

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Marcelo Antunes**

**REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTO DE TRECHO DA  
RODOVIA BR - 262/MG: APLICAÇÃO DO MÉTODO DNER-PRO 11/79**

Porto Alegre  
dezembro de 2017

**MARCELO ANTUNES**

**REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTO DE TRECHO DA  
RODOVIA BR - 262/MG: APLICAÇÃO DO MÉTODO DNER-PRO 11/79**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Prof. Dr. Washington P. Núñez**

**Coorientador: Eng<sup>o</sup> MSc Matheus Matuella**

**Relator: Prof. MSc. William Fedrigo**

Porto Alegre

dezembro de 2017

Dedico este trabalho a meu pai, Rógis,  
que dedicou uma parte de sua  
vida para me ver  
engenheiro.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por permitir que eu conclua meu segundo curso de graduação, ampliando minha formação profissional e pessoal. Sinto-me privilegiado por ter frequentado os mesmos bancos escolares onde passaram incontáveis pensadores que há muito tempo vem ganhando o mundo.

Agradeço ao Prof. Dr. Washington P. Núñez, orientador deste trabalho, pela confiança em mim depositada, pelos ensinamentos durante as disciplinas de graduação e pela orientação neste trabalho.

Agradeço a todos os meus professores, que de uma forma ou de outra, cada um à sua maneira, contribuíram para minha formação profissional.

Agradeço a todos os colegas, especialmente ao Émerson de Bem Steyer, à Fernanda Tweedie de Mattos e ao Maro de Mello, que extrapolaram as relações estudantis e hoje ocupam um lugar privilegiado em meu cercado de amigos.

Agradeço à minha mãe, que não mediu esforços para que eu alcançasse esse e todos os outros objetivos da minha vida; a meu irmão, Robson, pelo apoio e coleguismo na escola da vida, a qual fomos matriculados pelos nossos queridos pais.

Agradeço à Anita, a quem eu tenho o dever de ensinar, mas sou permanentemente surpreendido e levado a condição de aprendiz.

Obrigado ao meu pai, Rógis Soares Antunes, a quem as palavras são insuficientes para expressar o que o meu coração quer dizer.

Tenho muito mais dúvidas do que certezas. Acho isso bom.  
Eu sou o coração, não sou o cardiologista. O mundo  
está cheio de gente que sabe de tudo.

*Humberto Gessinger*

## RESUMO

O método DNER-PRO 11/79 baseia-se na análise defletométrica e, através de procedimentos recomendados, propõe como medida de reabilitação estrutural uma camada de espessura de reforço. Neste trabalho foi realizada a aplicação deste método como ferramenta de recuperação estrutural do pavimento de trecho da rodovia BR-262/MG. A concessionária responsável pela construção da rodovia, forneceu os dados necessários para a realização da análise defletométrica. Com isto, foi possível dividir a extensão de 537 km em 17 trechos, subdivididos em segmentos homogêneos. Deste modo, seguiram-se os cálculos dos parâmetros necessários à aplicação do método DNER-PRO 11/79, tornando possível o dimensionamento de uma camada de reforço para cada segmento homogêneo.

Na etapa de capacitação teórica, foram pesquisados os principais conceitos relativos ao dimensionamento de reforço de pavimentos flexíveis. Em virtude disto, sentiu-se a necessidade de informações que pudessem complementar a análise defletométrica. Assim, foi adotado o método de retroanálise (simplificado) de Albernaz, com o intuito de verificar a resistência do subleito, identificando se o problema estava localizado neste ou no pavimento.

O capítulo 7 apresenta a metodologia adotada no trabalho, expondo os procedimentos adotados no trecho 13, segmentos homogêneos 1, 2, 3 e 4. Neste roteiro, constam informações sob forma de tabelas e gráficos, na tentativa de ilustrar o processo de cálculo replicado a todo trabalho.

O capítulo 8 contém gráficos que apresentam as espessuras de reforço adotadas ao longo da extensão total da rodovia, além de comparativos dos módulos do subleito e do pavimento com as deflexões características e com a espessura de reforço. O capítulo, ainda apresenta uma tabela com as informações de todos os parâmetros calculados, em especial as espessuras da camada de reforço, sugeridas pelo método DNER-PRO 11/79, para todos os segmentos homogêneos e, por fim, ocupa-se da análise dos dados do trabalho.

Palavras-chave: Projeto de Reforço Estrutural de Pavimentos Asfálticos. DNER-PRO 11/79.

Análise Defletométrica. Método de Retroanálise de Albernaz.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição de tensões nos diferentes tipos de pavimentos.....	16
Figura 2 – Camadas de um pavimento flexível.....	17
Figura 3 – Deflexão em um pavimento.....	23
Figura 4 – Seção longitudinal e seção transversal da bacia de deformação.....	24
Figura 5 – Bacia de deformação.....	24
Figura 6 – Viga Benkelman .....	26
Figura 7 – Esquema de leituras FWD .....	27
Figura 8 – Exemplo de obtenção de segmentos homogêneos.....	32
Figura 9 – Solicitações de fadiga.....	33
Figura 10 – Linhas de iguais deflexões verticais no sistema pavimento – subleito.....	39
Figura 11 – $(E_p \times r_x)$ ; $(E_{SL} \times r_x)$ e $(T_x \times r_x)$ .....	41
Figura 12 – Situação do trecho atual .....	42
Figura 13 – Segmentos homogêneos: trecho 13 .....	45
Figura 14 – Valores de “k” e “n” .....	50
Figura 15 – Deflexões corrigidas .....	50
Figura 16 – $(E_p \times r_x)$ ; $(E_{SL} \times r_x)$ e $(T_x \times r_x)$ : Trecho 13, SH 1 .....	51
Figura 17 – $(E_p \times r_x)$ ; $(E_{SL} \times r_x)$ e $(T_x \times r_x)$ : Trecho 13, SH 2 .....	52
Figura 18 – $(E_p \times r_x)$ ; $(E_{SL} \times r_x)$ e $(T_x \times r_x)$ : Trecho 13, SH 3 .....	53
Figura 19 – $(E_p \times r_x)$ ; $(E_{SL} \times r_x)$ e $(T_x \times r_x)$ : Trecho 13, SH 4 .....	54
Figura 20 – Deflexões características e espessura de reforço no trecho 13.....	55
Figura 21 – Comparação entre $D_c$ e $H_R$ : Extensão Total .....	61
Figura 22 – Comparação entre $D_c$ e $E_{SL}$ : Extensão Total .....	62
Figura 23 – Comparação entre $H_R$ e $E_p$ : Extensão Total .....	63

Figura 24 – Comparação entre Espessura efetiva do pavimento e Módulo do subleito.....	64
Figura 25 – Comparação entre Espessura efetiva do pavimento e Módulo do pavimento .....	65



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo de aplicação do método das diferenças acumuladas.....	31
Tabela 2 – Fatores de correção sazonal.....	35
Tabela 3 – Critérios para o estabelecimento de diretrizes de projeto.....	36
Tabela 4 – Deflexões de um SH hipotético .....	40
Tabela 5 – Volume de tráfego .....	42
Tabela 6 – Método das diferenças acumuladas: trecho 13 .....	43
Tabela 7 – Segmento homogêneo 1: trecho 13.....	45
Tabela 8 – Valores de $Z$ em função de $n$ .....	46
Tabela 9 – Cálculo de espessura SH 1.....	47
Tabela 10 – Cálculo de espessura SH 2.....	47
Tabela 11 – Cálculo de espessura SH 3.....	48
Tabela 12 – Cálculo da espessura SH 4.....	48
Tabela 13 – Parâmetros obtidos pelo método de Albernaz: Trecho 13, SH 1.....	49
Tabela 14 – Parâmetros obtidos pelo método de Albernaz: Trecho 13, SH 2.....	52
Tabela 15 – Parâmetros obtidos pelo método de Albernaz: Trecho 13, SH 3.....	53
Tabela 16 – Parâmetros obtidos pelo método de Albernaz: Trecho 13, SH 4.....	54
Tabela 17 – Resultados: Extensão total.....	56

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA.....</b>	<b>14</b>
2.1 PROBLEMA DE PESQUISA.....	14
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	14
2.2.1 Objetivo principal .....	14
2.2.2 Objetivos específicos.....	14
2.3 PRESSUPOSTO.....	14
2.4 DELIMITAÇÕES .....	15
2.5 LIMITAÇÕES.....	15
2.6 DELINEAMENTO .....	15
<b>3 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....</b>	<b>16</b>
3.1 CAMADAS DO PAVIMENTO FLEXÍVEL.....	18
3.1.1 Revestimentos asfálticos.....	18
3.1.2 Base.....	18
3.1.3 Sub – Base.....	19
3.1.4 Reforço de subleito.....	19
3.1.5 Subleito.....	20
<b>4 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS .....</b>	<b>21</b>
4.1 MEDIDAS DE DESLOCAMENTOS ELÁSTICOS EM PAVIMENTOS.....	22
<b>5 DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS..</b>	<b>28</b>
5.1 CÁLCULO DO NÚMERO N.....	29
5.2 DETERMINAÇÃO DE SEGMENTOS HOMOGÊNEOS.....	30
5.3 ANÁLISE DEFLETOMÉTRICA - PROCEDIMENTO DNER - PRO 11/79 .....	32
<b>6 RETROANÁLISE.....</b>	<b>37</b>

6.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	37
6.2 MÉTODO SIMPLIFICADO DE ALBERNAZ .....	38
<b>7 PROJETO DE REFORÇO DO PAVIMENTO DE TRECHO DA BR-MG/262.....</b>	<b>42</b>
7.1 METODOLOGIA.....	43
<b>8 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>56</b>
<b>9 CONCLUSÃO.....</b>	<b>67</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Os meios de transporte são considerados um dos pilares do desenvolvimento sócio-econômico de um país. Em diversas áreas, seja no turismo, no comércio ou no escoamento da produção, os diferentes modais – rodoviário, aeroviário ou aquaviário – são responsáveis pela capilarização do sistema de transportes em nosso país. No Brasil, há uma predominância do modal rodoviário, o que poderia ser explicado por inúmeras razões, dentre elas uma de natureza política, promovida pelo governo brasileiro na segunda metade do século passado. Segundo pesquisa realizada pela Confederação Nacional de Transportes (2016), o modal rodoviário é responsável por 61,1% do transporte de cargas e 95% do transporte de passageiros no Brasil, tornando extremamente tímida a participação dos outros modais, o que pode ser observado com uma característica marcante dos países classificados como subdesenvolvidos.

Nas últimas décadas, houve um crescimento dos estudos relacionados à pavimentação, difundindo-se novos materiais utilizados, técnicas de construção e metodologias de dimensionamento, com vistas a uma melhora nas condições portantes e de conforto de nossas rodovias. O dimensionamento estrutural de pavimentos, via métodos específicos, visa proteger o subleito das deformações plásticas ocorridas no período para o qual foi dimensionado. Os métodos utilizados possuem base experimental em rodovias norte-americanas e são adaptados para nosso clima e relevo. Juntamente com eles, faz-se necessária uma análise – nos pavimentos flexíveis – da vida útil por fadiga nos revestimentos asfálticos.

Nesta direção, a proposta deste trabalho consiste na aplicação de um método de análise estrutural no pavimento da rodovia BR-262, no estado de Minas Gerais, utilizando dados disponibilizados pela concessionária responsável pela rodovia. Pretendeu-se avaliar a capacidade estrutural de pavimentos da desta rodovia, identificando locais com deficiência estrutural, com vistas à adoção de medidas reabilitadoras. Em termos mais específicos, foram avaliadas as deflexões medidas entre 2015 e 2024, em segmentos de comportamento homogêneo, de acordo com o método das diferenças acumuladas da AASHTO (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993). Ainda, foram analisados os dados de tráfego disponíveis, avaliando a capacidade estrutural dos segmentos homogêneos empregando o procedimento DNER-PRO 11/79.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos itens a seguir.

### **2.1 PROBLEMA DE PESQUISA**

O problema de pesquisa deste trabalho é:

“Que medidas restauradoras – estruturais – devem ser tomadas no pavimento de trecho da rodovia BR-262/MG, obedecendo aos critérios estabelecidos pelo procedimento DNER-PRO 11/79?”

### **2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Os objetivos são classificados como principal e específicos, descritos a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo Principal**

O objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso é elaborar um projeto de reabilitação de pavimentos flexíveis para um trecho da rodovia da BR-262/MG, utilizando o método DNER-PRO 11/79.

#### **2.2.2 Objetivos específicos**

- a) Estabelecer segmentos de comportamento homogêneo;
- b) Empregar o procedimento DNER-PRO 11/79;
- c) Obter espessuras de reforço para cada segmento homogêneo;
- d) Avaliar, através de retroanálise, o módulo resiliente da estrutura pavimento/subleito;
- e) Análise e considerações finais.

### **2.3 PRESSUPOSTO**

O trabalho tem por pressuposto que os valores das deflexões informados pela construtora foram medidos de forma apropriada e são válidos para a análise estrutural.

## 2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à análise de um trecho de pavimento flexível de 537 quilômetros.

## 2.5 LIMITAÇÕES

O trabalho limita-se à utilização dos dados fornecidos pela concessionária e ao uso do procedimento DNER-PRO 11/79.

## 2.6 DELINEAMENTO

Para a realização deste trabalho, seguiu-se as seguintes etapas, apresentadas em capítulos:

- a) Capítulo 1: Introdução;
- b) Capítulo 2: Diretrizes da pesquisa;
- c) Capítulo 3: Pavimentos flexíveis;
- d) Capítulo 4: Avaliação estrutural de pavimentos;
- e) Capítulo 5: Dimensionamento de reforço para pavimentos asfálticos;
- f) Capítulo 6: Retroanálise;
- g) Capítulo 7: Projeto de reforço de pavimento de trecho da BR-MG/262.
- h) Capítulo 8: Apresentação e análise dos resultados.

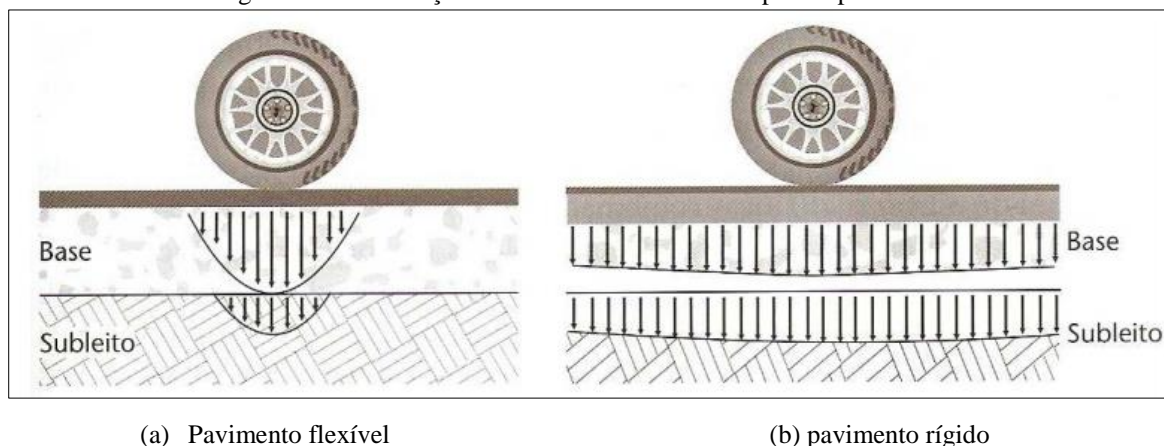
### 3 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

As obras de engenharia civil caracterizam-se estruturalmente, entre outras coisas, por apresentarem um arranjo onde a parte denominada superestrutura está distribuída de forma organizada sobre um terreno que ofereça suporte estrutural. Nas obras rodoviárias, chama-se essa estrutura portante de subleito, a qual é responsável por assentar as camadas do pavimento. De acordo com Pinto e Preussler (2002, p. 11):

o pavimento é uma estrutura constituída por uma ou mais camadas, com características para receber as cargas aplicadas na superfície e distribuí-las, de modo que as tensões resultantes fiquem abaixo das tensões admissíveis dos materiais que constituem a estrutura.

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006), classifica os pavimentos rodoviários da seguinte maneira: rígidos, semi-rígidos e flexíveis. Os pavimentos rígidos são aqueles que apresentam uma grande diferença de rigidez entre o revestimento (maior rigidez) e as camadas inferiores (menor rigidez), como aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland, que pode ser armada com barras de aço. O pavimento semi-rígido caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias, como por exemplo uma camada de solo cimento, a qual situa-se abaixo do revestimento. Por fim, o pavimento flexível é aquele em que as cargas causam flexão na estrutura, distribuindo-se em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Em termos estruturais, é importante salientar a diferença quanto a distribuição de tensões nos pavimentos flexíveis (pressões concentradas) e nos pavimentos rígidos (pressões distribuídas), como mostra a figura 1.

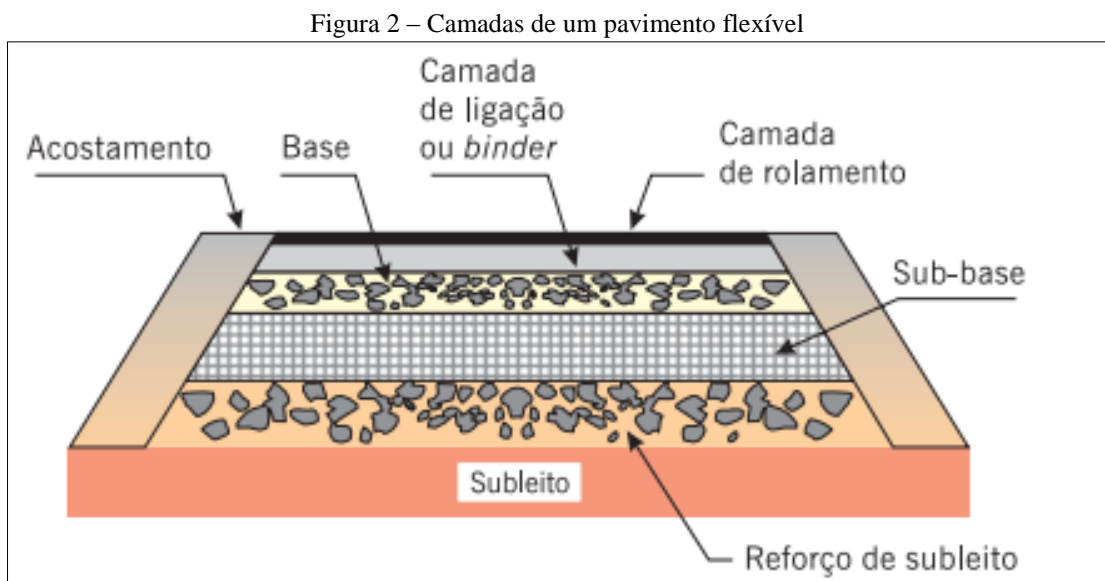
Figura 1 – Distribuição de tensões nos diferentes tipos de pavimentos



(fonte: BALBO, 2007, p. 47)

Este trabalho analisa trechos de pavimentos flexíveis. Por conseguinte, torna-se necessário realizar uma caracterização deste tipo de pavimento, expressando sua composição e divisão em camadas.

A literatura tradicional caracteriza os pavimentos flexíveis, de um modo geral, como formados por camadas (inferiores) constituídas de agregados e por camadas (superiores) formadas por um revestimento betuminoso delgado. Trabalham bem à flexão, mas não respondem bem à tração. Para Bernucci *et al.* (2008), “eles são formados por quatro<sup>1</sup> camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito”. A figura 2 ilustra essa divisão de camadas.



(fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 10)

O revestimento asfáltico, prosseguem Bernucci *et al.* (2008), pode ser composto por camada de rolamento – em contato direto com a carga e por camadas intermediárias ou de ligação. Algumas das camadas podem ser desnecessárias, dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis. Estas camadas da estrutura repousam sobre o subleito, ou seja, a plataforma da estrada terminada após a conclusão dos cortes e aterros.

As camadas superiores, de revestimento asfáltico, ficam em contato direto com a roda dos veículos e devem estar dimensionadas de forma que distribuam adequadamente as tensões às camadas inferiores, bem como protegê-las de ataques químicos, de intempéries, das amplitudes térmicas e infiltração de água.

<sup>1</sup> A camada de rolamento (capa) e o binder podem ser considerados constituintes da camada de revestimento. O subleito, por ser a fundação para a estrutura, não constitui, propriamente, uma camada do pavimento.



### 3.1 CAMADAS DO PAVIMENTO FLEXÍVEL

As camadas do pavimento asfáltico serão apresentadas considerando-se a configuração da figura 2, na tentativa de abarcar, tanto quanto possível, uma terminologia que corresponda à maioria dos casos reais. Assim, “o pavimento possui as seguintes camadas: revestimento, base, sub-base, reforço de subleito e subleito, sendo este último a fundação e parte integrante da estrutura” (BALBO, 2007, p. 36).

#### 3.1.1 Revestimentos asfálticos

A camada de revestimento é constituída de uma mistura de agregados minerais e materiais betuminosos, sobrepostas à camada de base (PINTO; PREUSSLER, 2002). Estruturalmente, deve ser responsável por resistir aos esforços de compressão, sinalizando a necessidade de possuir um módulo de resiliência<sup>2</sup> elevado. Além disso, explica Balbo (2007, p. 36):

o revestimento deverá, dentre outras funções, receber as cargas estáticas ou dinâmicas, sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes ou, ainda, perda de compactação; necessita, portanto, ser composto de materiais bem aglutinados ou dispostos, de maneira a evitar sua movimentação horizontal.

Desta maneira, é oportuno acrescentar que uma camada de revestimento deve ter como principais objetivos: dificultar o deslizamento dos veículos sobre a superfície, resistir à abrasão do tráfego e reduzir a penetração de água (PINTO; PREUSSLER, 2002).

Quanto a sua composição, a literatura aponta o uso do asfalto como o material rotineiramente utilizado para revestimentos. Trata-se de um material termo-viscoso-elástico, cujo comportamento é representado por modelos que tentam expressar as propriedades tensão-deformação-tempo-temperatura (PINTO; PREUSSLER, 2002). “Um dos concretos para pavimentação mais usados no Brasil é o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), que é o resultado da mistura de agregados de vários tamanhos e cimento asfáltico aquecidos em temperaturas escolhidas em função das características do ligante” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 158

---

<sup>2</sup> A observação do estado das rodovias brasileiras e uma posterior análise sobre os efeitos de fadiga indicava que era necessária outra metodologia que pudesse oferecer resultados que considerassem os efeitos repetitivos das cargas dinâmicas. Assim, começa a ser utilizado o conceito de módulo de resiliência (MR), que proporciona uma investigação dos estados de tensão x deformação das estruturas.

### 3.1.2 Base

Entende-se a camada de base como aquela que tem por finalidade resistir a esforços advindos do tráfego e transmiti-los às camadas inferiores, suportando o revestimento asfáltico. “Sua principal função no pavimento é o suporte estrutural, promovendo a rigidez e a resistência à fadiga da estrutura [...] e esta camada deve garantir que a magnitude das tensões de flexão no revestimento não o leve ao trincamento prematuro” (PINTO; PREUSSLER, 2002, p. 15).

Quanto aos materiais utilizados, Pinto e Preussler (2002) comentam que geralmente são utilizados produtos de britagem, misturas de solos e materiais britados, ou solos; dentre eles, predominam: brita graduada, brita corrida, macadame hidráulico, macadame betuminoso, solo estabilizado granulometricamente, solo-cimento, solo arenoso fino laterítico, solo-brita e brita graduada com cimento.

### 3.1.3 Sub-Base

Em geral, esta camada situa-se abaixo da camada de base e, quando se trata de pavimentos flexíveis, recebe tensões em menor magnitude do que a primeira. Seu material constituinte deve ser de melhor qualidade à da camada de reforço de subleito. Ainda, deve prevenir o acúmulo de água livre no pavimento (deve ser um material drenante) e o bombeamento do solo do subleito na base (PINTO; PREUSSLER, 2002).

Quando, em projeto, revela-se a necessidade de uma camada espessa de base, é comum que se opte por uma subdivisão desta, originando a sub-base, mais vantajosa, economicamente (BALBO, 2007). “Quanto a sua constituição, a sub-base pode ser de solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada, brita graduada tratada com cimento [...]” (BALBO, 2002, p. 38).

### 3.1.4 Reforço de subleito

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) recomenda que a camada de reforço de subleito, quando necessária (subleito de baixa capacidade portante), seja executada com espessura constante. Pode ser utilizado para redução da espessura da sub-base e deve possuir características técnicas superiores ao material do subleito original e inferiores ao material que vier acima, ou como coloca Senço (2007, p. 19), “o reforço do subleito poderia ser considerado indistintamente camada suplementar do subleito

ou camada complementar da sub-base”. Geralmente, o material é um solo argiloso selecionado, de capacidades físicas muito boas, de elevada resistência e espessura constante transversalmente e variável longitudinalmente (PINTO; PREUSSLER, 2002).

### **3.1.5 Subleito**

O subleito é o solo em que se assentará a estrutura do pavimento, ou seja, é a fundação da estrutura. As espessuras das demais camadas do pavimento, bem como sua constituição, dependem das condições do subleito. Deve ser constituído de material natural consolidado e compactado, por exemplo, nos cortes do corpo estradal, ou por um material transportado e compactado, no caso dos aterros (BALBO, 2007, p. 37).

## 4 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS

Para que um pavimento receba qualquer ação reabilitadora, torna-se necessário que o mesmo seja previamente avaliado. O mapeamento dos defeitos (construtivos ou de projeto) encontrados possibilitará que sejam definidas as ações tecnicamente adequadas à recuperação do pavimento. Em termos gerais, a avaliação pode ser orientada a analisar os efeitos na superfície do pavimento (avaliação funcional), sob uma análise do usuário; ou então, nas consequências ocasionadas pelo excesso de carga que a estrutura pode suportar (avaliação estrutural).

A avaliação estrutural tem a função de analisar a capacidade portante das camadas constituintes dos pavimentos, no que diz respeito às deformações (elásticas e plásticas) provocadas pelo tráfego rodoviário. A repetição das cargas no pavimento pode provocar defeitos estruturais (BERNUCCI *et al.*, 2008). Prosseguem os autores:

a avaliação estrutural, está associada ao conceito de capacidade de carga, que pode ser vinculado diretamente ao projeto do pavimento e ao seu dimensionamento. Os defeitos estruturais resultam especialmente da repetição das cargas e vinculam-se às deformações elásticas ou recuperáveis e plásticas ou permanentes. As deformações elásticas [...] são responsáveis pelo surgimento da maioria dos trincamentos ao longo da vida do pavimento, e que podem levar à fadiga do pavimento.

Este tipo de avaliação pode ser realizada através de três métodos. O método destrutivo é aquele que se caracteriza pela retirada de amostras para análise laboratorial de materiais de cada camada do pavimento até o subleito, por abertura de poços de sondagens (trincheiras), o que impossibilita o local à realização de novos testes (BERNUCCI *et al.*, 2008; HAAS *et al.*, 1994).

O método semidestruutivo utiliza instrumentos portáteis de pequenas dimensões como o cone dinâmico de penetração (DCP) para realizar ensaios de capacidade de carga, o que não obriga a realização de grandes aberturas no pavimento, capaz de inviabilizar novos testes naquele local (MARQUESINI, 2012).

O método não destrutivo é representado pelas medidas de deflexão. Avalia a variação da capacidade de carga, levando em consideração as grandes extensões dos trechos de pistas. De acordo com o Manual de Pavimentação (DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006, o estudo das condições onde ocorre a deformabilidade de pavimentos flexíveis é fundamental para a compreensão de seu comportamento, uma vez que refletem as condições estruturais das camadas que compõem o subleito. Além da geometria do carregamento, fatores como o valor da carga, da pressão de inflação do pneu e a posição do ponto de medida em relação à posição da carga também

influenciam na análise das deformações (PINTO; PREUSSLER, 1991). Estas deformações são constituídas por duas parcelas: plásticas e elásticas. As primeiras – de caráter permanente e acumulativo – são conhecidas na pavimentação asfáltica como trilhas de roda. Mesmo após a suspensão da aplicação da carga, seus efeitos continuam perceptíveis, mostrando sua condição residual (RIBAS, 2013).

As deformações elásticas – que desaparecem após a retirada da carga – podem ocasionar a ruptura por fadiga do revestimento asfáltico, dado que são responsáveis pela flexão alternada do pavimento enquanto solicitado a esforços provenientes das cargas dinâmicas, segundo o manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006).

#### 4.1 MEDIDAS DE DESLOCAMENTOS ELÁSTICOS EM PAVIMENTOS

A capacidade de carga, quando se verificam as propriedades estruturais de um pavimento, costuma ser uma das principais preocupações de projeto. A repetição de cargas está associada ao fenômeno de fadiga, proveniente de deformações horizontais elásticas e plásticas<sup>3</sup>. No entanto, as deflexões geradas pelas cargas também contribuem à geração de defeitos das estruturas. O manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006, p. 83), explica que “a deflexão de um pavimento representa a resposta das camadas estruturais e do subleito à aplicação do carregamento”.

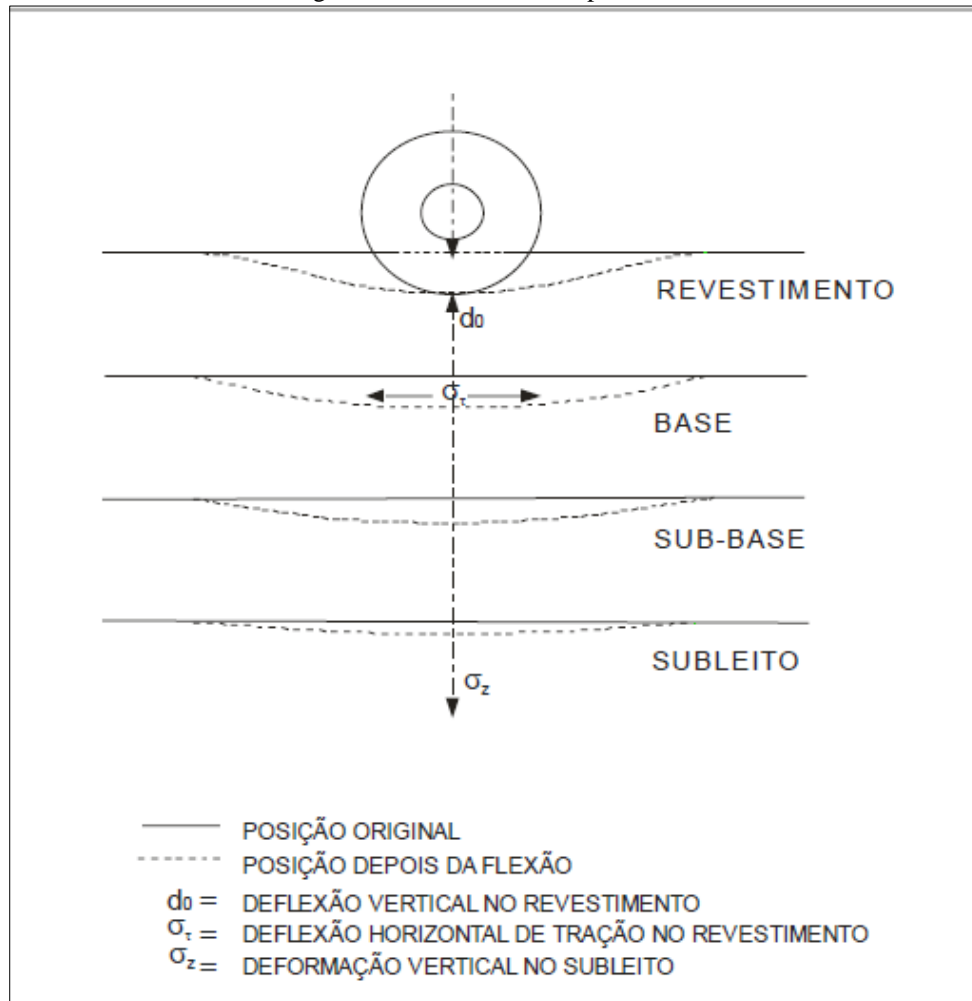
A mensuração das deformações elásticas é realizada por equipamentos específicos, que medem os deslocamentos verticais, ou seja, as deflexões do pavimento. São estas deflexões, segundo Macêdo (2003), que respondem pelo surgimento da maioria dos trincamentos ao longo da vida do pavimento<sup>4</sup>, e que podem levar à fadiga do revestimento.

A figura 3 ilustra o efeito (deflexões) provocado pelo carregamento no pavimento, ou seja, que a magnitude das deflexões diminui com o distanciamento do ponto de aplicação de carga – camadas mais profundas. Também é possível observar que as cargas provocam deformações horizontais de tração na camada inferior do revestimento, bem como, deformação vertical no subleito.

---

<sup>3</sup> Este tipo de deformação ocasiona um defeito denominado afundamento localizado ou trilhas de roda, medidos por meio de treliça normatizada, segundo Bernucci *et al.* (2008).

Figura 3 - Deflexão em um pavimento

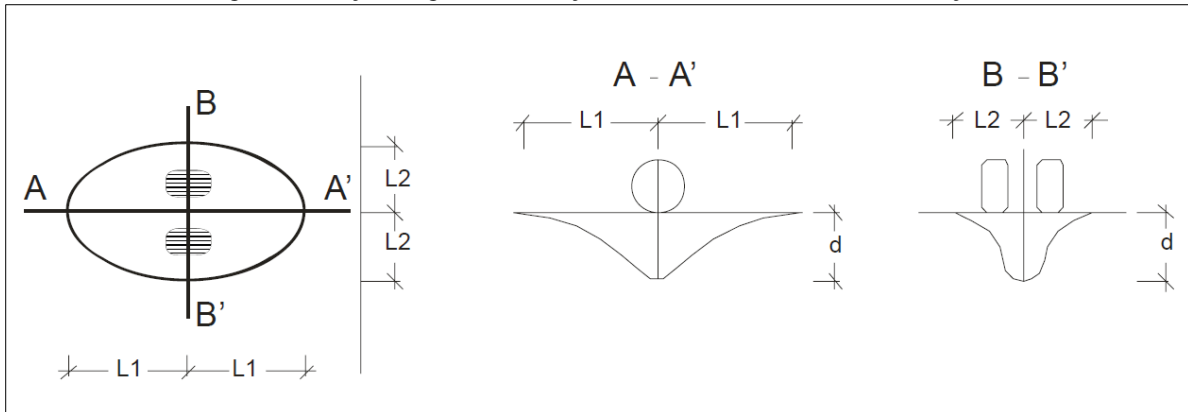


(fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006, p. 84)

A deflexão de um pavimento é um parâmetro que informa a maneira como as camadas da estrutura respondem às tensões e deformações impostas pelo carregamento, ou seja, quanto maiores os valores das medidas de deflexão, mais elástica (resiliente) é a estrutura, e menor a capacidade de suportar as solicitações de tráfego (PINTO; PREUSSLER, 2002).

Outro importante parâmetro a ser considerado é a bacia de deformação. Caracteriza-se por ser a superfície formada após as deformações impostas pelo tráfego ao pavimento. Para o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006, p. 81), durante a “aplicação de uma carga de roda dupla estática, a área anexa à carga que sofrerá deformação recuperável assume a forma aproximada de uma elipse, cujo eixo maior coincide com a direção de deslocamento do tráfego”. A figura 4 ilustra a bacia de deformação nas seções longitudinal (A – A’) e transversal (B – B’).

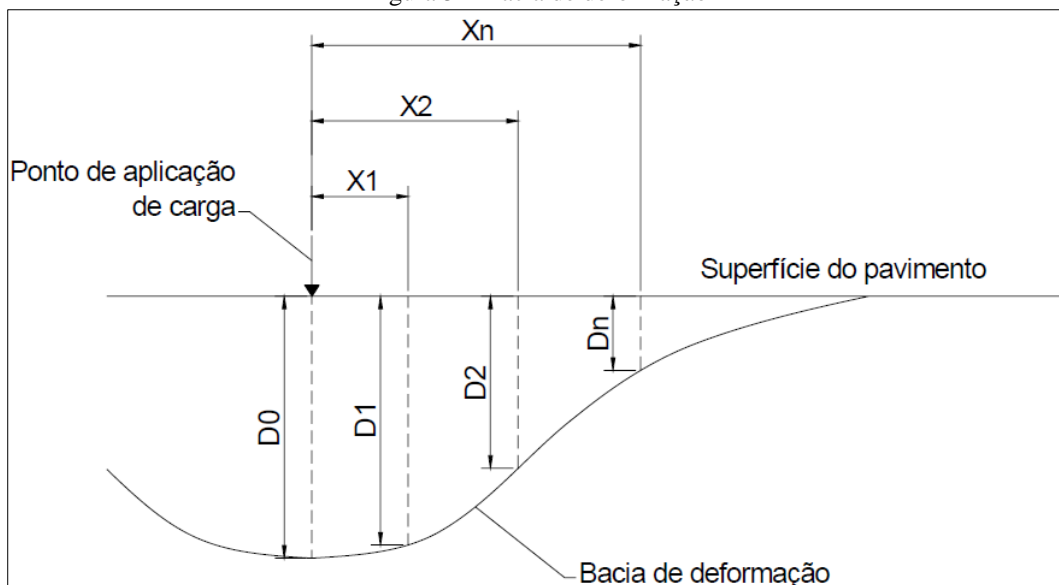
Figura 4 – Seção longitudinal e seção transversal da bacia de deformação



(fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006, p. 81)

Pode-se observar que a seção longitudinal à bacia de deformação (A – A') possui raios horizontais simétricos e maiores que a seção transversal à bacia de deformação (B – B') e, que seu arqueamento é menos intenso, segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006). A linha de influência longitudinal surgida pela deformação das cargas na superfície do pavimento (mostrada em A – A') recebe o nome de deformada e pode ser observada na figura 5.

Figura 5 – Bacia de deformação



(fonte: PEREIRA, 2007, p. 9)

A deformada constitui uma importante informação, já que diferentes estruturas podem apresentar os mesmos valores de deflexão, mas formas diferentes, em razão de seu arqueamento. Com isto, torna-se imprescindível a utilização de um parâmetro que possa fornecer informações sobre a forma desta curva.

Tradicionalmente, o parâmetro mais utilizado para estabelecer uma relação com a deformada é o “raio de curvatura (R), parâmetro indicativo do arqueamento da deformada na sua porção mais crítica, em geral considerada a 25 cm do centro da carga” (DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006, p. 83).

Segundo Pereira (2007), o raio de curvatura é calculado por:

$$R = \frac{10x_n^2}{2 \cdot (d_0 - d_n)} \quad \text{expressão (1)}$$

Onde:

$R$  = raio de curvatura, em metros;

$x_n$  = distância genérica em relação ao ponto de aplicação de carga;

$d_0$  e  $d_n$  = deflexões, em centésimos de milímetros.

O ajuste do arco parabólico, para o caso do raio de curvatura igual a 25 cm (porção mais crítica), pode ser realizado pela expressão (2), a seguir:

$$R = \frac{6250}{(d_0 - d_{25})} \quad \text{expressão (2)}$$

Quanto menor o raio de curvatura, mais severo será o arqueamento da deformada e, portanto, mais crítica a condição estrutural do pavimento (PREUSSLER; PINTO, 2002).

Os defletômetros são os equipamentos responsáveis por realizar uma avaliação das deflexões através da análise da bacia de deflexão gerada, o que permite a determinação dos módulos de resiliência das camadas do pavimento (MORAES, 2015). Embora alguns novos métodos de avaliação estrutural de pavimentos tenham surgido nos últimos anos, no que diz respeito à forma de aplicação da carga, três classes de equipamentos utilizados na avaliação não destrutiva ainda se destacam: equipamentos de carregamento estático e quase-estático como ensaio de placa, viga Benkelman, e defletômetros *Lacroix*; equipamentos de carregamento vibratório, como o *Dynaflect* e, equipamentos de carregamento por impacto conhecidos como FWD (*Falling Weight Deflectometer*) (MORAES, 2015; MEDINA *et al.*, 1994). De acordo com Balbo (2007), os equipamentos mais utilizados em avaliações não destrutivas no Brasil são a viga Benkelman e os FWD.

A viga Benkelman consiste de um equipamento simples que necessita de um caminhão basculante com eixo traseiro simples de roda dupla carregado com 8,2 toneladas para aplicar a carga sob a qual será medida a deformação elástica” (BERNUCCI *et al.*, 2008; PREUSSLER; PINTO, 2002). Após



serem registradas duas leituras relativas das deflexões a uma distância pequena do operador a 10 metros, calcula-se a deflexão  $d_0$  pela expressão (3), como sugerem Bernucci *et al.* (2008):

$$d_0 = (L_i - L_f) \cdot K \quad \text{expressão (3)}$$

Onde:

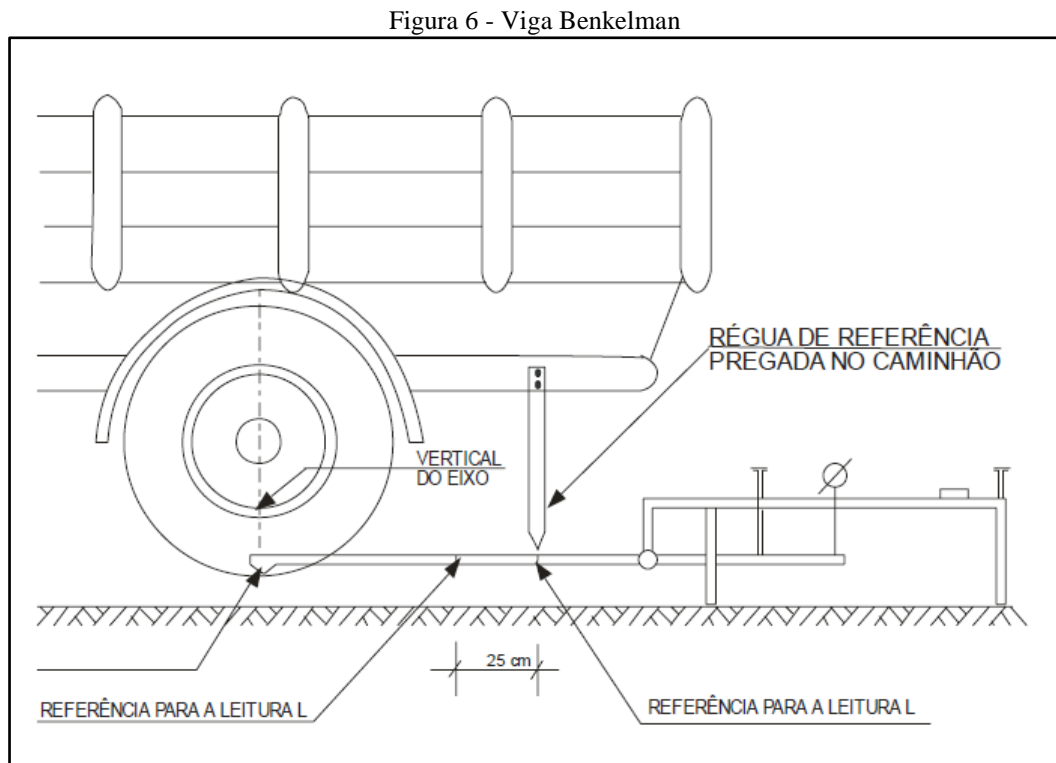
$d_0$  = deflexão total ou máxima medida sob a roda (0,01 m);

$L_i$  = leitura inicial no extensômetro (0,01 mm);

$L_f$  = leitura final no extensômetro (0,01 mm);

$K$  = constante da viga dada pela relação entre o braço maior e o braço menor, articulados.

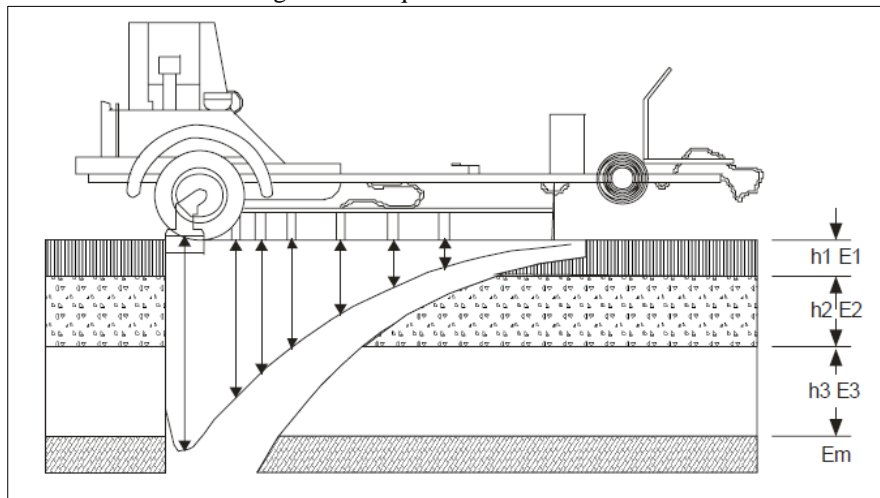
A figura 6 mostra um desenho esquemático da viga Benkelman.



(fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006, p. 84)

O FWD é um equipamento mais atual do que a viga Benkelman e realiza a medida dos deslocamentos elásticos de um pavimento através da queda de um peso suspenso a certa altura, sobre amortecedores que comunicam o choque a uma placa metálica apoiada sobre o pavimento no ponto de leitura da deflexão máxima (BERNUCCI *et al.*, 2008), como mostra a figura 7.

Figura 7 – Esquema de leituras FWD



(fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006, p. 84)

O registro do comportamento do pavimento é realizado por um microcomputador instalado em um veículo de apoio. Um conjunto de sensores posicionados longitudinalmente a partir do centro da placa é responsável por coletar as informações (PREUSSLER; PINTO, 2002).

Algumas das vantagens do FWD em relação à viga Benkelman, são: acurácia na medição, maior rapidez e produtividade e a não influência do operador. O seu alto custo e a necessidade de uma calibração sofisticada dificultam sua popularização.

Um ponto importante a ser levado em consideração seria a possível equivalência entre a viga Benkelman e o FWD. Para Bernucci *et al.* (2008, p. 449):

embora ambos os tipos de defletômetros sejam preparados para medir os deslocamentos elásticos, pelas diferenças de concepção entre eles, as deflexões não são iguais, nem existe uma correlação simples e universal entre medidas realizadas com o FWD e a VB. Em cada tipo de pavimento pode-se obter certa correlação entre esses valores, porém não generalizável.

Acrescentam Preussler e Pinto (2002, p. 76):

as correlações entre deflexões obtidas por viga Benkelman e FWD são dependentes de diversos fatores e, principalmente, da resposta elástica da estrutura do pavimento que está sendo avaliada. Portanto, não existem correlações de aplicação generalizada, porém, constata-se que geralmente as deflexões Benkelman são 20 a 30% superiores às obtidas pelo FWD.

## 5 DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Após ser projetado, um pavimento pode apresentar problemas, em grande parte, oriundos de ações construtivas e de projeto. Nestes casos, os defeitos podem comprometer a vida de projeto do pavimento, fazendo-se necessárias medidas reabilitadoras.

Para Balbo, 2007, p. 423:

*Reforço* de pavimento 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 de reabilitação (é comum sua designação popular por *recapeamento*). Esse novo revestimento proporciona uma melhora estrutural e também devolve aos usuários uma condição satisfatória de rolamento (serventia).

Por se tratarem de camadas estruturais, os reforços de pavimentos asfálticos são compostos por misturas asfálticas, devendo ser dimensionados tendo em vista a expectativa de tráfego para um dado horizonte de projeto.

Não há consenso sobre a utilização do método para dimensionamento de reforço de pavimentos que possa fornecer os melhores resultados; no entanto, sugerem Pinto e Preussler (2002) que o projeto de reforço é similar ao de um pavimento novo e que se deve realizar uma avaliação da situação em que se encontra e depois dividi-lo em segmentos homogêneos, considerando-se o tráfego, a idade, as condições do pavimento e sua estrutura.

Atualmente, o dimensionamento de reforço de pavimentos asfálticos pode ser classificado, segundo o manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006), em métodos:

- Empíricos (análises defletométricas e de deficiência estrutural);
- Mecanístico-Empíricos.

O DNIT possui homologado 4 métodos de dimensionamento de reforço de pavimentos: DNER-PRO 10/79 – Procedimento A; DNER-PRO 11/79 – Procedimento B; DNER-PRO 159/85 e DNER-PRO 269/94 – TECNAPAV. Segundo Pinto (2016), os dois métodos mais utilizados no Brasil são o método empírico DNER-PRO 11/79 – Procedimento B e o método mecanístico-empírico DNER PRO 269/94 – TECNAPAV.

Neste trabalho, abordaremos apenas o método DNER-PRO 11/79, escolhido para ser aplicado ao trecho da BR-262/MG. Considerando a importância do volume de tráfego e a necessidade de dividir

a extensão analisada da rodovia em segmentos que serão denominados de homogêneos, será fornecido um suporte teórico, a seguir, sobre estes itens.

## 5.1 CÁLCULO DO NÚMERO N

O dimensionamento de pavimentos é, naturalmente, influenciado em larga escala pelo volume de tráfego que solicitará a estrutura durante seu período de vida útil. As cargas que solicitam a estrutura do pavimento durante o período para o qual foi projetado são de pequena magnitude, mas a repetição desta solicitação provoca uma alteração na vida de fadiga dos pavimentos.

A solicitação de tráfego sobre uma rodovia é expressa, portanto, pelo número N de repetições de carga de um eixo padrão, definido como sendo um eixo simples de rodas duplas, carregado com 8,2 toneladas, o que está expresso pela expressão (4):

$$N = V_t \cdot F_v \cdot F_s \quad \text{expressão (4)}$$

Onde:

$V_t$  : o volume total de veículos em todo período de projeto;

$F_v$  : o fator de veículos;

$F_s$  : o fator climático regional ou fator sazonal.

Franco (2007, p. 151), acrescenta que as “cargas impostas pelos veículos são diferentes e que elas devem ser transformadas em cargas equivalentes (em termos destrutivos) à carga de eixo padrão”, de acordo com a expressão (5):

$$F_v = F_c \cdot F_e \quad \text{expressão (5)}$$

Onde:

$F_c$  = fator de carga;

$F_e$  = fator de eixos.

O fator de carga é um número que, multiplicado pelo número de eixos que operam, fornece o número de eixos equivalentes ao eixo padrão, isto é, transforma o poder de dano de deformação permanente no subleito provocados pelos eixos dos vários tipos de veículos que compõem o tráfego em um dano equivalente ao eixo padrão, enquanto o fator de eixos fornece o número de eixos correspondentes quando multiplicado pelo número de veículos (FRANCO, 2007, p. 151).

## 5.2 DETERMINAÇÃO DE SEGMENTOS HOMOGÊNEOS

A divisão de um trecho de uma rodovia em segmentos homogêneos (SH) facilita a futura tomada de decisões com vistas às medidas reabilitadoras de pavimentos, haja vista que é realizada uma partição de um trecho que conservam semelhanças de alguma característica.

Segmentos homogêneos são aqueles que apresentam similaridade quanto a determinadas características de uma rodovia, dependendo do tipo de estudo a ser realizado. Quando a abordagem preconiza a restauração do pavimento, os parâmetros mais utilizados são: estaqueamento, perfil de deflexões, flechas em trilhas de roda, módulos elásticos, defeitos do pavimento, constituição do pavimento, irregularidade longitudinal e tráfego solicitante. Em geral, as extensões dos segmentos são maiores de 200 m e menores de 5000 m<sup>5</sup> (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRASTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006).

O procedimento mais utilizado no Brasil para a obtenção dos SH é o método das diferenças acumuladas (AASHTO, 1993). O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRASTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006, p. 123) mostra as etapas do método:

- a) calcula-se o valor médio do parâmetro a ser analisado em toda a rodovia (geralmente as deflexões);
- b) calcula-se a diferença entre o valor pontual e o valor médio;
- c) calcula-se os valores acumulados das diferenças;
- d) plota-se um gráfico onde as abscissas são as distâncias e as ordenadas, os valores acumulados das diferenças.

A tabela 1 mostra os dados das deflexões obtidas em um trecho hipotético de uma rodovia. Seguindo as etapas de cálculo do método das diferenças acumuladas, pode-se apresentar os segmentos homogêneos (tendo como parâmetro as deflexões) plotados na figura 8 utilizando-se as expressões 6, 7, 8, 9, 10 e 11. Roteiro de cálculo:

$$✓ \text{ Deflexão média: } \bar{D}_i = \frac{D_{(i-1)} + D_i}{2} \quad (\text{expressão 6})$$

$$✓ \text{ Área entre estações e curva: } A_i = \bar{D}_i \times \Delta l_i \quad (\text{expressão 7})$$

$$✓ \text{ Área acumulada: } A_c = \sum A_i \quad (\text{expressão 8})$$

---

<sup>5</sup> A Norma DNER – PRO 11/79, procedimento B, página 9, sugere a extensão de 2000 m como valor máximo de um SH. Reabilitação estrutural de pavimento de trecho da BR-262/MG: aplicação do método DNER-PRO 11/79

$$\checkmark \text{ Dist\~{a}ncia acumulada: } L_c = \sum \Delta l_i \quad (\text{express\~{a}o 9})$$

$$\checkmark \text{ Diferen\~{c}a acumulada: } Z_i = \sum A_i - \tan \alpha \sum \Delta l_i \quad (\text{express\~{a}o 10})$$

Onde:

$D_i$  = deflex\~{a}o na estaca  $i$ ;

$\Delta l_i$  = dist\~{a}ncia entre esta\~{c}o\~{e}s;

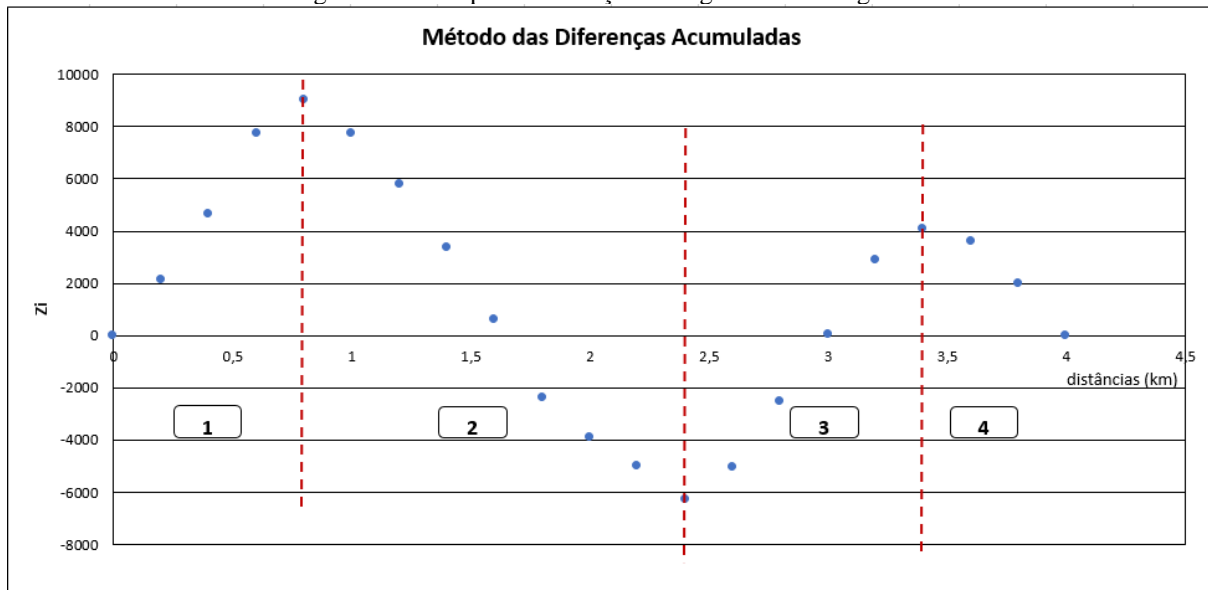
$$\tan \alpha = \frac{A_c}{L_c} \quad (\text{express\~{a}o 11})$$

Tabela 1 – Exemplo de aplica\~{c}o\~{e} do m\~{e}todo das diferen\~{c}as acumuladas

PONTO [Km]	$D_i$ [0,01 mm]	$\bar{D}_i$	$\Delta l_i$	$\Sigma \Delta l_i$	$A_i$	$\Sigma A_i$	$Z_i$
0	87	0	0	0	0	0	0
0,2	89	88	200	200	17600	17600	2110
0,4	91	90	200	400	18000	35600	4620
0,6	95	93	200	600	18600	54200	7730
0,8	73	84	200	800	16800	71000	9040
1	69	71	200	1000	14200	85200	7750
1,2	66	67,5	200	1200	13500	98700	5760
1,4	65	65,5	200	1400	13100	111800	3370
1,6	62	63,5	200	1600	12700	124500	580
1,8	63	62,5	200	1800	12500	137000	-2410
2	77	70	200	2000	14000	151000	-3900
2,2	67	72	200	2200	14400	165400	-4990
2,4	75	71	200	2400	14200	179600	-6280
2,6	92	83,5	200	2600	16700	196300	-5070
2,8	88	90	200	2800	18000	214300	-2560
3	93	90,5	200	3000	18100	232400	50
3,2	90	91,5	200	3200	18300	250700	2860
3,4	77	83,5	200	3400	16700	267400	4070
3,6	73	75	200	3600	15000	282400	3580
3,8	66	69,5	200	3800	13900	296300	1990
4	69	67,5	200	4000	13500	309800	0

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 8 – Exemplo de obtenção de segmentos homogêneos



(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.3 ANÁLISE DEFLETOMÉTRICA - PROCEDIMENTO DNER - PRO 11/79

Os métodos empíricos de reforço de pavimentação flexível preconizam a experiência e prática de profissionais que registraram suas vivências em situações particulares, onde se apresentavam de maneira específica o uso de materiais, as condições construtivas, do solo, climáticas e outras.

Este critério de análise procura associar as solicitações de tráfego com as deflexões originadas pelo carregamento e, desta maneira, propor uma espessura de reforço que atue como incremento da espessura existente.

A Análise Defletométrica propõe uma relação entre a vida do pavimento e as deflexões máximas, utilizando a espessura de reforço com o objetivo de diminuir as deflexões recuperáveis a um valor admissível (PINTO; PREUSSLER, 2002). De uma outra maneira, a espessura de reforço é dependente da deformação estrutural (representada pelas deflexões) causada pelo tráfego e pela capacidade da nova camada de rolamento resistir à degradação estrutural que causaria a perda da qualidade de rolamento (serventia), quando aplicado sobre estrutura que apresenta maior ou menor capacidade de deformação (BALBO, 2007).

Neste trabalho, utilizar-se-á a norma DNER – PRO 11/79, procedimento B (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE, 1979), que conceitua o método de reforço de pavimentos flexíveis. Desta maneira, justifica-se o interesse em apresentá-lo a seguir.

A Norma DNER – PRO 11/79, procedimento B, informa que tem por objetivo:

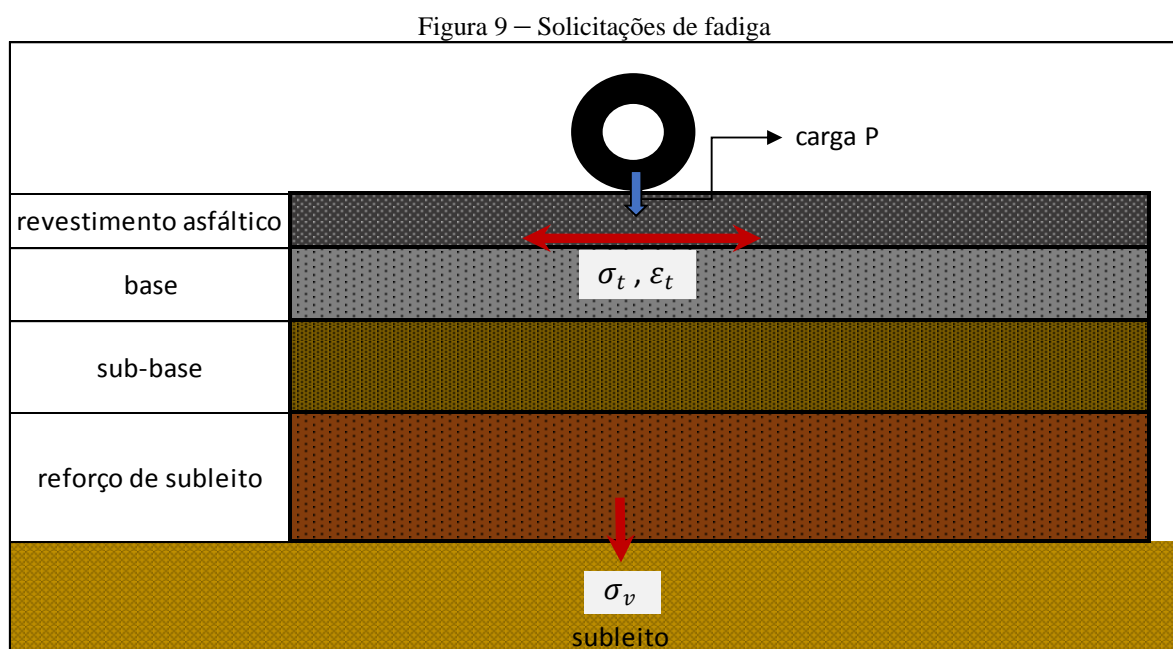
estabelecer os procedimentos necessários para a avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis existentes, apontar as causas de suas deficiências e fornecer elementos para o cálculo da vida restante ou do reforço necessário para um novo número de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão durante o período considerado (número N).

A preocupação com um novo número de solicitações de carga resultante do horizonte do projeto de reforço justifica-se pelo fato de que este é um dos principais fatores responsáveis pela antecipação da fase plástica do pavimento flexível. A ação de cargas repetidas estressa a estrutura, que responde com o aumento da magnitude de deflexões que causarão os efeitos de fadiga sob a manifestação de trincas, fendas e deformações permanentes nas partes inferiores das camadas.

O processo de fadiga é largamente conhecido na literatura por caracterizar-se pela perda de resistência de um material quando colocado sob repetidas ações (mecânicas e/ou térmicas). A *American Society for Testing Materials* (ASTM), na Norma ASTM E1823-96 (1996), define fadiga como:

o processo de mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre num ponto do material sujeito a tensões e deformações variáveis, produzindo fissuras que podem levar à ruptura após um determinado número de ciclos. Porém, deve-se levar em consideração que o estado de ruptura por fadiga somente irá ocorrer quando os danos atingirem um número crítico, o que pode não acontecer durante o período de vida útil do pavimento.

A figura 9 mostra a “ação de uma carga de roda P aplicada sobre uma superfície da estrutura que promoverá na face inferior do revestimento o desenvolvimento de uma tensão de tração  $\sigma_t$  e deformação de tração  $\varepsilon_t$ , além de uma tensão vertical  $\sigma_v$  no topo do subleito” (MACÊDO, 2003, p. 5).



(fonte: elaborada pelo autor)



Um possível estado de tensões e deformações, induzido por um número suficiente de repetições poderá promover o trincamento de um pavimento ou, até mesmo, a sua ruptura.

O conjunto de procedimentos que caracteriza este método empírico, demonstra, por esta razão, atenção aos efeitos de fadiga. Além disso, a própria norma DNER – PRO 11/79, procedimento B informa que:

Estes procedimentos foram desenvolvidos baseados no critério de deformabilidade de pavimentos flexíveis, que são expressos na prática por medidas de deflexões recuperáveis, pois, apesar de todas as limitações destes processos, a experiência tem demonstrado que, de uma maneira geral, existe uma correlação entre a magnitude das deflexões (e o raio de curvatura correspondente) e o aparecimento de falhas nos pavimentos flexíveis. Em virtude da grande variação de suporte estrutural que se observa nos pavimentos, inclusive naqueles bem construídos, usa-se critério estatístico para interpretação das medidas.

Para Pinto e Preussler (2002, p. 195), “Esse método fundamenta-se em que a deflexão máxima admissível ( $D_{adm}$ ) para um pavimento flexível é função apenas do tráfego que o solicita, não dependendo das características da estrutura do pavimento”. Consideramos, para efeitos deste trabalho, que a deflexão máxima admissível é aquela que pode suportar o revestimento asfáltico de um pavimento quando submetido à ação do tráfego sem que sejam produzidas trincas no revestimento.

A espessura de reforço do revestimento asfáltico, na norma do DNER – PRO 11/79, depende dos valores da deflexão de projeto ( $D_p$ ) e da deflexão admissível ( $D_{adm}$ ). Assim, esta norma (item 4.2.7) apresenta um procedimento para o cálculo destes parâmetros. As deflexões admissíveis são obtidas com a expressão (12), válida para deflexões medidas com a carga padrão de 8,2 tf por eixo, oriunda de estudos em pavimentos flexíveis constituídos de base granular revestidos com concreto betuminoso<sup>6</sup> (PINTO; PREUSSLER, 2002).

$$\log [D_{adm}] = 3,01 - 0,176 \cdot \log(N) \quad \text{expressão (12)}$$

Onde:

$D_{adm}$  = deflexão máxima admissível (0,01 mm);

$N$  = número equivalente de operações de um eixo tomado como padrão calculado para o período de projeto.

---

<sup>6</sup> “Se o pavimento for constituído de base granular revestida com tratamento superficial, a deflexão admissível calculada deve ser multiplicada por dois, para efeito de avaliação estrutural” (PINTO; PREUSSLER, 2002, p. 196)

Para o cálculo da deflexão de projeto ( $D_p$ ), inicialmente observa-se o tamanho da amostra de deflexões medidas no segmento homogêneo. Assim, determina-se a média aritmética ( $D$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ). De posse destes dados, calcula-se a deflexão característica ( $D_c$ ), tomada como um ajuste estatístico das deflexões obtidas em campo para cada segmento homogêneo, como mostra a expressão (13).

$$D_c = D + \sigma \quad \text{expressão (13)}$$

Onde:

$D$  = representa a médias aritmética das deflexões;

$\sigma$  = desvio padrão.

Posteriormente, pode-se obter o valor da deflexão de projeto, interpretada como um ajuste às condições climáticas mais desfavoráveis, como mostra a expressão (14):

$$D_p = D_c \cdot F_s \quad \text{expressão (14)}$$

A deflexão de projeto está em função da umidade das camadas do pavimento. Assim, utilizam-se fatores de correção sazonal para considerar que as medidas das deflexões foram realizadas em épocas chuvosas. Os valores de correção são mostrados na tabela 2.

Tabela 2: Fatores de correção sazonal.

Natureza do Subleito	Fatores de Correção Sazonal - $F_s$	
	Estação Seca	Estação Chuvosa
Arenoso e Permeável	1,1 - 1,3	1,0
Argiloso e Sensível à Umidade	1,2 - 1,4	1,0

(fonte: PINTO, 2016, p. 37)

Finalmente, a expressão (15) fornece o valor da espessura de reforço.

$$H_{ref} = K \cdot \log \left( \frac{D_p}{D_{adm}} \right) \quad \text{expressão (15)}$$

Onde:

$H_{ref}$  = espessura do reforço do pavimento (cm);

$K$  = fator de redução de deflexão, função do material usado no reforço<sup>7</sup>;

$D_p$  = deflexão de projeto (0,01mm);

<sup>7</sup> O DNIT adota o valor de  $k = 40$ , para concreto betuminoso.

Nota: O valor mínimo de espessura da camada de reforço recomendado pelo DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE (2006), é de 3 cm.

A tabela 3, a seguir, mostra o critério adotado para o estabelecimento das diretrizes de projeto. Esta tabela relaciona as deflexões de projeto e admissível, estabelecendo, de acordo com os valores dos raios (R) de curvatura, o nível de aceitação estrutural e sugere possíveis medidas corretivas.

Tabela 3 – Critério para o estabelecimento das diretrizes de projeto

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 $D_p \leq 3 D_{adm}$ REGULAR	NÃO	Deflectométrico	Reforço
		Se $D_p > 3 D_{adm}$ MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
III	$D_p \leq D_{adm}$ $R < 100$	REGULAR PARA MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
IV	$D_p > D_{adm}$ $R < 100$	MÁ	SIM	Resistência	Reforço ou Reconstrução
V	–	MÁ O pavimento apresenta deformações permanentes e rupturas plásticas generalizadas (IGG>180).	SIM	Resistência	Reconstrução

(fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – PRO 11/79)

## 6 RETROANÁLISE

Para Medina e Motta (2015), desde a década de 1950, o principal parâmetro para a realização do dimensionamento de reforço de pavimentos é a deflexão máxima causada por trilhas de roda. Somente por volta da década de 1970, houve o reconhecimento de que as deflexões máximas não seriam suficientes para avaliar a estrutura do pavimento. Deste modo, a utilização de um método de retroanálise justifica-se pela possibilidade de localização dos problemas estruturais, ou seja, se estes residem no pavimento ou no subleito.

Trata-se de um conjunto de processos que permite estimar os módulos de resiliência das camadas do pavimento e do subleito. Assim, torna-se fundamental conhecer o conceito de módulo de resiliência.

### 6.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os pavimentos flexíveis têm como característica trabalhar em regime elástico, ou seja, cessada a ação das cargas que provocam deformação no material, ele volta à sua forma inicial. Os carregamentos suportados pelos pavimentos são de curta duração e acontecem repetidamente, provocando um deslocamento elástico reversível nas camadas de revestimento onde a face superior fica submetida à compressão e a face inferior à tração. Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006, p. 49):

a preocupação em torno da capacidade de suporte dos pavimentos brasileiros concentrou-se nas deformações plásticas, representada pelo CBR (Índice de Suporte Califórnia). Até a década de 70, os métodos adotados eram basicamente empíricos e despreocupados com a fadiga de materiais, gerada pela repetição de cargas dinâmicas. A observação da degradação prematura da malha rodoviária promoveu o início dos estudos da resiliência dos materiais que estavam sendo usados na pavimentação.

A observação do estado das rodovias brasileiras e uma posterior análise sobre os efeitos de fadiga indicava que era necessária outra metodologia que pudesse oferecer resultados que considerassem os efeitos repetitivos das cargas dinâmicas. Assim, começa a ser utilizado o conceito de módulo de resiliência (MR), que proporciona uma investigação dos estados de tensão  $x$  deformação das estruturas. Sabe-se que “o módulo de resiliência dos materiais de pavimentação é determinado de duas formas: em laboratório ou em campo; neste último caso, por meio da interpretação de deformações ocorridas durante provas de carga” (BALBO, 2007, p. 228). Em laboratório, experimentalmente, o valor do módulo resiliente é determinado segundo a Norma DNIT 134/2010 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010, p. 2) pela

relação entre a tensão-desvio ( $\sigma_d$ ) aplicada repetidamente em uma amostra de solo e a correspondente deformação específica vertical recuperável ou resiliente ( $\varepsilon_r$ ), através da expressão (16):

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d} \quad \text{expressão (16)}$$

No entanto, apesar das deformações resilientes serem elásticas, elas não variam necessariamente de modo linear com as tensões aplicadas, e dependem de vários fatores – como a temperatura – que não são considerados pela Teoria da Elasticidade (BALBO, 2007). Portanto, os materiais geralmente não apresentam módulo de elasticidade constante (independendo do nível da tensão que ocorra) e raramente têm comportamento elástico linear. Para estes materiais, procura-se determinar nos ensaios triaxiais relações empíricas entre os parâmetros elásticos e os níveis de tensão induzidas pelo carregamento aplicado (PINTO; PREUSSLER, 2002).

## 6.2 O MÉTODO (SIMPLIFICADO) DE ALBERNAZ

Em geral os métodos de retroanálise dividem-se em iterativos e simplificados. Os primeiros procuram obter os módulos de resiliência de todas as camadas dos pavimentos. O objetivo é que com estas informações mais as espessuras dos pavimentos e cargas atuantes pode-se calcular as tensões, deformações e deslocamentos em qualquer ponto da estrutura. Ainda, o método faz uso de métodos matemáticos iterativos de convergência.

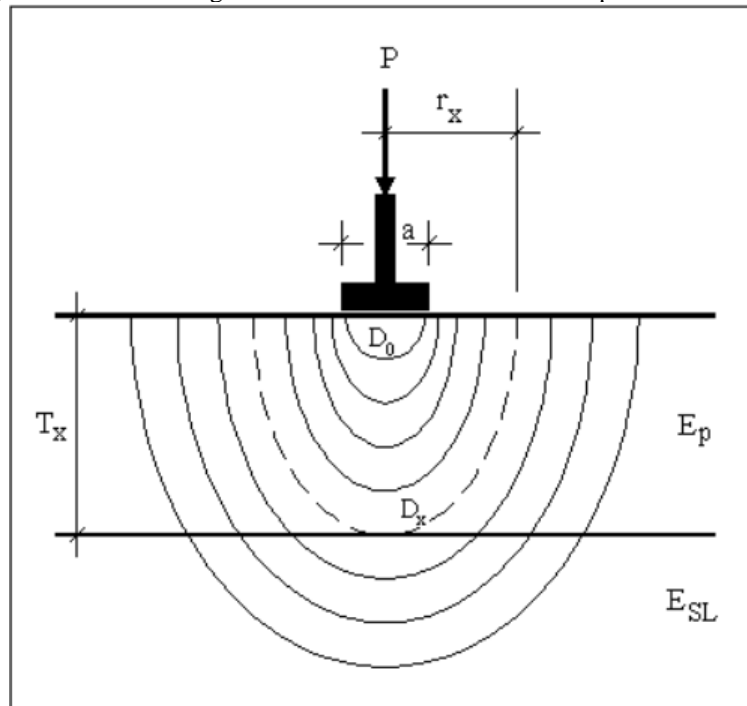
Os métodos simplificados de retroanálise utilizam artifícios gráficos, equações empíricas, gerados normalmente a partir das equações da Teoria da Elasticidade, a fim de avaliar estruturalmente o sistema pavimento/subleito. Dividem a estrutura real de multicamadas em estruturas mais simples, em geral duas ou três camadas além do subleito. Estas novas estruturas criadas são lidas como modelos matemáticos que podem ser tomados como equivalentes à estrutura real, principalmente para análises preliminares e anteprojetos, já que perdem um pouco de precisão por serem métodos simplificados.

Neste trabalho, será utilizado o método (simplificado) de retroanálise de Albernaz, baseado nos estudos da Teoria da Elasticidade aplicada aos meios homogêneos isotrópicos e linearmente elásticos. Aqui, vale destacar que serão largamente utilizados gráficos, equações e tabelas obtidas com auxílio de planilha eletrônica. Para a aplicação deste modelo, o pavimento será considerado um sistema elástico de duas camadas e espessura constante onde o topo da camada do subleito possui o menor módulo do sistema pavimento/subleito.

Assim, utilizar-se-á o método de Albernaz com o intuito de avaliar os módulos de resiliência (médios) do subleito e do pavimento, como forma de verificação das condições da estrutura. Para isto, é necessário que sejam conhecidas as bacias defletométricas do pavimento, quando submetido ao carregamento externo, que é simulado através de ensaios não-destrutivos, onde se usam equipamentos como a viga Benkelman ou FWD (VILLELA e MARCON, 2001).

O método de Albernaz, explica Nóbrega (2003), consiste no fato de que dado um ponto de aplicação de carga, deve-se considerar que existe um ponto da superfície localizado a uma distância do ponto de aplicação de carga onde a deflexão é originada pelas condições do subleito. O valor desta deflexão é o mesmo da deflexão do topo do subleito na vertical que passa pelo centro de carregamento, conforme ilustra a figura 10.

Figura 10 - Linhas de iguais deflexões verticais no sistema pavimento-subleito



(NOURELDIN, 1993, p. 24)

Com a deflexão máxima ( $D_0$ ) e as deflexões ( $D_x$ ) correspondentes às distâncias ( $r_x$ ), calcula-se os parâmetros de módulo efetivo do pavimento ( $E_p$ ), módulo do subleito ( $E_{SL}$ ) e a espessura efetiva do pavimento ( $T_x$ ).

Módulo resiliente do subleito ( $E_{SL}$ ):

$$E_{SL} = \frac{1193}{r_x D_x} \quad \text{expressão (17)}$$

Módulo efetivo do pavimento ( $E_p$ ):

$$E_p = \frac{142 - \frac{1193}{r_x}}{D_0 - D_x} \quad \text{expressão (18)}$$

Espessura relativa do pavimento ( $T_x$ ):

$$T_x = 1,264 \cdot \left[ \frac{D_0 - D_x}{D_x \cdot \left( \frac{r_x}{3,3} - 2,54 \right)} \right]^{1/3} \times (4r_x^2 - 282,3)^{1/2} \quad \text{expressão (19)}$$

Onde:

$D_x$  = Deflexão correspondente ao ponto situado à distância radial  $r_x$  (cm);

$D_0$  = Deflexão sob o eixo de aplicação de carga (cm);

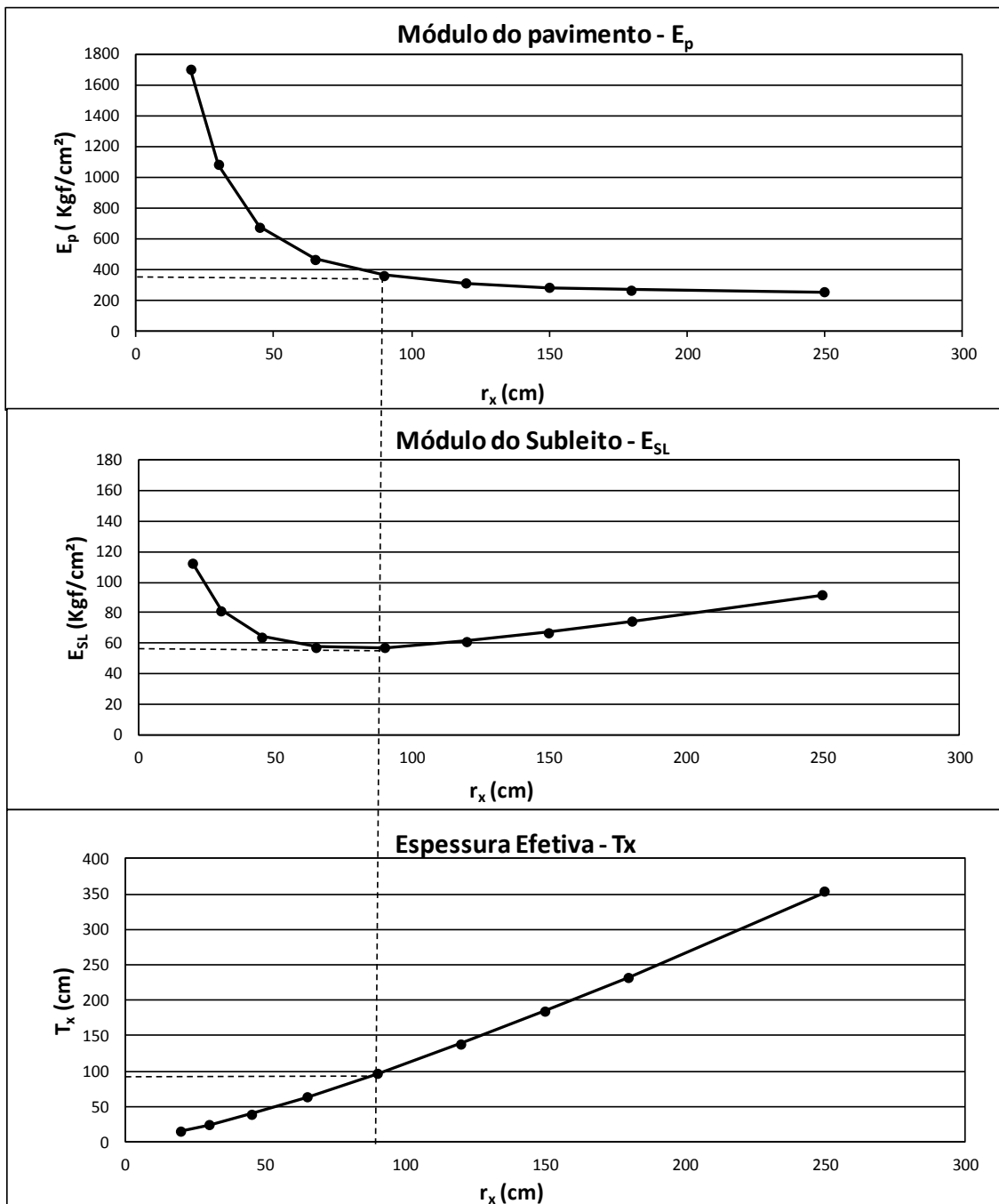
$r_x$  = Distância a partir do ponto de aplicação da carga até o ponto considerado (cm).

A partir dos valores (hipoteticamente) medidos de deflexões, mostrados na tabela 4, pode-se calcular os parâmetros  $E_{SL}$ ,  $E_p$  e  $T_x$ . Assim, é possível efetuar uma análise gráfica, conforme a figura 11.

Tabela 4 – Deflexões de um SH hipotético

D ou $r_x$	Deflexão $D_x$ [ $10^2$ mm]
0	56,9
20	51,4
30	47,1
45	40,7
65	33
90	25
120	18,1
150	12,9
180	9,7
250	3,2

(fonte: própria do autor)

Figura 11 –  $(E_p \times r_x)$ ;  $(E_{SL} \times r_x)$  e  $(T_x \times r_x)$ 

(fonte: própria do autor)

Percebe-se que o menor valor obtido para o  $E_{SL}$ , o qual apresenta o maior produto  $r_x \cdot D_x$ , fornece o ponto de abscissa onde pode ser encontrada a espessura efetiva  $T_x$ .





## 7.1 METODOLOGIA

Inicialmente, optou-se por denominar cada uma das planilhas eletrônicas, de variadas extensões, de trechos. Assim, a planilha 13, compreendida entre o km 799,482 e o km 803,687, ficou denominada de “trecho 13”. Este, por sua vez, foi dividido em 4 segmentos homogêneos. Da mesma maneira, seguiu-se a divisão dos demais trechos.

Será estabelecido aqui, um roteiro de cálculo para o trecho 13, escolhido por ser o trecho de menor extensão e, por esta razão, facilitar a exposição do método utilizado. Os demais trechos, podem ser encontrados no capítulo 8 deste trabalho.

Será apresentada, em um roteiro, a aplicação do método DNER- PRO 11/79, seguida do método simplificado de Albernaz.

(i) Inicialmente, identificou-se a localização do trecho 13 na planilha de volume de tráfego (tabela 13). Este trecho está compreendido na região da praça de pedágio P 11, que se subdivide em dois segmentos<sup>8</sup>: “V” (km 746 ao km 821) e “W” (km 821 ao km 906). É importante notar que o trecho 13 utilizará os volumes de tráfego do segmento V. Após esta identificação, foi realizada a adição dos volumes de tráfego entre os anos de 2015 e 2024, cuja soma é apresentada na última coluna da tabela 5.

(ii) O segundo passo consistiu em primeiramente, transferir para uma nova planilha de trabalho os dados das deflexões informadas. Assim, prosseguiu-se realizando a conversão das deflexões obtidas por equipamento FWD para medidas em Viga Benkelman (VB)<sup>9</sup>, utilizando-se a expressão (20) sugerida pelo manual de restauração de pavimentos asfálticos (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006, p. 88):

$$D_{VB} = - 5,73 + 1,396 \cdot D_{FWD} \quad \text{expressão (20)}$$

Onde:

$D_{VB}$  = Deflexão em Viga Benkelman, em 0,01 mm;

$D_{FWD}$  = Deflexão medida pelo equipamento *Falling Weight Deflectometer*, em 0,01 mm.

---

<sup>8</sup> Não confundir com SH.

<sup>9</sup> A conversão se faz necessária, pois, segundo o manual de restauração de pavimentos asfálticos do DNIT (2006), os dados da malha rodoviária brasileira, em sua quase totalidade, foram obtidos com VB.

(iii) De posse de todos os valores das deflexões em VG, aplicou-se o método das diferenças acumuladas com o intuito de dividir o trecho 1 em segmentos homogêneos. As etapas de cálculo são aquelas mostradas na seção 5.2, utilizando-se das expressões (6), (7), (8), (9), (10) e (11). A tabela 6 ilustra a obtenção dos SH.

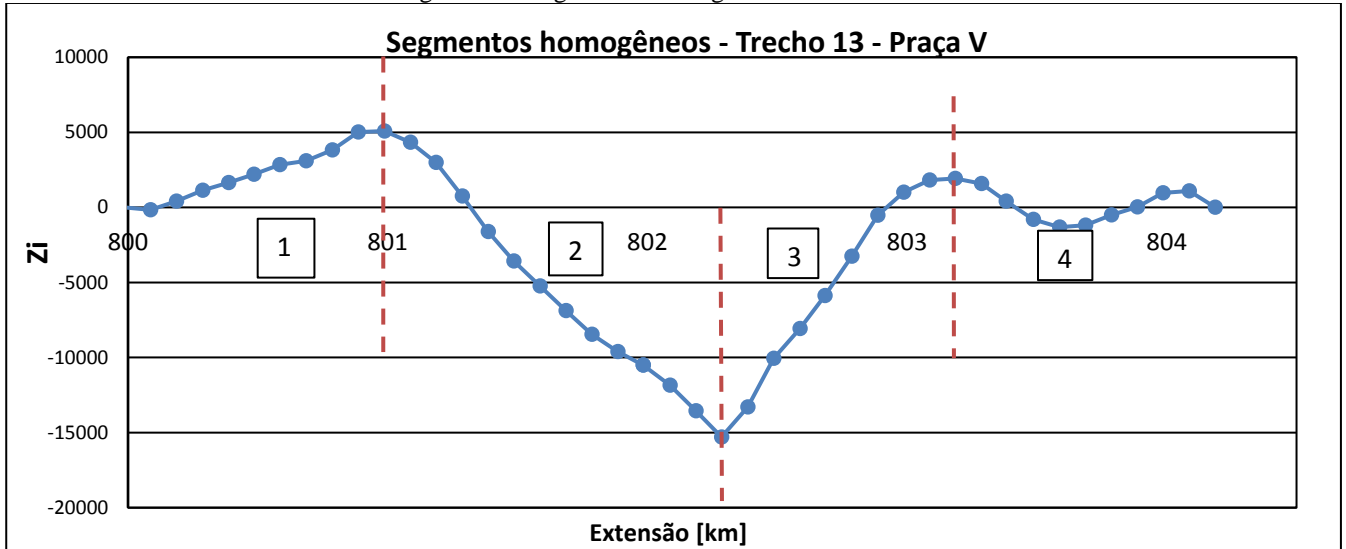
Tabela 6 – Método das diferenças acumuladas: trecho 13

TRECHO 13 - Segmentos Homogêneos								
PONTO [KM]	Di - FWD [0,01 mm]	Di - VB [0,01 mm]	$\bar{D}_i$	$\Delta_i$	$\Sigma\Delta_i$	Ai	$\Sigma A_i$	Zi
799,482	32	<b>38,2</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
799,587	40	<b>50,2</b>	44,2	105,0	105,0	4645,9	4645,9	-168,7
799,686	42	<b>53,3</b>	51,8	99,0	204,0	5126,7	9772,6	418,6
799,787	42	<b>52,6</b>	53,0	101,0	305,0	5350,2	15122,8	1137,5
799,887	39	<b>49,1</b>	50,9	100,0	405,0	5087,8	20210,6	1639,9
799,984	43	<b>54,0</b>	51,6	97,0	502,0	5002,9	25213,4	2195,0
800,085	40	<b>50,7</b>	52,3	101,0	603,0	5286,7	30500,1	2850,5
800,185	37	<b>46,1</b>	48,4	100,0	703,0	4836,5	35336,6	3101,7
800,287	47	<b>59,9</b>	53,0	102,0	805,0	5403,1	40739,8	3827,8
800,386	44	<b>56,0</b>	57,9	99,0	904,0	5734,8	46474,6	5023,1
800,487	31	<b>37,0</b>	46,5	101,0	1005,0	4694,5	51169,1	5086,4
800,587	32	<b>39,5</b>	38,2	100,0	1105,0	3824,4	54993,5	4325,5
800,686	22	<b>25,3</b>	32,4	99,0	1204,0	3205,7	58199,2	2991,7
800,787	20	<b>22,2</b>	23,7	101,0	1305,0	2396,3	60595,5	756,8
800,887	20	<b>21,9</b>	22,1	100,0	1405,0	2205,0	62800,5	-1623,5
800,986	26	<b>30,6</b>	26,2	99,0	1504,0	2597,6	65398,1	-3565,4
801,087	24	<b>27,9</b>	29,2	101,0	1605,0	2953,2	68351,4	-5243,4
801,186	26	<b>30,6</b>	29,2	99,0	1704,0	2894,7	71246,1	-6888,1
801,286	25	<b>29,6</b>	30,1	100,0	1804,0	3007,7	74253,8	-8465,7
801,386	32	<b>39,2</b>	34,4	100,0	1904,0	3440,5	77694,3	-9610,6
801,483	29	<b>34,1</b>	36,6	97,0	2001,0	3553,9	81248,3	-10504,4
801,483	29	<b>34,9</b>	34,5	0,0	2001,0	0,0	81248,3	-10504,4
801,587	26	<b>30,8</b>	32,9	104,0	2105,0	3418,4	84666,7	-11854,7
801,687	24	<b>27,1</b>	29,0	100,0	2205,0	2896,1	87562,8	-13544,0
801,785	25	<b>28,9</b>	28,0	98,0	2303,0	2742,4	90305,1	-15295,3
801,887	77	<b>101,9</b>	65,4	102,0	2405,0	6670,4	96975,5	-13301,9
801,987	43	<b>54,9</b>	78,4	100,0	2505,0	7837,9	104813,4	-10049,3
802,087	59	<b>76,2</b>	65,5	100,0	2605,0	6553,6	111367,0	-8081,1
802,184	48	<b>60,7</b>	68,5	97,0	2702,0	6641,3	118008,4	-5887,6
802,287	63	<b>82,1</b>	71,4	103,0	2805,0	7354,1	125362,5	-3256,4
802,387	50	<b>64,3</b>	73,2	100,0	2905,0	7321,4	132683,8	-520,3
802,487	46	<b>57,9</b>	61,1	100,0	3005,0	6113,8	138797,7	1008,2
802,587	40	<b>49,8</b>	53,9	100,0	3105,0	5387,9	144185,6	1810,8
802,686	36	<b>44,1</b>	47,0	99,0	3204,0	4649,9	148835,5	1921,2
802,787	34	<b>41,0</b>	42,6	101,0	3305,0	4299,7	153135,3	1589,7
802,881	23	<b>25,8</b>	33,4	94,0	3399,0	3142,2	156277,5	421,7
802,986	35	<b>42,4</b>	34,1	105,0	3504,0	3583,2	159860,7	-809,7
803,087	32	<b>39,1</b>	40,8	101,0	3605,0	4116,4	163977,1	-1324,4
803,187	44	<b>55,6</b>	47,3	100,0	3705,0	4731,8	168708,9	-1178,0
803,287	40	<b>49,4</b>	52,5	100,0	3805,0	5248,3	173957,2	-515,0
803,387	42	<b>53,2</b>	51,3	100,0	3905,0	5129,7	179086,9	29,3
803,486	45	<b>57,4</b>	55,3	99,0	4004,0	5472,2	184559,1	962,1
803,587	31	<b>37,1</b>	47,2	101,0	4105,0	4772,1	189331,2	1103,0
803,687	27	<b>32,5</b>	34,8	100,0	4205,0	3482,4	192813,6	0,0

(fonte: própria do autor)

(iv) Com a identificação dos dados que produzem os segmentos homogêneos, bastou realizar a plotagem dos mesmos, como mostra a figura 13.

Figura 13 – Segmentos homogêneos: trecho 13



(fonte: própria do autor)

(iv) O próximo passo foi realizar os cálculos dos parâmetros que constituem as informações para a obtenção da camada de espessura de reforço, anteriormente apresentados, na seção 5.3. Primeiro, selecionou-se a amostra do SH 1 do trecho 13 (tabela 7).

Tabela 7 – Segmento homogêneo 1: trecho 13

TRECHO 13 - Segmentos Homogêneos								
PONTO [KM]	Di - FWD [0,01 mm]	Di - VB [0,01 mm]	$\bar{D}_i$	$\Delta_i$	$\Sigma \Delta_i$	Ai	$\Sigma A_i$	Zi
799,482	32	<b>38,2</b>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
799,587	40	<b>50,2</b>	44,2	105,0	105,0	4645,9	4645,9	-168,7
799,686	42	<b>53,3</b>	51,8	99,0	204,0	5126,7	9772,6	418,6
799,787	42	<b>52,6</b>	53,0	101,0	305,0	5350,2	15122,8	1137,5
799,887	39	<b>49,1</b>	50,9	100,0	405,0	5087,8	20210,6	1639,9
799,984	43	<b>54,0</b>	51,6	97,0	502,0	5002,9	25213,4	2195,0
800,085	40	<b>50,7</b>	52,3	101,0	603,0	5286,7	30500,1	2850,5
800,185	37	<b>46,1</b>	48,4	100,0	703,0	4836,5	35336,6	3101,7
800,287	47	<b>59,9</b>	53,0	102,0	805,0	5403,1	40739,8	3827,8
800,386	44	<b>56,0</b>	57,9	99,0	904,0	5734,8	46474,6	5023,1
800,487	31	<b>37,0</b>	46,5	101,0	1005,0	4694,5	51169,1	5086,4

(fonte: própria do autor)

Em segundo lugar, considerando-se a amostra de 11 elementos, utilizou-se a expressão (21), encontrada na norma do DNER-PRO 11/79, para a obtenção do intervalo de aceitação da amostra.

$$[D - Z \cdot \sigma; D + Z \cdot \sigma] \quad \text{expressão (21)}$$

Onde:

$D$  = média aritmética;

$\sigma$  = desvio padrão;

$Z$  = valor obtido pela tabela 8.

Tabela 8: Valores de  $Z$  em função de  $n$

<b>n</b>	<b>z</b>
3	1
4	1,5
5 - 6	2
7 - 19	2,5
$\geq 20$	3

(fonte: norma DNER-PRO11/79)

Calculados os valores de  $D$  (49,7) e de  $\sigma$  (6,7), pode-se estabelecer o intervalo de aceitação<sup>10</sup>: [33;66,4].

Com o volume total de veículos  $V_t$  (57.749.461) em todo período de projeto (tabela 5), e a adoção de alguns parâmetros e adaptações<sup>11</sup>, foi possível calcular o número  $N$ . Partindo-se da expressão (4):

$$N = 0,2 \cdot 57.749.461 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 0,45 \quad \therefore \quad N = 25987257 \quad \text{expressão (22)}$$

O próximo passo consistiu em calcular os valores das deflexões admissível  $D_{adm}$ , característica  $D_c$ , e de projeto  $D_p$ . Assim, fizemos uso das expressões (12), (13) e (14).

$$\log [D_{adm}] = 3,01 - 0,176 \cdot (25987257) \quad \therefore \quad D_{adm} = 50,7 \quad \text{expressão (23)}$$

$$D_c = 49,7 + 6,7 \quad \therefore \quad D_c = 56,2 \quad \text{expressão (24)}$$

$$D_p = 56,2 \cdot 1 \quad \therefore \quad D_p = 56,2 \quad \text{expressão (25)}$$

<sup>10</sup> Eliminam-se todos os valores situados fora do intervalo de aceitação, procedendo-se a um novo cálculo de  $D$  e  $Z$ , agora, com os valores remanescentes, até que todos os valores pertençam ao intervalo obtido pela expressão (21).

<sup>11</sup> Utilizamos neste trabalho a expressão (4) de forma adaptada. Tomamos  $N = n_{vc} \cdot F_v \cdot F_s$ , onde  $n_{vc}$  é o número de veículos comerciais. Foi seguida a sugestão (DAER, 1981, p. 14 e 15) para a utilização de  $n_{vc} = 0,2 \cdot v_t$ . Para  $F_v$ , foi adotado o valor 5, pois foi considerado que os veículos comerciais causam o mesmo dano que veículos de 5 eixos padrões. O valor 0,45 surge da multiplicação de 0,9 x 0,5, em consideração ao fato de que neste trecho há pista dupla.

Finalmente, utilizou-se a expressão (15) para calcular a espessura de reforço pelo método DNER – PRO 11/79:

$$H_{ref} = 40 \cdot \log \left( \frac{56,2}{50,7} \right) \quad \therefore \quad H_{ref} = 1,86 \text{ cm} \quad \text{expressão (26)}$$

A espessura adotada<sup>12</sup> para o segmento homogêneo 1 do trecho 13 é de 3 cm.

A tabela 9 resume os valores encontrados.

Tabela 9 – Cálculo da espessura SH 1

<b>TRECHO 13 - SH 1 - pista dupla (0,5 x 0,9)</b>					<b>0,45</b>
<b>n</b>	<b><math>\bar{D}</math></b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>CV</b>	<b>Intervalo de aceitação</b>	
11	49,74	6,68	0,13	33,0	66,4
Deflexões fora do intervalo: nenhuma					
<b>ANO</b>	2015- 2024	<b>Vt</b>	57749460,7	<b>Nvc</b>	11549892,1
<b>Fv</b>	5	<b>Fs</b>	1	<b>N</b>	<b>25987257</b>
<b>Dc</b>	56,4	<b>Dp</b>	56,4	<b>Dadm</b>	50,7

<b>Href</b>	<b>1,86</b>	<b>Href adotado [cm]</b>	<b>3,0</b>
-------------	-------------	--------------------------	------------

(fonte: própria do autor)

Seguem abaixo, nas tabelas 10, 11 e 12, a apresentação dos valores dos parâmetros para os segmentos homogêneos 2, 3 e 4, respectivamente, deste trecho. Os valores calculados referem-se aos dados da tabela 6.

Tabela 10 – Cálculo da espessura SH 2

<b>TRECHO 13 - SH 2 - pista dupla (0,5 x 0,9)</b>					<b>0,45</b>
<b>n</b>	<b><math>\bar{D}</math></b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>CV</b>	<b>Intervalo de aceitação</b>	
14	30,2	5,2	0,17	17,2	43,2
Deflexões fora do intervalo: nenhuma					
<b>ANO</b>	2015- 2024	<b>Vt</b>	57749460,7	<b>Nvc</b>	11549892,1
<b>Fv</b>	5	<b>Fs</b>	1	<b>N</b>	<b>25987257</b>
<b>Dc</b>	35,4	<b>Dp</b>	35,4	<b>Dadm</b>	50,7

<b>Href</b>	<b>-6,25</b>	<b>Href adotado [cm]</b>	<b>0,0</b>
-------------	--------------	--------------------------	------------

(fonte: própria do autor)

<sup>12</sup> Seguiu-se a normalização estipulada pelo DNIT, em que considera o valor mínimo de 3cm para espessura de concreto asfáltico.

Nota. CV é o coeficiente de variação, a razão entre o desvio padrão e a média aritmética. É uma medida de dispersão da amostra.

Tabela 11 – Cálculo da espessura SH 3

<b>TRECHO 13 - SH 3 - pista dupla (0,5 x 0,9)</b>					<b>0,45</b>
<b>n</b>	<b><math>\bar{D}</math></b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>CV</b>	<b>Intervalo de aceitação</b>	
9	65,8	17,0	0,26	23,2	108,4
Deflexões fora do intervalo: nenhuma					
<b>ANO</b>	2015- 2024	<b>Vt</b>	57749460,7	<b>Nvc</b>	11549892,1
<b>Fv</b>	5	<b>Fs</b>	1	<b>N</b>	<b>25987257</b>
<b>Dc</b>	82,8	<b>Dp</b>	82,8	<b>Dadm</b>	50,7

<b>Href</b>	<b>8,52</b>	<b>Href adotado [cm]</b>	<b>9,0</b>
-------------	-------------	--------------------------	------------

(fonte: própria do autor)

Tabela 12 – Cálculo da espessura SH 4

<b>TRECHO 13 - SH 4 - pista dupla (0,5 x 0,9)</b>					<b>0,45</b>
<b>n</b>	<b><math>\bar{D}</math></b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>CV</b>	<b>Intervalo de aceitação</b>	
10	43,4	9,8	0,23	18,8	67,9
Deflexões fora do intervalo: nenhuma					
<b>ANO</b>	2015- 2024	<b>Vt</b>	57749460,7	<b>Nvc</b>	11549892,1
<b>Fv</b>	5	<b>Fs</b>	1	<b>N</b>	<b>25987257</b>
<b>Dc</b>	53,2	<b>Dp</b>	53,2	<b>Dadm</b>	50,7

<b>Href</b>	<b>0,83</b>	<b>Href adotado [cm]</b>	<b>3,0</b>
-------------	-------------	--------------------------	------------

(fonte: própria do autor)

Neste ponto, encerrou-se a aplicação do método DNER-PRO 11/79. O procedimento seguinte consistiu em utilizar o método simplificado de retroanálise de Albernaz, descrito na seção 6.2.

(v) Os dados das bacias de deflexões fornecidos pela concessionária foram organizados, conforme a tabela 13. Foram escolhidas as bacias de deflexão cuja deflexão máxima mais se aproximou da deflexão característica. Em seguida, utilizou-se a expressão<sup>13</sup> (27) para o ajustar de bacias de deflexão.

$$D_{x\text{ calc}} = \frac{D_0}{1 + k \cdot r_x^n} \quad \text{expressão (27)}$$

Onde:

$D_{x\text{ calc}}$  = deflexão calculada (corrigida), no ponto correspondente à distância radial  $r_x$  em 0,01 mm;

$D_0$  = deflexão no centro de carregamento, em 0,01 mm;

<sup>13</sup> O método de Albernaz propõe um ajuste das bacias de deflexão de campo através do método dos mínimos quadrados (MACÊDO, 2003, p. 39).

$k$ ,  $n$  = coeficientes obtidos no ajuste da bacia.

$r_x$  = distância ao centro de carregamento, em cm.

Assim, realizou-se uma pequena manipulação algébrica para que fossem obtidos os valores do termo  $k \cdot r_x^n$ , pois  $\frac{D_0}{D_x} - 1 = k r_x^n$ . A seguir, foi plotado um gráfico de  $k \cdot r_x^n$  x  $r_x$  com o objetivo de se obter os valores de  $k$  e  $n$ . Neste procedimento, escolheu-se a opção “potência” ao ser utilizado o recurso de “linha de tendência”, da planilha eletrônica.

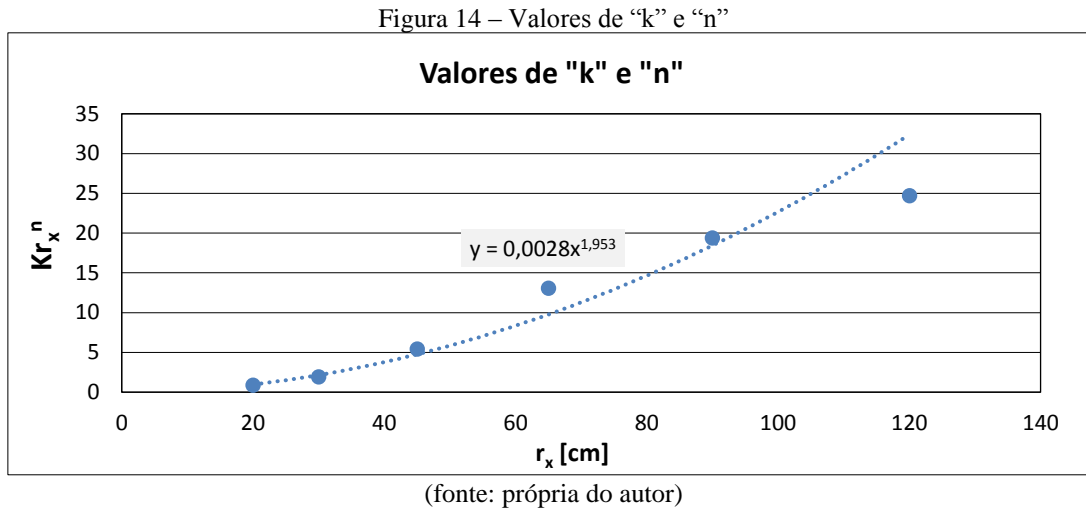
Tabela 13 – Bacias de deflexões: Trecho 13

	Deflexões (0.01 mm)							
	D0	D20	D30	D45	D65	D90	D120	
799,482	<b>89,6</b>	48	35	21	11	7	5	Sh 1
799,587	<b>87,7</b>	48	37	22	14	9	7	
799,686	<b>49,0</b>	30	24	17	11	8	6	
799,787	<b>77,8</b>	43	33	22	13	8	5	
799,887	<b>61,8</b>	24	17	12	7	6	4	
799,984	<b>70,5</b>	42	35	25	17	11	8	
800,085	<b>81,8</b>	44	32	23	15	10	6	
800,185	<b>82,8</b>	44	33	22	13	9	7	
800,287	<b>48,7</b>	26	18	9	6	4	3	
800,386	<b>59,2</b>	31	20	9	4	3	2	
800,487	<b>68,0</b>	37	25	15	8	5	5	Sh 2
800,587	<b>78,9</b>	41	27	18	10	7	5	
800,686	<b>69,2</b>	37	26	17	11	7	5	
800,787	<b>80,3</b>	44	31	20	12	7	6	
800,887	<b>64,8</b>	32	21	11	6	4	4	
800,986	<b>49,0</b>	29	22	14	9	5	4	
801,087	<b>67,6</b>	35	24	14	7	4	3	
801,186	<b>46,5</b>	24	16	9	5	3	3	
801,286	<b>46,5</b>	25	17	10	7	4	3	
801,386	<b>52,3</b>	24	16	9	4	3	2	
801,483	<b>70,5</b>	39	28	17	11	7	5	Sh 3
801,483	<b>45,6</b>	28	22	14	7	5	4	
801,587	<b>67,1</b>	36	26	16	10	7	5	
801,687	<b>59,6</b>	32	23	14	9	7	6	
801,785	<b>68,3</b>	39	29	18	12	8	5	
801,887	<b>80,4</b>	41	29	19	11	8	6	
801,987	<b>77,9</b>	39	27	17	11	7	5	
802,087	<b>81,1</b>	44	32	19	11	7	5	
802,184	<b>50,2</b>	28	20	13	8	6	4	
802,287	<b>60,3</b>	34	26	17	10	7	5	
802,387	<b>61,6</b>	35	28	19	12	8	6	Sh 4
802,487	<b>72,0</b>	41	28	18	12	8	6	
802,587	<b>56,8</b>	34	25	18	12	8	6	
802,686	<b>53,9</b>	33	26	18	11	8	5	
802,787	<b>65,5</b>	37	27	18	10	7	6	
802,881	<b>65,0</b>	37	27	19	13	8	6	
802,986	<b>64,1</b>	37	27	17	10	7	5	
803,087	<b>56,0</b>	32	24	15	11	8	6	
803,187	<b>44,2</b>	27	22	16	10	7	5	
803,287	<b>69,9</b>	41	32	21	14	10	7	
803,387	<b>58,3</b>	33	25	15	9	6	5	
803,486	<b>54,7</b>	32	26	18	12	8	6	
803,587	<b>37,7</b>	22	16	10	7	5	4	
803,687	<b>65,7</b>	34	25	17	11	8	6	

(fonte: própria do autor)

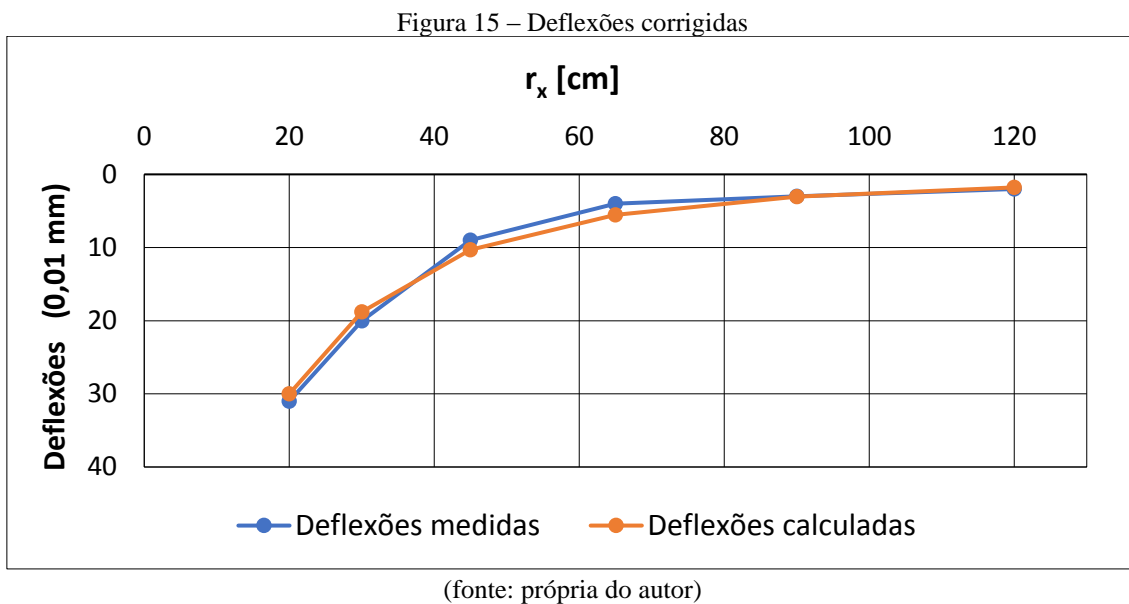


A figura 14 mostra o gráfico de  $k \cdot r_x^n$  x  $r_x$  para o segmento homogêneo 1 do trecho 13.



Os valores obtidos, foram, para  $k = 0,0028$  e para  $n = 1,953$ , conforme a figura 14.

(vi) Com os valores de  $k$  e de  $n$ , foi possível realizar o ajuste da bacia de deflexão e, assim, obter os valores corrigidos (calculados), usando-se a expressão (27). A figura 15 mostra os resultados.

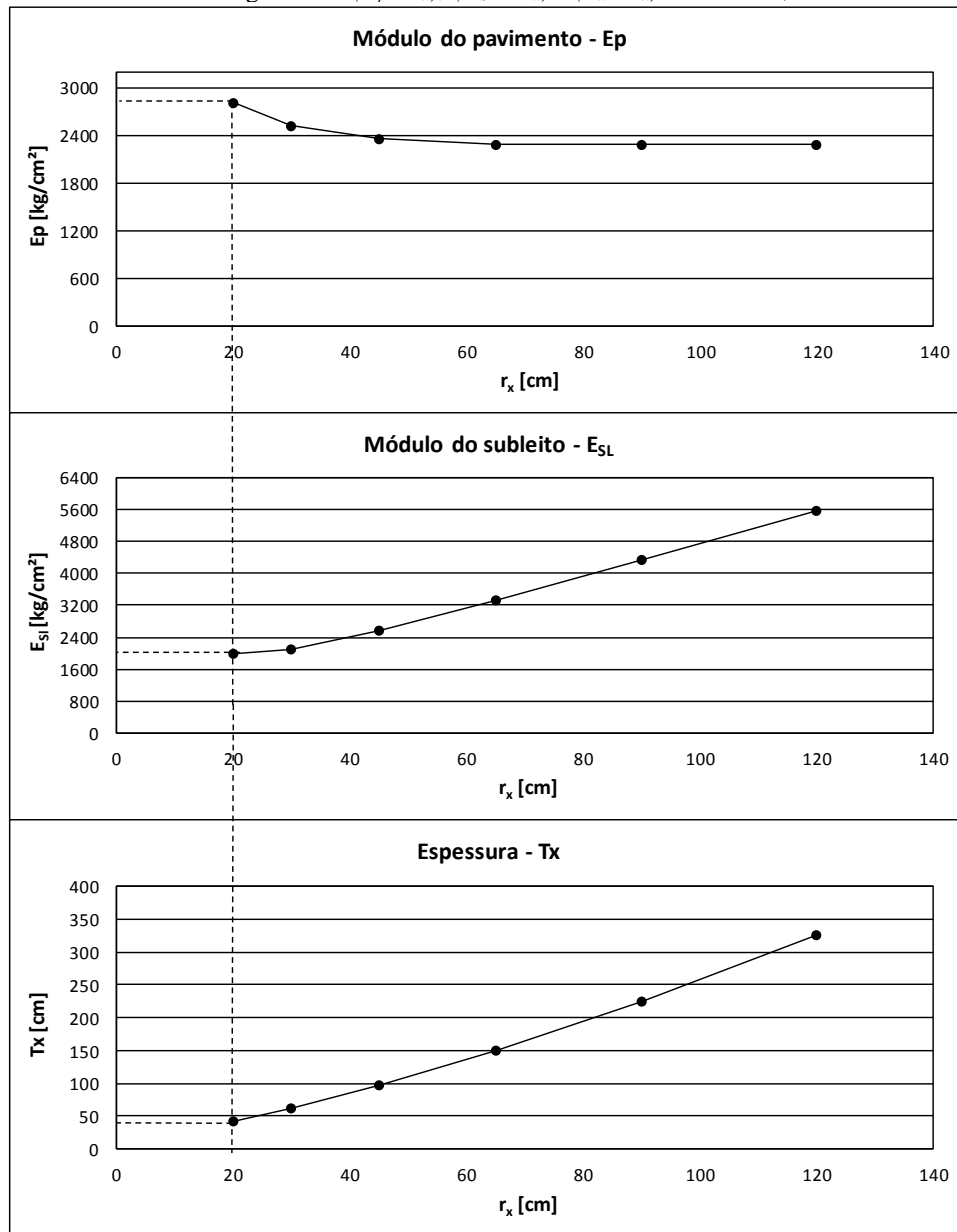


(vii) O passo seguinte foi determinar os módulos do subleito ( $E_{SL}$ ) e do pavimento ( $E_p$ ). Com isto, calculou-se o valor da espessura efetiva  $T_x$ . Foram utilizadas as expressões (17), (18) e (19), que foram programadas na planilha eletrônica. De imediato, pode-se notar que quando os valores dos produtos dos pares  $(r_x, D_x)$  são maiores, o  $E_{SL}$  atinge seu menor valor. Neste ponto, obtivemos o valor da espessura efetiva  $T_x$ , como ilustram a tabela 13 e a figura 16.

Tabela 13 – Parâmetros obtidos pelo método de Albarnaz: Trecho 13, SH 1

Dc										
59,2										
D ou $r_x$ [ $10^{-2}$ mm]	0	20	30	45	65	90	120	k	0,0028	
Deflexão Dx [ $10^{-2}$ mm]	59	31	20	9	4	3	2	n	1,953	
$k r_x^n$		0,89	1,93	5,43	13,09	19,41	24,73			
Dx <sub>calc</sub> [cm]		0,0300	0,0188	0,0103	0,0055	0,0031	0,0018			
Ep [Kgf/cm <sup>2</sup> ]		2821,60	2531,67	2362,93	2304,06	2293,83	2300,62			
E <sub>SL</sub> [Kgf/cm <sup>2</sup> ]		1988,4	2115,0	2571,7	3325,2	4335,3	5576,2			
Tx [cm]		40,8	61,5	96,8	150,3	225,3	324,5	Tx	40,8	

(fonte: própria do autor)

Figura 16 – ( $E_p \times r_x$ ); ( $E_{SL} \times r_x$ ) e ( $T_x \times r_x$ ): Trecho 13, SH 1

(fonte: própria do autor)

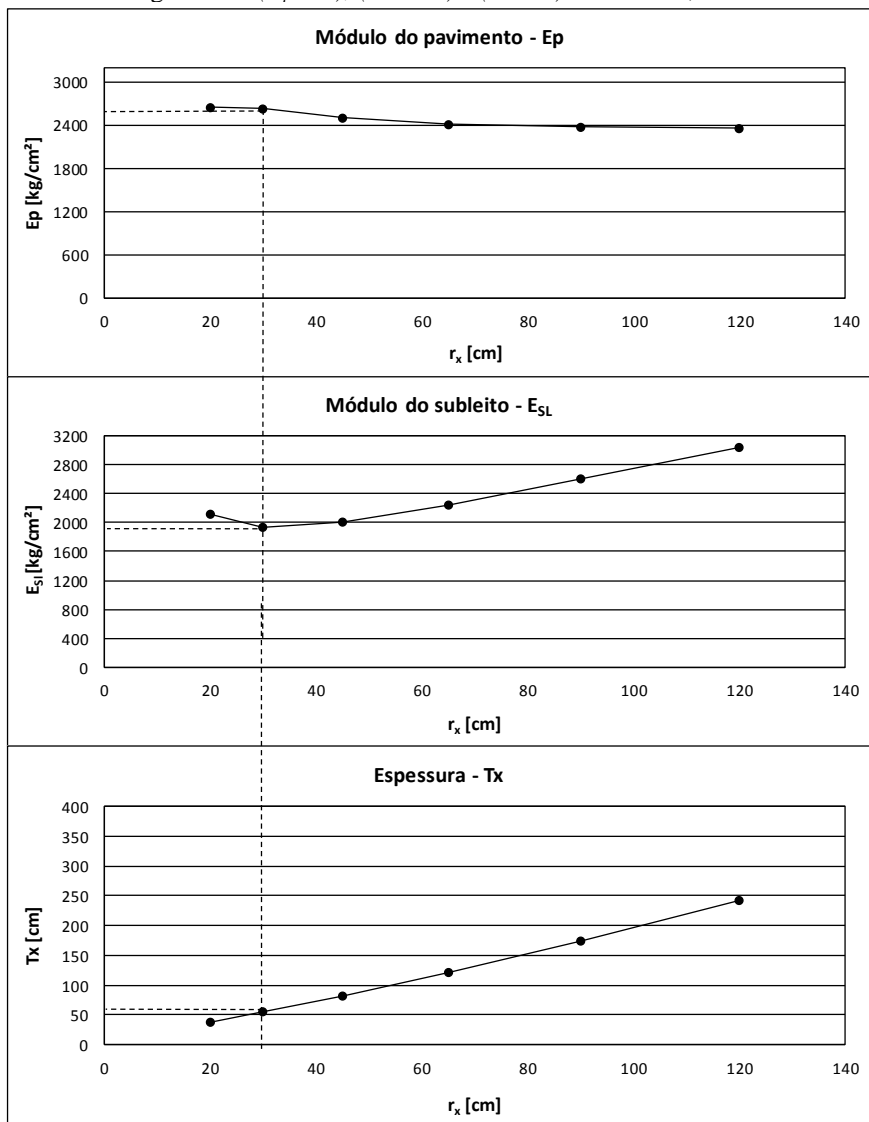
Seguem abaixo, nas tabelas 14, 15 e 16 e nas figuras 17, 18 e 19, a apresentação dos valores dos parâmetros para os segmentos homogêneos 2, 3 e 4, respectivamente, deste trecho. Os valores calculados referem-se aos dados da tabela 12.

Tabela 14 – Parâmetros obtidos pelo método de Albarnaz: Trecho 13, SH 2

<b>Dc</b>										
35,4										
<b>D ou r<sub>x</sub> [cm]</b>	0	20	30	45	65	90	120	<b>k</b>	0,0038	
<b>Deflexão Dx [10<sup>-2</sup> mm]</b>	<b>46</b>	<b>28</b>	<b>22</b>	<b>14</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>n</b>	1,6987	
<b>k r<sub>x</sub><sup>n</sup></b>		0,64	1,12	2,38	5,25	8,92	11,34			
<b>D<sub>xcalc</sub> [cm]</b>		0,0282	0,0205	0,0133	0,0082	0,0051	0,0033			
<b>E<sub>p</sub> [Kgf/cm<sup>2</sup>]</b>		2661,07	2642,23	2514,40	2425,32	2380,86	2362,06			
<b>E<sub>SL</sub> [Kgf/cm<sup>2</sup>]</b>		2112,4	1940,6	2000,4	2237,5	2594,4	3034,7			
<b>T<sub>x</sub> [cm]</b>		38,2	54,8	81,6	120,8	174,1	243,0	<b>T<sub>x</sub></b>	<b>54,8</b>	

(fonte: própria do autor)

Figura 17 – (E<sub>p</sub> x r<sub>x</sub>); (E<sub>SL</sub> x r<sub>x</sub>) e (T<sub>x</sub> x r<sub>x</sub>): Trecho 13, SH 2

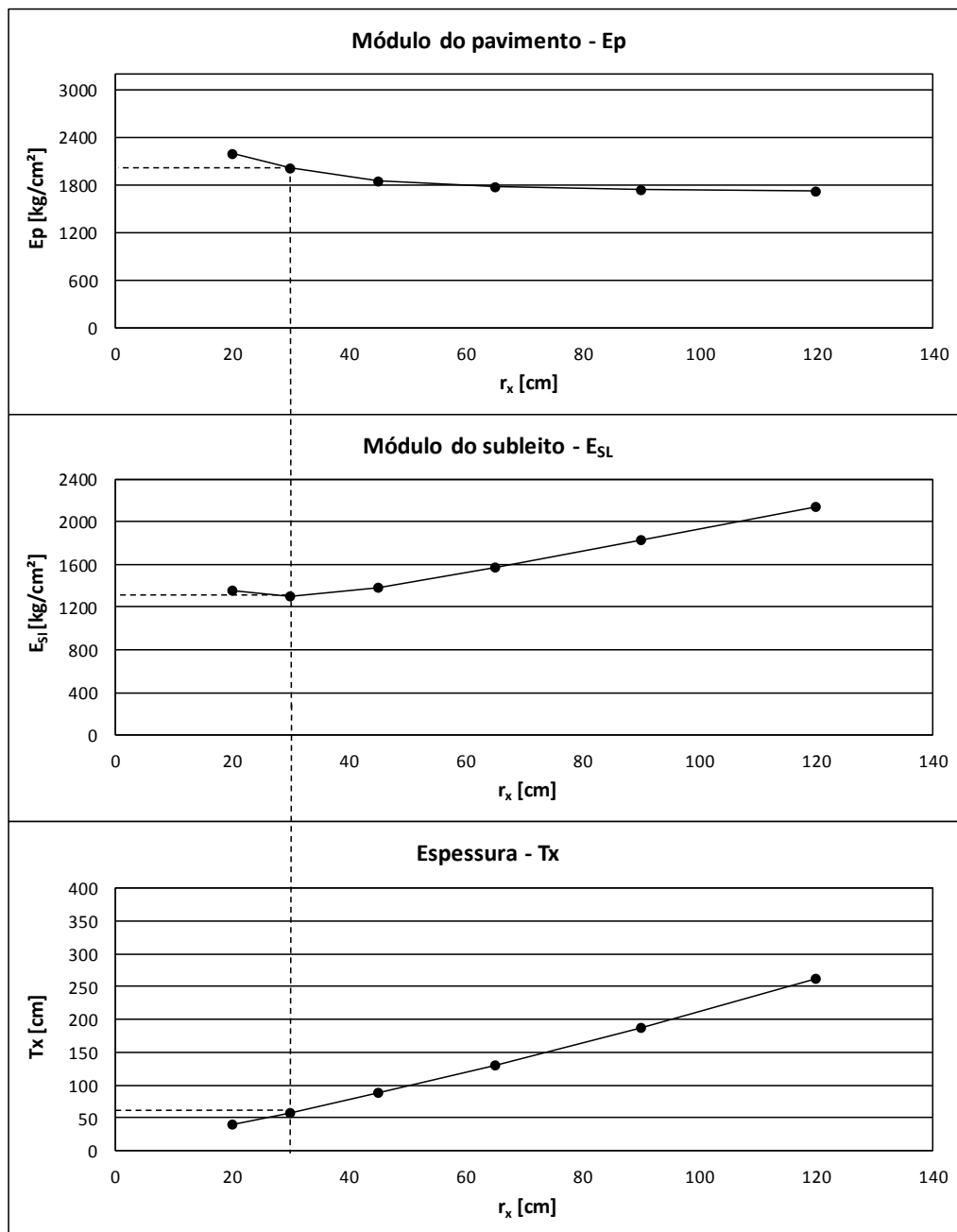


(fonte: própria do autor)

Tabela 15 – Parâmetros obtidos pelo método de Albernaz: Trecho 13, SH 3

<b>Dc</b>										
82,8										
<b>D ou r<sub>x</sub> [cm]</b>	0	20	30	45	65	90	120	<b>k</b>	0,006	
<b>Deflexão Dx [10<sup>-2</sup> mm]</b>	81	44	32	19	11	7	5	<b>n</b>	1,6533	
<b>k r<sub>x</sub><sup>n</sup></b>		0,84	1,57	3,20	6,72	10,11	15,22			
<b>D<sub>xcalc</sub> [cm]</b>		0,0439	0,0305	0,0191	0,0116	0,0072	0,0047			
<b>Ep [Kgf/cm<sup>2</sup>]</b>		2210,74	2019,65	1862,65	1780,28	1742,91	1727,42			
<b>E<sub>SL</sub> [Kgf/cm<sup>2</sup>]</b>		1360,3	1304,6	1388,1	1575,7	1832,5	2136,7			
<b>Tx [cm]</b>		39,9	58,2	87,6	130,2	187,8	261,8	<b>Tx</b>	<b>58,2</b>	

(fonte: própria do autor)

Figura 18 - ( $E_p \times r_x$ ); ( $E_{SL} \times r_x$ ) e ( $T_x \times r_x$ ): Trecho 13, SH 3

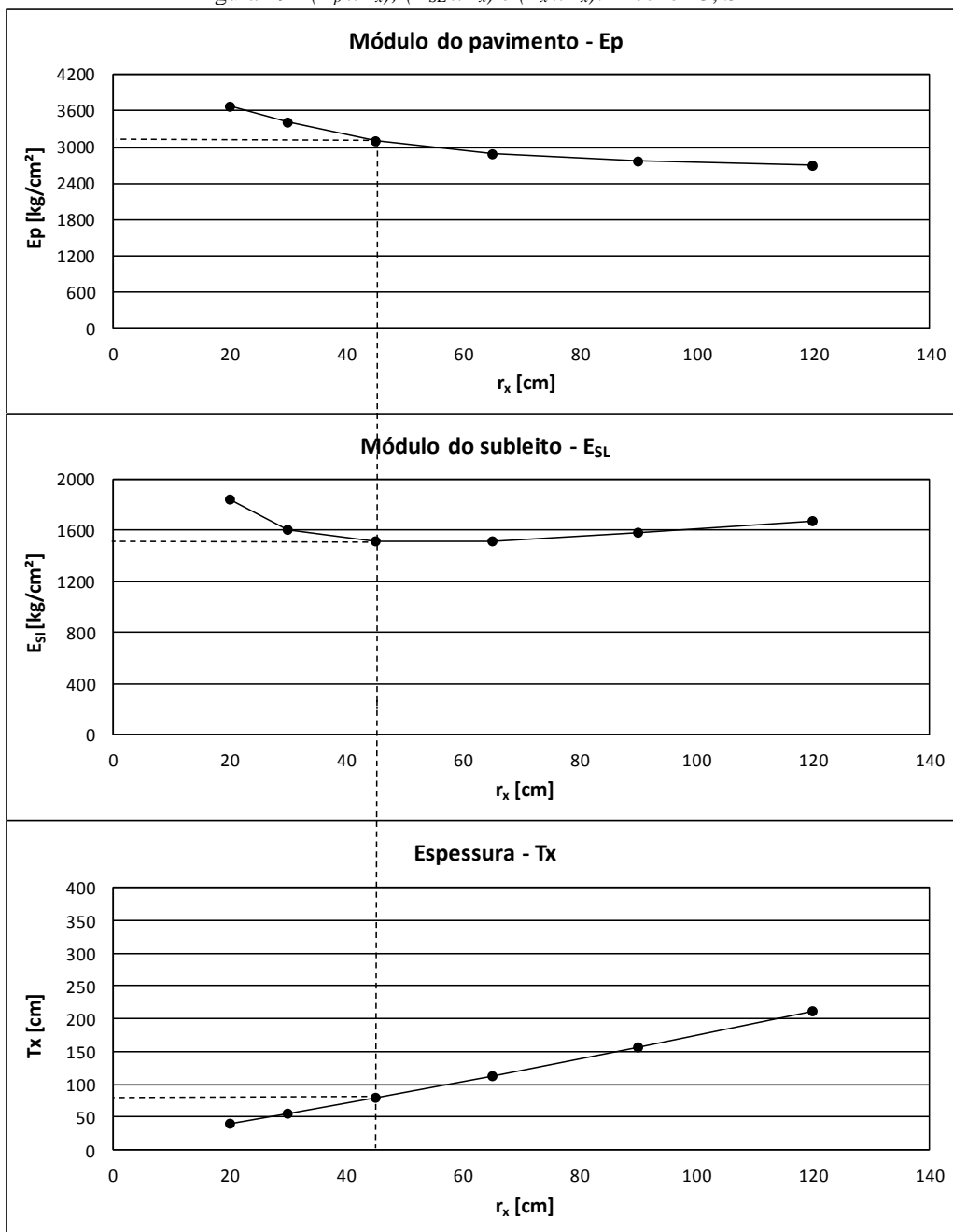
(fonte: própria do autor)

Tabela 16 – Parâmetros obtidos pelo método de Albemaz: Trecho 13, SH 4

<b>Dc</b>									
53,2									
<b>D ou rx [cm]</b>	<b>0</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>65</b>	<b>90</b>	<b>120</b>	<b>k</b>	<b>0,011</b>
<b>Deflexão Dx [10<sup>-2</sup> mm]</b>	<b>55</b>	<b>32</b>	<b>26</b>	<b>18</b>	<b>12</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>n</b>	<b>1,382</b>
<b>k r<sub>x</sub><sup>n</sup></b>		0,70	1,15	2,13	3,64	5,59	7,97		
<b>D<sub>xcalc</sub> [cm]</b>		0,0324	0,0248	0,0176	0,0121	0,0084	0,0059		
<b>Ep [Kgf/cm<sup>2</sup>]</b>		3686,63	3415,22	3108,63	2902,62	2779,92	2707,84		
<b>E<sub>SL</sub> [Kgf/cm<sup>2</sup>]</b>		1842,2	1604,7	1509,3	1514,5	1577,2	1671,5		
<b>Tx [cm]</b>		38,8	54,7	79,0	112,7	156,7	211,6	<b>Tx</b>	<b>79,0</b>

(fonte: própria do autor)

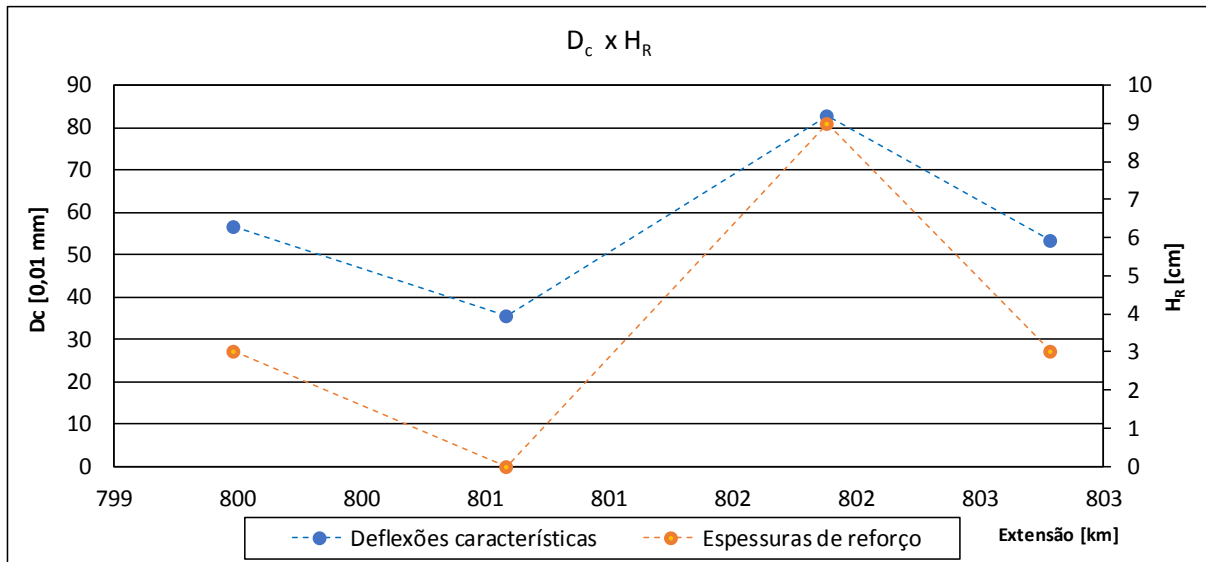
Figura 19 - ( $E_p \times r_x$ ); ( $E_{SL} \times r_x$ ) e ( $T_x \times r_x$ ): Trecho 13, SH 4



(fonte: própria do autor)

As figuras 19 e 20 ilustram as deflexões características em cada segmento homogêneo do trecho 13, bem como a camada de espessura sugerida, como medida reabilitadora. Nota-se que nos segmentos onde a deflexão característica atinge maior módulo, as espessuras de reforço são maiores.

Figura 20 – Deflexões características e espessura de reforço no trecho 13



(fonte: própria do autor)

Nesta seção, foi exposta a metodologia de aplicação do método DNER-PRO 11/79 e do método de retroanálise de Albernaz. Para efeitos de melhor compreensão, foi detalhado apenas o trecho 13, subdividido em 4 SH. Esta metodologia foi replicada ao restante dos trechos.

## 8 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados do trabalho estão apresentados na tabela 17. As soluções de projeto resumem-se a identificar se existem locais (trechos e segmentos homogêneos) da extensão analisada da rodovia BR-262/MG que necessitam de restauração sob forma de camada de reforço sobre o pavimento. Em caso positivo, dimensionar os valores das espessuras das camadas de reforço e, localizar onde devem ser realizadas as restaurações

Foi utilizado o método DNER-PRO 11/79, baseando-se na análise defletométrica. Em cada trecho, subdivididos em segmentos homogêneos, foram calculadas as deflexões características, as deflexões de projeto e as deflexões admissíveis. Desta maneira, foi possível calcular o valor da espessura de reforço. A retroanálise, através do método de Albernaz, contribuiu para verificar se a causa dos problemas estruturais decorria do subleito ou do pavimento.

Abaixo, segue a tabela 17 com os valores das espessuras de reforço ( $H_R$ ), em centímetros.

Tabela 17 – Resultados: Extensão total

	Km i	Km f	$D_c$ [0,01 mm]	$E_p$ [Kgf/cm <sup>2</sup> ]	$E_{sL}$ [Kgf/cm <sup>2</sup> ]	$T_x$ [cm]	$H_R$ adotada [cm]	TRECHO
SH 01	368,9	371,5	44,2	3509,0	2031,0	56,9	<b>0,0</b>	1
SH 02	371,5	374,5	53,0	3100,8	1864,5	57,3	<b>5,0</b>	
SH 03	374,5	376,0	67,3	2634,1	792,3	132,3	<b>9,0</b>	
SH 04	376,0	378,7	42,2	3421,9	2111,0	56,8	<b>3,0</b>	
SH 05	378,7	384,6	73,9	2372,4	1540,9	40,3	<b>10,0</b>	
SH 06	384,6	387,2	53,7	2067,0	1510,5	80,6	<b>5,0</b>	
SH 07	387,2	392,1	65,1	2363,3	2031,4	42,2	<b>8,0</b>	
SH 08	392,1	394,9	49,4	2896,2	2684,9	63,0	<b>3,0</b>	
SH 09	394,9	397,7	60,0	2504,3	2199,3	62,2	<b>7,0</b>	
SH 10	397,7	400,0	44,4	3972,1	2040,8	55,6	<b>3,0</b>	
SH 11	400,0	404,1	47,3	3708,8	2251,9	58,3	<b>3,0</b>	
SH 12	404,1	405,6	62,3	1761,7	1111,6	57,9	<b>7,0</b>	
SH 13	405,6	406,7	42,2	2702,6	1293,2	78,7	<b>3,0</b>	
SH 14	406,7	408,9	66,7	2238,5	1456,5	84,6	<b>8,0</b>	
SH 15	408,9	411,5	21,7	8435,4	2268,6	96,2	<b>0,0</b>	
SH 16	411,5	412,6	93,8	803,3	867,5	59,0	<b>14,0</b>	
SH 17	412,6	414,7	50,3	2511,7	1115,4	38,2	<b>3,0</b>	
SH 18	414,7	429,5	67,4	2492,9	1474,5	57,1	<b>9,0</b>	
SH 19	429,5	433,2	54,2	2522,6	2775,0	65,7	<b>5,0</b>	
SH 20	433,2	436,6	68,1	2129,1	2095,7	43,3	<b>9,0</b>	

continua

SH 01	447,0	449,4	27,1	5680,9	2666,2	148,6	<b>0,0</b>	2
SH 02	449,4	450,2	26,6	4205,1	2456,2	208,1	<b>0,0</b>	
SH 03	450,2	452,7	39,4	4226,7	2573,5	57,5	<b>3,0</b>	
SH 04	452,7	454,2	17,6	5777,4	2944,8	100,5	<b>0,0</b>	
SH 05	454,2	455,0	37,7	3094,6	2078,0	217,0	<b>3,0</b>	
SH 06	455,0	455,9	23,4	6534,2	3175,5	110,6	<b>0,0</b>	
SH 07	455,9	457,9	45,4	3621,6	1702,9	78,4	<b>4,0</b>	
SH 08	457,9	459,4	24,8	3086,6	2480,8	116,4	<b>0,0</b>	
SH 09	459,4	460,0	30,4	3010,9	2871,5	122,2	<b>0,0</b>	
SH 10	460,0	462,2	20,1	9951,7	4374,5	38,1	<b>0,0</b>	
SH 11	462,2	464,9	35,1	3011,8	2942,7	58,7	<b>0,0</b>	
SH 12	464,9	468,1	27,8	5572,3	2191,1	104,9	<b>0,0</b>	
SH 13	468,1	469,6	36,0	5131,7	2349,4	54,4	<b>0,0</b>	
SH 14	469,6	470,5	26,4	4945,8	1964,2	75,6	<b>0,0</b>	
SH 15	470,5	471,1	34,1	4690,7	2168,2	78,1	<b>0,0</b>	
SH 16	471,1	473,6	24,1	6819,5	2849,7	76,4	<b>0,0</b>	
SH 17	473,6	475,5	33,7	9452,9	1394,9	85,8	<b>0,0</b>	
SH 18	475,5	476,2	52,2	2551,2	1295,4	55,5	<b>6,4</b>	
SH 01	477,8	481,7	40,1	4382,6	1755,4	75,7	<b>3,0</b>	3
SH 02	481,7	489,6	64,8	2587,6	1264,0	79,1	<b>9,0</b>	
SH 03	489,6	493,5	63,0	2790,4	1315,7	54,7	<b>9,0</b>	
SH 04	493,5	494,1	29,9	4094,2	1427,1	179,6	<b>0,0</b>	
SH 05	494,1	495,3	68,2	2367,0	1176,3	79,4	<b>10,0</b>	
SH 06	495,3	500,5	40,3	3786,4	1614,2	190,0	<b>3,0</b>	
SH 07	500,5	502,5	56,1	3468,5	1082,4	72,0	<b>7,0</b>	
SH 08	502,5	504,9	26,0	5719,7	2060,3	181,3	<b>0,0</b>	
SH 09	504,9	507,5	55,1	2836,3	1633,2	82,2	<b>7,0</b>	
SH 10	507,5	512,6	44,2	3800,4	2311,1	57,5	<b>0,0</b>	
SH 11	512,6	513,3	57,3	2693,8	2004,7	60,0	<b>7,0</b>	
SH 12	513,3	523,3	25,7	6871,3	1288,2	153,2	<b>0,0</b>	
SH 01	523,3	525,3	33,1	4957,6	1479,3	172,2	<b>0,0</b>	4
SH 02	525,3	526,1	20,5	5394,1	2059,4	184,2	<b>0,0</b>	
SH 03	526,1	526,6	45,6	3476,7	1646,0	149,0	<b>3,0</b>	
SH 04	526,6	526,9	15,0	12798,4	2155,4	149,4	<b>0,0</b>	
SH 05	526,9	529,2	38,5	4216,3	1053,6	164,4	<b>3,0</b>	
SH 06	529,2	530,3	17,7	4592,1	2161,1	160,7	<b>0,0</b>	
SH 07	530,3	531,2	31,7	4647,8	1219,0	166,5	<b>0,0</b>	
SH 08	531,2	531,7	20,4	6431,3	2670,5	143,8	<b>0,0</b>	
SH 09	531,7	532,0	35,3	4263,4	1770,3	143,8	<b>0,0</b>	
SH 10	532,0	532,5	16,1	9414,8	2262,5	162,8	<b>0,0</b>	
SH 11	532,5	533,4	43,6	3666,5	1370,8	183,1	<b>3,0</b>	

continua



SH 12	533,4	535,3	25,9	9299,8	1610,0	150,3	<b>0,0</b>	4
SH 13	535,3	536,0	34,5	5471,1	1482,2	167,9	<b>0,0</b>	
SH 14	536,0	536,7	50,8	3122,2	1365,7	107,7	<b>5,0</b>	
SH 15	536,7	537,7	19,7	9886,9	2510,5	95,0	<b>0,0</b>	
SH 16	537,7	539,2	44,2	3286,5	1437,6	107,7	<b>3,0</b>	
SH 17	539,2	541,0	13,9	11008,8	4096,2	139,7	<b>0,0</b>	
SH 18	541,0	542,4	21,5	6326,9	2860,5	108,6	<b>0,0</b>	
SH 19	542,4	543,8	47,8	3257,9	2260,2	86,0	<b>4,0</b>	
SH 01	543,8	544,6	23,9	8002,0	3084,4	75,1	<b>0,0</b>	
SH 02	544,6	544,8	41,1	3729,0	1592,1	144,8	<b>3,0</b>	5
SH 03	544,8	549,5	23,4	6741,2	1670,6	164,1	<b>0,0</b>	
SH 04	549,5	550,0	46,1	3488,4	1794,9	80,0	<b>4,5</b>	
SH 05	550,0	551,2	10,1	8935,6	3774,5	106,8	<b>0,0</b>	
SH 06	551,2	552,3	41,2	3543,5	2368,2	58,6	<b>3,0</b>	
SH 07	552,3	553,7	16,8	9821,9	3780,6	104,4	<b>0,0</b>	
SH 08	553,7	554,5	62,5	2575,3	694,0	167,7	<b>8,5</b>	
SH 09	554,5	555,0	20,1	6878,2	1853,5	167,7	<b>0,0</b>	
SH 10	555,0	558,0	50,3	2676,8	2612,2	43,2	<b>5,0</b>	
SH 11	558,0	560,0	23,6	6778,5	2840,4	106,6	<b>0,0</b>	
SH 12	560,0	561,5	32,2	4963,9	2395,0	78,8	<b>0,0</b>	
SH 13	561,5	565,6	21,5	7413,0	2463,4	135,7	<b>0,0</b>	
SH 14	565,6	566,7	33,7	4407,2	2202,0	79,5	<b>0,0</b>	
SH 15	566,7	567,5	19,0	6760,3	2156,6	175,3	<b>0,0</b>	
SH 01	567,5	568,9	19,2	8758,7	4173,6	78,6	<b>0,0</b>	
SH 02	568,9	569,7	36,7	4761,1	2563,1	56,1	<b>0,0</b>	
SH 03	569,7	570,1	16,9	10200,7	3968,5	75,2	<b>0,0</b>	
SH 04	570,1	572,8	54,8	2558,2	2330,4	42,7	<b>6,5</b>	
SH 05	572,8	579,7	14,6	12082,7	3907,2	100,2	<b>0,0</b>	
SH 06	579,7	580,0	66,2	2063,1	1410,2	58,9	<b>9,5</b>	
SH 01	580,0	581,5	43,9	3720,9	2840,7	41,4	<b>3,0</b>	7
SH 02	581,5	582,5	12,7	13011,1	7485,2	82,1	<b>0,0</b>	
SH 03	582,5	585,8	43,2	3120,6	2989,7	43,1	<b>3,0</b>	
SH 04	585,8	591,0	20,2	8593,6	3822,1	77,4	<b>0,0</b>	
SH 01	591,0	594,1	24,3	2978,5	1481,4	79,4	<b>0,0</b>	8
SH 02	594,1	600,5	33,0	4867,9	1303,7	167,4	<b>0,0</b>	
SH 03	600,5	601,2	103,5	1618,1	433,4	167,4	<b>18,0</b>	
SH 04	601,2	613,2	37,1	4539,7	1215,8	167,4	<b>3,0</b>	
SH 05	613,2	618,5	48,7	3780,7	1740,1	78,0	<b>5,0</b>	
SH 06	618,5	625,9	24,9	6233,9	2357,5	183,7	<b>0,0</b>	
SH 07	625,9	629,1	37,2	4179,0	2097,5	151,4	<b>3,0</b>	
SH 08	629,1	632,2	39,0	5242,8	2630,5	38,8	<b>0,0</b>	
SH 09	632,2	638,2	56,6	2978,5	1481,4	79,4	<b>7,0</b>	
SH 10	638,2	642,6	45,5	3740,4	1901,2	111,9	<b>3,0</b>	
SH 11	642,6	650,0	95,9	1736,1	1043,0	57,3	<b>15,0</b>	

SH 01	650,0	651,6	66,2	2782,8	1697,8	57,5	<b>9,0</b>	9
SH 02	651,6	654,8	47,4	3347,4	1656,8	111,1	<b>3,0</b>	
SH 03	654,8	655,8	110,3	1376,5	1043,7	60,2	<b>17,0</b>	
SH 04	655,8	658,0	25,5	6349,4	2586,9	143,0	<b>0,0</b>	
SH 05	658,0	660,4	96,9	1656,5	1239,1	41,2	<b>15,0</b>	
SH 06	660,4	664,6	47,7	3311,9	2263,8	58,9	<b>3,0</b>	
SH 07	664,6	665,6	89,8	1715,1	1245,7	41,0	<b>14,0</b>	
SH 08	665,6	666,3	48,6	3743,4	1775,6	78,5	<b>3,0</b>	
SH 09	666,3	667,5	100,1	1413,5	966,1	58,9	<b>16,0</b>	
SH 10	667,5	669,1	43,4	3777,9	1880,7	79,4	<b>3,0</b>	
SH 11	669,1	671,3	88,3	1784,4	1219,7	58,9	<b>14,0</b>	
SH 12	671,3	672,1	61,0	6635,5	1655,8	40,2	<b>7,0</b>	
SH 13	672,1	673,3	77,1	2041,2	1395,2	58,9	<b>11,0</b>	
SH 14	673,3	685,0	42,9	3805,5	2601,1	58,9	<b>3,0</b>	
SH 01	685,0	687,3	66,3	4558,1	2592,6	156,8	<b>9,0</b>	10
SH 02	687,3	688,4	50,1	3279,3	2361,4	59,5	<b>4,0</b>	
SH 03	688,4	692,5	95,1	1682,9	1092,3	58,2	<b>15,0</b>	
SH 04	692,5	700,0	84,7	1772,4	1302,2	59,8	<b>13,0</b>	
SH 05	700,0	704,5	68,6	2348,3	1725,3	59,8	<b>9,0</b>	
SH 06	704,5	710,1	101,6	1607,4	1193,7	41,2	<b>16,0</b>	
SH 07	710,1	714,0	59,9	2563,3	1883,3	59,8	<b>7,0</b>	
SH 08	714,0	716,7	90,5	1656,1	1302,2	60,7	<b>14,0</b>	
SH 09	716,7	717,9	63,5	2053,1	2311,2	66,1	<b>8,0</b>	
SH 10	717,9	722,2	77,8	4135,1	2377,1	82,1	<b>11,0</b>	
SH 11	722,2	725,0	71,9	2553,8	1504,7	39,7	<b>10,0</b>	
SH 01	725,0	726,1	56,7	2222,0	2218,9	64,2	<b>6,0</b>	11
SH 02	726,1	727,9	76,7	2598,2	1850,5	44,0	<b>11,0</b>	
SH 03	727,9	731,1	62,5	2567,1	1709,1	58,5	<b>8,0</b>	
SH 04	731,1	732,5	78,1	2217,1	1203,8	56,2	<b>11,0</b>	
SH 05	732,5	736,2	71,7	2397,1	1414,1	57,1	<b>10,0</b>	
SH 06	736,2	737,1	69,8	2263,8	1785,1	41,6	<b>10,0</b>	
SH 07	737,1	745,2	86,4	1972,9	1163,9	57,1	<b>13,0</b>	
SH 08	745,2	746,1	59,4	2390,0	2425,9	43,6	<b>7,0</b>	
SH 09	746,1	754,2	70,4	3240,4	1446,3	58,1	<b>8,0</b>	
SH 10	754,2	755,4	91,2	1749,0	1308,0	41,2	<b>12,0</b>	
SH 01	755,4	760,2	76,7	2220,1	1254,4	56,6	<b>9,0</b>	12
SH 02	760,2	767,1	52,3	3128,7	2292,2	41,1	<b>3,0</b>	
SH 03	767,1	776,1	73,2	2112,9	1536,9	59,7	<b>8,0</b>	
SH 04	776,1	788,3	49,0	3597,7	2249,0	40,0	<b>3,0</b>	
SH 05	788,3	789,6	81,6	1495,4	1429,7	63,5	<b>10,0</b>	
SH 06	789,6	793,6	64,6	8194,7	1515,4	38,8	<b>6,0</b>	
SH 07	793,6	798,1	78,7	2406,3	1093,0	54,3	<b>10,0</b>	
SH 08	798,1	799,5	33,8	5155,1	2261,3	107,8	<b>0,0</b>	

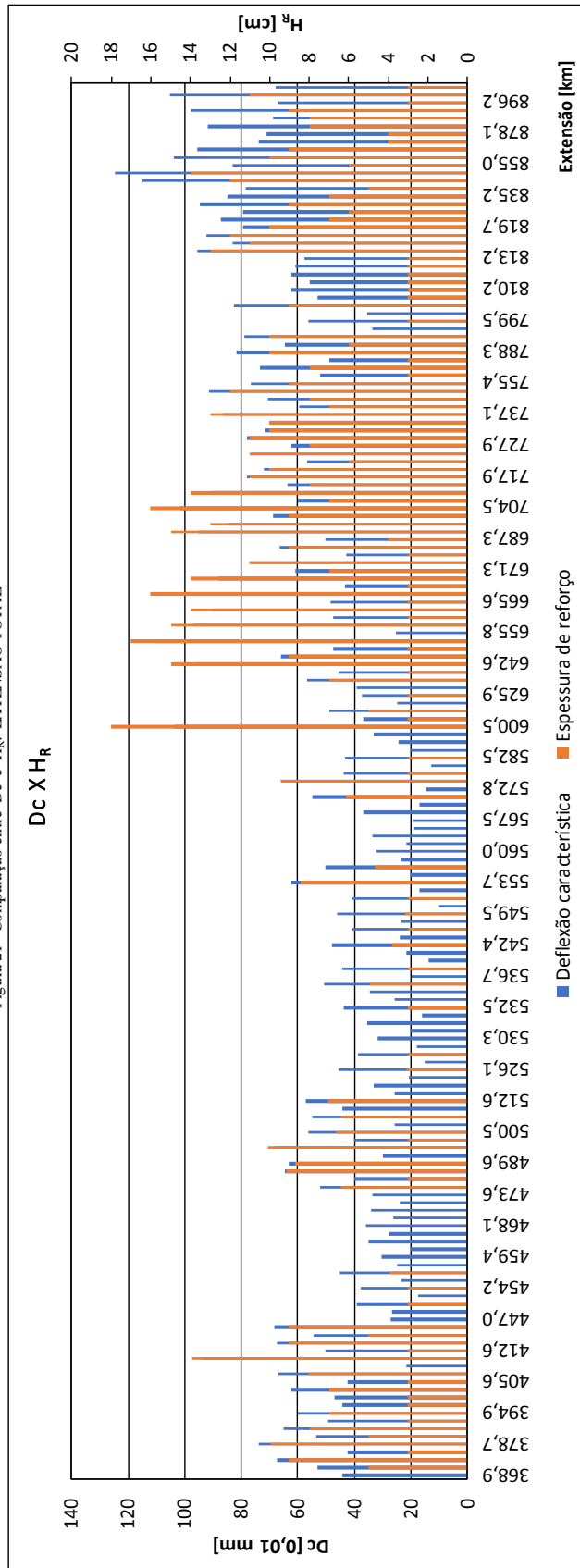
continua

SH 01	799,5	800,6	56,4	2821,6	1988,4	40,8	<b>3,0</b>	<b>13</b>
SH 02	800,6	801,9	35,4	2661,1	2112,4	38,2	<b>0,0</b>	
SH 03	801,9	802,8	82,8	2210,7	1360,3	39,9	<b>9,0</b>	
SH 04	802,8	803,7	53,2	3415,2	1604,7	54,7	<b>3,0</b>	
SH 01	810,2	811,0	62,2	2191,1	2828,1	68,4	<b>3,0</b>	<b>14</b>
SH 02	811,0	812,0	56,0	2106,5	2560,0	45,2	<b>3,0</b>	
SH 03	812,0	812,6	62,3	1989,4	2767,0	46,5	<b>3,0</b>	
SH 04	812,6	813,2	60,9	1896,5	3076,1	48,2	<b>3,0</b>	
SH 05	813,2	814,9	57,6	2557,0	2421,8	93,2	<b>3,0</b>	
SH 01	814,9	816,9	95,7	1438,4	1589,4	44,3	<b>13,0</b>	<b>15</b>
SH 02	816,9	818,2	82,9	1539,5	1797,1	44,8	<b>11,0</b>	
SH 03	818,2	819,7	92,2	1400,9	1875,2	46,1	<b>12,0</b>	
SH 04	819,7	821,0	79,3	1550,4	2329,0	47,3	<b>10,0</b>	
SH 05	821,0	824,8	87,2	1331,3	2323,9	49,0	<b>7,0</b>	
SH 06	824,8	827,2	79,5	1439,2	2512,2	49,0	<b>6,0</b>	
SH 07	827,2	835,2	94,8	1489,4	2323,7	50,5	<b>9,0</b>	
SH 08	835,2	838,1	85,1	1404,2	2672,8	51,0	<b>7,0</b>	
SH 01	838,1	844,8	78,4	1760,9	1891,0	44,1	<b>5,0</b>	<b>16</b>
SH 02	844,8	851,1	115,2	1182,9	1317,6	44,4	<b>12,0</b>	
SH 03	851,1	855,0	124,6	1090,8	1196,4	44,3	<b>14,0</b>	
SH 04	855,0	867,1	83,0	1421,0	2458,2	48,9	<b>6,0</b>	
SH 05	867,1	869,8	103,9	1078,6	1865,8	48,9	<b>10,0</b>	
SH 06	869,8	875,6	95,4	1385,4	1611,5	44,8	<b>9,0</b>	
SH 07	875,6	878,6	73,9	1889,0	2045,4	65,4	<b>4,0</b>	
SH 01	878,1	879,3	71,3	1546,5	3019,6	50,3	<b>4,0</b>	<b>17</b>
SH 02	879,3	885,2	91,8	1285,6	2247,6	49,0	<b>8,0</b>	
SH 03	885,2	888,7	68,8	1566,1	2716,8	48,9	<b>8,0</b>	
SH 04	888,7	896,2	97,8	1417,5	3627,5	49,5	<b>9,0</b>	
SH 05	896,2	902,2	67,1	1434,1	3484,6	51,3	<b>3,0</b>	
SH 06	902,2	903,6	105,2	1878,7	1942,6	49,3	<b>11,0</b>	
SH 07	903,6	904,0	67,7	1764,2	4077,6	80,1	<b>3,0</b>	

(fonte: própria do autor)

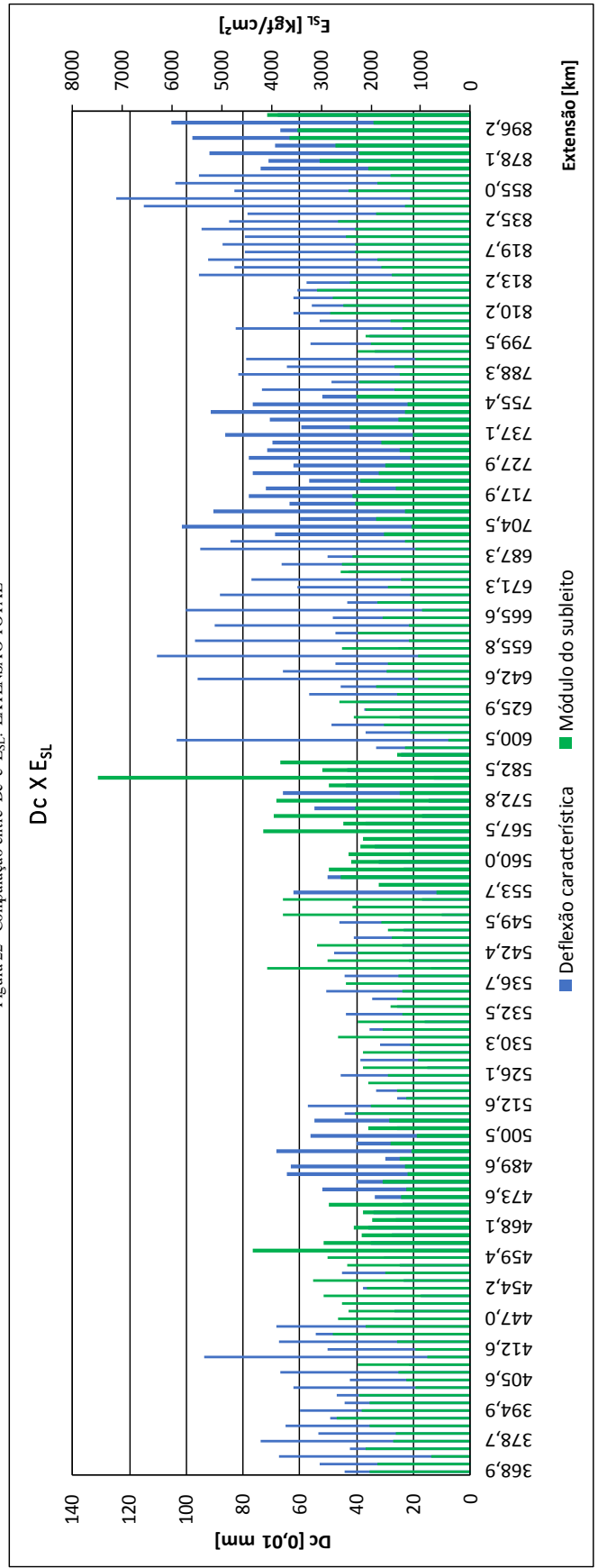
Os gráficos mostrados nas figuras 21, 22, 23, 24 e 25 têm por objetivo ilustrar de forma geral a situação estrutural do pavimento.

Figura 21 - Comparação entre Dc e H<sub>R</sub>: EXTENSÃO TOTAL



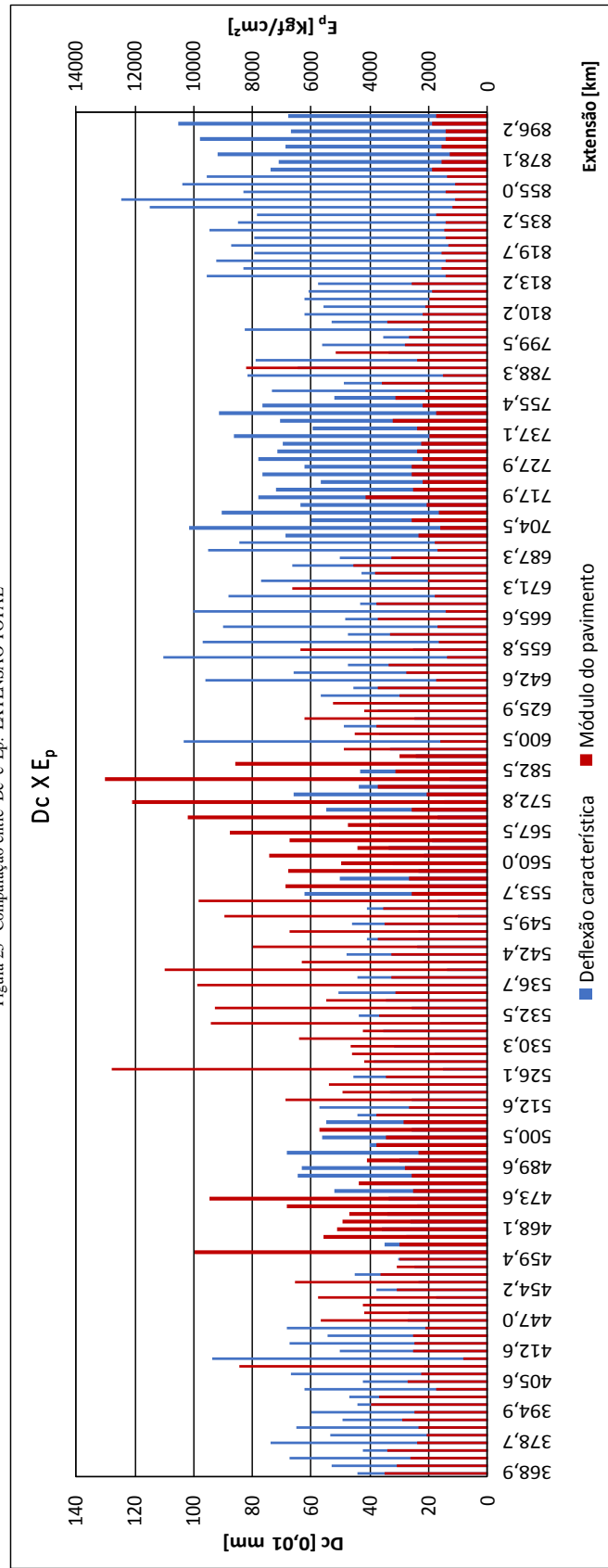
(fonte: própria do autor)

Figura 22 - Comparação entre  $D_c$  e  $E_{sl}$ : EXTENSAO TOTAL



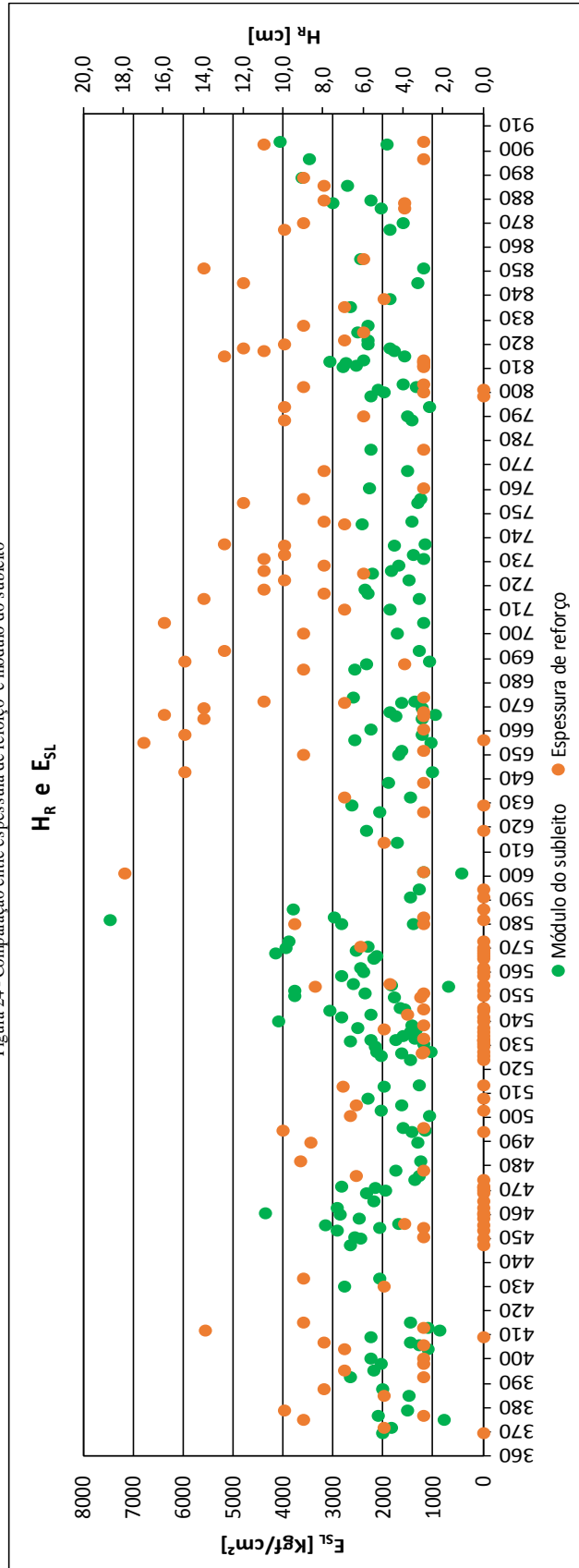
(fonte: própria do autor)

Figura 23 - Comparação entre Dc e Ep: EXTENSÃO TOTAL



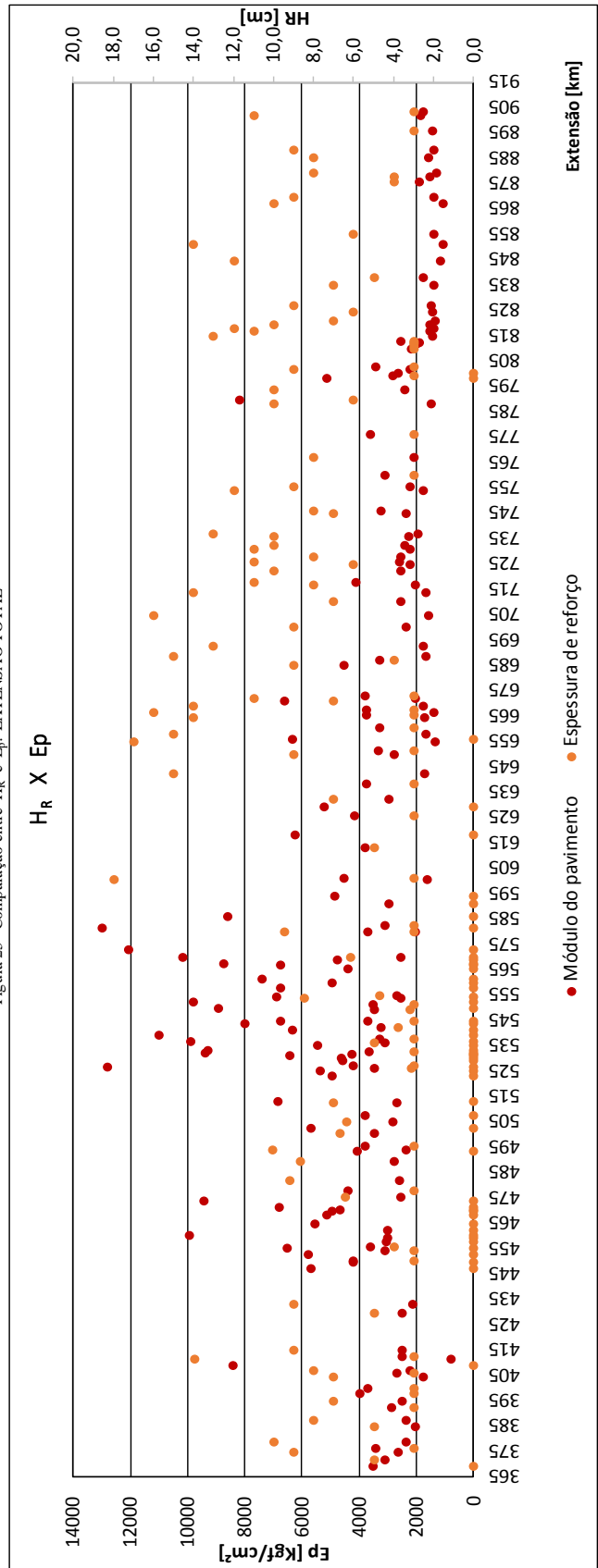
(fonte: própria do autor)

Figura 24 - Comparação entre espessura de reforço e módulo do subleito



(fonte: própria do autor)

Figura 25 - Comparação entre  $H_R$  e  $E_p$ : EXTENSÃO TOTAL



(fonte: própria do autor)



A figura 21 apresenta as deflexões características e as espessuras de reforço adotadas pelo método DNER- PRO 11/79. Nela, podemos perceber que o método sugere maiores camadas de espessura de reforço nos locais onde a deflexão característica possui valores mais elevados. Este resultado já era esperado, pois a expressão (15) relaciona a espessura de reforço  $H_R$  com a deflexão característica  $D_c$ , via deflexão de projeto  $D_p$ . Na figura 21, por exemplo, aproximadamente entre os km 440 e km 480 (trecho 2) e também entre os km 515 e km 600, é possível perceber que os valores de  $H_R$  ficam próximos de zero, necessitando pouca ou nenhuma espessura de reforço. Segmentos homogêneos com deflexões características, em geral, em torno de  $30 \times 0,01$  mm, não apresentaram necessidade de reabilitação. Das proximidades do km 625 até o final da extensão analisada, os valores das deflexões são mais acentuados, revelando uma necessidade maior de reabilitação.

A figura 22 mostra as condições do subleito ao longo da rodovia, podendo-se realizar uma comparação com as deflexões no pavimento. De maneira geral, o subleito apresentou uma resistência constante, com um pequeno acréscimo entre os km 535 e km 590.

Quanto aos módulos de elasticidade do pavimento, a figura 23 ilustra valores acentuados entre os km 520 e km 590. Deste ponto, até o final, os valores decaem sensivelmente. Se for realizada uma comparação com a figura 21, percebe-se que os maiores valores de deflexões exigem maiores camadas de reforço, indicando que nesta região, os baixos valores do módulo de elasticidade do pavimento indicam que o problema está no pavimento e não no subleito. Maiores valores de deflexão indicam maiores deformações, o que implica em módulos de elasticidade menores, de acordo com a teoria da elasticidade.

A figura 24 e a figura 25 apresentam o comportamento dos módulos do subleito e do pavimento ao longo da rodovia, em comparação com a espessura de reforço. Não foi percebida qualquer relação entre esses parâmetros.

## 9 CONCLUSÃO

Considerando-se que os dados fornecidos a este trabalho resumiram-se às deflexões medidas com equipamento FWD, a aplicação do método empírico DNER – PRO 11/79 revelou-se uma escolha adequada à proposta de dimensionamento de espessuras de reforço, como medida reabilitadora do trecho de pavimento da BR-262/MG. O método está baseado em análise defletométrica, congregando um conjunto de procedimentos fundamentados no critério da deformabilidade de pavimentos flexíveis.

Como era de se esperar, o método aplicado sugeriu a utilização de maiores valores de espessura de camada asfáltica nos segmentos homogêneos onde as deflexões características registradas apresentaram maiores magnitudes. Dessa forma, o método apresentou todos os segmentos que devem receber intervenção sob incremento de camada asfáltica, respeitando a espessura mínima de 3 cm de concreto asfáltico, normalizada pelo DNIT.

O método de retroanálise de Albernaz mostrou-se útil ao representar os módulos de elasticidade do pavimento e do subleito, permitindo identificar os segmentos homogêneos que apresentavam problemas estruturais decorrentes do pavimento ou do subleito.

Como sugestão para trabalho futuros, pode-se mencionar um possível estudo sobre os custos da reabilitação estrutural na rodovia.

## REFERÊNCIAS

- ASTM – AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. ASTM E1823-96: "*Standard terminology relating to fatigue and fracture testing*", USA, 1996.
- BALBO, J. T. Pavimentos Asfálticos: patologias e manutenção. São Paulo: Plêiade, 2002.
- BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 1. ed. (3. reimpr.). Rio de Janeiro: Petrobrás; Abeda, 2008 (reimpr. 2010).
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Boletim estatístico**. Disponível em: <file:///C:/Users/user/Desktop/Boletim%20Estat%20C3%ADstico%20-%202006%20-%202017.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2017.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-PRO 11/79**: avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis. Normas rodoviárias – Volume I. Procedimento – B. Brasília, DF, 1979. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dner-pro011-79.pdf>. Acesso em: 21 julho. 2017.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**, 3ª edição. Rio de Janeiro, RJ, 2006. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos\_internet/ipr/ipr\_new/manuais/Manual\_de\_Pavimentacao\_Versao\_Final.pdf>. Acesso em: 21 julho. 2017.
- \_\_\_\_\_. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**, 2ª edição. Rio de Janeiro, RJ, 2006. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos\_internet/ipr/ipr\_new/manuais/Manual\_de\_Pavimentacao\_Versao\_Final.pdf>. Acesso em: 21 de julho. 2017.
- \_\_\_\_\_. **NORMA DNIT 009/2003 – PRO**: Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003b. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit009\_2003\_pro.pdf>. Acesso em: 13 de julho. 2017.
- \_\_\_\_\_. **NORMA DNIT 005/2003 – TER**: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/terminologia-ter/dnit005\_2003\_ter.pdf>. Acesso em: 22 de julho. 2017.
- FRANCO, F. A. C. de P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos** – SISPAV. 2007. 294 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- MACÊDO, F. N. **Retroanálise de bacias de deflexões reais e teóricas obtidas por métodos estáticos e dinâmicos**. Universidade de Brasília, 2003.
- MARQUESINI, D. R. **Avaliação funcional e estrutural de um segmento da rua minas gerais no município de Tuneiras do Oeste – PR**. Dissertação de mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, 2012.
- MEDINA, J.; MACÊDO, J.A.D.; MOTTA, L.M.G.; ALBERNAZ, C.A.V.; (1994). **Utilização de Ensaio Deflectométrico e de Laboratório para Avaliação Estrutural de Pavimento**. In 28ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 1994..

- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, 2015.
- MORAES, C. G. **Análise de bacias deflectométricas obtidas por 4 equipamentos do tipo Falling Weight Deflectometer (FWD)**. Dissertação. Coppe/UFRJ. Rio de Janeiro, 2015
- MOTTA, L.M.G. – **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critérios de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. Tese de doutorado, Coop/UFRJ, 1991
- NOURELDIN, A.S. **A New Scenario for Backcalculation of Layer Moduli of Flexible Pavement**. Transportation Research Record. Washington., 1993. Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1993/1384/1384-004.pdf>>. Acessado em: 15/12/2017
- 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 Carlos. 2007.
- PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Tese de doutorado, Coppe/UFRJ, 1991.
- PINTO, S. e PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis**. Rio de Janeiro: COPIARTE, 2002.
- RIBAS, C. Y. **Estudo comparativo entre as metodologias empírica e empírico-mecanicista de dimensionamento de reforço de pavimentos flexíveis: um estudo de caso da rodovia BR-282/SC**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.
- SENÇO, W. **Manual técnico de pavimentação**: volume 2. 2ª ed. São Paulo: Pini, 2007