (D<sub>c</sub>), foram obtidas a partir dos dados originais do levantamento. Cabe destacar também que para se verificar a acurácia da estatística, deve ser calculado o coeficiente de variação da amostra (CV), que pode ser entendido como a variabilidade dos dados em relação à média. Quanto menor o CV mais homogêneo se considera o conjunto de dados. Em sistemas rodoviários valores abaixo de 30% podem ser considerados com baixa dispersão e homogêneos. No caso das bacias médias da pista da esquerda indicadas em projeto e objeto desse estudo, apenas os SH 5, SH 6, SH 7, SH 9, SH 11, SH 17 e SH 18 apresentaram CV menor que 30%.

### 3.2.2 Parâmetros de curvatura

Sabe-se que a partir da bacia de deformação obtida pelo equipamento tipo FWD, é possível determinar os módulos resilientes da estrutura por meio de programas computacionais que efetuam a retroanálise, como é o caso do *software* BackMeDiNa. Porém, esta análise é complexa, e se não for efetuada corretamente, pode levar a resultados totalmente contrários à realidade.

Assim, parâmetros de curvatura têm sido estudados a fim de facilitar a análise do comportamento estrutural de um pavimento, entre eles pode-se destacar a deflexão recuperável máxima ( $D_0$ ), raio de curvatura ( $R_c$ ), área da bacia deflectométrica (AREA), índice da curvatura da superfície (SCI), índice de danos à base (BDI), índice da curvatura da base (BCI) e fator de curvatura (CF).

A consideração das características elásticas dos materiais da estrutura auxilia na avaliação estrutural, visto que pavimentos com estruturas diferentes, podem apresentar o mesmo valor de deflexão máxima ( $D_0$ ) parâmetro este usado nos métodos atuais de projeto de reforço, mas com diferentes arqueamentos da bacia deflectométrica. A curvatura da bacia se reflete em módulos elásticos distintos dependendo da condição em que estes materiais se encontram. Portanto, analisar a bacia completa permite um diagnóstico mais preciso da condição estrutural do pavimento e a melhor decisão da solução de restauração em cada situação.

Nas Tabela 8 e Tabela 9, a seguir, são apresentados os parâmetros de curvaturas calculados a partir dos dados de bacias médias obtidos em projeto e bacias medidas no ponto de sondagem por SH, respectivamente.

Tabela 8: Parâmetros de curvatura - bacia de deformação média

Segmento Homogêneo				Parâmetros de curvatura das bacias médias							
SH	Estaca Inicial	Estaca Final	Ext. (km)	$\sigma$ (0,01mm)	Dc (0,01mm)	Rc (m)	AREA (cm)	SCI	BDI	BCI	CF
								(0,01 mm)			
1	0	500	10,00	18,1	61,8	144	34	26	10	3	17
2	500	982	9,64	17,2	65,4	113	31	33	8	3	23
3	982	1565	11,66	13,9	45,5	166	30	22	5	2	15
4	1565	2146	11,62	13,0	50,6	136	28	27	6	2	19
5	2146	2500	7,08	14,1	70,8	92	30	40	9	3	28
6	2500	3794	25,88	13,2	61,1	126	35	29	9	4	21

Segmento Homogêneo				Parâmetros de curvatura das bacias médias							
SH	Estaca Inicial	Estaca Final	Ext. (km)	$\sigma$ (0,01mm)	Dc (0,01mm)	Rc (m)	AREA (cm)	SCI	BDI	BCI	CF
								(0,01 mm)			
7	3794	4418	12,48	12,2	53,4	143	34	26	8	3	18
8	4418	4494	1,52	14,0	57,1	157	37	24	10	4	16
9	4494	5066	11,44	17,0	75,5	111	35	34	14	5	23
10	5066	5766	14,00	17,3	67,7	135	36	28	12	4	18
11	5766	6324	11,16	11,9	54,9	144	34	26	10	3	18
12	6324	6449	2,50	12,9	50,4	168	34	22	9	3	15
13	6449	6744	5,90	20,6	86,8	103	37	35	18	7	25
14	6744	6909	3,30	11,8	48,4	172	34	22	8	2	14
15	6909	7039	2,60	18,6	65,8	142	35	26	12	4	18
16	7039	7670	12,62	8,2	34,7	222	31	17	6	2	11
17	7670	8390	14,40	8,7	42,7	203	36	18	9	4	12
18	8390	8560	3,40	13,7	58,1	147	34	25	12	5	18

Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 9: Parâmetros de curvatura - bacia de deformação no ponto de sondagem

Segmento Homogêneo		Parâmetros de curvatura Bacias deflectométricas – poço sondagem					
SH	Estaca Poço Sondagem	Rc (m)	AREA (cm)	SCI	BDI	BCI	CF
				(0,01 mm)			
1	-	-	-	-	-	-	-
2	737	32	19	113	3	1	82
3	1037	69	29	57	21	5	34
4	2145	70	39	55	24	10	35
5	2461	63	34	56	17	8	43
6	3120	54	39	70	47	19	45
7	4193	87	37	43	20	8	29
8	4529	68	37	58	31	10	34
9	5065	78	33	49	21	7	31
10	5265	62	32	68	34	9	33
11	6201	56	34	58	14	8	53
12	6443	252	34	15	5	2	10
13	6488	25	33	137	26	16	112
14	6908	202	29	18	4	1	14
15	7000	93	38	40	25	9	27

Segmento Homogêneo		Parâmetros de curvatura Bacias deflectométricas – poço sondagem					
SH	Estaca Poço Sondagem	Rc (m)	AREA (cm)	SCI	BDI	BCI	CF
				(0,01 mm)			
16	7140	80	29	41	14	4	37
17	8253	96	33	38	19	6	27
18	8509	46	27	80	14	6	58

Fonte: Elaborada pela autora

Com relação ao raio de curvatura (Rc) cujo parâmetro mostra um indicativo do arqueamento da deformada na sua porção mais crítica, em geral considerada a 25 cm do centro da carga, uma bacia de deflectométrica que apresentar valor de raio relativamente baixo e inferior a 100 m corresponde a uma condição estrutural crítica do pavimento. Sabe-se também que o parâmetro Rc tem bastante sensibilidade à grande parte das mudanças nos parâmetros estruturais das camadas dos pavimentos, entretanto, para variações no módulo do subleito, o raio de curvatura não apresenta boa correlação. Segundo ROCHA (2020) o Rc é dependente principalmente dos módulos das camadas superiores do pavimento principalmente base e sub-base.

Analisando os parâmetros de curvatura - bacia de deformação média, apresentado na Tabela 8, observa-se que o apenas o SH 05 sua bacia média apresenta valor de Rc inferiores a 100 m. No entanto, ao analisar os parâmetros de curvatura das bacias de deformação obtidas no ponto exato da abertura dos poços de sondagem de cada SH, o que se observa é apenas os SH 12 e SH 14 apresenta uma boa condição estrutural (Tabela 9). As demais bacias apresentam Rc inferior a 100 m, o que corresponde a uma condição estrutural crítica do pavimento.

Com relação ao parâmetro AREA calculado para cada SH, os valores indicam que a estrutura em geral do pavimento analisado é típica de um pavimento muito flexível, ou seja, pavimentos flexíveis fraco, visto os valores calculados entre 28 e 40 cm. Ocorre que, uma estrutura constituída de três ou mais camadas elásticas que apresenta valor de área próxima do valor mínimo de 28, corresponde a uma estrutura onde os módulos do revestimento, da base e do subleito são praticamente iguais, situação indesejável para o bom desempenho real dos pavimentos. Ressalta que a bacia medida no ponto de sondagem do SH 02 apresenta parâmetro AREA inferior ao valor mínimo indicado nas faixas de avaliação.

O parâmetro SCI (*Surface Curvature Index*), que em português significa Índice da Curvatura da Superfície, é definido como a diferença entre as deflexões sob o ponto de aplicação da carga e a deflexão a 30 cm de distância dela. Este parâmetro é conhecido como o



indicador mais sensível em relação à camada asfáltica (KIM et al., 2002). Os valores de SCI superiores a 25 (0,01mm) indicam que a camada de revestimento é pouco resistente ou é de pequena espessura, pois é muito deformável. Avaliando o SCI das bacias médias de projeto (Tabela 8), verifica-se que apenas os SH 3, SH 8, SH 12, SH 14, SH 16, SH 17 e SH 18 apresentaram valores inferiores ao limite de 25 (0,01mm) indicando que estes segmentos apresentam revestimento mais resistentes. Já nas bacias medidas nos pontos de sondagem, esta situação ocorre apenas para os SH 12 e SH 14. Ou seja, as bacias medidas no exato ponto da execução do poço de sondagem, indica que todas as bacias medidas, com exceção daquelas medidas no SH 12 e SH14, indicam que a camada de revestimento é pouco resistente ou é de pequena espessura, pois é muito deformável.

Analisando o parâmetro BDI (*Base Damage Index*), designado por Índice de Danos à Base, considerado o melhor indicador da condição da camada de base do pavimento. Valores de BDI superiores a 40 (0,01mm) indicam pavimentos pouco resistentes ou pavimentos com problemas estruturais. No caso do pavimento aqui estudado considerando as bacias médias e as bacias medidas nos pontos de sondagem, os valores de BDI indicam que as bases existentes no trecho segmentado estão em condições íntegras, uma vez que os valores médios das bacias fornecem dados que levam a um BDI bem inferiores ao limite.

O Índice de Curvatura da Base (BCI do inglês *Base Curvature Index*) definido como a diferença entre as medidas  $D_{60}$  e  $D_{90}$  da bacia de deflexão, é considerado como sendo o melhor indicador para verificar a condição do subleito. Valores de BCI superiores a 10 (0,01mm) indicam que o subleito possui CBR menor que 10% e indicam problemas estruturais no subleito. Ao analisar os ensaios de caracterização realizados nos materiais dos poços de inspeção, considerando as bacias de deformação média, verifica-se que o CBR da camada de subleito da rodovia apresenta CBR entre 12 a 30%. Porém, ao analisar o parâmetro BCI calculado a partir das bacias de deformação medidas no ponto de sondagem, observa-se que os SH 6 e SH 13 apresentaram valores BCI superiores a 10 (0,01mm) o que pode ser um indicativo de problemas estruturais no subleito, especificamente nesses trechos da rodovia.

Já, o Fator de Curvatura (CF do inglês *Curvature Function*), preconizado pela AUSTROADS (órgão rodoviário australiano), é definido como a diferença entre as medidas  $D_0$  e  $D_{20}$  da bacia de deflexão. Este parâmetro é o melhor indicativo para prever a probabilidade de fissuração da camada de revestimento asfáltico de um pavimento flexível. Este fator é usado pelo órgão australiano no método de restauração de pavimentos, lá o cálculo de reforço leva em consideração o parâmetro CF, uma vez que o parâmetro é o que melhor representa a deformação horizontal máxima de tração na fibra inferior da camada de revestimento, a metodologia se

baseia em tabelas que relacionam o coeficiente CF com o tráfego e número N australiano para estimar a vida útil do pavimento.

### 3.3 Caracterização dos segmentos estudados

A escolha dos segmentos estudados foi feita levando em consideração o coeficiente de variação dos segmentos homogêneos, escolhendo um segmento que apresentou coeficiente de variação superior a 30% e um segmento com CV inferior a 30%. Sendo assim foi escolhidos os primeiros segmentos que apresentasse esse requisito, adotando o SH02 que apresentou CV maior que 30%, visto que o segmento SH01 é um segmento novo a ser construído e o segmento SH 05 que apresentou CV menor que 30%.

A prospecção das camadas do pavimento compreendeu as sondagens e coletas de amostra para definição e caracterização das diferentes camadas constitutivas do pavimento e do subleito. Para tanto os dados de projeto, mostra que foram efetuadas sondagens do tipo poços de inspeção ao longo de todo o trecho. De acordo com o memorial justificativo do projeto, foi realizado um estudo criterioso de forma a contemplar uma sondagem para cada segmento homogêneo. Com o trecho já segmentado foram calculados os dados de deflexões médias e de deflexões máximas, de forma a permitir a definição do posicionamento exato para os poços de sondagens, tendo em vista que nestes locais é importante se verificar o comportamento das camadas do revestimento, base, sub-base e do subleito. O Quadro 3 apresenta a divisão dos segmentos homogêneos escolhidos com a indicação da estaca onde foi realizada a sondagem de cada segmento e suas características do pavimento existente.

Quadro 3: Estrutura do Pavimento existente

SONDAGEM DO PAVIMENTO EXISTENTE								
SH	Estaca sondagem	Estrutura existente						
		Revestimento		Base		Sub-base		Subleito
		Material	Esp. (cm)	Material	Esp. (cm)	Material	Esp. (cm)	Material
2	737	CBUQ	5	Laterita amarela	22	Seixo silte amarelo	20	Silte amarelo
5	2461	CBUQ	4	Laterita vermelha	17	Laterita vermelha	18	Silte amarelo argiloso

Fonte: Projeto Executivo de Engenharia para Restauração de Rodovia

Observa-se que no SH05 a camada de base e sub-base são constituídas pelo mesmo material, dado isso, optou-se por considerar essas duas camadas como uma única camada de base passando a analisar o segmento como um sistema de 2 camadas estruturais (Revestimento

+ Base). No Quadro 4 é apresentado a composição da estrutura do pavimento dos SH a quais foram modificadas e analisadas em estudo.

Quadro 4: Estrutura do Pavimento existente modificado

SONDAGEM DO PAVIMENTO EXISTENTE MODIFICADO								
SH	Estaca sondagem	Estrutura existente						
		Revestimento		Base		Sub-base		Subleito
		Material	Esp. (cm)	Material	Esp. (cm)	Material	Esp. (cm)	Material
2	737	CBUQ	5	Laterita amarela	22	Seixo silte amarelo	20	Silte amarelo
5	2461	CBUQ	4	Laterita vermelha	35	-	-	Silte amarelo argiloso

Fonte: Elaborada pela autora

### 3.3.1 Segmento homogêneo SH02

O segmento homogêneo SH02 abrange uma extensão de 9,64 km do trecho analisado e está localizado , e está compreendido entre as estacas 500 a 982 do lado esquerdo e a sondagem foi realizada na estaca 737 onde foi verificado um pavimento existente composto por um sistema de três camadas, uma camada de revestimento de concreto asfáltico com espessura de 5 cm, uma base cujo material foi determinado com uma laterita amarela com espessura de 22 cm e uma sub-base de seixo silte amarelo de 20 cm, tal estrutura assente em um subleito cujo material foi determinado como um silte amarelo. No estudo de tráfego, o segmento SH02 está localizado na área de abrangência do primeiro posto de contagem apresentando número N de  $1,11E+07$  repetições de carga de eixo padrão (8,2t).

### 3.3.2 Segmento homogêneo SH05

O segmento homogêneo SH05 está compreendido entre as estacas 2.146 a 2.500 totalizando em um trecho com 7,08 Km de extensão. O poço de sondagem foi realizado no ponto de localização da estaca 2.461 localizado no lado esquerdo da rodovia, onde foi verificado um pavimento existente composto por um sistema de 3 camadas estruturais com camada de revestimento constituída por concreto asfáltico (CA) com espessura de 4 cm e camadas granulares (Base e Sub-base), ambas composta por 17 e 18 cm, respectivamente, de laterita vermelha assente em um subleito de solo natural identificado como silte amarelo argiloso. Por serem compostas pelo mesmo material, optou-se por considerar as camadas de base e sub-base como sendo uma única camada de base com espessura de 35 cm, passando de um sistema de 3

camadas estruturais para um sistema de 2 camadas estruturais como apresentado no Quadro 4. No estudo de tráfego, o segmento SH05 está localizado na área de abrangência do segundo posto de contagem volumétrica apresentando número N de  $1,40E+07$  repetições de carga de eixo padrão (8,2t).

### **3.4 Análise dos módulos de resiliência retroanalizados pelo programa BackMeDiNa.**

A retroanálise da bacia deflectométrica é a técnica empregada para inferir a contribuição de cada camada e do subleito na perda de capacidade de carga e no consequente trincamento do revestimento (MACÊDO, 1996). Caracteriza-se pela determinação analítica dos módulos elásticos de todas as camadas do pavimento e do subleito a partir das bacias deflectométrica. É a forma mais utilizada atualmente em vários países para o projeto de reforço (MEDINA E MOTTA, 2015).

As retroanálises foram realizadas com o objetivo de se obter os módulos de resiliência das camadas que constituem os pavimentos dos dois segmentos estudados de projeto. Para isso, foi utilizado o *software* de retroanálise BackMeDiNa, basicamente os dados de entrada dos programas de retroanálise são: carga aplicada no pavimento (em torno de 4100 kgf ou 40,2kN); raio de Aplicação (15cm); bacia Deflectométrica medida em campo; temperaturas do ar e pavimento; seção tipo do pavimento; coeficientes de Poisson; valores de módulos iniciais; condição de aderência.

Segundo Franco (2018), o cálculo de retroanálise no BackMeDiNa se inicia variando o módulo inicial (*seed values*) por uma faixa dependendo do erro da retroanálise inicial. Para erros elevados, a faixa de cada módulo é de 80% do valor “semente” para maior ou para menor, a fim de abranger um maior nível de soluções. Já para erros menores, essa faixa diminui para 25%. O número de intervalos de cada faixa é de 9 para erros elevados e 15 para erros menores, objetivando a melhor precisão da retroanálise.

Ressalta-se que o programa utiliza a raiz média quadrática de valor absoluto (RMS) como critério de parada das iterações, e não em valor proporcional. Ou seja, RMS (%) é o erro admissível para o ajuste entre as bacias medidas e calculadas. Quando o erro no programa se apresenta maior que 10  $\mu\text{m}$ , o programa marca a seção com a cor vermelho no quadro de listagem das bacias, indicando que a retroanálise não conseguiu atingir um erro satisfatório. Já as seções com erros que ficam dentro do intervalo de 5 a 10  $\mu\text{m}$  são marcadas com a cor amarelo, enquanto aquelas com erros inferiores a 5  $\mu\text{m}$ , com a cor em verde.

Sabendo disso, para a realização da retroanálise das bacias selecionada com o auxílio do *software* BackMeDiNa foi feita a importação do arquivo Excel com os dados da bacia e a inserção dos dados sementes de Módulo de Resiliência (MR), nesse estudo optou por usar os valores de referência embutidas no próprio programa e Coeficiente de Poisson. Os valores do coeficiente de Poisson são adotados valores constantes pois apresentam baixa influência nos valores finais de retroanálise. Sendo assim, foram usados os valores apresentados no Quadro 5 para todos os segmentos homogêneos estudados.

Quadro 5: Valores adotados para o Coeficiente de Poisson

<b>Camada do pavimento</b>	<b>Coeficiente de Poisson</b>
Revestimento	0,30
Base	0,35
Sub-base	0,35
Subleito	0,45

Fonte: Elaborada pela autora

Após análise do levantamento deflectométrico de projeto e conseqüentemente da divisão do trecho em segmentos homogêneos e dos parâmetros de curvatura das bacias médias e das bacias medidas no ponto de sondagem, foi iniciado o processo de retroanálise das bacias deflectométricas médias obtidas pelo equipamento FDW definidas em projeto dos segmentos SH 02, SH 05 (Tabela 10).

Tabela 10: Bacias de deformação média a serem retroanalizadas

<b>Segmento Homogêneo</b>				<b>Bacia de Deformação média (0,01 mm)</b>						
<b>SH</b>	<b>Estaca Inicial</b>	<b>Estaca Final</b>	<b>Ext. (km)</b>	<b>D<sub>0</sub></b>	<b>D<sub>20</sub></b>	<b>D<sub>30</sub></b>	<b>D<sub>45</sub></b>	<b>D<sub>65</sub></b>	<b>D<sub>90</sub></b>	<b>D<sub>120</sub></b>
2	500	982	9,64	48,2	25,4	15,6	10,5	7,0	5,1	3,8
5	2146	2500	7,08	56,7	28,4	17,2	11,2	7,2	5,0	3,0

Fonte: Elaborada pela autora

E ainda, foi realizado a retroanálise dos dados dos segmentos completos e da bacia medida no ponto exato da abertura do poço de sondagem (Tabela 11), referentes aos segmentos homogêneos escolhidos, totalizando assim um total de 06 (seis) segmentos homogêneos e bacias retroanalizadas, nesse estudo.

Tabela 11: Bacias de deformação medida no ponto do poço de sondagem a serem retroanalisadas

Segmento Homogêneo		Bacia de Deformação - Sondagem (0,01mm)						
SH	Estaca Poço Sondagem	D <sub>0</sub>	D <sub>20</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>45</sub>	D <sub>65</sub>	D <sub>90</sub>	D <sub>120</sub>
2	737	120,8	38,4	7,6	6,0	4,8	4,3	3,1
5	2461	90,6	47,3	34,3	24,1	14,8	9,0	5,5

Fonte: Elaborada pela autora

Assim, a realização da retroanálise com o auxílio do *software* BackMeDiNa foi feita a partir da inserção dos dados adquiridos pelo FWD no programa por meio de um arquivo de dados no formato .xls. Após isso, entrou com a estrutura do pavimento informando o número, a espessura e os parâmetros elásticos de cada camada e se há ou não aderência entre elas. Na Figura 11 é apresentada a interface do *software* com os dados da bacia deflectométricas já inseridos.

Figura 11 - Interface do *software* BackMeDiNa

The screenshot displays the BackMeDiNa v.1.2.0 (julho/2020) interface. The main window is titled 'SH05 - segmento completo' and contains several panels:

- Left Panel:** A list of 'BACIA' (Bacina) entries with checkboxes and 'ESTACA' (Estaca) values ranging from 2499 + m to 2429 + m.
- Top Right Panel:** Project parameters including 'Estaca: 2499 + m', 'CARGA (kgf): 4117,00', 'RAIO (cm): 15', and 'T AR: 35 °C'. It also shows sensor positions (SENsoRES) and deflection data (DEFLEXÕES) for various distances.
- Middle Panel:** Pavement structure ('ESTRUTURA >>') with columns for 'CAMADA', 'MATERIAL', 'ESPESSURA (cm)', 'MÓDULO (MPa)', 'COEF POISSON', and 'ADERÊNCIA'. The structure consists of three layers: 'Camadas Asfálticas' (4 cm, 5000 MPa), 'Camadas Granulares' (35 cm, 400 MPa), and 'Subleito' (0 cm, 150 MPa).
- Bottom Panel:** A graph titled 'DEFLEXÕES NORMALIZADAS' showing a curve of normalized deflections versus distance (cm) from 0 to 180.

Fonte: Elaborado pela autora

Como rotina para a realização de fato da retroanálise foi acionado o botão retroanalizar o qual busca a rotina interna da biblioteca do AEMC, visando realizar os cálculos e buscar os módulos das camadas e ao fim apresentar a bacia que mais se aproxima da bacia medida. Esse procedimento pode ser realizado quantas vezes forem necessárias até se obter a uma bacia de deformação o mais próximo possível da bacia medida em campo com o FWD, ou seja, até o erro (RMS) não alterar mais. Da mesma forma que um processo pode ser interrompido a qualquer momento ao acionar o comando ESC do computador.

### **3.5 Análise da espessura de reforço calculada pelo método PRO-011 nos segmentos estudado.**

No Projeto Executivo de Engenharia para Restauração da Rodovias – CREMA 2ª Etapa foi usada a metodologia empíricas de dimensionamento de reforços de pavimentos normalizada pelo DNER-PRO 11/79 - Procedimento B. Esse método de dimensionamento é realizado de acordo com a deformabilidade do pavimento onde é determinada a deflexão característica do segmento homogêneo e o número previsto de repetições de carga de eixo padrão (8,2 tf) e em seguida é determinada a espessura necessária de reforço do pavimento.

Para dimensionamento do reforço do pavimento foram analisadas as condições estruturais e as medidas corretivas necessárias de cada segmentos a partir do raio de curvatura e a deflexão de projeto de acordo com o catálogo de soluções apresentado pela norma DNER PRO-011 (Quadro 2). Em seguida foi analisa a espessura da camada de reforço pela Equação 8 fornecida pelo manual do DNER, onde é necessário conhecimento da deflexão de projeto e o número de repetições de carga de eixo padrão (8,2 tf). E por fim, foi analisada a medida corretiva necessária para cada segmento a partir do grau de deterioração do pavimento apresentado pelo IGG.

No dimensionamento do reforço do pavimento foi avaliada duas metodologias propostas nas normas DNER PRO 011/79 e DNER PRO 269/94, sendo adotado a metodologia PRO 011/79 conforme Catálogo de Soluções de soluções do programa Crema 2ª etapa. O método de dimensionamento proposta pela norma do DNER PRO 011/79 determina que para que não surjam trincas no revestimento, é necessário que a deflexão D mantenha-se abaixo de um valor máximo,  $D_{adm}$  (deflexão admissível) e o raio de curvatura ( $R_c$ ) esteja acima de um valor mínimo, 100,0 m para pavimentos flexíveis, fazendo com que a tensão de tração na face inferior do revestimento não ultrapasse um determinado valor acima do qual o revestimento betuminoso rompe por fadiga. Para efeito de cálculo a rodovia é dividida por segmento homogêneos e a

deflexão  $D$  passa a ser expressa pelo valor de  $D_c$  (deflexão característica) que é representada pela Equação 12.

$$D_c = D + \sigma \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

$D_c$ : Deflexão característica

$D$ : Média aritmética

$\sigma$ : Desvio padrão

Ressalta-se que a deflexão admissível depende dos materiais que constituem a camada de revestimento e da camada de base e do número  $N$  de solicitantes de eixos equivalentes ao eixo padrão (8,2 t). A  $D_{adm}$  (0,01 mm), em pavimentos flexíveis com base granular, é determinada pela Equação 13. No Quadro 6 está apresentado o número  $N$  determinado por cada posto de contagem volumétrica e classificatória de veículos.

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \log N \quad \text{Equação 13}$$

Quadro 6: Número  $N$  definido nos postos de contagem volumétrica

Posto	Segmento		Número $N$
	Estaca Inicial	Estaca Final	
1	0	1706	1,11E+07
2	1706	3794	1,40E+07
3	3794	5766	1,99E+07
4	5766	8560	2,36E+07

Fonte: Elaborada pela autora

A espessura da camada de reforço é determinada a partir dos resultados deflectométricos e usando a Equação 8, onde  $h$  é a espessura do reforço do pavimento em centímetros,  $D_p$  é a deflexão de projeto,  $D_{adm}$  é a deflexão admissível e  $k$  é fator de redução de deflexão próprio do material usado no reforço, sendo adotado 40 para dimensionamento de reforço em concreto betuminoso.

No Quadro 7, a seguir está apresentado as espessuras necessárias das camadas de reforço dos segmentos estudados determinadas pela metodologia da norma do DNER PRO 011/79



juntamente com a qualidade estrutural do pavimento e as medidas corretivas necessárias apresentados no Projeto Executivo de Engenharia para Restauração de Rodovia - CREMA 2ª Etapa, conforme os critérios de avaliação estrutural apresentados pela norma do DNER PRO-011/79 (Quadro 2).

Quadro 7: Espessura da camada de reforço pelo DNER PRO 011/79

<b>S H</b>	<b>D<sub>c</sub> (0,01mm)</b>	<b>D<sub>adm</sub> (0,01mm)</b>	<b>IRI</b>	<b>VMD</b>	<b>Taxa de crescimento (%)</b>	<b>N<sub>USACE</sub></b>	<b>Qualidade Estrutural</b>	<b>Medidas Corretivas</b>	<b>HR (cm)</b>
2	65,4	58,1	3,2	569	3,0	1,11E+07	Regular	Reforço	2,0
5	70,8	62,8	4	1143	3,0	1,40E+07	Regular	Reforço ou Reconstrução	4,0

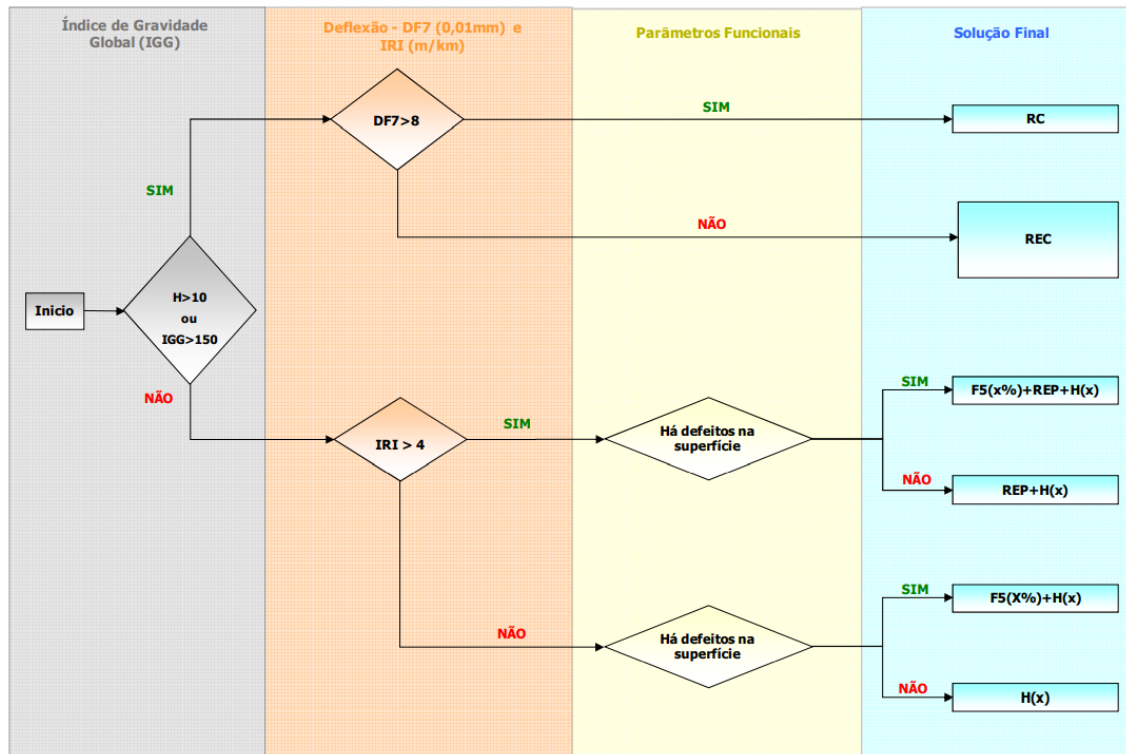
Fonte: Elaborada pela autora

Após análise dos dados de tráfego, deflexões, IRI, IGG e vistorias de campo e dimensionamento da camada de reforço pela metodologia do método PRO 011 foi realizado a aplicação do Catálogo de Soluções do Programa CREMA 2ª Etapa, o que consiste no tipo de intervenção a ser realizada para solucionar as patologias do pavimento.

Essas soluções foram particularizadas de forma a se adequar as necessidades de correção preliminares ao recapeamento e atender aos requisitos de desempenho desejados, onde foi identificado os segmentos críticos em que a espessura de reforço simples dimensionada é superior a 10 cm ou IGG maior que 150, optando pela solução de reconstrução do pavimento. Já nos locais onde não foi necessária a reconstrução do pavimento, foram avaliados os defeitos existentes no pavimento para verificação da necessidade de fresagem e recomposição, em seguida analisou a condição de irregularidade longitudinal optando por reperfilagem para os segmentos que apresentaram IRI com valores acima de 4 m/km, e por fim a execução de reforço simples em concreto asfáltico atendendo as espessuras dimensionadas pelo método PRO-011 considerando-se a espessura mínima de 4 cm.

Na Figura 12, a seguir está apresentada a matriz de solução para a pista da BR estudada usada pelo Projeto Executivo de Engenharia para Restauração de Rodovia - CREMA 2ª Etapa para determinar o tipo de intervenção a ser realizada como solução de restauração do pavimento.

Figura 12: Matriz de solução para pista da BR em estudo



Fonte: Projeto Executivo de Engenharia para Restauração de Rodovia - CREMA 2ª Etapa

Onde:

REC: Reconstrução do pavimento por reciclagem “in situ”

H: Reforço estrutural em concreto asfáltico;

F5: Fresagem de 5 cm na porcentagem da área deteriorada;

REP: Reperfilagem (massa fina)

A partir da matriz de soluções apresentada em projeto (Figura 12) foram determinadas soluções para os segmentos estudados, ambos apresentados na Tabela 12, onde os segmentos foram divididos em trechos para determinar melhor a solução de acordo com a particularidade de cada trecho, visto que os levantamentos dos dados para a solução do CREMA 2ª Etapa foram realizados antes da execução da solução do CREMA 1ª Etapa, dado isso o DNIT solicitou a compatibilização entre as soluções do CREMA 2ª Etapa com as soluções que estavam sendo executadas pelo CREMA 1ª Etapa.

Tabela 12: Soluções de restauração para os segmentos SH2 e SH5 apresentado pelo Projeto Executivo de Engenharia para Restauração de Rodovia - CREMA 2ª Etapa

Segmento			Número N	D <sub>adm</sub> (0,01 mm)	Solução Proposta			Deflexão característica máxima	
Nº	Estaca inicial	Estaca final			Ext. (Km)	Acostamento LE	Pista		Acostamento LD
2	500	525	0,5	1,11E+07	58,9	TSD	F3(100%) + H(5)	TSD	65,4
	525	720	3,9			Binder(6)	REC(10)	Binder(6)	
	720	953	4,66			TSD	F3(100%) + H(5)	TSD	
	953	982	0,58			Binder(6)	REC(10)	Binder(6)	
5	2146	2205	1,18	1,40E+07	56,5	TSD	F3(100%) + H(6)	TSD	70,8
	2205	2355	3			TSD	F3(100%) + H(6)	TSD	
	2355	2420	1,3			TSD	F3(100%) + H(6)	TSD	
	2420	2460	0,8			TSD	F3(100%) + H(6)	TSD	
	2460	2500	0,8			Binder(7)	REC(11)	Binder(7)	

Fonte: Projeto Executivo de Engenharia para Restauração de Rodovia

Ressalta-se que os trechos que compreendem as estacas 525 a 720 e 953 a 982 do segmento SH2 e o trecho do segmento SH5 que compreende as estacas 2460 a 2500 houve a necessidade de realizar a reconstrução do pavimento. No entanto, como finalidade de estudo do dimensionamento da camada de reforço dos segmentos em questão será considerado apenas a solução proposta para o primeiro trecho de cada segmento, sendo apresentada na Tabela 13 a seguir.

Tabela 13: Soluções de restauração para os segmentos SH2 e SH5

Segmento			Número N	D <sub>adm</sub> (0,01 mm)	Solução Proposta			Deflexão característica máxima	
Nº	Estaca inicial	Estaca final			Ext. (Km)	Acostamento LE	Pista		Acostamento LD
2	500	982	9,64	1,11E+07	58,9	TSD	F3(100%) + H(5)	TSD	65,4
5	2146	2500	7,08	1,40E+07	56,5	TSD	F3(100%) + H(6)	TSD	70,8

Fonte: Elaborada pela autora

Onde:

F3: Fresagem de 3cm do revestimento e recomposição com CBUQ

H: Reforço estrutural em CBUQ

TSD: Tratamento superficial duplo

### **3.6 Análise da espessura de reforço calculada pelo método MeDiNa no segmento estudado.**

Foi realizado o dimensionamento da camada de reforço com o *software* MeDiNa mudando configuração de MODO de Pavimento Novo (Nível A) para PROJETO DE REFORÇO e importando os dados da retroanálise realizada com o *software* BackMeDiNa na opção reforço. Em seguida foi inserido os dados de tráfego e características das bacias estudadas e considerando solução de intervenção proposta pelo Projeto Executivo de Engenharia para Recuperação da Rodovia – CREMA 2ª Etapa, foi solicitado o dimensionamento da estrutura inserida no programa.

No dimensionamento, o programa realizou diversas análises, alterando a espessura da camada visando atender primeiramente o critério de fadiga, aumentando e diminuindo a espessura da camada para definir qual a melhor espessura para o máximo de Área Trincada permitida.

### **3.7 Verificação das espessuras da camada de reforço obtidas com o método PRO-011 e método MeDiNa**

Na verificação das espessuras das camadas de reforço obtidas com o método PRO-011/79 e o método MeDiNa, foram realizadas primeiro uma análise da estrutura proposta no Projeto Executivo de Engenharia para Restauração da Rodovia – CREMA 2ª Etapa e em seguida realizado um novo dimensionamento da estrutura para os segmentos estudados.

## 4 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo, serão apresentados todos os resultados obtidos para os dois segmentos homogêneos estudados, discutindo os resultados obtidos de diversas retroanálises variando condições de contorno, análise do dimensionamento da camada de reforço determinada pelo método PRO-011 apresentada pelo Projeto executivo de engenharia para restauração a rodovia-CREMA 2ª ETAPA por meio do *software* MeDiNa, e o dimensionamento da camada de reforço pelo método MeDiNa.

### 4.1 Retroanálise da bacia de deformação BackMeDiNa

As retroanálises foram realizadas com o objetivo de se obter os módulos de resiliência das camadas que constituem os pavimentos dos dois segmentos estudados de projeto. Para isso, foi utilizado o *software* de retroanálise BackMeDiNa, basicamente os dados de entrada dos programas de retroanálise são: carga aplicada no pavimento (em torno de 4100 kgf ou 40,2kN); raio de Aplicação (15cm); bacia Deflectométrica medida em campo; temperaturas do ar e pavimento; seção tipo do pavimento; coeficientes de Poisson; valores de módulos iniciais; condição de aderência.

#### 4.1.1 Segmento Homogêneo SH02

O SH 02 possui 272 bacias deflectométricas medidas em campo com o FWD na pista esquerda. Ao realizar a retroanálise de todas as 272 bacias e importá-la para o programa MeDiNa (modo projeto de reforço) um alarme foi emitido o qual notificava que “*A retroanálise não pode ser importada porque a estrutura parece não corresponder a um segmento homogêneo*”. Assim, fez uma análise de exclusão de bacias, assim foram excluídas bacias que apresentaram erro maior que 10 %, e bacias que ao serem retroanalizadas apresentaram resultados de módulos incompatíveis para o material da camada. Ressalta-se que das bacias excluídas, apenas 9 bacias (inclusive a bacia do poço de sondagem) apresentaram erro maior que 10%, e as outras 231 bacias tiveram como resultado de módulos retroanalizados valores fora dos valores médios considerados para os materiais dispostos nas camadas, com por exemplo, módulos retroanalizados para camada de sub-base de solo muito superiores a 1.000 MPa, embora o processo interativo tenha apresentado erro menores que 5%.

Observou-se que das 272 bacias apresentadas nos segmentos homogêneos mais de 88% das bacias retroanalizadas apresentaram valores de MR fora dos valores médios para os materiais presentes nas camadas ou erro RMS maior que 10%, podendo ser resultado da não homogeneidade do segmento, visto que o segmento apresentou coeficiente de variação superior a 30%.

Todas essas 240 bacias foram excluídas, ficando o SH02 com apenas 32 bacias consideradas com valores coerentes de módulos retroanalizados. Ao importar este novo arquivo da retroanálise com apenas as 32 bacias para o programa MeDiNa no modo Projeto de Reforço, o programa emitiu o seguinte alerta: “*Os coeficientes de variação (CV) dos parâmetros de MR estão acima de 30%*”. Mesmo assim, a importação dos dados da retroanálise foi aceita para avaliação dos CV% do MR para cada camada da estrutura. Assim, a Tabela 14 apresenta a análise do CV% do MR retroanalizados para cada camada da estrutura do pavimento existente a partir das 32 bacias do SH 02 consideradas coerentes para os materiais das camadas.

Tabela 14: Módulos Retroanalizados a partir das 32 bacias do SH02 e CV%

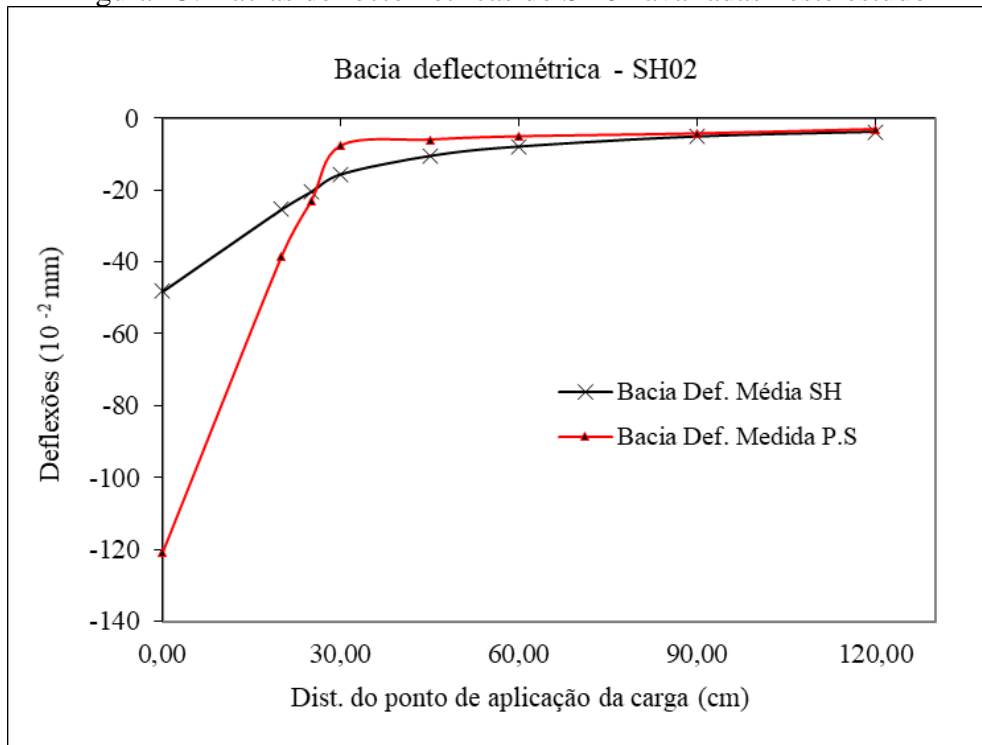
<b>Camada</b>	<b>Material existente</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>MR retroanalizados (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>Revestimento</b>	Concreto Asfáltico	5	2.408	90,4
<b>Base</b>	Laterita amarela	22	378	46,2
<b>Sub-base</b>	Seixo silte amarelo	20	512	46,0
<b>Subleito</b>	Silte amarelo	-	276	29,0

Fonte: Elaborada pela autora

Cabe destacar que o processo de retroanálise com os dados das 272 bacias do SH 02, foi realizada com dados de MR iniciais, os módulos sementes, padrões de material do programa e o processo de retroanálise foi deixado “livre” para fazer as interações até o ajuste final em relação às características dos materiais reais existentes nas camadas.

Atenta as notificações e aos altos valores de CV, o estudo isolado de bacias foi realizada da seguinte maneira, uma análise da bacia média do segmento e uma outra análise da bacia medida no ponto exato da abertura de sondagem do segmento. A Figura 13, a seguir, mostra o gráfico das bacias do SH02 avaliadas neste estudo (a bacia média e a bacia medida no exatamente na estaca que foi aberto o poço de sondagem): deflexões no eixo das ordenadas e pontos de leitura do FWD no eixo das abscissas.

Figura 13: Bacias deflectométricas do SH02 avaliadas neste estudo



Fonte: Elaborada pela autora

Observa-se que as bacias estudadas para o SH02 são bastante distintas, o que indica que a segmentação apresentada em projeto não é homogênea, pois apresentam deflexão máxima muito distintas, sendo que a deflexão máxima da bacia medida na estaca da mesma localização do poço de sondagem apresenta um valor superior a 120 (0,01mm). A Tabela 15, a seguir, apresenta os dados referentes aos parâmetros de curvatura das duas bacias deflectométricas estudadas.

Tabela 15: Resumo dos parâmetros das bacias deflectométrica estudadas do SH02

Bacia estudada	Rc (m)	AREA (cm)	SCI	BDI	BCI	CF
			(0,01 mm)			
<b>Média</b>	113	31	33	8	2,8	22,8
<b>Poço sondagem</b>	32	19	113	3	0,8	82,4

Fonte: Elaborada pela autora

Para o Raio de Curvatura, a norma do DNER-PRO 011/79 estabelece que para pavimentos flexíveis, raios menores que 100,0 m podem indicar baixa capacidade estrutural do conjunto. Pode-se observar que a bacia medida exatamente na mesma localização do poço de sondagem apresenta raio de curvatura muito inferior ao valor mínimo recomendado pela DNIT,

indicando que a estrutura do pavimento apresenta baixa capacidade estrutural, contradizendo o  $R_c$  obtido pela bacia média do SH 02.

O parâmetro AREA, o qual refere-se a área sob a curva da bacia deflectométrica. Como limites, o parâmetro possui como máximo o valor de 90 cm e como mínimo o valor de 28 cm. Com relação ao parâmetro AREA calculado para as duas bacias em estudo do SH02, os valores indicam que a estrutura em geral do pavimento analisado é típica de um pavimento muito flexível, ou seja, pavimentos flexíveis fraco, visto os valores calculados entre 28 e 40 cm. Lembrando que as duas bacias apresentam valores de área próxima do valor mínimo de 28 e até inferior ao mínimo, o que corresponde a uma estrutura onde os módulos do revestimento, da base, sub-base e do subleito são praticamente iguais, situação indesejável para o bom desempenho real dos pavimentos.

Ao analisar o parâmetro SCI, cujo valores são inversamente proporcionais à rigidez das camadas asfálticas. Percebe-se que as duas bacias apresentaram valores de SCI muito superiores aos recomendados ( $< 0,025$  mm), principalmente a bacia do poço de sondagem.

Após análise dos parâmetros de curvatura das duas bacias estudadas para o SH02, foram realizados oito processos de retroanálise a partir das duas bacias deflectométrica estudadas, denominadas de RETRO1, RETRO2, RETRO3, RETRO4 e RETRO5, RETRO6, RETRO7 e RETRO8, com o objetivo de se determinar os módulos das camadas existente do pavimento para este segmento. Cada retroanálise utilizou-se de diversas possibilidades de uso do *software*, e observações pertinentes para uma boa interpretação dos dados obtidos no processo de retroanálise. Ressalta-se que foram realizadas cinco análises para a bacia média de deflexão e três análises para a bacia medida no ponto do poço de sondagem, conforme divisão apresentada no Quadro 8.

Quadro 8: Número de retroanálise por bacia estudada – SH02

<b>Bacia média</b>	<b>Bacia poço de sondagem</b>
RETRO1	RETRO6
RETRO2	RETRO7
RETRO3	RETRO8
RETRO4	-
RETRO5	-

Fonte: Elaborada pela autora



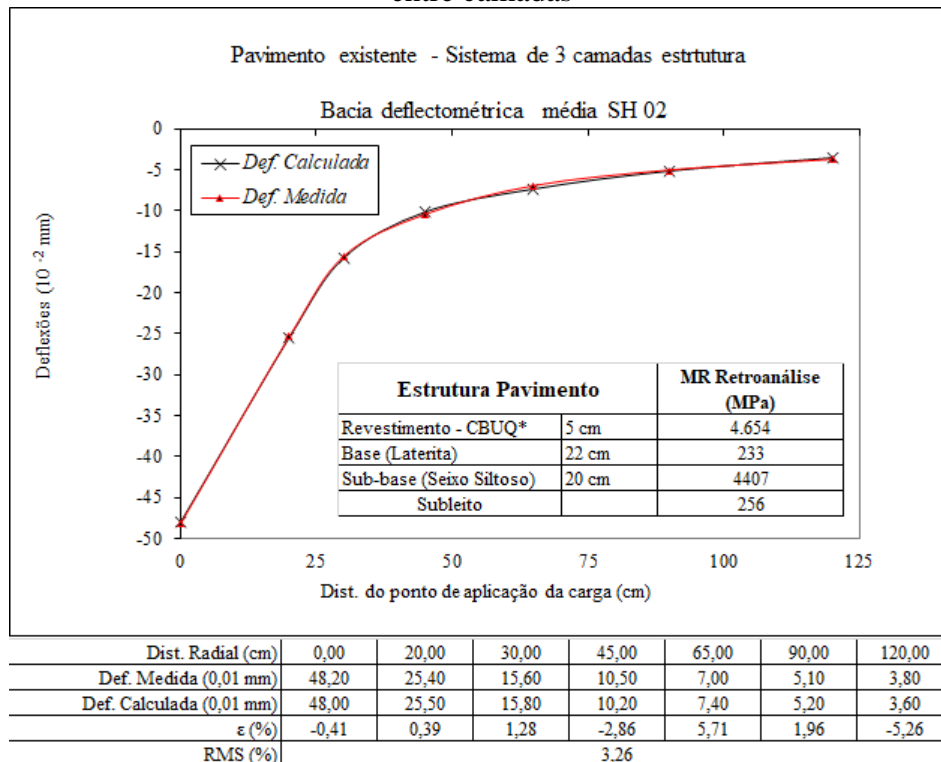
#### 4.1.1.1 Retroanálises da bacia média do SH02

Em primeiro momento, foi realizado uma retroanálise no *software* BackMeDiNa, chamada de RETRO1, levando em consideração o pavimento existente conforme definido em projeto (sistema de 3 camadas estruturais + subleito solo natural), daí foi inserido o dado da bacia de deformação média (Tabela 10) e a condição de camadas não aderidas (o que significa que não haverá cisalhamento na interface), isso porque para que a retroanálise possa ser reconhecida pelo programa MeDiNa, a condição de aderência entre camadas considerada no MeDiNa para realização de uma análise mecanística-empírica para projeto de reforço, deverá ser respeitada nas retroanálises, uma vez que o MeDiNa realiza a verificação e o dimensionamento de estruturas de pavimentos mecanístico-empírico, por meio da rotina do programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas AEMC.

As condições são pré-estabelecidas e as únicas três condições aceita de aderência entre camadas é quando existe uma camada asfáltica sobre outra camada asfáltica, ou quando existe camada asfáltica sobre camada anti-reflexão de trincas ou quando existe um tratamento superficial sobre camadas asfálticas. Com relação ao MR ditos sementes, ou seja, os MR iniciais para iniciar a retroanálise, estes não foram alterados, usando os valores de referência indicado no *software* para cada tipo de camada. Ressalta-se também, que não foi feita nenhuma interrupção no processo de retroanálise, deixando com que o processo se realizasse por completo até encontrar o menor RMS possível.

A Figura 14, a seguir apresenta graficamente a bacia deflectométrica calculada pelo *software* BackMeDiNa, a partir dos dados medidos em campo com o FWD e chamada de RETRO1. Embora o erro admissível para o ajuste entre as bacias medidas e calculadas tenha sido menor que 5%, observa-se que o valor de MR retroanalizados para a camada de sub-base ( $MR = 4407\text{MPa}$ ) não apresenta valor típico de material que compõe esta camada apresentado em sondagem.

Figura 14: RETRO1 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH02 – Não aderência entre camadas



Fonte: Elaborada pela autora

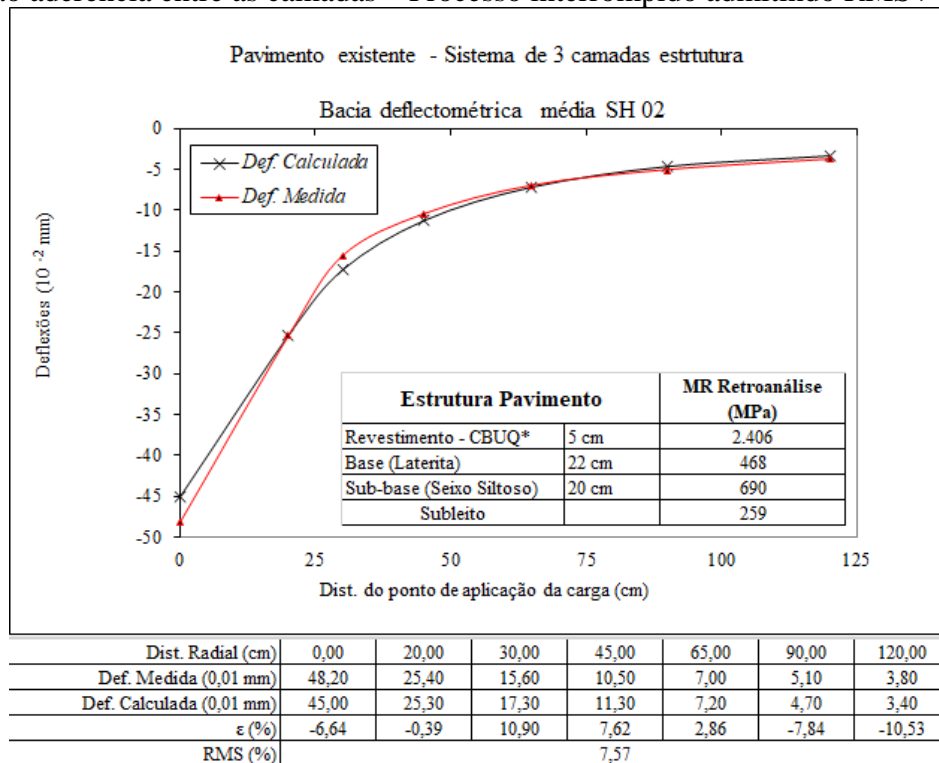
Retornando a análise dos parâmetros de curvatura da bacia, o valor do parâmetro SCI foi de 33 (0,01 mm), ou seja, superior a 25 (0,01 mm) indicando que a camada de revestimento do SH02 é pouco resistente ou é de pequena espessura, pois é muito deformável. Kim e Park (2002) utiliza a Equação 4 para determinar o módulo da camada de revestimento asfáltico através do SCI e da espessura conhecida do revestimento asfáltico.

Dito isso, o módulo para a camada de revestimento asfáltico previsto pela Equação 4, considerando o valor do parâmetro SCI e a espessura da camada de revestimento do pavimento de 5 cm, é de aproximadamente 4.207MPa. Corroborando com o MR retroanalísados na RETRO1 que determinou um MR de 4.654MPa. Com relação ao alto valor de módulo para a camada de sub-base (muito superior a 1.000MPa), que não são usuais em solos brasileiros, isso faz com que haja a necessidade de sempre fazer uma análise crítica dos valores de MR retroanalísados de cada camada para verificar a coerência de valores obtidos quando se deixa o programa “livre” para fazer as interações até o ajuste final em relação às características dos materiais reais existentes nas camadas.

Na tentativa de buscar resultado mais satisfatório para os MR retroanalísados a partir da bacia média do SH02, principalmente para as camadas granulares, foi feita uma segunda retroanálise (RETRO2), considerou todos os parâmetros iniciais idênticos a RETRO1, porém o

processo de retroanálise foi interrompido (apertando o botão ESC) quando foi considerado que já havia se determinado valores de módulos coerentes para todas as camadas, admitindo assim um erro admissível para o ajuste entre as bacias medidas e calculadas maior que 5%. A Figura 15, a seguir apresenta graficamente a bacia deflectométrica calculada pelo *software* BackMeDiNa, a partir dos dados medidos em campo com o FWD e chamada de RETRO2 nas mesmas condições da RETRO1, com parada do processo de interação do *software*.

Figura 15: RETRO2 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH02 – Condição de não aderência entre as camadas – Processo interrompido admitindo  $RMS > 5\%$



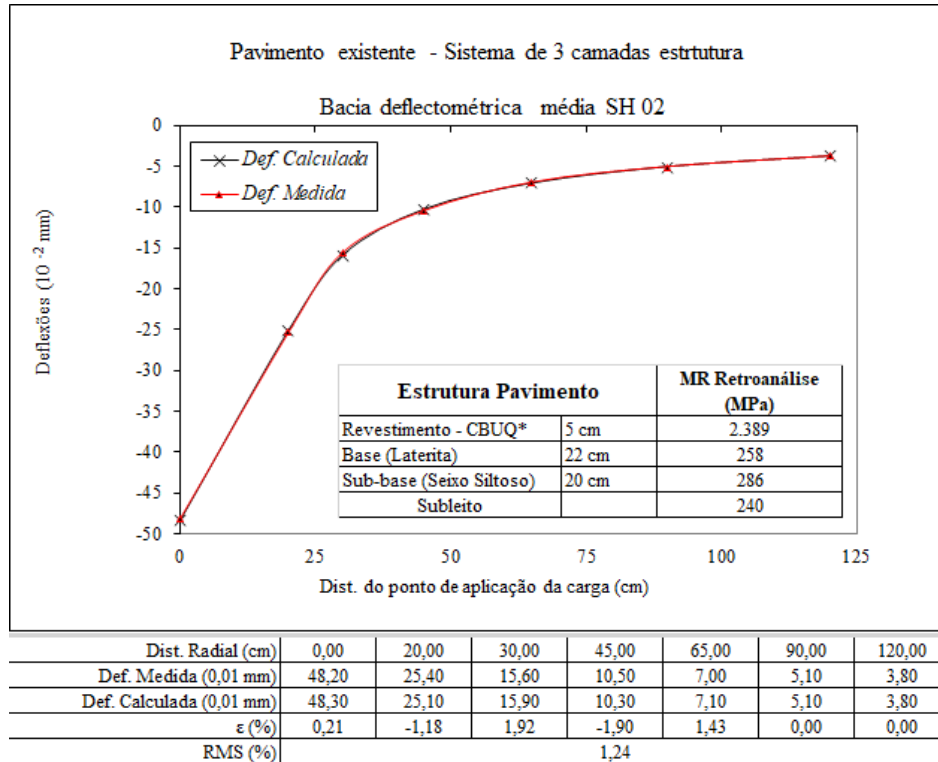
Fonte: Elaborada pela autora

Sabe-se que, os diversos fatores que influenciam os resultados de um dimensionamento mecânico de um reforço, podem estar presentes já na fase do processo de retroanálise. Diversos são os fatores que influenciam de forma significativa nos valores finais de módulo de resiliência no processo de retroanálise e um deles é a condição de aderência entre as camadas e os módulos iniciais.

Assim, o terceiro processo de retroanálise, a RETRO3, foi realizado com os mesmos dados de número e tipo de material das camadas do pavimento, coeficiente de Poisson e módulos iniciais da RETRO1, mudando a condição de aderência entre as camadas, ou seja, a interface entre todas as camadas está aderida. A Figura 16, a seguir apresenta graficamente a

bacia deflectométrica calculada pelo *software* BackMeDiNa, a partir dos dados medidos em campo com o FWD e chamada de RETRO3 na condição de aderência entre as camadas.

Figura 16: RETRO3 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH02 – Condição de aderência entre as camadas



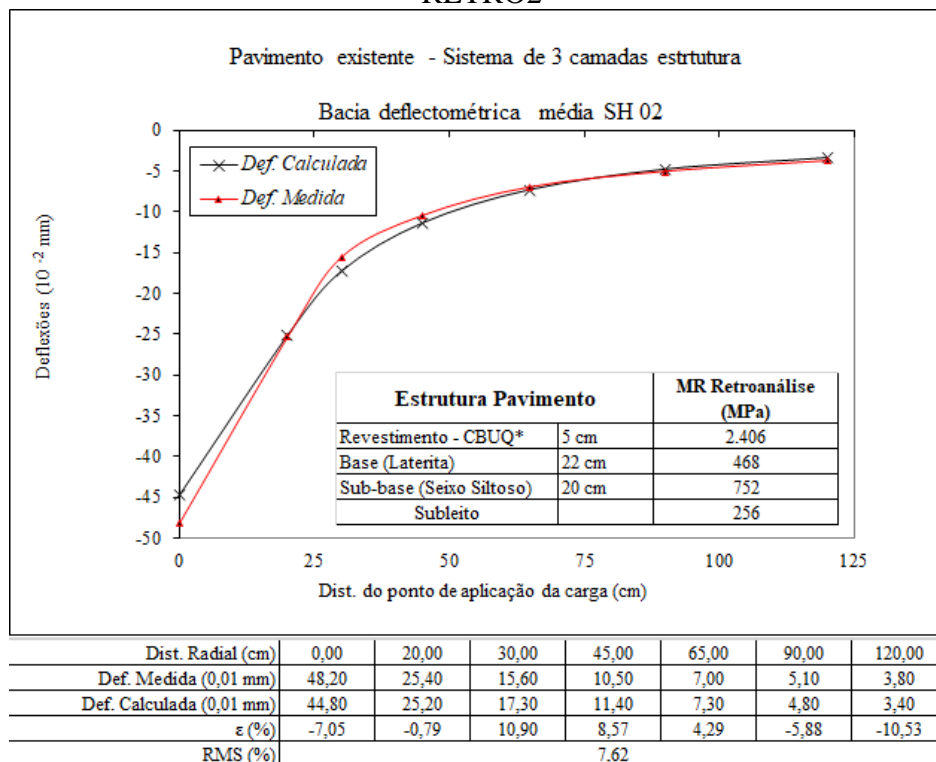
Fonte: Elaborada pela autora

Os valores apresentados na RETRO3 corroboram com a avaliação do parâmetro AREA calculado para cada SH, o qual para o SH02 apresentou um valor de 31 cm, tal valor indica que a estrutura em geral do pavimento analisado é típica de um pavimento muito flexível, ou seja, pavimentos flexíveis fracos, visto os valores calculados entre 28 e 40 cm. Apresentando valores de módulos praticamente iguais para as camadas granulares e de solo, tal qual foi encontrado na RETRO3.

Como já dito anteriormente diversos são os fatores que influenciam os resultados de um dimensionamento mecânico de um reforço, sendo que esses fatores podem estar presentes inclusive na fase do processo de retroanálise. E como a condição de não aderência é pré-estabelecida no *software* BackMeDiNa para que a retroanálise possa ser reconhecida pelo programa MeDiNa esta condição foi escolhida para novas análises. Assim, duas outras tentativas de retroanalisar os dados da bacia média do SH 02, RETRO4 e RETRO5, nesta quarta retroanálise realizada (RETRO4) com os dados da bacia de deformação média do SH02, foi fixado um valor de módulo de resiliência (MR) da camada de revestimento em um valor de

2406 MPa e fixado o valor de MR da camada de base em um valor de 468 MPa e a condição de não aderência foi imposta entre as camadas. A Figura 17, a seguir apresenta graficamente a bacia deflectométrica calculada pelo *software* BackMeDiNa, a partir dos dados médios medidos em campo com o FWD e chamada de RETRO4 na condição de não aderência entre as camadas e valores de MR revestimento e base congelados a partir dos valores determinados na RETRO2.

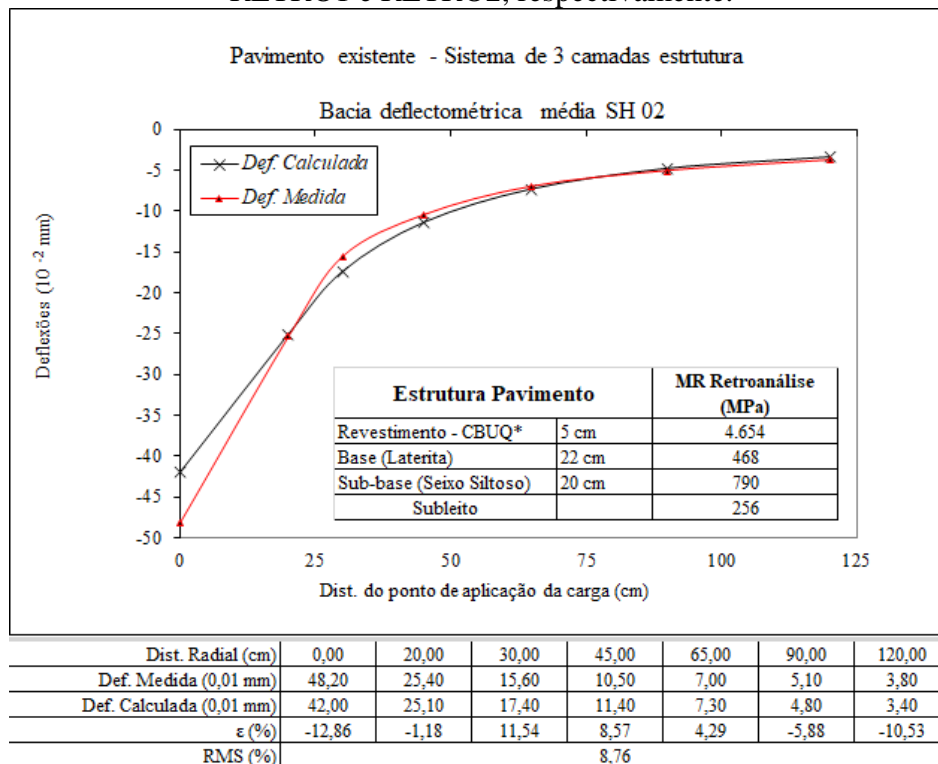
Figura 17: RETRO4 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH02 – Condição de não aderência entre as camadas e MRrev e MRbase congelados a partir dos dados da RETRO2



Fonte: Elaborada pela autora

A quinta e última retroanálise realizada (RETRO5) com os dados da bacia de deformação média do SH02, foi fixado um valor de módulo de resiliência (MR) da camada de revestimento em um valor de 4654 MPa e fixado o valor de MR da camada de base em um valor de 468 MPa e a condição de não aderência foi imposta entre as camadas. A Figura 18, a seguir apresenta graficamente a bacia deflectométrica calculada pelo *software* BackMeDiNa, a partir dos dados médios medidos em campo com o FWD e chamada de RETRO5 na condição de não aderência entre as camadas e valores de MR revestimento congelado a partir do valor determinado na RETRO1 e MR base congelado a partir do valor determinado na RETRO2.

Figura 18: RETRO5 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH02 – Condição de não aderência entre as camadas e MRrev e MRbase congelados a partir dos dados da RETRO1 e RETRO2, respectivamente.



Fonte: Elaborada pela autora

A RETRO4 e RETRO5 foram realizadas com uma tentativa de determinar os módulos da camada de sub-base e o módulo de subleito, uma vez que os módulos da camada de revestimento e base foram congelados, por considerar tais valores coerentes para o material das camadas. Embora os RMS tenham apresentado valor acima de 5% eles mostram-se satisfatórios.

A Tabela 16, a seguir apresenta os módulos retroanalizados a partir dos cinco processos de retroanálise, denominadas de RETRO1, RETRO2, RETRO3, RETRO4 e RETRO5. Lembrando que cada uma tentativa fez uso de diversas possibilidades do *software* e observações pertinentes para uma boa interpretação dos dados obtidos no processo de retroanálise.

Tabela 16: Módulos retroanalizados (MPa) a partir da bacia média do SH02

<b>Retroanálise</b>	<b>Revestimento</b>	<b>Base</b>	<b>Sub-base</b>	<b>Subleito</b>	<b>Condição de Aderência</b>	<b>RMS (%)</b>
<b>RETRO1</b>	4.654	233	4.407	256	Não aderido	3,3
<b>RETRO2</b>	2.406	468	690	259	Não aderido	7,6
<b>RETRO3</b>	2.389	258	286	240	Aderido	1,2
<b>RETRO4</b>	2.406**	468**	752	256	Não aderido	7,6
<b>RETRO5</b>	4.654*	468**	790	256	Não aderido	8,8

\* Módulo congelado da RETRO1

\*\* Módulo congelado da RETRO2

Fonte: Elaborada pela autora

Após todos as análises realizadas, foi determinado que os valores dos módulos retroanalizados da RETRO2 estão mais coerentes para análise e assim serem inseridos no *software* MeDiNa para dimensionamento da camada de reforço do pavimento, mesmo apresentando um RMS maior que 5%. Visto que os resultados de MR retroanalizados na RETRO2 corroboram com os valores de Módulos Retroanalizados a partir das 32 bacias do SH02 apresentado na Tabela 14.

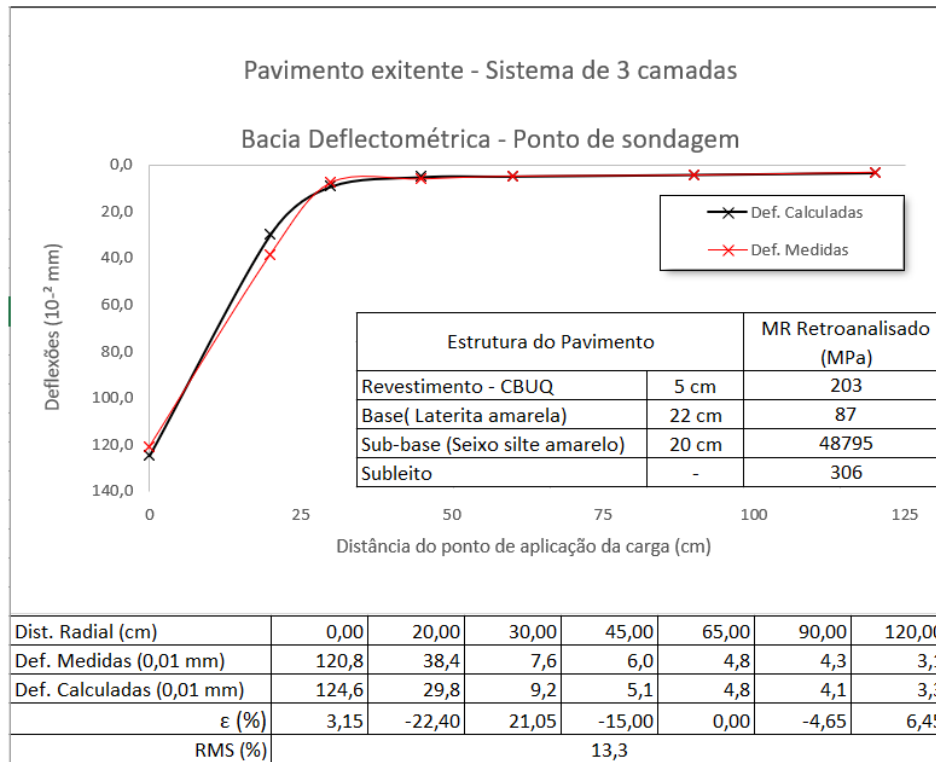
#### 4.1.1.2 Retroanálises da bacia do ponto do poço de sondagem do SH02

Considerando a bacia medida no ponto exato da execução do poço de sondagem, foi realizado uma retroanálise no *software* BackMeDiNa, chamada de RETRO6, levando em consideração o pavimento existente conforme definido em projeto (sistema de 3 camadas estruturais + subleito solo natural), daí foi inserido o dado da bacia de deformação medida no ponto do poço de sondagem (Tabela 11) considerando a condição de camadas não aderidas, mantido como MR sementes para o início da retroanálise os valores de referência indicado no *software* para cada tipo de camada e não foi feita nenhuma interrupção no processo de retroanálise deixando que o processo realizasse por completo até encontrar o menor RMS possível.

A Figura 19, a seguir apresenta graficamente a bacia deflectométrica calculada pelo *software* BackMeDiNa, a partir dos dados medidos em campo com o FWD e chamada de RETRO6. A retroanálise finalizou quando o programa ainda apresentava erro admissível para o ajuste entre as bacias medidas e calculados superior a 10%, foi observado que o valor de MR

retroanalizados para todas as camadas da estrutura não apresenta valor típico de material que compõe cada camada apresentado em sondagem.

Figura 19: RETRO6 - Retroanálise da Bacia deflectométrica medida no ponto de abertura do poço de sondagem do SH02 – Não aderência entre camadas

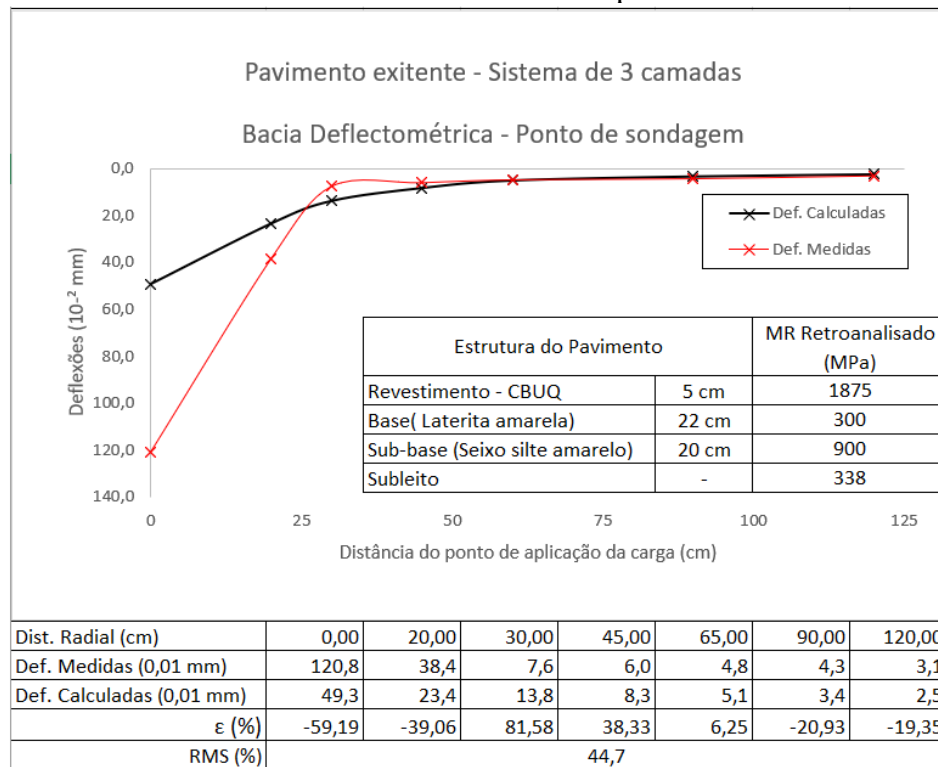


Fonte: Elaborada pela autora

Buscando encontrar resultado mais satisfatório para os MR retroanalizados a partir da bacia medida no ponto de abertura do poço de sondagem do SH02 foi realizada uma nova retroanálise (RETRO7) seguindo o mesmo procedimento da RETRO6 e interrompendo a retroanálise assim que as camadas do pavimento apresentarem valores de MR que representem os materiais identificados na sondagem. No decorrer do processo de retroanálise observou-se que a bacia deflectométrica apresentou valores admissíveis de MR para as camadas do pavimento somente quando o erro para o ajuste entre as bacias medidas e calculadas ainda era superior a 40% e à medida que ocorria a redução do RMS, a camada de sub-base apresentava aumento significando do MR enquanto que as camadas de revestimento e base apresentavam redução no valor do MR. A Figura 20, a seguir apresenta a RETRO7 com valores de MR condizentes com os materiais que compõem as camadas do pavimento, no entanto, a bacia calculada não condiz com a bacia medida em campo pois apresentam valores de deflexão máxima muito distintos.



Figura 20: RETRO7 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH02 – Condição de não aderência entre as camadas – Processo interrompido admitindo RMS = 44,7%

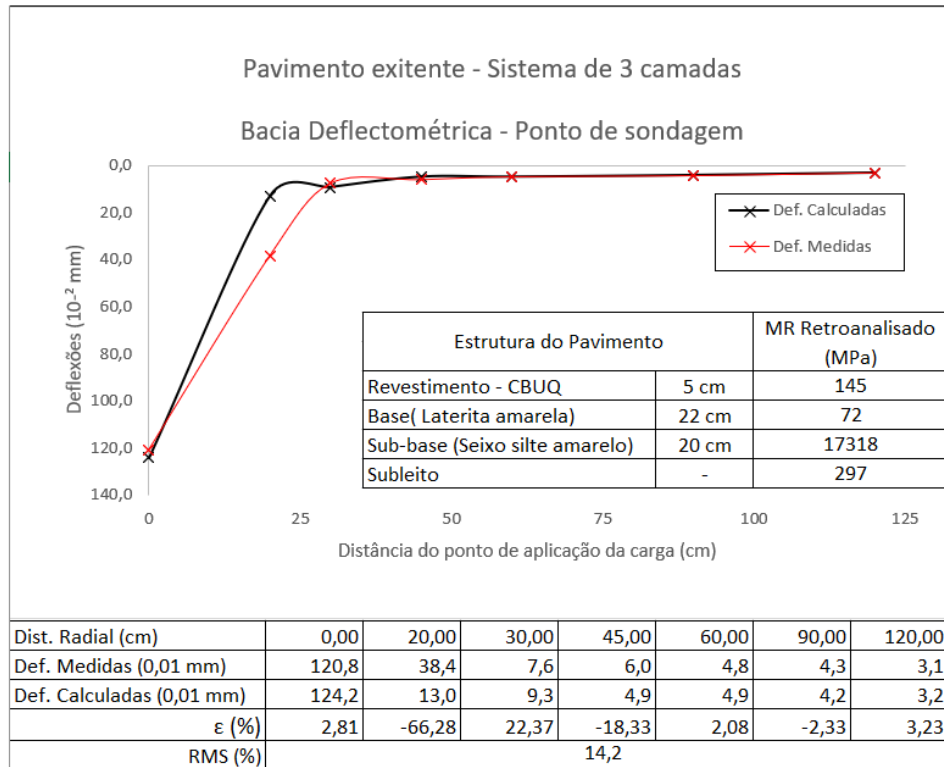


Fonte: Elaborada pela autora

Realizou-se novamente outra retroanálise (RETRO8) onde foi novamente considerado o pavimento existente conforme definido em projeto (sistema de 3 camadas estruturais + subleito solo natural) e mantido como MR sementes para o início da retroanálise os valores referência apresentados pelo *software* para cada tipo de camada. Nessa retroanálise passou-se a considerar aderência entre as camadas e deixou que o processo de retroanálise realizasse por completo até que o menor RMS possível fosse encontrado, não sendo feita nenhuma interrupção no processo de retroanálise.

Mesmo considerando cisalhamento na interface das camadas (condição de aderência), a bacia medida no ponto de sondagem ainda apresentou valores de MR que não representam os materiais que compõem as camadas do pavimento, principalmente para as camadas de revestimento que apresentou valor muito baixo e sub-base que apresentou valores significativamente alto para os tipos de materiais constituintes dessas camadas, como é representado na Figura 21.

Figura 21: RETRO8 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH02 – Condição de aderência entre as camadas



Fonte: Elaborada pela autora

A Tabela 17, a seguir apresenta os módulos retroanalizados a partir dos cinco processos de retroanálise, denominadas de RETRO6, RETRO7 e RETRO8. Lembrando que cada uma tentativa fez uso de diversas possibilidades do *software* e observações pertinentes para uma boa interpretação dos dados obtidos no processo de retroanálise.

Tabela 17: Módulos retroanalizados (MPa) a partir da bacia medida no ponto de abertura do poço se sondagem do SH 02

Retroanálise	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito	Condição de Aderência	RMS (%)
<b>RETRO6</b>	198	87	47.038	306	Não aderido	13,3
<b>RETRO7</b>	133	99	6.836	370	Não aderido	44,7
<b>RETRO8</b>	170	73	15.987	297	Aderido	14,2

Fonte: Elaborada pela autora

Após todos as análises realizadas, foi determinado que nenhuma das retroanálises apresentaram valores de módulos coerente para análise e assim serem inseridos no *software* MeDiNa para dimensionamento da camada de reforço do pavimento. Sendo assim, a bacia medida no ponto de sondagem não foi levada adiante no presente estudo.

#### 4.1.2 Segmento Homogêneo SH05

O SH05 possui no total 177 bacias deflectométricas medidas em campo com o FWD na pista esquerda. Foi importado para o *software* BackMeDiNa o arquivo EXCEL com essas deflexões medidas, iniciando o processo de retroanálise considerando os dados apresentados no Quadro 4 e como módulos iniciais os de referência apresentado pelo *software*, não considerando aderência entre as camadas e deixando o processo de retroanálise seguir até encontrar o menor RMS possível. Findada a retroanálise foi identificado que 68 bacias apresentaram  $RMS > 10\%$ , sendo que dessas 68 bacias 4 não foram retroanalizadas pois possuíam  $Df_7$  ( $D_{120}$ ) igual a zero. Ao ser importado para o programa MeDiNa (modo projeto de reforço) um alarme foi emitido notificando que “A retroanálise não pode ser importada porque a estrutura parece não corresponder a um segmento homogêneo”. Dado isso, foram excluídas as 68 bacias que apresentaram erro maior que 10% e 24 bacias que apresentaram resultado de módulos com valores fora dos valores médios considerados para os materiais presentes nas camadas, como por exemplo, módulos de resiliência da camada de base superior a 1.000 MPa, embora o processo interativo tenha apresentado erro menor que 5%, restando no total 85 bacias deflectométricas com valores coerentes de módulos retroanalizados.

Ao ser importado a retroanálise com as 85 bacias para o programa MeDiNa no modo de projeto de reforço, um novo alerta foi emitido indicando que “Os coeficientes de variação (CV) dos parâmetros de MR estão acima de 30%”. Mesmo assim, a importação dos dados da retroanálises foi aceita para avaliação dos CV% e do MR para cada camada da estrutura. Assim, a Tabela 18 apresenta a análise do CV% e do MR retroanalizados para cada camada da estrutura do pavimento existente a partir das 85 bacias do SH05 consideradas coerentes para os materiais das camadas.

Tabela 18: Módulos Retroanalizados a partir das 85 bacias do SH05 e CV%

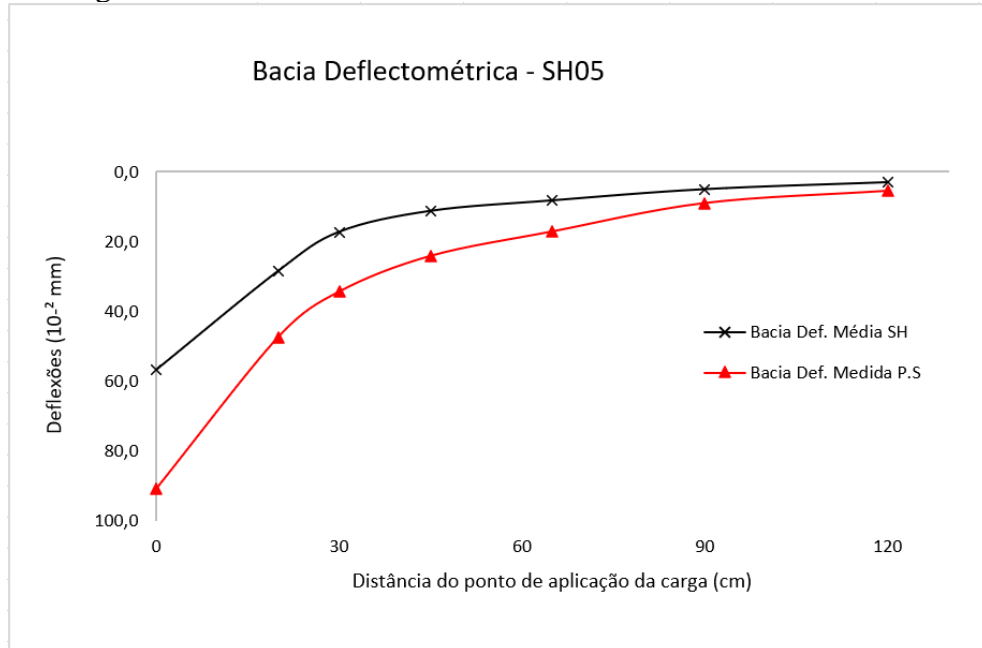
<b>Camada</b>	<b>Material existente</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>MR retroanalizados (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>Revestimento</b>	Concreto Asfáltico	4	3.363	86,3
<b>Base</b>	Laterita vermelha	35	321	42,0
<b>Subleito</b>	Silte amarelo argiloso	-	306	39,4

Fonte: Elaborada pela autora

Devido aos altos valores de CV, o estudo isolado de bacias foi realizado da seguinte maneira, uma análise da bacia média do segmento e uma outra análise da bacia medida no ponto

exato da abertura de sondagem do segmento. A Figura 22, a seguir, mostra o gráfico das bacias do SH05 avaliadas neste estudo (a bacia média e a bacia medida exatamente na estaca que foi aberto o poço de sondagem): deflexões no eixo y e pontos de leitura do FWD no eixo x.

Figura 22: Bacias deflectométricas do SH05 avaliadas neste estudo



Fonte: Elaborada pela autora

Observa-se que as bacias estudadas para o SH 05 são bastante distintas, o que indica que a segmentação apresentada em projeto não é homogênea, pois apresentam deflexões distintas para os pontos mais próximos de aplicação da carga. A Tabela 19, a seguir, apresenta os dados referentes aos parâmetros de curvatura das duas bacias deflectométricas estudadas para o SH05.

Tabela 19: Resumo dos parâmetros das bacias deflectométrica estudadas do SH05

Bacia estudada	Rc (m)	AREA (cm)	SCI	BDI	BCI	CF
			(0,01 mm)			
<b>Média</b>	92	30	40	9	3	28
<b>Poço sondagem</b>	63	34	56	17	8	43

Fonte: Elaborada pela autora

Analisando os parâmetros de curvatura apresentados na Tabela 19 pode-se observar que as duas bacias estudadas apresentam baixa capacidade estrutural visto que ambas apresentam raio de curvatura (Rc) inferior ao limite mínimo de 100,0 m que é estabelecido pela norma do DNER-PRO 011/79 para pavimentos flexíveis. Com relação ao parâmetro AREA calculado

para as duas bacias em estudo do SH05, os valores indicam que a estrutura em geral do pavimento analisado é típica de um pavimento muito flexível, ou seja, pavimentos flexíveis fracos, visto os valores calculados entre 28 e 40 cm. Ao observar o parâmetro SCI, percebe-se que as duas bacias apresentam camada de revestimento com baixa resistência ou pequena espessura (muito flexível) visto que os valores de SCI são superiores ao limite superior recomendado ( $< 0,025$  mm).

Após análise dos parâmetros de curvatura das duas bacias estudadas para o SH05, foram realizados dez processos de retroanálise a partir das duas bacias deflectométrica estudadas, denominadas de RETRO9, RETRO10, RETRO11, RETRO12 e RETRO13, RETRO14, RETRO15, RETRO16, RETRO17 e RETRO18, com o objetivo de se determinar os módulos das camadas existente do pavimento para este segmento. Cada retroanálise utilizou-se de diversas possibilidades de uso do *software*, e observações pertinentes para uma boa interpretação dos dados obtidos no processo de retroanálise. Ressalta-se que foram realizado cinco análise para cada bacia conforme divisão apresentada no Quadro 9.

Quadro 9: Número de retroanálise por bacia estudada – SH05

<b>Bacia média</b>	<b>Bacia poço de sondagem</b>
RETRO9	RETRO14
RETRO10	RETRO15
RETRO11	RETRO16
RETRO12	RETRO17
RETRO13	RETRO18

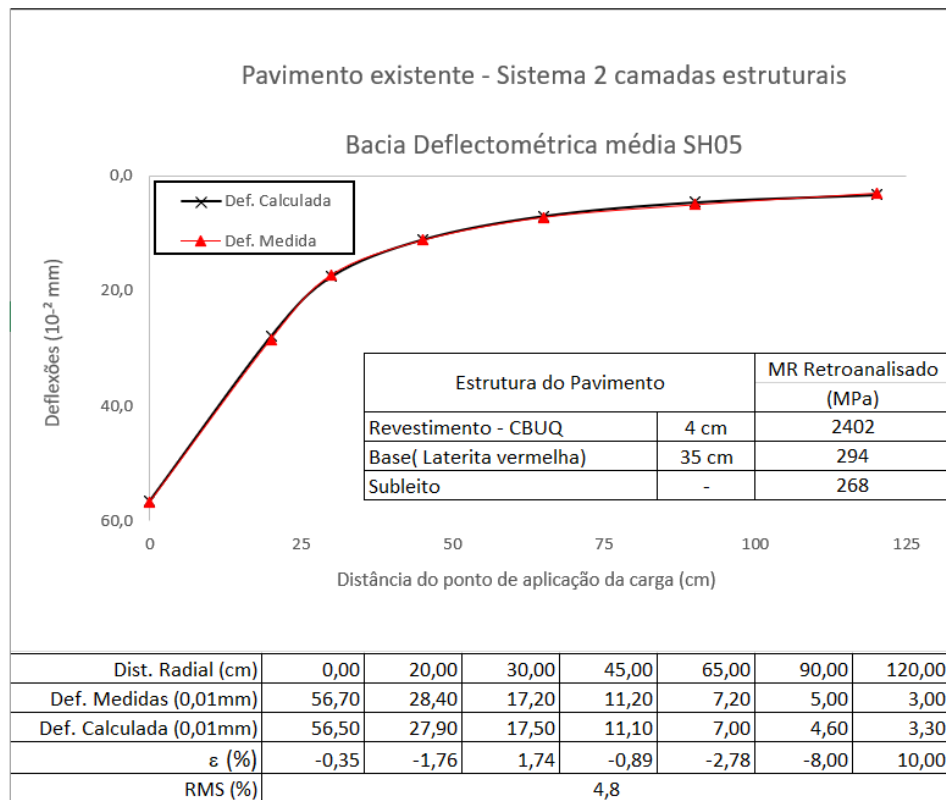
Fonte: Elaborada pela autora

#### 4.1.2.1 Retroanálises da bacia média do SH05

Em primeiro momento, foi realizado uma retroanálise da bacia média do SH05 no *software* BackMeDiNa, chamada de RETRO9, onde foi inserido os dados deflectométricos da bacia (Tabela 10) e como módulos iniciais foi usado os módulos apresentados como referência pelo programa, além disso, foi considerado a condição de aderência entre as camadas como NÃO ADERIDA e deixou o programa “livre” para realizar o processo até que seja encontrado o menor erro RMS possível sem que haja a interrupção do processo. Ressalta-se que no SH 05 o pavimento foi considerado para estudo como um sistema de 2 camadas estruturais (Revestimento + Base).

Na Figura 23, a seguir está representado a bacia deflectométrica média do SH05 resultado da RETRO9 onde pode ser observado que o processo de retroanálise foi finalizado quando atingiu o erro mínimo possível igual a 4,8% e os valores dos módulos retroanalizados das camadas representam os materiais presentes nas camadas do pavimento.

Figura 23: RETRO9 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH05 - Não aderência entre camadas



Fonte: Elaborada pela autora

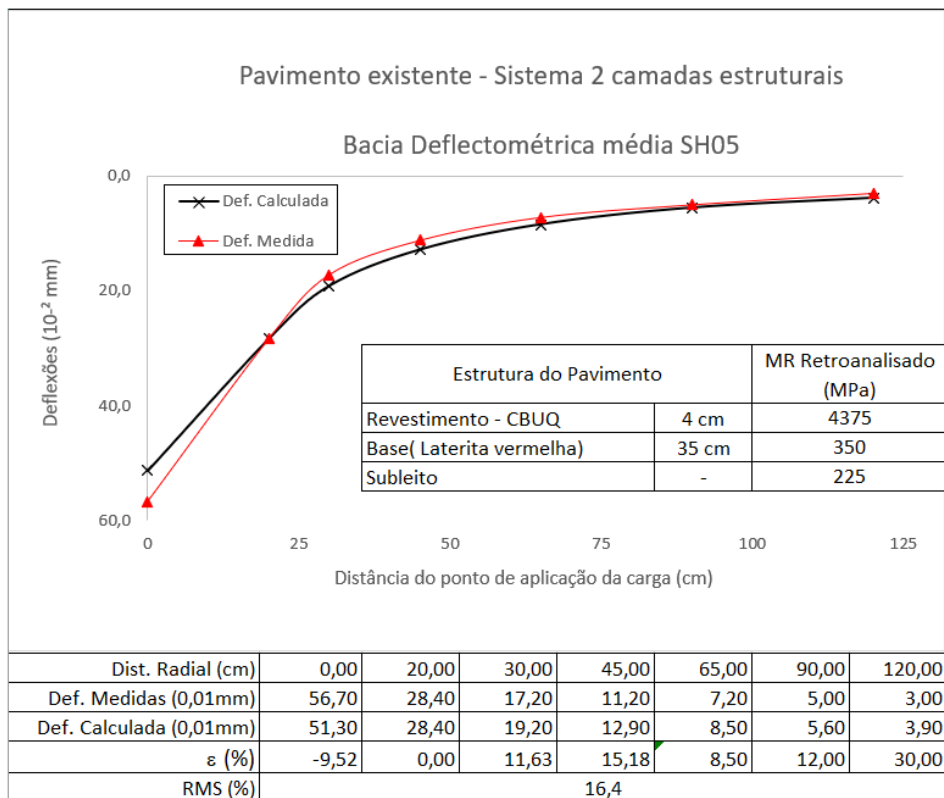
Nos resultados obtidos pela RETRO9 apresentados na Figura 23, podemos observar que os valores dos módulos retroanalizados corroboram com o parâmetro AREA calculado para o segmento que apresentou valor de 30 cm (Tabela 19) o que indica que a estrutura geral do pavimento representa um pavimento flexível fraco, pois apresentou valores de módulos retroanalizadas para as camadas inferiores (Base e subleito) praticamente iguais.

Analisando os demais parâmetros de curvatura do SH05 apresentados na Tabela 19, a bacia deflectométrica média apresenta baixa capacidade estrutural, pois apresenta  $R_c = 92$  m, e camada asfáltica pouco resistente ou de pequena espessura que é evidenciado pelo parâmetro SCI superior a 25 (0,025 mm). Dito isso, para determinar o módulo previsto para a camada de revestimento da bacia média foi usada a Equação 4 que leva em consideração o parâmetro SCI

e a espessura da camada de revestimento obtendo o valor aproximadamente de 4.371 MPa que é quase duas vezes maior do que o valor do módulo retroanalísado na RETRO9.

Dito isso, realizou-se outra retroanálise (RETRO10) considerando os mesmos parâmetros da RETRO9: um sistema com 2 camadas estruturais; sem aderência entre as camadas. Nessa retroanálise foi feita a interrupção do processo de retroanálise assim que o *software* apresentasse valores de módulos para a camada de revestimento semelhante ao obtido pela equação, mesmo que o erro RMS encontrado seja maior do que 5%. Na RETRO10 foi observado todo o processo de retroanálise para observar os valores que o programa apresentava e o RMS referente a esses valores. Observou-se que no decorrer do processo de retroanálise, à medida que o RMS diminui o módulo da camada de revestimento também diminuía e apresentou valores próximos ao valor obtido pela Equação 4 (4.371 MPa) apenas quando o RMS ainda se encontrava maior do que 10% como apresentado na Figura 24.

Figura 24: RETRO10 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH05 – Condição de não aderência entre as camadas – Processo interrompido com RMS > 10%

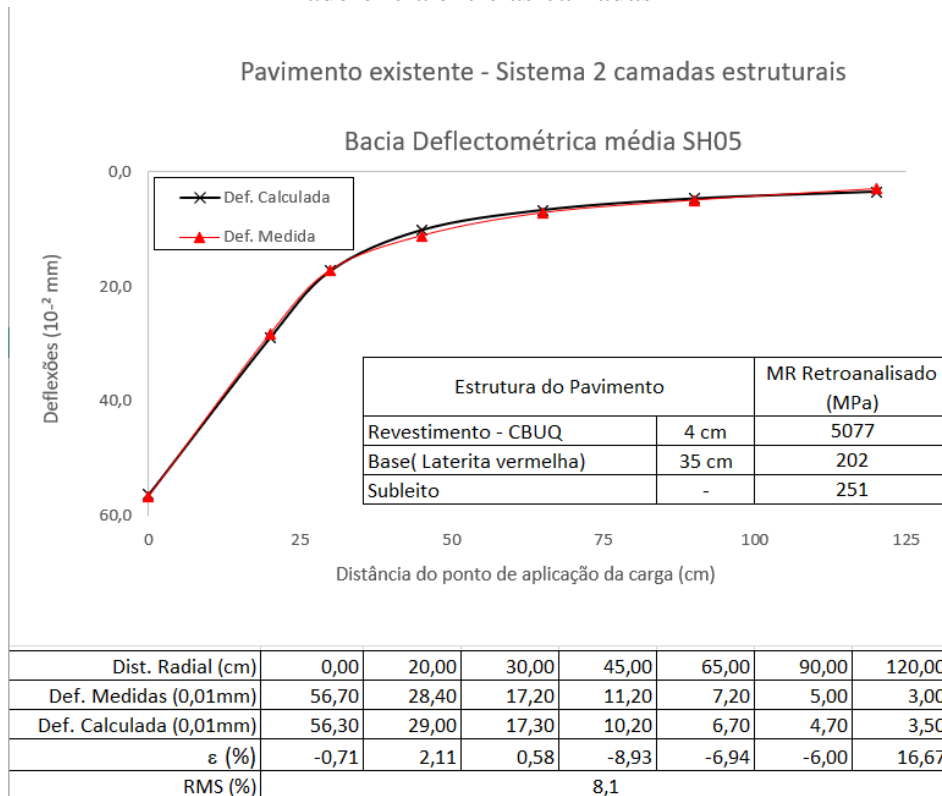


Fonte: Elaborada pela autora

Sabe-se que a condição de aderência entre as camadas é um dos fatores que influenciam os resultados da retroanálises, dado isso, realizou-se outra retroanálise (RETRO11) com os mesmos parâmetros da RETRO9. Nessa retroanálise (RETRO11) foi alterada a situação de

aderência entre as camadas para ADERIDA e deixou o programa realizar o processo de retroanálise até que se encontre o menor RMS possível sem que seja feita interrupção no processo. Na Figura 25, a seguir observa-se que o processo de retroanálise finalizou quando o programa apresentou erro para ajuste entre as bacias medidas e calculadas igual a 8,1%.

Figura 25: RETRO11 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH05 – Condição de aderência entre as camadas



Fonte: Elaborada pela autora

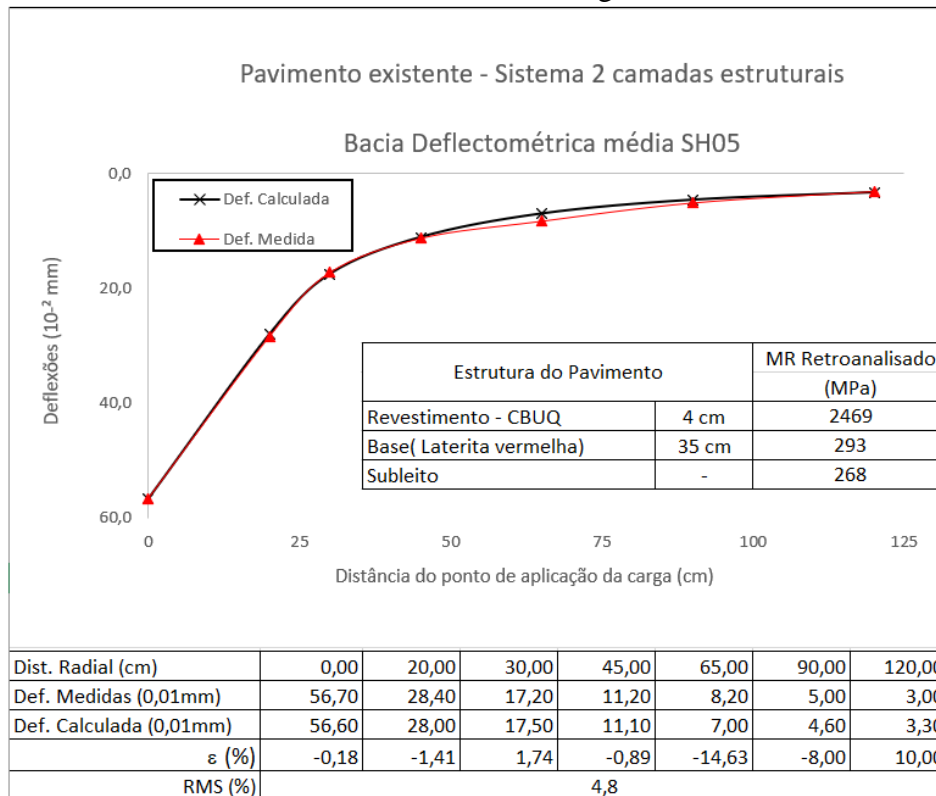
Observa-se que não houve variação significativa dos módulos retroanalizados para as camadas de base e subleito quando comparado com a RETRO9 onde não foi considerada aderência entre as camadas e deixado o programa “livre” para realizar o processo de retroanálise, em contrapartida a camada de revestimento apresentou aumento significativo no valor de módulo retroanalizado.

Devido ao *software* de dimensionamento de reforço (MeDiNa) não aceitar retroanálises em que há aderência entre as camadas, realizou-se mais duas retroanálises (RETRO12 e RETRO13) onde foi considerado os mesmos parâmetros da RETRO9: sistema com duas camadas estruturais + subleito; não aderência entre as camadas; processo de retroanálise livre de interrupção até que encontre o menor RMS possível. Visto que nas 3 retroanálises já realizadas a camada de subleito apresento MR semelhantes aos valores médios de módulos das



85 bacias, na RETRO12 congelou-se o módulo do subleito adotando como referência a RETRO9 (subleito = 268 MPa) obtendo os resultados apresentados na Figura 26.

Figura 26: RETRO12 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH05 – Condição de não aderência entre as camadas e MRsubleito congelado com dados da RETRO9

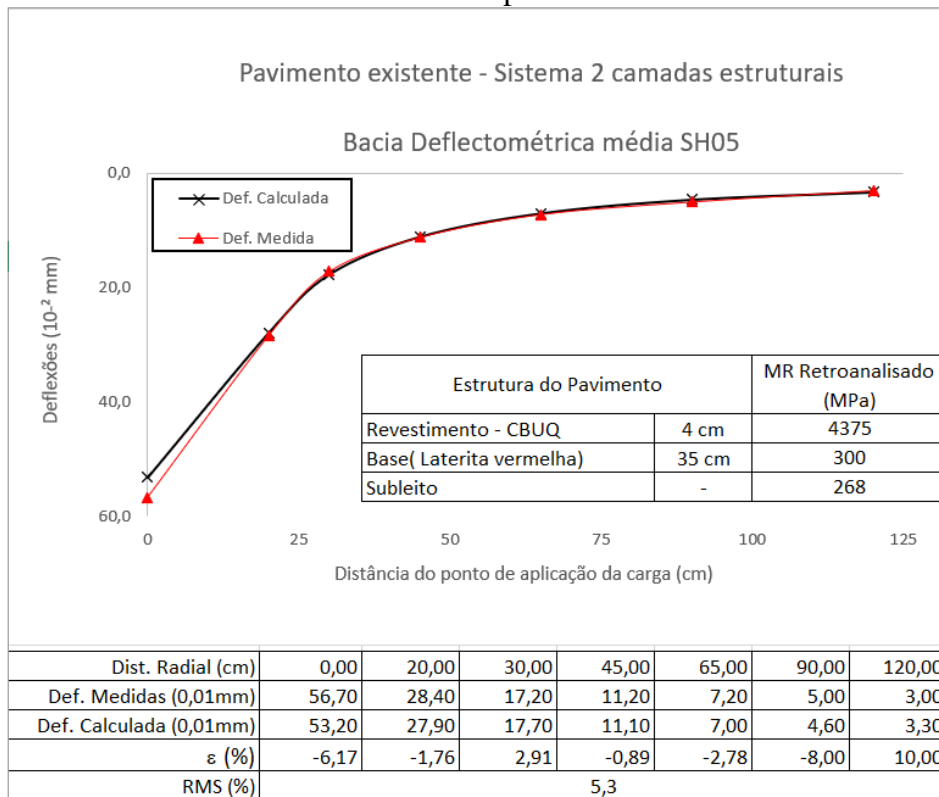


Fonte: Elaborada pela autora

Observando os resultados apresentados pela RETRO12 (Figura 26) percebe-se que o valor de MR apresentado para a camada de revestimento foi o mesmo apresentado para a mesma camada na RETRO9, porém para as demais camadas não houve significativa variação do módulo retroanalizados, além disso, o valor de RMS apresentado na RETRO12 foi bem inferior ao apresentado na RETRO9.

Na RETRO13 com os mesmos dados da RETRO12 (condição de não aderência entre as camadas e camada de subleito congelada com MR=268MPa) realizou-se outra retroanálise onde foi interrompido o processo assim que a camada de revestimento apresentasse valores próximos ao da equação obtendo os resultados apresentados na Figura 27 a seguir.

Figura 27: RETRO13 - Retroanálise da Bacia deflectométrica média do SH05 – Condição de não aderência entre as camadas e MRsubleito congelado com dados da RETRO9 - processo interrompido



Fonte: Elaborada pela autora

Nos resultados apresentados na RETRO13 (Figura 27), observa-se que a retroanálise apresentou valores de módulos retroanalísados semelhantes aos apresentados na RETRO10, no entanto o erro obtido para a ajuste entre as bacias medidas e calculadas foi menor que o limite máximo admissível, apresentando RMS igual a 5,3%.

Após todas as análises realizadas, percebe-se que não houve significativa variação nos módulos retroanalísados para as camadas de base e revestimento do pavimento corroborando com o parâmetro AREA calculado para a bacia. Na Tabela 20, a seguir está apresentado o resumo dos módulos retroanalísados a partir da bacia média do SH05 tendo destacado com “\*” as camadas cujo módulos iniciais foram congelados.

Tabela 20: Módulos retroanalizados (MPa) a partir da bacia média do SH05

<b>Retroanálise</b>	<b>Revestimento</b>	<b>Base</b>	<b>Subleito</b>	<b>Aderência</b>	<b>RMS (%)</b>
<b>RETRO9</b>	2.402	294	268	Não aderido	4,8
<b>RETRO10</b>	4.375	350	225	Não aderido	16,4
<b>RETRO11</b>	5.077	202	251	Aderido	8,1
<b>RETRO12</b>	2.469	293	268*	Não aderido	4,8
<b>RETRO13</b>	4.375	300	268*	Não aderido	5,3

\*Módulo congelado da RETRO9

Fonte: Elaborada pela autora

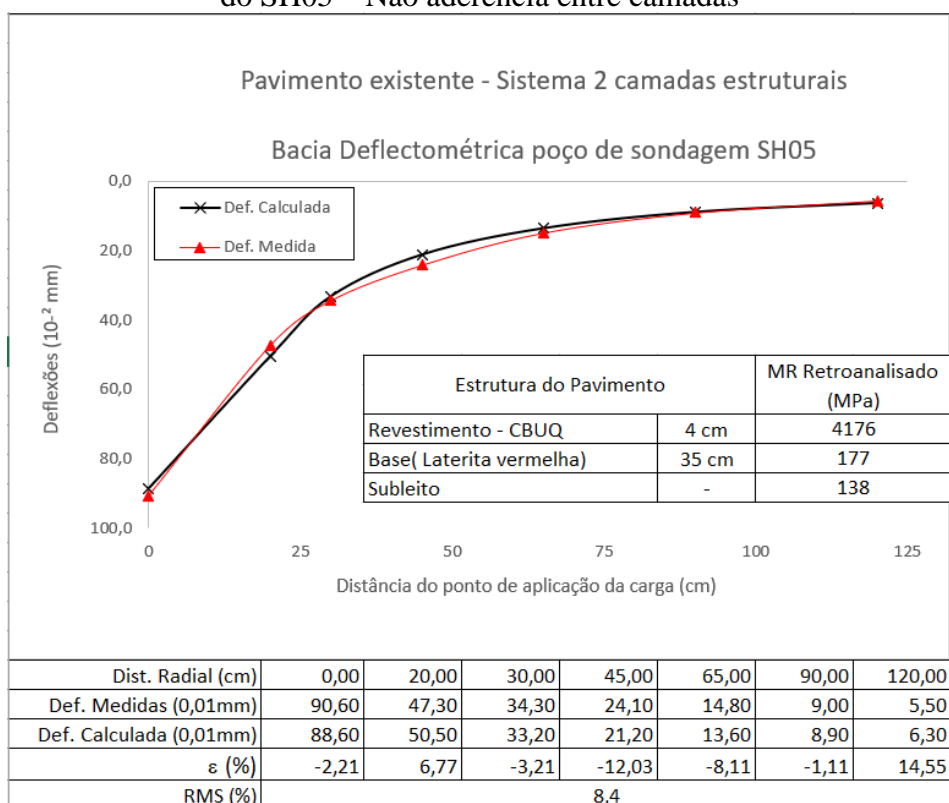
Foi determinado que os valores dos módulos retroanalizados da RETRO13 estão mais coerentes para análise e assim serem inseridos no *software* MeDiNa para dimensionamento da camada de reforço do pavimento, mesmo apresentando um RMS maior que 5%, visto que o módulo apresentado para a camada de revestimento corrobora com o valor determinado pela Equação 4, além de ter apresentado erro menor do que 10% e não ter sido considerada aderência entre as camadas.

#### 4.1.2.2 Retroanálises da bacia do ponto do poço de sondagem do SH05

Considerando a bacia medida no ponto exato da execução do poço de sondagem, foi realizado uma retroanálise no *software* BackMeDiNa, chamada de RETRO14, levando em consideração o pavimento existente (sistema de 2 camadas estruturais + subleito solo natural), onde foi inserido o dado da bacia de deformação medida no ponto do poço de sondagem (Tabela 11) e a condição de camadas não aderidas, além disso, foi mantido como módulos iniciais para o início da retroanálise os valores de referência indicado no *software* para cada tipo de camada e não foi feita nenhuma interrupção no processo de retroanálise deixando que o processo realizasse por completo até encontrar o menor RMS possível.

A Figura 28, a seguir apresenta graficamente a bacia deflectométrica calculada pelo *software* BackMeDiNa, a partir dos dados medidos em campo com o FWD e chamada de RETRO14. A retroanálise finalizou quando o programa ainda apresentava erro admissível para o ajuste entre as bacias medidas e calculados superior a 5%.

Figura 28: RETRO14 - Retroanálise da Bacia deflectométrica medida no poço de sondagem do SH05 – Não aderência entre camadas



Fonte: Elaborada pela autora

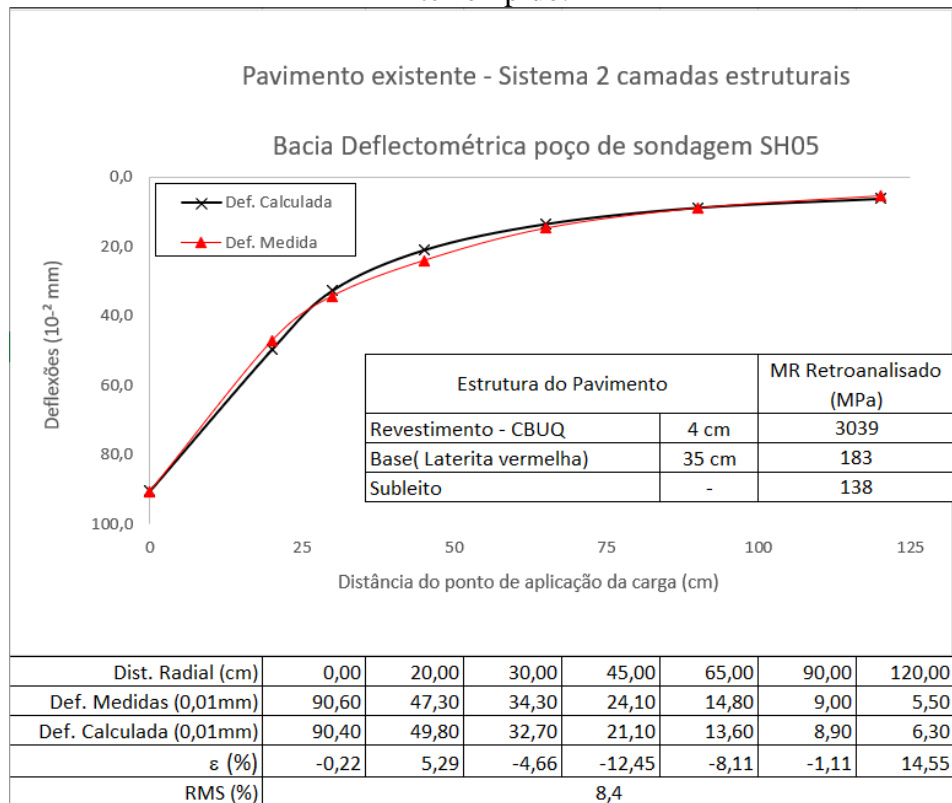
Observando os resultados da retroanálise, observa-se que os valores de módulos retroanalizados são típicos dos materiais constituintes das camadas. Analisando os parâmetros de curvatura da bacia, observa-se que os resultados da RETRO14 corroboram com o parâmetro AREA calculado para a bacia que apresentou valor de 36 indicando que a estrutura do pavimento representa um pavimento flexível fraco, pois as camadas de base e subleito apresentaram valores de módulos retroanalizados semelhantes.

Observa-se também que a bacia apresenta comprometimento do bom desempenho estrutural ( $R_c < 100,0$  m) além de camada asfáltica com baixa resistência ou com pequena espessura apresentando-se muito deformável ( $SCI > 25$ ). Pela Equação 4 foi determinado um módulo de 3.016 MPa que corrobora com o módulo médio apresentado pelas 85 bacias (Tabela 18), porém discorda do módulo retroanalizados na RETRO14.

Buscando encontrar melhores valores de módulos mais próximos do apresentado pela Equação 4 e pela média das 85 bacias, realizou-se outra retroanálise, denominada RETRO15, onde foi considerado os mesmos parâmetros da RETRO14 e interrompendo o processo quando a camada de revestimento apresentou valor de MR próximo ao valor obtido pela equação (3.016 MPa) buscando manter o valor de RMS inferior a 10%.

Na Figura 29, a seguir, onde está representado o resultado da retroanálise após ser interrompido o processo, onde pode-se observar que foi possível obter módulo de resiliência próximo aos valores apresentados pela equação e pela média das 85 bacias para a camada de revestimento, onde o processo foi interrompido pouco antes do próprio programa obter o erro mínimo possível, visto que a RETRO15 apresentou o mesmo valor de RMS que foi apresentado na RETRO14. Já nas demais camadas (base e subleito) percebe-se que os valores apresentados se diferem um pouco dos valores apresentados pela média das 85 bacias.

Figura 29: RETRO15 - Retroanálise da Bacia deflectométrica medida no ponto de abertura do poço de sondagem do SH05 – Condição de não aderência entre as camadas – Processo interrompido.



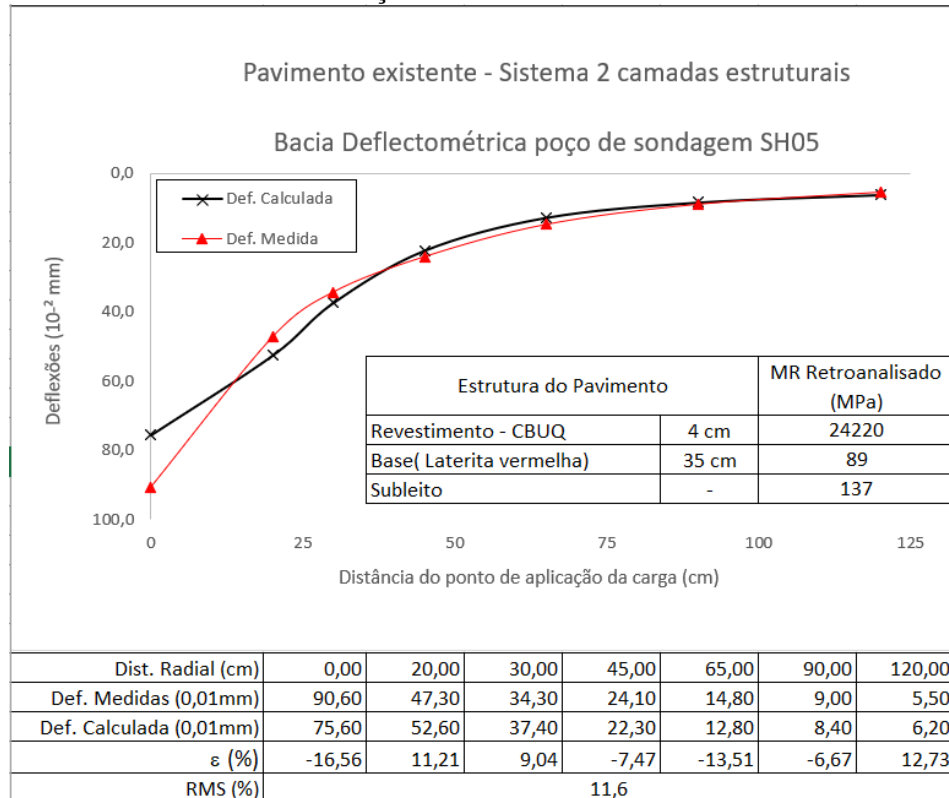
Fonte: Elaborada pela autora

Devido a significativa interferência que a condição de aderência entre as camadas pode causar nos resultados da retroanálise, realizou-se outra retroanálise (RETRO16) onde foi realizado o mesmo procedimento e considerando os mesmos parâmetros da RETRO14, no entanto passando a considerar aderência entre as camadas e deixando o processo perdurar até que encontre o RMS possível, sem que seja feita nenhuma interrupção.

Finalizada o processo de retroanálise, pode-se observar na Figura 30, que quando considerado aderência entre as camadas, a bacia apresentou valores de módulos retroanalizados para a camada de revestimento fora dos limites de módulos típicos dos materiais que constituem

as camadas do pavimento, além disso, a retroanálise finalizou quando o erro RMS ainda estava superior a 10%.

Figura 30: RETRO16 - Retroanálise da Bacia deflectométrica medida no ponto de sondagem do SH05 – Condição de aderência entre as camadas

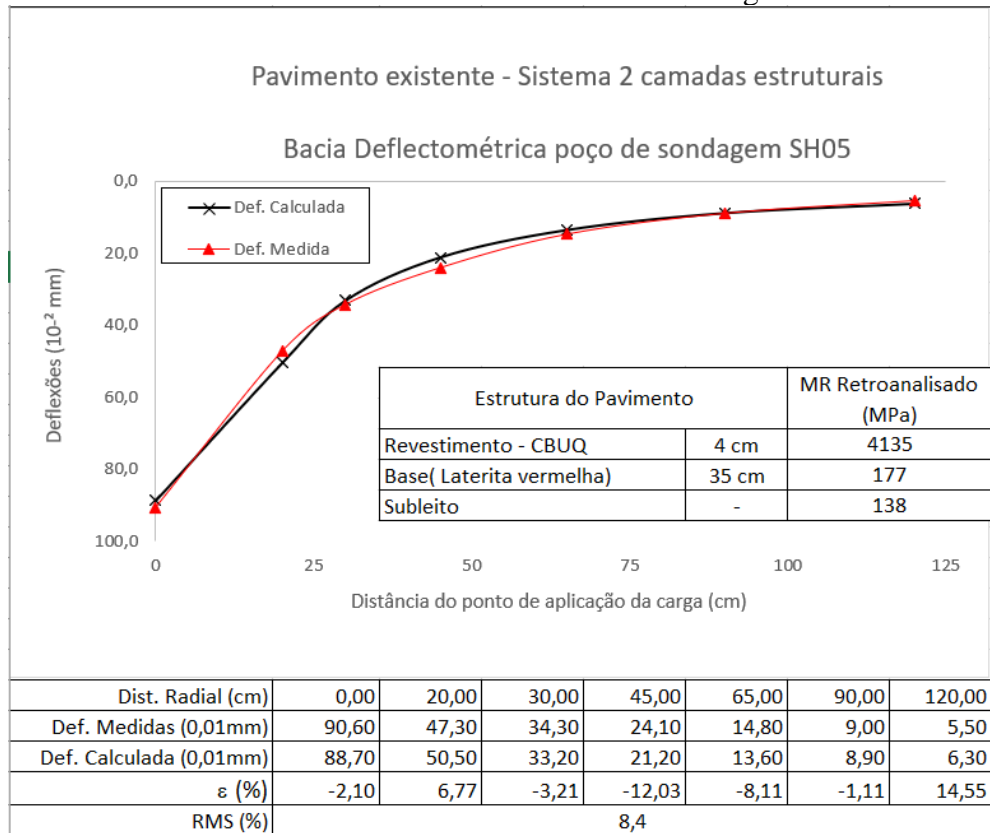


Fonte: Elaborada pela autora

Realizou-se outra retroanálise (RETRO17) considerando os mesmos parâmetros usados na RETRO14: sistema de 2 camadas estruturais; condição de não aderência entre as camadas e programa livre para realizar o processo de retroanálise até que seja encontrado o menor RMS possível sem que seja feita interrupção do processo. Visto que os valores dos módulos retroanalizados para a camada de base encontram-se muito próximos, fixou o módulo da camada de base com o dado da RETRO14 (MR=177 MPa).

Na Figura 31, a seguir é apresentado os resultados da RETRO17 onde observa-se que ao fixar o módulo da camada de base, as demais camadas apresentaram valores de módulos semelhantes ao da RETRO14 além de apresentar também o mesmo erro RMS, visto que não houve quase alteração nas condições de contorno.

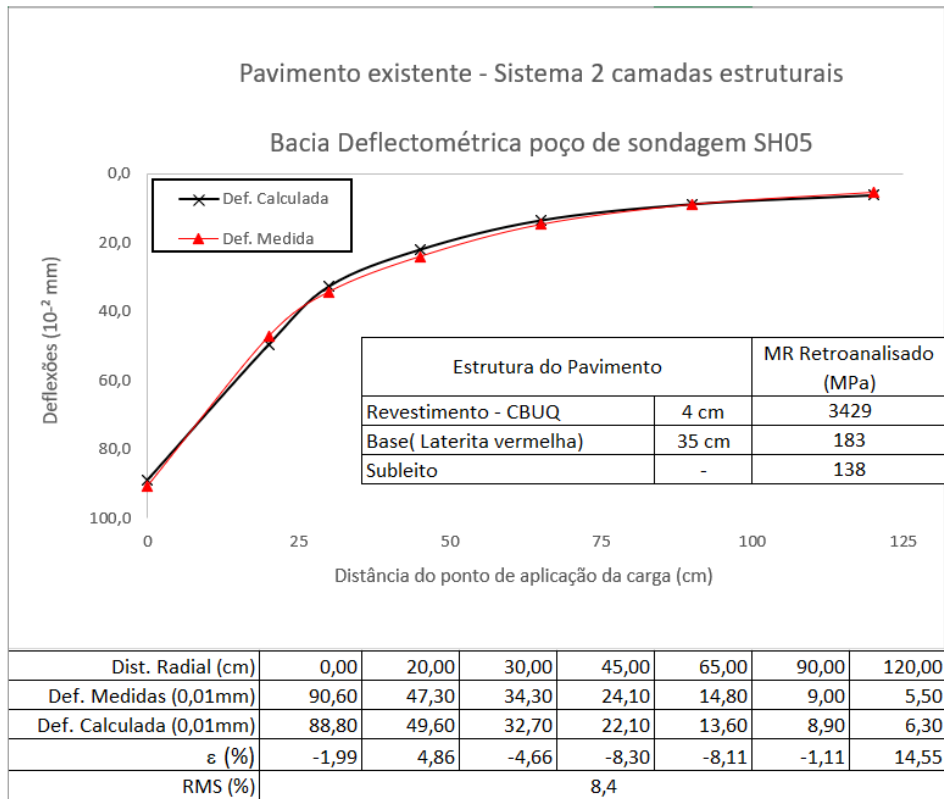
Figura 31: RETRO17 - Retroanálise da Bacia deflectométrica medida no ponto de sondagem do SH05 – Não aderência entre as camadas com MRbase congelado dado RETRO14



Fonte: Elaborada pela autora

Realizou-se uma última retroanálise (RETRO18) onde foi, novamente, considerado os mesmos parâmetros da RETRO14: sistema de 2 camadas estruturais, condição de não aderência entre as camadas e deixou o programa livre para realizar o processo de retroanálise até que seja encontrado o menor RMS possível. Na RETRO18 foi congelado os módulos da camada de base e subleito, porém dessa vez tomou como referência a RETRO15 (MRbase= 187, MRsubleito= 138), obtendo os resultados apresentados na Figura 32.

Figura 32: RETRO18 - Retroanálise da Bacia deflectométrica medida no ponto de sondagem do SH05 – Não aderência entre as camadas com MRbase MRsubleito congelado dado RETRO15



Fonte: Elaborada pela autora

Analisando os resultados da RETRO18 percebe-se que ao fixar os valores dos módulos das camadas de base e subleito da RETRO15 houve uma pequena variação no módulo retroanalizado para a camada de revestimento apresentando-se mais próximo do módulo da média das 85 bacias.

Na Tabela 21, a seguir está apresentado o resumo dos módulos retroanalizados a partir da bacia medida no ponto do poço de sondagem do SH05 tendo destacado com “\*” as camadas cujo módulos iniciais foram congelados.



Tabela 21: Módulos retroanalizados (MPa) a partir da bacia medida no ponto de abertura do poço de sondagem do SH05

<b>Retroanálise</b>	<b>Revestimento</b>	<b>Base</b>	<b>Subleito</b>	<b>Aderência</b>	<b>RMS (%)</b>
<b>RETRO14</b>	4.176	177	138	Não aderido	8,4
<b>RETRO15</b>	3.039	183	138	Não aderido	8,4
<b>RETRO16</b>	24.220	88	137	Aderido	11,6
<b>RETRO17</b>	4.135	177*	138	Não aderido	8,4
<b>RETRO18</b>	3.429	183**	138**	Não aderido	8,4

\*Módulos congelados da RETRO14

\*\*Módulos congelados da RETRO15

Fonte: Elaborada pela autora

Após todas as análises realizadas, visto que não houve variação dos módulos retroanalizados para as camadas de base e subleito, foi determinado que os valores dos módulos retroanalizados da RETRO18 apresentaram-se mais coerentes para análise e assim serem inseridos no *software* MeDiNa para dimensionamento da camada de reforço do pavimento, mesmo apresentando um RMS maior que 5%, visto que os resultados de MR retroanalizados na RETRO18 para a camada de revestimento apresenta-se mais próximo com o valor de Módulo Retroanalizado a partir das 85 bacias do SH05 além de ser também semelhante ao obtido pela Equação 4.

#### 4.2 Dimensionamento da camada de reforço

Findada as retroanálises da bacia média e da bacia medida no exato ponto de abertura do poço de sondagem dos segmentos SH02 e SH05 foram separados os valores dos módulos retroanalizados das camadas existentes das estruturas analisadas, lembrando que a condição de não aderência entre as camadas foi a condição escolhida para análise dos trechos estudados para serem importadas para *software* MeDiNa para dimensionamento da camada de reforço do pavimento. Esses dados estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22: Resumo das retroanálises das bacias de deformação

SH	Camada	Material	Esp. (cm)	MÓDULO RETROANALISADO (MPa)			Coef. Poisson
				Completo*	Bacia média	Sondagem	
2	Revestimento	Concreto asfáltico	5	2.408	2.406	-	0,30
	Base	Laterita amarela	22	378	468	-	0,35
	Sub-base	Seixo silte amarelo	20	512	690	-	0,35
	Subleito	Silte amarelo	-	276	259	-	0,40
5	Revestimento	Concreto asfáltico	4	3.363	4.375	3.429	0,30
	Base	Laterita vermelha	35	321	300	183	0,35
	Subleito	Silte amarelo argiloso	-	306	268	138	0,40

Fonte: Elaborada pela autora

Ressalta-se que para o segmento SH2, das 272 bacias que compõem o segmento, foram analisadas apenas 32 bacias, pois apenas elas apresentaram RMS admissível ( $RMS < 10\%$ ) e MR condizentes aos valores típicos de matérias constituintes dessas camadas. Das retroanálises da bacia média do segmento foi escolhida a RETRO2 para o dimensionamento da camada de reforço pois apresentou valores de MR mais semelhantes à média das 32 bacias. Das retroanálises da bacia medida no exato ponto onde foi feita a abertura do poço de sondagem não foi possível definir uma retroanálise para dimensionamento da camada de reforço pois das 3 retroanálises realizadas nenhum apresentou valores típicos dos materiais das camadas ou apresentaram RMS muito alto.

Já no segmento SH05, foram analisadas 85 das 177 bacias que compõem todo o segmento, pois apenas elas apresentaram RMS menor que 10% e valores de módulos retroanalizados condizentes com os valores típicos dos materiais que constituem as camadas do pavimento. Para a bacia de deflexão média do segmento foi escolhida a RETRO13 pois apresentou valores de MR mais coerentes e das retroanálises da bacia medida no exato ponto de abertura do poço de sondagem foi escolhida a RETRO18 pois apresentou módulos retroanalizados para a camada de revestimento próximo ao da média das 85 bacias.

Segundo o Manual de Utilização do método de dimensionamento MeDiNa, apresentado pelo DNIT, o MeDiNa é um *software* que realiza a verificação e dimensionamento de estruturas de pavimento mecanístico-empírico por meio da rotina AEMC de análise de camadas elásticas de múltiplas camadas. Nele é possível fazer o dimensionamento de pavimentos novos e reforços de estruturas já existentes. Para a realização do dimensionamento de reforço do pavimento é necessário mudar a configuração MODO de “Pavimento novo (Nível A)” para “Projeto de

reforço”. Na opção de reforço, o programa fornece ao usuário duas opções: Dados novos, onde o projetista insere os dados do pavimento e importar retroanálise, onde o programa importa o arquivo das bacias deflectométricas do *software* BackMeDiNa.

Após a importação dos dados das bacias deflectométricas do BackMeDiNa, é necessário o preenchimento dos dados de tráfego e características da camada asfáltica existente: Número N; Taxa de crescimento; Período de projeto; espessura de fresagem da camada asfáltica; área trincada; IRI, deflexão característica; idade do pavimento. Em seguida, pode-se realizar a análise da estrutura, onde é verificado os critérios de área trincada e deformação permanente sem alterar a espessura da camada, ou realizar dimensionamento da camada de reforço, onde o programa realizará análises alterando a espessura da camada até definir qual a melhor espessura para o máximo de área trincada permitida.

No Quadro 10, a seguir está apresentado os dados de tráfego e características da camada asfáltica existente dos segmentos SH02 e SH05 a serem inseridos no MeDiNa para dimensionamento da camada de reforço.

Quadro 10: Dados necessários para dimensionamento de camada de reforço - MeDiNa

SH	Dados de Tráfego			Características da camada asfáltica existente				
	Taxa de Crescimento (%)	Período de projeto	Número N	Dc (0,01 mm)	Espessura de fresagem (cm)	Área trincada (%)	IRI (%)	Idade do pavimento (anos)
2	3,00	10,00	1,11*10 <sup>7</sup>	65,4	3,0	46	3,2	30
5	3,00	10,00	1,40*10 <sup>7</sup>	70,8	3,0	80	4	30

Fonte: Elaborada pela autora

Com os dados apresentados acima, no Quadro 10, foi realizado a análise da estrutura proposta pelo Projeto Executivo de Engenharia para Restauração da Rodovia – CREMA 2ª ETAPA e o dimensionamento da camada de reforço dos segmentos SH02 e SH05 considerando as retroanálises apresentadas na Tabela 22 e os resultados dos dimensionamentos estão apresentados a seguir:

#### 4.2.1 Segmento Homogêneo SH02 – 32 bacias deflectométricas

Para o dimensionamento da camada de reforço do segmento SH2 pelo método MeDiNa considerando as 32 bacias deflectométricas foi, primeiramente alterado a configura MODO para projeto de reforço e feita a importação do trecho do BackMeDiNa para o MeDiNa preenchendo os dados de tráfego e características do pavimento (Quadro 10), fazendo a análise da estrutura

inserida no programa considerando a solução de reforço proposta pelo Projeto Executivo de Engenharia para Restauração de Rodovia - CREMA 2ª Etapa apresentada na Tabela 13.

Findada a análise da estrutura, o *software* alertou que o tráfego é elevado para a estrutura e a área trincada estimada no pavimento no fim de período de 10 anos é de 32,5% ultrapassando o limite de 30% e atingindo a ruptura estrutural com o decorrer de 9 anos e 6 meses anos atendendo o tráfego de  $N=1,05E+7$ , como apresentado na Tabela 23.

Tabela 23: Análise da estrutura proposta pelo Método PRO-011 – 32 bacias do SH02

Camadas	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Área trincada fim de período (%)
Camada de Reforço – Concreto Asfáltico	8,0	10.492	0,30	32,5
Camada asfáltica existente	2,0	2.408	0,30	
Base existente	22,0	378	0,35	
Sub-base existente	20,0	512	0,35	
Subleito existente	-	276	0,45	

Fonte: Elaborada pela autora

Como a fresagem do pavimento existente não retirou toda a camada asfáltica e a área trincada do pavimento existente é de 46% tornou-se indispensável considerar a adoção de medidas para evitar a reflexão de trincas. Dito isso, adicionou uma camada anti-reflexão de trincas do tipo Tratamento Superficial Duplo (TSD) e realizou o dimensionamento da estrutura para determinar a espessura necessária da camada de reforço para atender às solicitações do pavimento, obtendo os resultados apresentado na Tabela 24.

Tabela 24: Dimensionamento da camada de reforço - 32 bacias do SH02

Camadas	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Área trincada fim de período (%)
Camada de Reforço – Concreto Asfáltico CLASSE 4	8,5	10.492	0,30	29,2
Camada Anti-reflexão de trincas (TSD)	2,0	1.000	0,25	
Camada asfáltica existente	2,0	2.408	0,30	
Base existente	22,0	378	0,35	
Sub-base existente	20,0	512	0,35	
Subleito existente	-	276	0,45	

Fonte: Elaborada pela autora

#### 4.2.2 Segmento Homogêneo SH02 – Bacia média (RETRO2)

Para o dimensionamento da camada de reforço do segmento SH02 considerando a bacia média de deflexão realizou-se a primeiramente a análise da estrutura do pavimento seguindo o mesmo procedimento realizado para as 32 bacias do segmento SH02 inserindo os dados de tráfego e características do pavimento existente apresentados no Quadro 10 e alterando a espessura da camada de revestimento conforme a proposta de solução baseando-se na norma do DNER PRO 011/79 (Tabela 13).

Ao finalizar a análise da estrutura, o *software* informou que a área trincada estimada do pavimento no fim do período de projeto de 10 anos é de 30,3%, indicando que a estrutura proposta pelo Método PRO-011 suporta o tráfego previsto no projeto, como apresentado na Tabela 25.

Tabela 25: Análise da estrutura proposta pelo Método PRO-011 – bacia média do SH02 (RETRO2)

Camadas	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Área trincada fim de período (%)
Camada de Reforço – Concreto Asfáltico	8,0	10.492	0,30	30,3
Camada asfáltica existente	2,0	2.406	0,30	
Base existente	22,0	468	0,35	
Sub-base existente	20,0	690	0,35	
Subleito existente	-	259	0,45	

Fonte: Elaborada pela autora

No entanto, devido a existência de uma parcela da camada asfáltica existente que restou após a fresagem e ao elevado grau de deterioração dessa camada (área trincada de 46%), foi adotado no dimensionamento da camada de reforço uma nova camada na estrutura do tipo Tratamento Superficial Duplo para evitar a reflexão de trincas, adotando como material para a camada de reforço Concreto Asfáltico do tipo CLASSE 4 devido ao elevado tráfego do segmento. Ao realizar o dimensionamento da estrutura foi obtido espessura para camada de reforço inferior à proposta pelo método PRO-011, como apresentado na Tabela 26.

Tabela 26: Dimensionamento da camada de reforço - Bacia média do SH02 (RETRO2)

Camadas	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Área trincada fim de período (%)
Camada de Reforço – Concreto Asfáltico CLASSE 4	7,5	10.492	0,30	29,8
Camada Anti-reflexão de trincas (TSD)	2,0	1.000	0,25	
Camada asfáltica existente	2,0	2.406	0,30	
Base existente	22,0	468	0,35	
Sub-base existente	20,0	690	0,35	
Subleito existente	-	259	0,45	

Fonte: Elaborada pela autora

#### 4.2.3 Segmento Homogêneo SH05 – 85 Bacias deflectométricas

Para realizar o dimensionamento da camada de reforço das 85 bacias referentes ao segmento SH5 foi primeiramente analisada a estrutura proposta pelo método PRO-011 importando do BackMeDiNa para o *software* MeDiNa o arquivo das bacias deflectométricas retroanalisadas, em seguida foi preenchido os dados de tráfego e características do pavimento existente apresentados no Quadro 10 alterando a espessura para 6cm de reforço mais 3cm da recomposição da fresagem, totalizando 9 cm de camada asfáltica.

Findando a análise da estrutura, o *software* emitiu um alerta de que o tráfego é elevado para a estrutura analisada apresentando ruptura com decorrer de 8 anos e meio e a área trincada estimada do pavimento no fim do período de 40,8%, muito maior do valor máximo de 30% suportando o tráfego de  $1,164E+7$  solicitações de eixo padrão, apresentado na Tabela 27.

Tabela 27: Análise da estrutura proposta pelo Método PRO-011 – 85 bacias do SH05

Camadas	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Área trincada fim de período (%)
Camada de Reforço – Concreto Asfáltico	9,0	10.492	0,30	40,8
Camada asfáltica existente	1,0	3.363	0,30	
Base existente	35,0	321	0,35	
Subleito existente	-	306	0,45	

Fonte: Elaborada pela autora

Assim como o SH02, o SH05 também após a fresagem apresentou uma parcela de camada asfáltica do pavimento existente. Sendo assim, no dimensionamento da camada de reforço foi adotada uma camada anti-reflexiva de trincas do tipo Tratamento Superficial Duplo (TSD) visto que a camada remanescente do pavimento apresentou área trincada de 80% significativamente maior do que o limite máximo de 30%. Dito isso, foi realizado o dimensionamento da camada de revestimento do pavimento obtendo os resultados apresentados na Tabela 28, onde observa-se que a espessura obtida, mesmo com a camada anti-reflexão de trincas, é superior à prevista no método PRO-011.

Tabela 28: Dimensionamento da camada de reforço – 85 bacias do SH05

<b>Camadas</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Módulo de Resiliência (MPa)</b>	<b>Coefficiente de Poisson</b>	<b>Área trincada fim de período (%)</b>
Camada de Reforço – Concreto Asfáltico CLASSE 4	10,5	10.492	0,30	29,5
Camada anti-reflexão de trincas (TSD)	2,0	1.000	0,25	
Camada asfáltica existente	1,0	3.363	0,30	
Base existente	35,0	321	0,35	
Subleito existente	-	306	0,45	

Fonte: Elaborada pela autora

#### 4.2.4 Segmento Homogêneo SH05 – Bacia média (RETRO13)

Para o dimensionamento da camada de reforço do segmento SH05 considerando a bacia média, primeiramente analisou-se a estrutura do pavimento proposta pelo Projeto Executivo de Engenharia para Restauração de Rodovia - CREMA 2ª Etapa seguindo os mesmos procedimentos realizados para as 85 bacias, onde o software apresentou um alerta onde informava que o tráfego é elevado para a estrutura atingindo a ruptura no decorrer de 8 anos e meio atendendo o tráfego de 1,162E+4 solicitações de eixo padrão e a área trincada estimada do pavimento no fim do período de projeto é de 42,4%, como apresentado na Tabela 29.

Tabela 29: Análise da estrutura proposta pelo Método PRO-011 – Bacia média do SH05 (RETRO13)

<b>Camadas</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Módulo de Resiliência (MPa)</b>	<b>Coefficiente de Poisson</b>	<b>Área trincada fim de período (%)</b>
Camada de Reforço – Concreto Asfáltico	9,0	10.492	0,30	42,4
Camada asfáltica existente	1,0	4.375	0,30	
Base existente	35,0	300	0,35	
Subleito existente	-	268	0,45	

Fonte: Elaborada pela autora

Ressalta-se que a área trincada do pavimento é existente remanescente após a fresagem é de 80%, significativamente superior ao limite de 30% sendo necessário a adoção de medidas para evitar a reflexão de trincas. Dito isso foi inserida uma nova camada no pavimento do tipo TSD e realizou o dimensionamento da estrutura obtendo a espessura da camada de reforço de 10,9 cm e adotando 11 cm, como apresentado na Tabela 30.

Tabela 30: Dimensionamento da camada de reforço – Bacia média do SH05 (RETRO13)

<b>Camadas</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Módulo de Resiliência (MPa)</b>	<b>Coefficiente de Poisson</b>	<b>Área trincada fim de período (%)</b>
Camada de Reforço – Concreto Asfáltico CLASSE 4	11,0	10.492	0,30	28,4
Camada anti-reflexão de trincas (TSD)	2,0	1.000	0,25	
Camada asfáltica existente	1,0	4.375	0,30	
Base existente	35,0	300	0,35	
Subleito existente	-	268	0,45	

Fonte: Elaborada pela autora

#### 4.2.5 Segmento Homogêneo SH05 – Bacia medida no exato ponto de abertura do poço de sondagem (RETRO18)

Para o dimensionamento da camada de reforço do segmento SH5 considerando a bacia medida no ponto exato da abertura de sondagem foi feito primeiramente a análise da estrutura considerando a camada de reforço proposta pelo método do DNER PRO 011/79 apresentada pelo Projeto Executivo de Engenharia para Restauração de Rodovia - CREMA 2ª Etapa (Tabela 13) inserindo os dados de tráfego e características do pavimento existente (Quadro 10).



Ao fim da análise da estrutura proposta o *software* emitiu um alerta dizendo que o tráfego é elevado para a estrutura apresentando ruptura no decorrer de 7 anos atendendo o tráfego de 9,348E+6 solicitações de eixo padrão e a área trincada estimada do pavimento para o fim do período de projeto é de 53,1%, valor muito superior ao limite de 30%, como apresentado na Tabela 31.

Tabela 31: Análise da estrutura proposta pelo Método PRO-011 – Bacia do poço de sondagem do SH05 (RETRO18)

Camadas	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Área trincada fim de período (%)
Camada de Reforço – Concreto Asfáltico	9,0	10.492	0,30	53,1
Camada asfáltica existente	1,0	3.429	0,30	
Base existente	35,0	181	0,35	
Subleito existente	-	138	0,45	

Fonte: Elaborada pela autora

Após a fresagem de 3cm da camada do pavimento existente restou ainda uma camada de 1cm do pavimento com área trincada de 80% que pode vir a deteriorar a camada de revestimento sendo necessário adotar uma camada para evitar a reflexão dessas trincas. Dito isso, foi inserida uma nova camada na estrutura do tipo TSD para evitar reflexão de trincas e adotando como material para a camada de reforço Concreto asfáltico do tipo CLASSE 4 fornecido pelo *software* MeDiNa e realizou o dimensionamento da camada de reforço obtendo os resultados apresentados na Tabela 32.

Tabela 32: Dimensionamento da camada de reforço – Bacia medida no ponto de abertura do poço de sondagem do SH05 (RETRO18)

Camadas	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Área trincada fim de período (%)
Camada de Reforço – Concreto asfáltico CLASSE 4	13,0	10.492	0,30	28,7
Camada anti-reflexão de trincas (TSD)	2,0	1.000	0,25	
Camada asfáltica existente	1,0	3.429	0,30	
Base existente	35,0	183	0,35	
Subleito existente	-	138	0,45	

Fonte: Elaborada pela autora

Finalizado o dimensionamento das cinco retroanálises escolhidas dos segmentos SH02 e SH05, comparou-se as propostas fornecidas pelo Projeto Executivo de Engenharia para Restauração de Rodovia - CREMA 2ª Etapa obtidas a partir da metodologia proposta pelo DNER PRO 011/79 e os resultados obtidos a partir da análise mecanística-empírica realizada pelo *software* MeDiNa para os dois segmentos estudados, SH02 e SH05. Na Tabela 33 está apresentado o resumo dos dimensionamentos obtidos a partir do método PRO 011 e pelo método MeDiNa para os segmentos. Destaca-se que é de suma importância que em campo a proposta de dimensionamento sejam seguidas corretamente, principalmente as características da mistura asfáltica da camada de reforço para que as análises realizadas sejam corretas.

Tabela 33: Resumo das espessuras calculadas de reforço para os segmentos SH02 e SH05

SH	Camadas	Material	Espessura (cm)			
			PRO-011	MeDiNa		
			Dados de projeto	Segmento Completo	Bacia Média	Bacia - Sondagem
2	Camada de Reforço	Concreto asfáltico	8,0	8,5	7,5	-
	Camada anti-reflexão de trincas	Tratamento superficial duplo	-	2,0	2,0	-
	Camada asfáltica remanescente do pavimento existente	Concreto asfáltico	2,0	2,0	2,0	-
5	Camada de Reforço	Concreto asfáltico	9,0	10,5	11,0	13,0
	Camada anti-reflexão de trincas	Tratamento superficial duplo	-	2,0	2,0	2,0
	Camada asfáltica remanescente do pavimento existente	Concreto asfáltico	1,0	1,0	1,0	1,0

Fonte: Elaborada pela autora

Analisando os dados apresentado na Tabela 33, observa-se que no SH02 a proposta apresentada pelo Projeto Executivo de Engenharia para Restauração da Rodovia – CREMA 2ª Etapa atende as solicitações do pavimento no entanto, mesmo com a adoção de uma camada asfáltica de 8cm sobre o pavimento pode ocorrer a deterioração do pavimento antes do decorrer dos 10 anos de projeto devido a parcela de camada remanescente do pavimento após a fresagem apresentar um elevado grau de deterioração. Já no SH05 observa-se que os dimensionamentos da camada de reforço realizado pelo método MeDiNa apresentaram espessura muito superior a camada obtida pelo método PRO-011, inclusive para a bacia média do segmento que foi usada como referência para o dimensionamento da camada de reforço pelo método PRO-011.

Ressalta-se que quando foi analisada a estrutura da solução proposta pelo método PRO-011 para o segmento SH05 (Tabela 13), o *software* acionou um alerta avisando que o tráfego era elevado para a estrutura proposta no projeto original atingindo a ruptura antes do fim do período de projeto.

Na Tabela 34 a seguir está apresentada o tráfego suportado pela estrutura e o período estimado para atingir a ruptura estrutural, considerando todas as bacias retroanalisadas no presente trabalho, e na Figura 33 está representado graficamente o grau de área trincada do pavimento no decorrer do período de projeto.

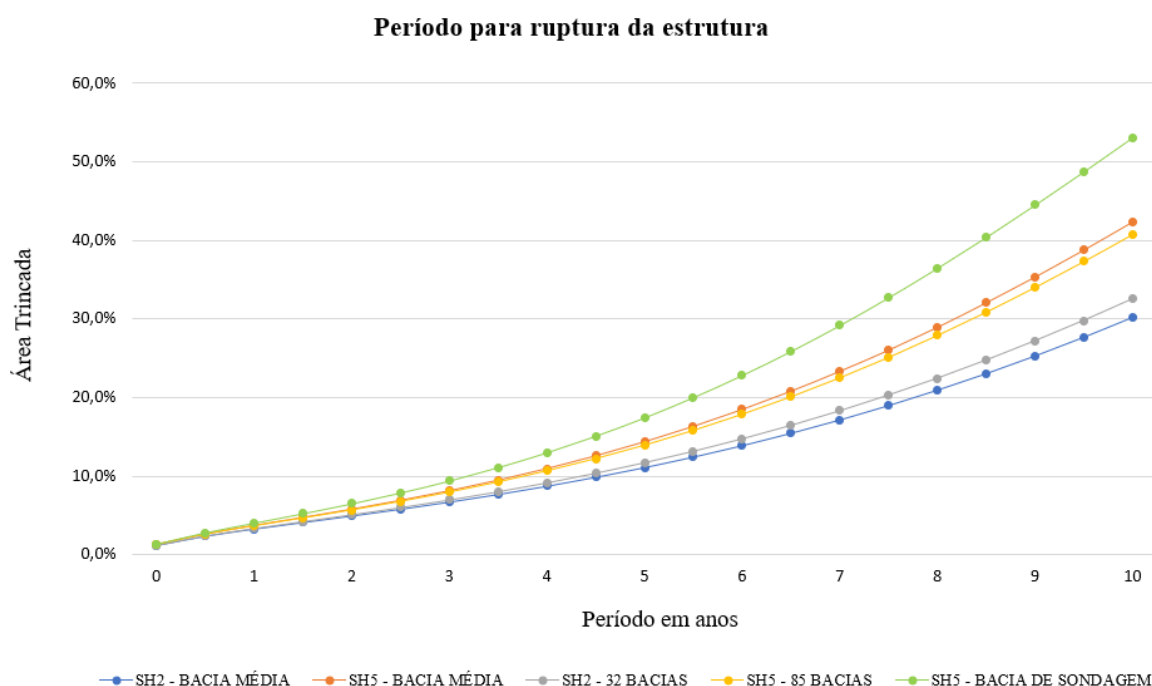
Tabela 34: Tráfego suportado pelas estruturas propostas no projeto de restauração da rodovia para os segmentos SH2 e SH5.

<b>SH</b>	<b>Bacia retroanalisada</b>	<b>Tráfego suportado</b>	<b>Período (meses)</b>
2	Segmento completo - 32 bacias	1,050E+07	114
	Bacia média	1,114E+06	120
5	Segmento completo - 85 bacias	1,162E+07	102
	Bacia média	1,162E+07	102
	Bacia de sondagem	9,348E+06	84

Fonte: Elaborada pela autora

Analisando a Tabela 33 e a Figura 33 a seguir, observa-se que considerando a bacia média, a qual foi usada como parâmetro para o dimensionamento da camada de reforço pelo método PRO-011, observa-se que pelo método MeDiNa o segmento SH05 apresentou camada de reforço 22,2% superior ao método PRO-011 e no segmento SH02, a proposta apresentada pelo método PRO-011 atende as solicitações do trecho enquanto que pelo método MeDiNa o dimensionamento apresentou uma espessura menor além de considerar adoção de medidas para evitar a reflexão de trincas provenientes da camada remanescente do pavimento deteriorado. Observa-se também que o SH05 suporta um tráfego inferior ao SH02 atingindo a ruptura num período de tempo mais curto visto que o tráfego de projeto é superior ao do SH02.

Figura 33: Período previsto para ruptura da estrutura proposta pelo método PRO-011 analisa no *software* MeDiNa



Fonte: Elaborada pela autora

Em termos de projeto observa-se que o reforço obtido pelo método MeDiNa garante a vida útil mínima para o período de projeto enquanto que o reforço apresentado pelo método empírico de dimensionamento PRO-011 apresenta-se mais econômico, no entanto, de acordo com o MeDiNa, a solução proposta não é suficiente para atender ao tráfego total na vida útil, apresentando precoce comprometimento da capacidade portante do pavimento.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal o estudo da retroanálise de bacias deflectométricas, de uma Rodovia Federal, medidas em campo com o equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD) para dimensionamento de camada de reforço de pavimento asfáltico a partir do método mecanístico-empírico (MeDiNa) comparando com a proposta de intervenção apresentada pelo Projeto Executivo de restauração da rodovia a partir da metodologia empírica apresentada pela norma do DNER PRO-011/79.

O pavimento, como qualquer estrutura da engenharia, precisa de projetos de reforço visto que o sistema estrutural de um pavimento é caracterizado por sofrer rupturas devido às cargas externas que se acumulam ao longo de sua vida útil. No entanto, muitos pavimentos não atingem o tempo de vida útil desejado para o qual foram dimensionados, tais danos, são relacionados à capacidade de carga do pavimento. Hoje o tráfego é diferente em termos de volume, tipos de veículos, tipos de pneus, velocidade, etc, em relação anos atrás quando os métodos de projeto de reforço, atualmente ainda empregados, foram estabelecidos.

E não foi apenas o tráfego que modificou com o tempo, houve evolução também na forma de avaliar os materiais e os pavimentos em uso. Sabe-se que as medidas de deflexão não se restringem mais à deflexão máxima, com a modernização dos equipamentos de medidas deflectométricas, como é o caso do equipamento FWD, tem-se à disposição as bacias de deflexão que permitem um diagnóstico muito mais detalhado da condição estrutural do pavimento e em consequência um projeto de restauração mais adequado.

Diante do exposto, os resultados das análises dos segmentos estudados permitiram obter de modo geral as seguintes conclusões da avaliação comparativa entre as soluções propostas pelo método tradicional e pelo *software* MeDiNa e o *software* de retroanálise BackMeDiNa.

- Com relação as retroanálises e o uso do BackMeDiNa:

A bacia média dos segmentos apresentado pelo Projeto Executivo para Restauração da Rodovia não representa o segmento homogêneo, pois na retroanálise das bacias percebeu-se que as bacias médias dos segmentos escolhidos para estudo eram muito distintas das bacias medidas no ponto de abertura do poço de sondagem resultando em espessuras de camada de reforço obtidas pelo método de dimensionamento MeDiNa distintas.

Determinar os módulos das camadas de uma estrutura de pavimento existente por meio de uma retroanálise com o mesmo programa de cálculo de tensões e deformações que será depois utilizado no dimensionamento do reforço torna mais consistente as análises. Isso porque, dentre os diversos fatores que podem influenciar os resultados de um dimensionamento mecânico de um reforço, e que está presente na fase do processo de retroanálise é a condição de aderência entre as camadas. Uma vez que considerar se haverá cisalhamento na interface entre camadas ou se não haverá interfere significativamente nos valores finais de módulo de resiliência no processo de retroanálise.

- Com relação Dimensionamento da camada de reforço com o MeDiNa:

Na análise mecanicista, realizada pelo programa MeDiNa, da solução proposta pelo catálogo de soluções do projeto de restauração da rodovia foi indicado que a estrutura apresentada não suporta o tráfego definido para o período de projeto no SH05 onde considerando a bacia média do segmento a proposta apresentada atende 83% do tráfego total, que conseqüentemente resultou em camadas de reforço dimensionada pelo método MeDiNa com espessuras superiores as espessuras proposta pelo catálogo de soluções. Isto porque inúmeras são as deficiências dos métodos de dimensionamento atuais do DNIT, que em geral levam ao subdimensionamento da camada de reforço, podendo citar a não consideração dos parâmetros resilientes das camadas granulares e a caracterização da mistura asfáltica para o dimensionamento da nova camada de reforço do pavimento, por exemplo.

O método mecânico-empírico (MeDiNa) apresenta maior eficiência na obtenção de soluções para restauração de pavimentos flexíveis em relação ao método empírico PRO 011, visto que o método empírico é orientado pela deflexão máxima da bacia enquanto que o MeDiNa analisa toda a estrutura do pavimento, representando a bacia deflectométrica a partir dos módulos retroanalizados das camadas, além de focar na área trincada prevista para o fim de projeto e curva de fadiga do material, apresentando mais detalhes sobre o pavimento ao projetista. E ainda, propondo soluções mais eficientes, como é o caso de uma camada anti-reflexão de trinca após uma realização de uma fresagem.

Fazer uso de um método de base mais racional, como é o caso do MeDiNa, que traz na sua metodologia um método mecânico-empírico, e que dimensiona um pavimento com capacidade estrutural suficiente para a demanda de tráfego. Além disso, traz a possibilidade de análise de vários tipos de soluções que podem satisfazer os critérios selecionados previamente no conjunto de materiais, com suas características e espessuras. O programa MeDiNa facilita

as várias análises e gera as memórias de cálculo, mas não substitui o projetista: permite maior liberdade de projetar as estruturas, usar combinações menos rígidas de materiais, inovar nas concepções, etc.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Buscando uma continuidade e complementação da pesquisa, sugerem-se as seguintes ideias:

- Realizar estudo de retroanálise com dados de levantamento defletoométrico obtido com a Viga Benkelman
- Comparar os resultados de módulo retroanalizados pelo BackMeDiNa com outros *softwares* de retroanálise.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERNAZ, C. A. – Método Simplificado de Retroanálise de Módulo de Resiliência de Pavimentos Flexíveis a partir da Bacia de Deflexão – Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro/RJ. 1997

ALBERNAZ, C. A. V.; MOTTA, L. M. G. D.; MEDINA, J. D. Retroanálise: Uma útil ferramenta na avaliação estrutural de pavimentos. In: **29ª RAPv - REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**. Cuiabá. 1995.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras - Abeda, 2008.

CNT - Confederação Nacional de Transportes. **Anuário CNT do Transporte, 2020**. Disponível em: <PrincipaisDados.pdf (cnt.org.br)> . Acesso em: 10 Dezembro 2021.

DAROUS, J., Estudo Comparativo Entre Sistemas de Cálculo de Tensões e Deformações Utilizados em Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos Novos. - Dissertação de Mestrado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

DNER-ME 024/94. **Método de Ensaio – Pavimento – Determinação das deflexões pela viga Benkelman**. Rio de Janeiro. 1994.

DNER-PRO 011/79. **Procedimento B - Avaliação estrutural dos Pavimentos Flexíveis**. IPR. Rio de Janeiro-RJ. 1979.

DNER-PRO 010/79. **Procedimento A - Avaliação estrutural dos Pavimentos Flexíveis**. IPR. Rio de Janeiro-RJ. 1979.

DNER-PRO 269/94. **Projeto de Restauração de Pavimentos flexíveis e semi-rígidos**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 1994.

DNER-PRO 159/85. **Projeto de Restauração de Pavimentos flexíveis - TECNAPAV**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 1985.

DNER-PRO 273/96. **Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo "Falling Weight Deflectometer (FWD)**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. 1996.

DNIT. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecânico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. IPR. Rio de Janeiro-RJ. 2020.

DNIT. Manual de Restauração de Pavimento Asfálticos. IPR 720. Rio de Janeiro. 2006



FABRÍCIO, J. M.; et. al. Metodologia não destrutiva para avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis através da interpretação das bacias de deformação. In: **23ª RPAv - REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, Florianópolis. 1988.

FRANCO, F.A.C.P., Avaliação dos Modelos de Previsão do Dano de Fadiga em Misturas Asfálticas, In: **Trabalhos técnicos do 17º Encontro de Asfalto**, Rio de Janeiro, p. 100-117. 2004.

FRANCO, F. A. C. P. Manual de Utilização - BackMeDiNa. [S.l.]. 2018

FRANCO, F. A. C. P. – Um Sistema Para Análise Mecânica de Pavimentos Asfálticos – Tese de Mestrado – UFRJ – Rio de Janeiro/RJ.2000

FRANCO, F. A. C. P. – Um Sistema Para Análise Mecânica de Pavimentos Asfálticos – Tese de Doutorado – UFRJ – Rio de Janeiro/RJ. 2007

FONSECA, L. F. S. Análise das soluções de pavimentação do programa CREMA 2ª etapa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. – Dissertação de Mestrado - UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro. 2013.

HERMES, T. B.; ECHEVERRIA, J. A. S.; SPECHT, L. P. Utilização de Material Fresado como Camada de Pavimento em Construção de Faixa Adicional. **ABPv – Revista Pavimentação**, Rio de Janeiro, v. 11, Nº 41, p. 49-64, jul./set. 2016.

JUNIOR, J. G. S. – Aplicação do novo Método de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos a trechos de uma Rodovia Federal – Dissertação de Mestrado – COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro/RJ.2018

KIM, Y. R.;. Use of Falling Weight Deflectometer Multi-Load Data for Pavement Strength Estimation. No. FHWA/NC/2002-006. Department of Civil Engineering North Carolina State University Raleigh. 2002.

LOPES, F. L. – Pavimento Flexível com Revestimento Asfáltico – Avaliação Estrutural a partir dos Parâmetros de Curvatura da Bacia de Deformação – Dissertação de Mestrado – UNICAMP – Campinas/SP. 2012

MACÊDO, J. A. G. Interpretação de ensaios defletoométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis - Tese de Doutorado - - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro-RJ. 1996.

MARQUES, J. R. – Dimensionamento de Reforço mediante Retroanálise de Avaliação Estruturais Não-Destrutivas – Dissertação de Mestrado - EESC/USP – São Carlos/SP. 2002

MEDINA, J. de et al. Utilização de Ensaio Defletométricos e de Laboratório para a Avaliação Estrutural de Pavimentos. In: **28ª RAPv - Reunião Anual de Pavimentação**, v. 1, p. 595-625, 1994.

MEDINA, J. e MOTTA, L.M.G., 2005, Mecânica dos Pavimentos. 2ª Edição, Edição dos autores, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. Mecânica dos Pavimentos. 3. ed. Rio de Janeiro/RJ: Editora Interciência, 2015.

MOTTA, L.M.G., 1991, Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaios de Cargas Repetidas. - Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

NOBREGA, E. S. – Comparação entre Métodos de Retroanálise de Pavimentos Flexíveis – Dissertação de Mestrado – COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro/RJ. 2003

PEREIRA, J. M. B. Um procedimento de retroanálise para pavimentos flexíveis baseado na teoria do ponto inerte e em modelagem matemática - Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo. São Paulo. 2007.

PINTO, S. e MOTTA, L. M. G., Catálogo de curvas de fadiga. Boletim técnico número 16, **ABPv – Revista de Pavimentação**, Rio de Janeiro. 1995.

ROCHA, M. L. - Influência dos módulos de resiliência iniciais no procedimento de retroanálise de pavimentos flexíveis – Dissertação de Mestrado – UFJF – Juiz de Fora/MG. 2020

SILVA, S. A. T.; BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B. Influência da Aderência na Análise de Pavimentos Asfálticos. In: **44º RAPv - Reunião Anual de Pavimentação**. Foz do Iguaçu-PR. 2015.

SOARES, J. B.; SANTOS, H.C. Obtenção de Módulos de Resiliência em Laboratório e por meio de Retroanálise em Rodovias no Estado do Ceará e o efeito no Dimensionamento de Pavimentos. In: **XXIX CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTES DA ANPET**. Ouro Preto-MG. 2015.

THEISEN, K. M. et al. Método de retroanálise de bacias obtidas por carregamento de eixo padrão através do uso de *softwares* adaptados para FWD. In: **Congresso de pesquisa e ensino em transportes, XXIII, 2009**, Vitória.

TRICHÊS, G.; KNABBEN, R.; VILLENA J.; MELO, J. V. S. – Influência do uso de Diferentes Programas Computacionais na Análise Mecanicista Elástica Linear de Estruturas de Pavimento. In: **40ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação**. Rio de Janeiro/RJ. 2010