

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**ÉRICA GONÇALVES DE VARGAS**

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E RETROANÁLISE DE UM TRECHO DE  
PAVIMENTO DA AVENIDA TIARAJÚ NO MUNICÍPIO DE ALEGRETE – RS COM  
A UTILIZAÇÃO DE VIGA BENKELMAN**

**Alegrete**

**2019**

**ÉERICA GONÇALVES DE VARGAS**

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E RETROANÁLISE DE UM TRECHO DE  
PAVIMENTO DA AVENIDA TIARAJÚ NO MUNICÍPIO DE ALEGRETE – RS COM  
A UTILIZAÇÃO DE VIGA BENKELMAN**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jaelson Budny

**Alegrete**

**2019**

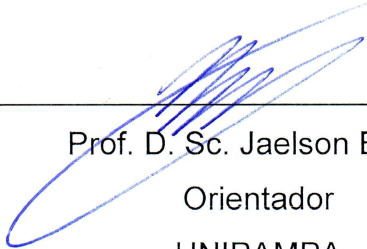
ÉRICA GONÇALVES DE VARGAS

**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E RETROANÁLISE DE UM TRECHO DE  
PAVIMENTO DA AVENIDA TIARAJÚ NO MUNICÍPIO DE ALEGRETE – RS COM  
A UTILIZAÇÃO DE VIGA BENKELMAN**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 25 de junho de 2019.

Banca examinadora:

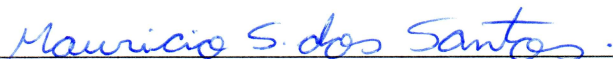


---

Prof. D. Sc. Jaelson Budny

Orientador

UNIPAMPA



---

Prof. Me. Maurício Silveira dos Santos

UNIPAMPA



---

Prof. D. Sc. Diego Arthur Hartmann

UNIPAMPA

Dedico a todos os amigos e professores que partilharam e confiaram na conclusão deste trabalho. Em especial aos meus pais Edegar e Rodiméia, irmãos Évelin e Robson e todos os familiares, pelo incentivo e apoio. E ao Guilherme, meu companheiro, em todos os momentos dessa trajetória.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal utilizar o equipamento viga Benkelman para o levantamento deflectométrico e avaliação das deformações de um trecho de pavimento flexível da Avenida Tiarajú na zona urbana do município de Alegrete. Permitir uma avaliação estrutural por meio de retroanálise utilizando o programa BackMeDiNa e obter os possíveis valores de módulos de resiliência de todos os pontos e camadas do trecho no estudo. Estimar a vida de projeto do pavimento construído a partir da avaliação da estrutura através do programa MeDiNa, encontrando resultados acerca das deformações permanentes e área de trincamento dos pontos, determinando assim, sua influência no dimensionamento de um possível reforço no pavimento construído. Foi possível observar que no trecho em estudo foram obtidos diversos valores de deflexões e variados valores de Módulo de Resiliência, essas diferentes situações resultam em vidas de projeto distintas. Possivelmente esses resultados tão diferentes são resultados da falta de controle durante a etapa de construção da via.

Palavras-Chave: deformações; retroanálise; vida de projeto.

## **ABSTRACT**

This work has as main objective to use the Benkelman beam equipment for the deflectometric survey and evaluation of the deformations of a stretch of flexible pavement of Tiarajú Avenue in the urban area of the city of Alegrete. Allow a structural evaluation through back-analysis using the BackMeDiNa program and obtain the possible values of resilience modules of all points and layers of the stretch in the study. Estimate the design life of the pavement constructed from the evaluation of the structure through the program MeDiNa, finding results about the permanent deformations and area of cracking of the points, thus determining, its influence in the design of a possible reinforcement in the constructed pavement. It was possible to observe that in the section under study several values of deflections and varied values of Resilience Modules were obtained, these different situations result in different project lives. Possibly these very different results are results of the lack of control during the stage of road construction.

Keywords: deformations; retroanalysis; project life.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de equipamentos DCP de avaliação estrutural expedita de subleitos e camadas de solo .....	19
Figura 2 – Equipamento Light Weight Deflectomete (LWD) .....	20
Figura 3 – Comportamento do pavimento submetido à aplicação de um carregamento .....	22
Figura 4 – Defeitos por trincamento e afundamento a partir de repetição de cargas	22
Figura 5 – Deflexão máxima para diferentes bacias deflectométricas .....	23
Figura 6 – Esquema de bacia de deformação e deformada .....	24
Figura 7 – Deformada e arco parabólico .....	24
Figura 8 – Esquema viga Benkelman .....	27
Figura 9 – Ensaio da viga Benkelman .....	28
Figura 10 – Esquema de leituras com a viga Benkelman para obtenção da deformada .....	29
Figura 11 – Representação dos defletômetros de impacto .....	30
Figura 12 – Sensores de medida de deflexão .....	31
Figura 13 – Correlações obtidas por vários pesquisadores (tipo $D_{FWD} = aD_{vb} + b$ ) ...	33
Figura 14 – Esquema simplificado de contribuição das camadas para a bacia de deflexão .....	35
Figura 15 – Fluxograma com o desenvolvimento do trabalho em estudo .....	36
Figura 16 – Localização do trecho da Avenida Tiarajú para estudo .....	37
Figura 17 – Composição e espessuras das camadas dos pontos 1 a 15 .....	38
Figura 18 – Composição e espessuras das camadas dos pontos 16 a 20 .....	38
Figura 19 – Pesagem do caminhão e calibragem dos pneus .....	39
Figura 20 – Detalhe da demarcação dos pontos e medição de temperatura .....	40
Figura 21 – Leituras dos pontos através de gravações e uso de trena .....	41
Figura 22 – Leitura dos pontos através do reprodutor de mídias VLC .....	41
Figura 23 – Posicionamento do equipamento .....	42
Figura 24 – Pavimentação com revestimento acima de paralelepípedo .....	42
Figura 25 – Pavimentação do trecho entre o ponto 16 e ponto 20 .....	43
Figura 26 – Interface do programa de retroanálise no software BackMeDiNa .....	47
Figura 27 – Interface do programa de retroanálise no software MeDiNa .....	50
Figura 28 – Resultado da evolução mensal dos danos em até 120 meses .....	51

Figura 29 – Bacias de deformação formadas em cada ponto de estudo .....	53
Figura 30 – Tubulação na região de estudo.....	55
Figura 31 – Deformações em relação ao Número de solicitações do eixo padrão....	56
Figura 32 – Área trincada em relação ao Número de solicitações do eixo padrão....	57



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correlações entre FWD e viga Benkelman .....	32
Tabela 2 – Estrutura do Pavimento entre os pontos 1 e 15 .....	37
Tabela 3 – Estrutura do Pavimento entre os pontos 16 e 20 .....	38
Tabela 4 – Medidas de temperatura do pavimento em cada ponto.....	40
Tabela 5 – Medidas de deflexões em cada ponto de interesse na ordem de 0,01mm .....	44
Tabela 6 – Deformações sem correção de temperaturas ( $\mu\text{m}$ ) .....	45
Tabela 7 – Valores Usuais de Coeficiente de <i>Poisson</i> para materiais de pavimento	48
Tabela 8 – Coeficientes de Regressão encontrados na curva de Fadiga .....	50
Tabela 9 – Deformações com correção das temperaturas para 25°C ( $\mu\text{m}$ ) .....	52
Tabela 10 – Módulos de Resiliência encontrados através do programa BackMeDiNa. .....	54
Tabela 11 – Valores Usuais de Módulo de Resiliência .....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
DCP	<i>Dynamic Cone Penetrometer</i>
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
IGG	Índice de Gravidade Global
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LC	Limite de Contração
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
LWD	<i>Light Weight Deflectometer</i>
ME	Método de Ensaio
MR	Módulo de Resiliência
NDT	<i>Nondestructive Testing</i>
PRO	Procedimento
IFF	Instituto Federal Farroupilha

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivo Específico	14
1.2	Justificativa	14
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
	Avaliação dos Pavimentos	16
2.1	Método Destrutivo	17
2.2	Método Semi-Destrutivo	19
2.3	Método Não-Destrutivo	20
2.4	Deformabilidade de Pavimentos	21
2.5	Equipamentos de Avaliação Estrutural Não-Destrutiva	25
2.6	Viga de Benkelman	26
2.7	Defletômetro de Impacto – Falling Weight Deflectometer (FWD)	30
2.8	Correlações entre a viga Benkelman e o FWD	31
2.9	Módulo de Resiliência	33
2.10	Noções de Retroanálise	34
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>36</b>
	Planejamento	36
3.1	Definição e caracterização do local do estudo	36
3.2	Realização de Ensaio com a Viga Benkelman	39
3.3	Retroanálise	45
3.4	Fadiga	49
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>59</b>
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	60
	REFERÊNCIAS	61

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Prego (2001) a descoberta do motor de combustão interna acarretou no início da construção de rodovias. Os Estados Unidos, em 1917, já regulamentavam suas leis federais, estaduais e municipais para atender essa demanda. A mais extensa das redes rodoviárias da América Latina encontra-se no Brasil, mas pagou-se um tributo muito alto e valioso para esse desenvolvimento, pois, para compensar o tempo perdido, em relação a outros países já desenvolvidos, foi utilizada uma tecnologia importada, sem qualquer adaptação para o solo e ação climática brasileira, provocando assim certas distorções no quesito como qualidade e durabilidade desses pavimentos implantados.

O Brasil demorou um longo período para aderir a implantação de políticas de desenvolvimento. Somente com o Decreto lei N.º 8.463, de 27 de dezembro de 1945, que instituiu o Fundo Rodoviário Nacional e reorganizou o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, criando os Órgãos Rodoviários Estaduais como referência do DNER.

O início da elaboração de procedimentos e adaptações específicas, promovidas para a construção dessas rodovias no país, foram desenvolvidas pelo antigo Laboratório Central (atual Divisão de Pesquisas), mas não obteve boa aceitação no quesito tecnológico. Somente no ano de 1960 é que foi publicado o Manual de Pavimentação do DNER. Essa carência de regimento para a execução de serviços de pavimentação não terminou, pois, algumas soluções ainda eram reformuladas no decorrer das obras, com determinados prejuízos técnicos para a pavimentação e altos gastos não programados.

Segundo Balbo (2007), a partir de 1960 nos países mais ocidentais da Europa, sobreveio uma maior preocupação quanto a duração das estradas, escoamento apropriado das chuvas e adesão entre pneu-pavimento. Para isso, pensou-se no uso de misturas asfálticas que fornecessem essa devida garantia de segurança e conforto para os usuários.

Essa camada de revestimento com o uso de misturas asfálticas deve, portanto, ser bem resistente e impermeável. No Brasil é utilizada uma mistura de agregados de minério, variáveis em forma e tamanho, juntamente com ligante asfáltico com a devida dosagem.

Com essa mistura pode-se obter um material adequado e com a garantia de que sejam atendidas as condições técnicas para receber às solicitações de projeto, além de atender aos atuais requisitos de qualidade quanto ao trincamento, fadiga, duração, flexibilidade, capacidade de carga entre outros (BERNUCCI *et al.*, 2008).

As misturas asfálticas são destinadas a resistir aos carregamentos impostos pelo tráfego e, portanto, sofrem com tensões e deformações ao longo da sua utilização. A combinação de materiais estruturais do pavimento é de extrema importância, para controlar, prevenir defeitos e problemas que ocorrem devido a deformações permanentes, que interferem no conforto e segurança dos usuários.

O manual do DNER faz o uso de parâmetros para a avaliação estrutural em pavimentos flexíveis, através da determinação de deflexões, raio de curvatura e elaborações de métodos de retroanálises.

A viga Benkelman é um equipamento que serve para a obtenção de dados de deflexões, para posterior avaliação estrutural de capacidade dos pavimentos, tal equipamento é empregado até os dias atuais. As normas rodoviárias estão fundamentadas nos resultados obtidos, através dessas medidas de deflexões encontradas, para utilização em projetos de restauração dos pavimentos.

Segundo Balbo (2007), no ano de 1953, o equipamento foi criado pelo engenheiro do Departamento de Transportes da Califórnia, A.C. Benkelman que utiliza um conjunto de vigas metálicas com um tipo de alavanca, formando dois braços e um caminhão simples de roda dupla carregado em seu eixo traseiro para a obtenção de deformações nos pavimentos. Em 1968 foi executado o primeiro recapeamento dimensionado utilizando-se da viga Benkelman no trecho compreendido entre a Vila Scharlau e Rincão do Cascalho no Rio Grande do Sul (PREGO, 2001).

Para Santos (2015), esses levantamentos e pesquisas realizados, ajudam os projetistas com informações valiosas, a obter uma previsão para avaliação e o encontro da alternativa de dimensionamento mais adequado, para a condição estrutural do pavimento encontrado, fornecendo aos usuários o devido conforto e seu deslocamento em condições seguras pelas estradas.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar as deflexões de um trecho de pavimento flexível da Avenida Tiarajú na zona urbana de Alegrete, para permitir por meio de retroanálise estimar a vida de projeto do pavimento construído.

### **1.1.2 Objetivo Específico**

- Efetuar, com o uso da viga Benkelman, ensaios deflectométricos na via;
- Por meio de retroanálise obter os possíveis módulos de resiliência das camadas;
- Estimar qual a provável vida de projeto da via utilizando modelo empírico mecanístico de dimensionamento de pavimentos flexíveis.

### **1.2 Justificativa**

O estudo do trecho através da análise de deformações proporcionara uma avaliação mais técnica referente à condição do pavimento e sua qualidade, servindo como auxílio no planejamento de medidas mais eficazes para a conservação e manutenção da via, em prol do seu bom funcionamento no seu período de vida útil.

O acesso ao município de Alegrete, na fronteira oeste do estado, assim como o escoamento da produção agrícola, base da economia local, é realizado em sua totalidade por vias e rodovias. A Avenida Tiarajú localizada no lado leste da cidade configura como uma das principais vias da cidade. Sua importância não apenas para a mobilidade urbana, mas também para a economia do município é ressaltada pelos seguintes pontos:

1. Acesso às rodovias RS-377 e a BR 290. O ingresso a essas rodovias torna possível a entrada ao Instituto Federal Farroupilha (IFF), uma das instituições acadêmicas mais renomadas da região.

2. Ligação dos municípios de Manoel Viana, São Francisco de Assis, Santiago, São Vicente do Sul e demais municípios da região central do estado do Rio Grande do Sul.

3. O 8º Subdistrito – Rincão de São Miguel se trata do 2º maior produtor de produtos agropecuários do município. O ingresso a este subdistrito e o transporte e distribuição da produção oriunda da região é realizada exclusivamente através da Avenida Tiarajú de modo que é comum o tráfego de caminhões na via.

4. A Avenida Tiarajú está localizada na zona leste do município, que vem apresentando crescimento populacional considerável e conseqüentemente maior trafegabilidade de veículos na região, devido a instalação da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), e se transformando num polo educacional alavancando financeiramente a parte leste do município.

A implantação dessas melhorias proverá ao município uma rota necessária para entrada e distribuição da produção e possibilitará aos usuários não apenas conforto, mas principalmente mais segurança ao trafegar pelo trecho revitalizado.

O projeto que está sendo executado, foi concebido com uso do método empírico do DNIT e o mesmo muitas vezes não leva a resultados adequados ao dimensionamento estrutural para a expectativa de vida do pavimento. Nesse contexto, a interpretação completa das bacias de deflexão, é a melhor forma de avaliação da condição real de um pavimento, aliado assim aos métodos de retroanálise. Esses elementos tornaram-se fundamentais para a análise estrutural, prevendo assim a vida útil do projeto em questão.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### Avaliação dos Pavimentos

Segundo Borges (2001), os pavimentos sofrem deterioração funcional e estrutural, que através de avaliações combinadas possibilitam a caracterização e a descrição do comportamento do pavimento, possibilitando uma análise mais precisa para a definição de possíveis reparos.

As deteriorações funcionais são percebidas na maioria das vezes pelos próprios usuários, pois estes defeitos estão localizados na superfície do pavimento e influenciam na sua segurança e seu conforto ao rolamento que conseqüentemente afeta o veículo gerando mais custos. O levantamento desses defeitos tem por finalidade fazer uma avaliação da qualidade do pavimento para uma alternativa de restauração adequada e necessária.

Existem alguns métodos e procedimentos para a avaliação funcional que contribuem para o controle da qualidade da superfície do pavimento e reabilitação do mesmo. A esse respeito, Bernucci *et al.* (2008) cita alguns processos utilizados para a avaliação funcional:

- Serventia;
- Irregularidade Longitudinal;
- Defeitos de Superfície;
- Avaliação Objetiva de Superfície pela Determinação do Índice de Gravidade Global (IGG);
- Avaliação de Aderência em Pistas Molhadas e
- Avaliação de Ruído provocado pelo tráfego.

Segundo Pessoa (2012) a avaliação da deterioração estrutural do pavimento tem por alvo conhecer a completa caracterização dos elementos e variáveis da estrutura para a elaboração de um projeto de restauração ou reforço. Essa avaliação e eventual recuperação recomenda-se que ocorra antes que a camada da base seja afetada pelos danos, sendo às vezes apenas necessárias intervenções mais simplificadas que a recuperação total do pavimento ou de um determinado trecho abordado.



As normas, procedimentos e especificações utilizadas para avaliação estrutural dos pavimentos são segundo Pessoa (2012):

- DNIT – PRO 10/79 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento A;
- DNIT – PRO 11/79 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento B;
- DNER – PRO 159/85 – Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos;
- DNER – ME 024/94 – Pavimento – Determinação das Deflexões pela Viga Benkelman;
- DNER – ME 061/94 substituída pela norma vigente DNIT 133/2010 – ME – Pavimentação Asfáltica – Delineamento da Linha de Influência Longitudinal da Bacia de Deformação por intermédio da Viga Benkelman;
- DNER – ME 039/94 – Pavimento – Determinação das Deflexões pelo Dynaflect;
- DNER – ME 175/94 – Aferição de Viga Benkelman
- DNER – PRO 269/94 – Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis – Tecnapav
- DNER – PRO 273/96 – Determinação das Deflexões utilizando o deflectômetro de impacto Tipo "Falling Weight Deflectometer – FWD"

A avaliação estrutural caracteriza a estrutura do pavimento associado ao seu comportamento aos danos e defeitos causados pela repetição de carregamentos e por efeitos ambientais. A determinação da estrutura possibilita a verificação das condições de integridade das camadas subjacentes ao revestimento, que podem conter deformações elásticas (recuperáveis), e deformações plásticas (permanentes). As deformações podem ser avaliadas pelo método destrutivo, método semi-destrutivo e método não-destrutivo. (BALBO, 2007).

## **2.1 Método Destrutivo**

Bernucci *et al.* (2008) descreve o método destrutivo, que tem a finalidade de reconhecer as demais camadas do pavimento, de um modo mais agressivo, podendo ser de maneira manual ou mecânica. O intuito do método é chegar a definição dos

materiais e de suas devidas espessuras, caracterizando por completo a estrutura física do pavimento com a retirada de amostras para a realização de ensaios posteriores.

Os processos mais conhecidos para essa caracterização são:

- Abertura de cavas à pá ou picareta;
- Abertura de furos a trado;
- Concha ou helicoidal;
- Abertura de trincheiras transversais à pista e
- Extração de amostras de revestimentos e bases com sondagens rotativas.

De acordo com o manual DNER (1998), a coleta dessas amostras deformadas ou indeformadas, que são realizadas através dos processos citados, podem nos oferecer informações laboratoriais sobre o pavimento como:

- (a) limites de Atterberg – índice (LL, LP, LC);
- (b) teor de umidade;
- (c) espessuras;
- (d) uniformidade do material na camada;
- (e) tipo de material;
- (f) intrusão do material de subleito nas camadas de sub-base ou base;
- (g) permeabilidade;
- (h) capacidade de suporte (CBR);
- (i) módulo resiliente;
- (j) características tensão-deformação (resistência à tração ou compressão, comportamento à fadiga, deformações permanentes sob cargas repetidas);
- (k) teor de asfalto;
- (l) granulometria.

As desvantagens desse tipo de avaliação são, dificuldades de demonstrar o estado de tensão, condições ambientais e o desempenho existentes em campo que não são alcançadas em sua totalidade mesmo com amostras indeformadas.

## 2.2 Método Semi-Destrutivo

É um método que utiliza instrumentos de porte menor, com pequenas dimensões, com aberturas menores no pavimento, para a investigação da capacidade de carga da via com o uso, por exemplo, de cones dinâmicos de penetração (DCP) demonstrado na Figura 1 e o Light Weight Deflectometer (LWD). A aplicação destes ensaios só permite, em geral, correlação com o Índice de Suporte Califórnia (ISC) ruptura dos materiais, com certa precisão.

Figura 1 – Exemplo de equipamentos DCP de avaliação estrutural expedita de subleitos e camadas de solo



Fonte: Bernucci et.al. (2006, p.444)

Outro equipamento, segundo Medina e Motta (2015), de pequeno porte é o Light Weight Deflectometer (LWD), conforme a Figura 2. Um deflectômetro manual com um peso de 15kg acoplado a uma placa e três sensores que realizam a medição, através do impacto, da deformabilidade das camadas chegando-se aos resultados dos módulos de resiliência em campo.

Figura 2 – Equipamento Light Weight Deflectometre (LWD)



Fonte: Medina e Motta (2015, pg. 568 apud MIRANDA, 2013)

### 2.3 Método Não-Destrutivo

Segundo Balbo (2007) a determinação da capacidade estrutural do pavimento, obtida através de métodos não-destrutivos, se faz por meio de equipamentos que tem por objetivo simular de forma mais real as condições do tráfego. A estrutura é submetida a um carregamento aplicado e realiza-se uma medição das deformações que lhe são transmitidas.

A esse respeito, LOPES (2012) descreve:

Os ensaios não-destrutivos, chamados de NDT (*Nondestructive Testing*), são aqueles realizados sem a alteração das condições físicas da estrutura. Como esses ensaios geram menores interrupções no tráfego, eles fornecem maior flexibilidade para a avaliação quantitativa da condição estrutural do pavimento em qualquer período de vida útil do pavimento e ainda possibilita a reavaliação no mesmo ponto ensaiado. Uma importante vantagem dos ensaios não-destrutivos é a medição da resposta real do pavimento ao carregamento aplicado, sem submeter os materiais a alterações físicas causadas nas retiradas de amostras. Avaliam-se parâmetros superficiais através de equipamentos que não afetem a estrutura. As medidas dos deslocamentos recuperáveis na superfície (deflexões) é uma das formas mais difundidas de se avaliar a condição estrutural do pavimento. Existem outros tipos de medidas que podem ser obtidas de ensaios não-destrutivos, como a irregularidade longitudinal, macro e microtextura do revestimento que fazem parte da avaliação funcional. Porém nenhuma outra medida se correlaciona tão diretamente com a condição estrutural do pavimento quanto às deflexões. (pg. 13).

Os ensaios não-destrutivos são a maneira mais adequada para se determinar resultados mais próximos da estrutura do pavimento. De acordo com o DNER os ensaios não-destrutivos podem ser utilizados para:

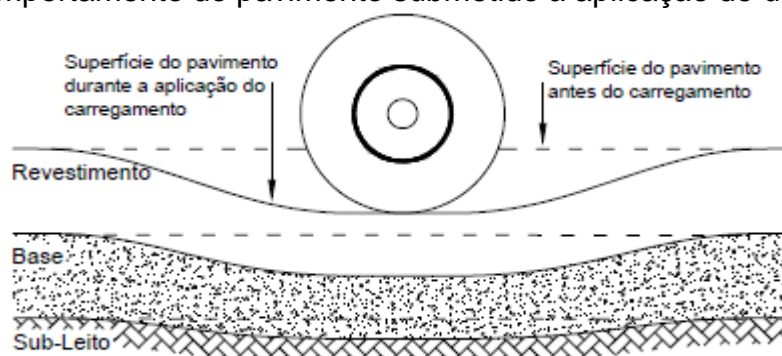
- (a) auxiliar o projeto de reforço estrutural;
- (b) distinguir os diferentes segmentos para efeito de projeto em função dos valores de deflexão encontrados;
- (c) determinar causas de defeitos e verificar locais com falta de suporte ou excesso de vazios;
- (d) diferenciar os períodos críticos de deterioração do pavimento com função das variações sazonais nas deflexões;
- (e) indicar a capacidade da estrutura do pavimento em suportar o tráfego atual e futuro;
- (f) avaliação dos módulos de elasticidade por retroanálise.

#### **2.4 Deformabilidade de Pavimentos**

Segundo Bernucci *et al.* (2008) a ação das cargas no pavimento provoca deslocamentos verticais que podem causar deformações elásticas e deformações plásticas.

As deformações elásticas são um tipo de comportamento que resulta da flexão das camadas devida as tensões, conforme a Figura 3, e ao carregamento, que pode causar por sua repetição o fenômeno da fadiga (trincamento generalizado), mostrado na Figura 4.

Figura 3 – Comportamento do pavimento submetido à aplicação de um carregamento



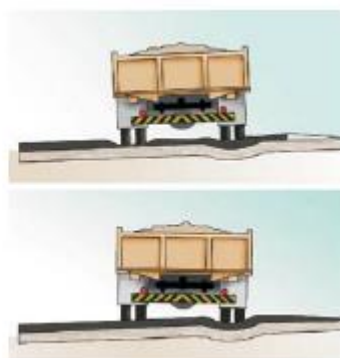
Fonte: Zanetti (2008, p.16)

Segundo o DNIT–ME 133/2010, norma que traz por intermédio da viga Benkelman, o método de ensaio para o cálculo das deflexões e o desenho da linha de influência, que são medidos em vários pontos ocasionados pela carga aplicada. As deformações permanentes resultam no afundamento de trilha de roda e rupturas de natureza plástica nas vias, esses deslocamentos demonstrados na Figura 4, continuam mesmo após o efeito do carregamento imposto ao pavimento ser retirado, podendo interferir notoriamente na condição de conforto e segurança do usuário.

Figura 4 – Defeitos por trincamento e afundamento a partir de repetição de cargas



(b) trincamento



(a) trilha de roda

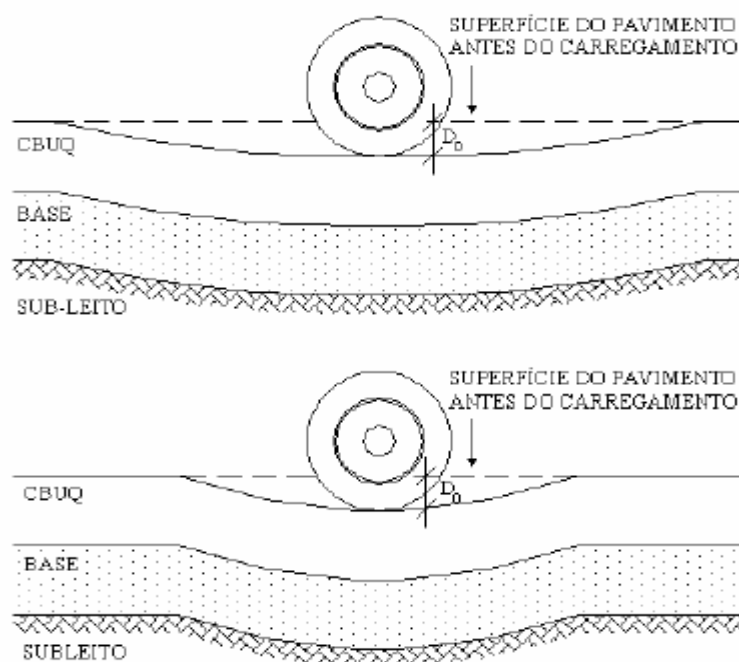
Fonte: Bernucci et.al. (2006, p.445)

Segundo DNER (1998) o estudo das condições de deformabilidade dos pavimentos flexíveis permite a compreensão do seu comportamento mecânico, já que refletem e caracterizam os materiais utilizados no local. A atuação das cargas como citado, produz um deslocamento vertical nas camadas, essa magnitude da deformação é variável e depende das características do pavimento, como sua geometria, e do equipamento utilizado bem aferido, sendo necessário saber o valor

de carga aplicado, pressão dos pneus e a relação da posição de medida com a posição de carregamento.

Medina e Motta (2015), afirmam que é possível distinguir três fases do uso de deformações como critério de avaliação estrutural das camadas do pavimento. A primeira fase seria a mais simples, utiliza somente a deflexão máxima sob o centro da carga, como demonstrado na Figura 5, expressa em  $10^{-2}\text{mm}$  ( $d_0$ ), medida através de um critério de ruptura empírico, por observações se chega na vida útil do pavimento.

Figura 5 – Deflexão máxima para diferentes bacias deflectométricas

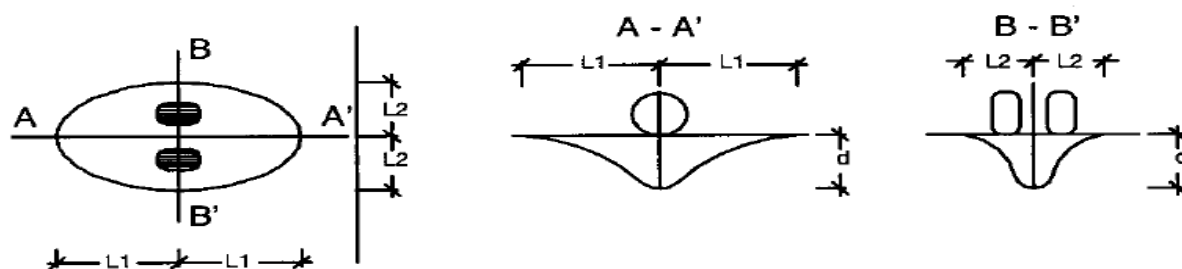


Fonte: Nobrega (2003, p.12)

De acordo com Pandolfo (2015 apud ALBANO, 2005) as bacias de deformação são um conjunto de deslocamentos que se dissipam à medida que se afasta do ponto de aplicação da carga, quanto maior esse valor mais elástica ou resiliente é a estrutura e maior será seu comprometimento, quanto menor esse valor mais rígido e estático, admitindo-se que as suas condições são melhores do ponto de vista que se deformam menos e conseqüentemente apresentarão maior vida útil de pavimentação.

Para esclarecer melhor o DNER considera uma carga dupla estática aplicada na superfície onde forma-se uma elipse com o eixo maior na direção do tráfego, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Esquema de bacia de deformação e deformada

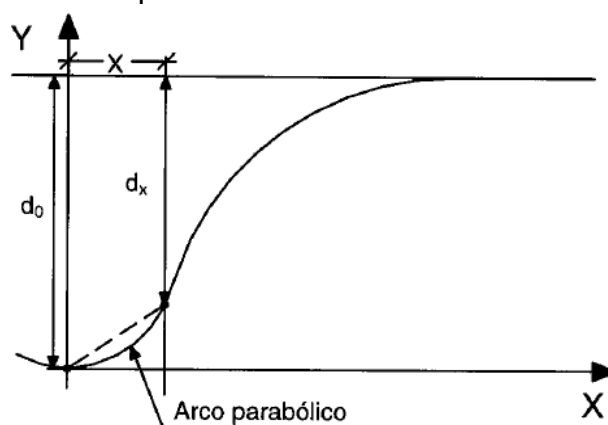


Fonte: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998, p.58)

A seção longitudinal (seção A–A') seria a deformada que demonstra a deflexão máxima que ocorre no centro da carga e seus raios horizontais são idênticos. Na seção transversal (seção B–B') os raios são iguais porém com valores inferiores a seção longitudinal, causando um arqueamento maior o que explica o início de trincas no sentido longitudinal do carregamento.

Na fase 2 a deflexão máxima em muitos casos não expressa o comportamento global da estrutura, tornando-se necessário definir outros parâmetros incorporando mais uma medida de deflexão, essa medida ficaria a certa distância da aplicação da carga como demonstra a Figura 7. Isso permite um conhecimento mais apropriado da flexibilidade a partir da determinação do raio de curvatura, que seria um arco de parábola ou círculo que passa por dois pontos da deformada, normalmente está localizada sob a carga e a 25 cm do centro ( $d_0$  e  $d_{25}$ ) seriam agora indicadores da capacidade estrutural do pavimento (MEDINA e MOTTA, 2015).

Figura 7 – Deformada e arco parabólico



Fonte: DNER (1998, p.59)

O raio de curvatura geralmente expresso pela Equação 2.1 segundo a DNER–ME 024/94, será um indicativo do arqueamento da deformada na posição mais crítica,



para isso é necessário um ajuste do arco parabólico. Se a curvatura do raio for baixa significa um arqueamento elevado da deformada indicando maiores deteriorações pois a área solicitada pela carga é menor.

Borges (2001) ainda assegura que a deflexão máxima e o raio de curvatura são inversamente proporcionais. Pavimentos em boa condição apresentam deflexão baixas e valores de raio elevados, revelando a capacidade de assimilar e distribuir os esforços para as camadas do pavimento.

$$R = \frac{6250}{2 \times (d_0 - d_{25})}$$

Equação 2.1

Onde:

R = raio de curvatura (m);

$d_0$  = deflexão máxima (0,01 mm);

$d_{25}$  = deflexão crítica a 25 cm do centro da carga (0,01 mm).

Para Medina e Motta (2015) na fase 3, é analisada a bacia de deformação completa ( $d_0$ ,  $d_{25}$ ,  $d_{50}$ ), sendo medidos os deslocamentos elásticos ou recuperáveis em diversos pontos a partir do centro de carga, fornecendo a melhor avaliação da capacidade estrutural do pavimento. Essa análise se torna mais confiável chegando a resultados mais precisos da vida restante do pavimento, as necessidades de recuperação e de possíveis reforços estruturais nas camadas.

## 2.5 Equipamentos de Avaliação Estrutural Não-Destrutiva

Para Bernucci *et al.* (2008), Lopes (2012), Nobrega (2003), Pessoa (2012) e Zanetti (2008) existem vários equipamentos que foram desenvolvidos para a avaliação não destrutiva, simulando de forma mais realista as condições de carregamento sofridos na pista. Esses equipamentos têm para fins adquirir dados de deflexão do pavimento e se dividem em função do seu tipo de carga em dois grupos:

- Equipamentos de carregamento quase-estático – ensaios de placa, Viga Benkelman convencional e Viga Benkelman com leitura contínua;

- Equipamentos de carregamento dinâmico ou por impacto – Deflectômetro de Impacto – FWD.

Os equipamentos mais empregados no Brasil nos últimos trinta anos, e no mundo, para a execução de controle deflectométrico são a Viga Benkelman e o deflectômetro de impacto FWD, sendo que este ganha mais produtividade e versatilidade. Estes equipamentos medem os deslocamentos verticais, ou deflexões, sofridas na superfície de um pavimento quando submetido a um carregamento (MACÊDO, 2003).

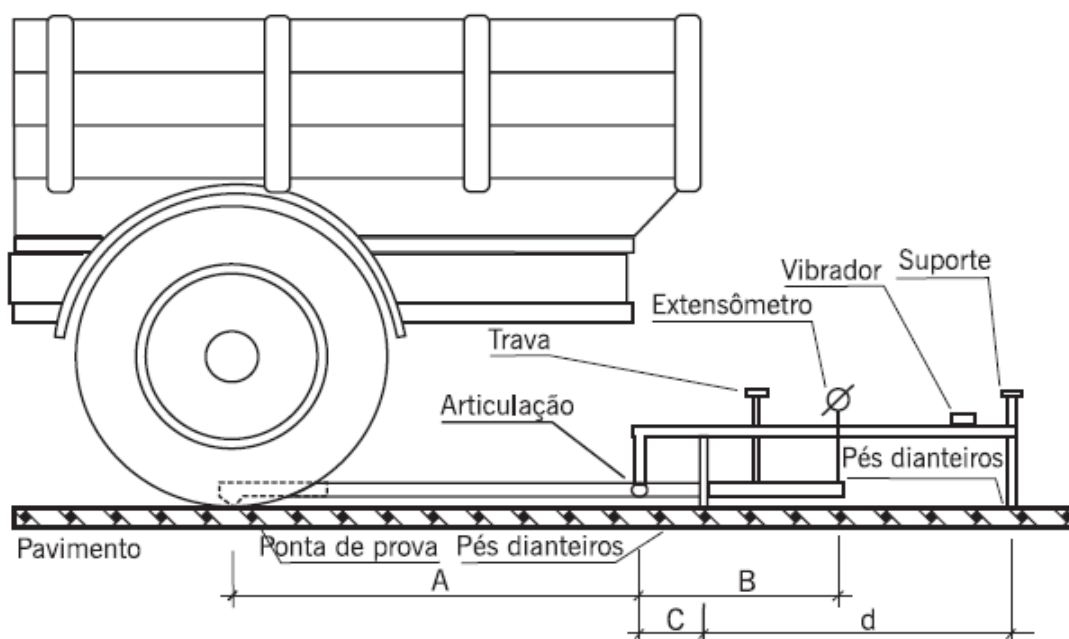
## **2.6 Viga de Benkelman**

Segundo Balbo (2007) a viga Benkelman faz referência ao engenheiro do Bureau of Public Roads dos Estados Unidos que inventou o equipamento bastante simplificado e de baixo custo desenvolvido na década de 1950. O equipamento é extensivamente utilizado para medidas de deflexões por órgãos rodoviários, para trabalhos de pesquisa, avaliações estruturais e projetos de restauração de rodovias.

Algumas desvantagens da sua utilização seria a baixa produtividade, cerca de 5 a 8 km/dia. Como a medida é feita por carga estática não representa a real aplicação da carga dinâmica produzida pelos veículos; as medidas não apresentam boa repetibilidade e a precisão diminui nos pontos mais afastados em relação ao ponto central (ZANETTI, 2008).

O princípio de funcionamento regido pela norma rodoviária DNER 024/94 para determinação das deflexões é demonstrado na Figura 8, onde necessita de uma aparelhagem constituída de um conjunto de sustentação em que se articula uma haste metálica, dividindo a barra em duas partes proporcionais, cujos comprimentos a e b seguem a relação 2/1, 3/1 ou 4/1.

Figura 8 – Esquema viga Benkelman



Fonte: DNER ME 024/94 (1994, p.7)

A haste é composta de uma ponta de prova que fica entre o par de rodas do lado direito do eixo traseiro de um caminhão com 8,2 tf de carga no eixo traseiro, sendo ele simples e com roda dupla (ESRD), os pneus devem ser de aro 10x20 ou 9x20 calibrados à pressão de 0,56 MPa (5,6 kgf/cm<sup>2</sup> ou 80 lb/pol<sup>2</sup>).

Um extensômetro é fixado na extremidade do braço menor, este acusa qualquer movimento vertical da ponta de prova. Para eventuais inibições do extensômetro é colocado um vibrador pequeno na outra extremidade da haste, onde se encontra os pés traseiros, que estão em contato com a superfície que se deseja medir a deflexão no pavimento (ZANETTI, 2008).

Anteriormente a execução do ensaio da viga Benkelman, deve ser previamente aferida conforme DNER PRO 175/94, que fixa as condições exigíveis de ser utilizada e para definir o valor da constante a ser usada para o cálculo das deflexões.

O ensaio completo da viga Benkelman segundo Zanetti (2008) consiste em:

- i) colocar a ponta de prova da viga Benkelman entre os pneus da roda traseira do caminhão, colocando-a exatamente sob o seu eixo;
- ii) Solta-se a trava da viga, e os pés da parte fixa são ajustados de modo que a haste do extensômetro fique em contato com a parte móvel da viga;

- iii) Ajusta-se o pé traseiro, de forma que o extensômetro fique aproximadamente na metade do seu curso;
- iv) Liga-se o vibrador e a leitura inicial é feita quando a velocidade de deformação do pavimento for igual ou inferior a 0,01 mm/minuto, ou decorridos 3 minutos da ligação do vibrador - Leitura  $L_i$ ;
- v) Realizada a leitura inicial, desloca-se o caminhão lentamente para frente, parando-o quando o eixo traseiro estiver à distância de 10 metros da ponta de prova conforme a Figura 9.
- vi) Quando a velocidade de recuperação do pavimento for igual ou inferior a 0,01 mm/minuto, ou decorridos 3 minutos após o caminhão sair da posição original, fazendo-se a leitura final pelo extensômetro – Leitura  $L_f$ .

Figura 9 – Ensaio da viga Benkelman



Fonte: Bernucci et.al. (2006, p.448)

Calcula-se, então, o deslocamento vertical recuperável que está associado à deformação elástica do pavimento no ponto ( $d_0$ ) e os demais pontos de deformações, através das expressões matemáticas para cálculo de deformações segundo o DNIT-ME 133/2010 através da Equação 2.2 e Equação 2.3.

$$D_o = (L_o - L_f) \times \frac{a}{b}$$

Equação 2.2

$$D_n = (L_n - L_f) \times \frac{a}{b}$$

Equação 2.3

Onde:

$D_o$  = deflexão em centésimos de milímetro no ponto de prova inicial (flexa máxima da linha de influência longitudinal da bacia de deformação);

$D_n$  = deflexão em centésimos de milímetro nos pontos correspondentes aos diversos deslocamentos do veículo;

$L_o$  = leitura inicial em centésimos de milímetro;

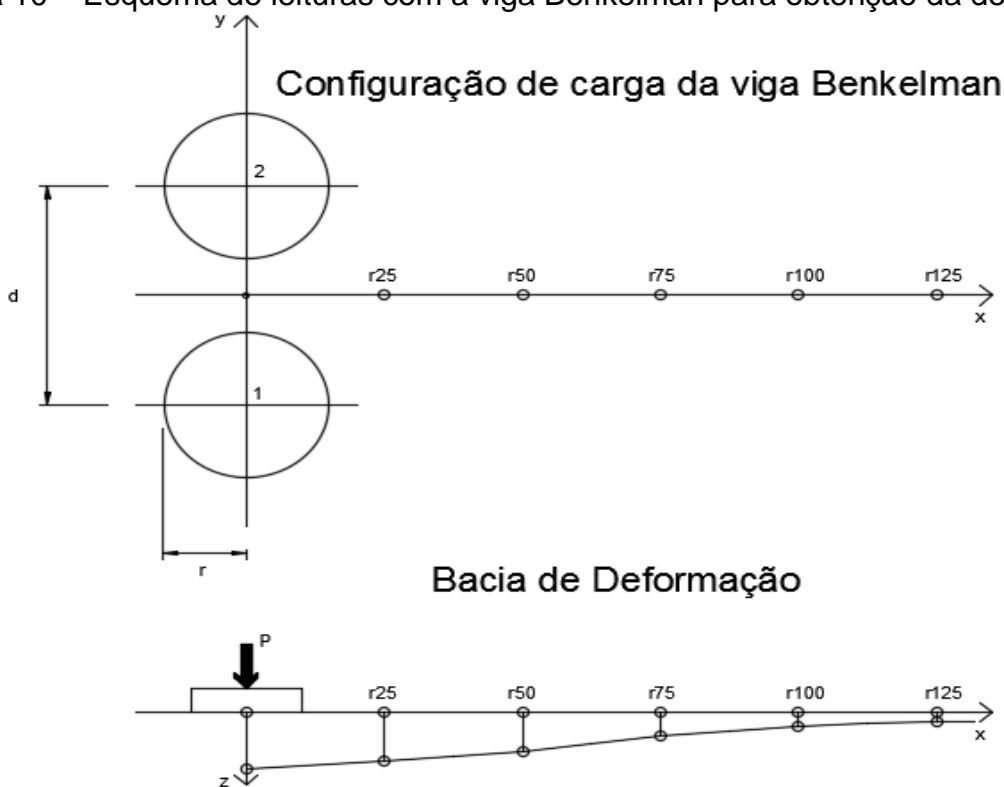
$L_n$  = leituras em centésimos de milímetro nos pontos correspondentes aos diversos deslocamentos do veículo;

$L_f$  = leitura final em centésimos de milímetro;

$a/b$  = relação entre o braço maior e o menor, dimensões dos braços da viga Benkelman, em centímetros.

Calculados todas as deflexões é possível proceder ao traçado e a análise das deformadas levantadas. Na maior parte das vezes medem-se somente a deflexão máxima  $d_0$  e o ponto mais crítico ( $d_{25}$ ), para o cálculo de raio de curvatura utilizando a Equação 2.1. A Figura 10 demonstra o esquema de medidas quando se deseja obter a bacia de deflexão com a viga Benkelman.

Figura 10 – Esquema de leituras com a viga Benkelman para obtenção da deformada



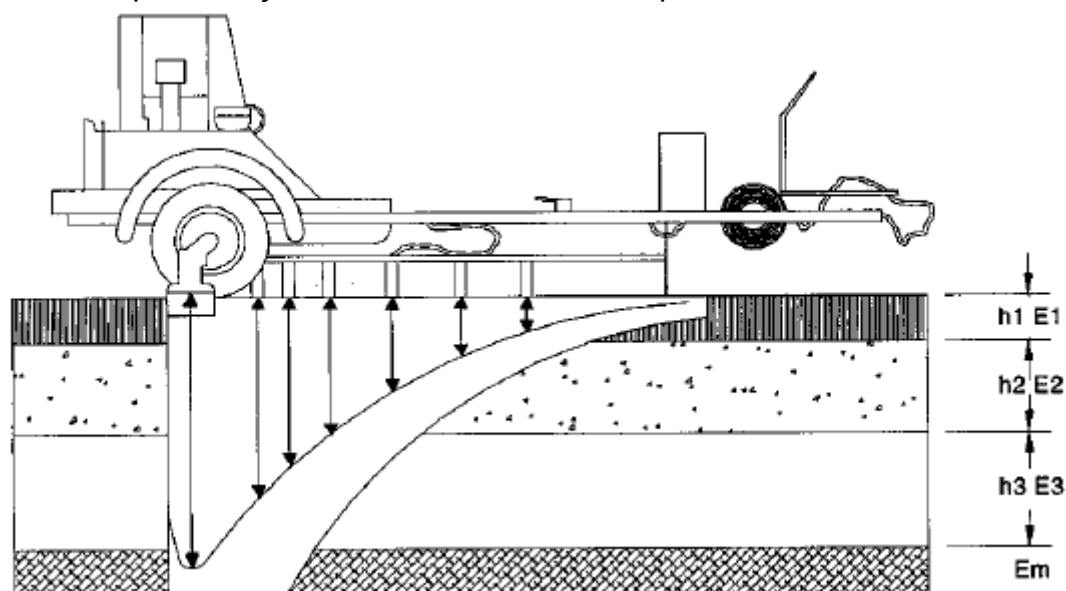
Fonte: Borges (2001, p. 19)

## 2.7 Defletômetro de Impacto – Falling Weight Deflectometer (FWD)

Segundo Borges (2001) todos os equipamentos que transferem carga dinâmica de impacto ao pavimento são chamados de FWD, os mais conhecidos no Brasil são o Dynatest FWD e o KUAB FWD. Devido a sua grande produtividade e alta precisão tem obtido grande satisfação nas avaliações estruturais para a medição de deflexões, pois permite a determinação por dados automáticos obtidos das deformadas completas.

O equipamento foi projetado segundo Macêdo (2003) para que o impacto da carga, conforme a Figura 11, simule o efeito causado pela passagem de uma carga de roda a velocidade entre 70 e 80 km/h, os deslocamentos produzidos pelo impacto são medidos por sensores que se encontram na barra metálica e na placa circular. Alguns sensores são colocados ao longo da barra metálica espaçados geralmente de 0,20,30,45,60,90 e 150 cm totalizando sete sensores com capacidade de medir deslocamentos de até 2,0 mm (ZANETTI, 2008).

Figura 11 – Representação dos defletômetros de impacto



Fonte: DNER (1998, p.64)

Ainda segundo Zanetti (2008) a carga do FWD é um conjunto de peças metálicas demonstrada na Figura 12, sendo uma barra metálica de 2,25 m de comprimento e uma placa circular de 30cm de diâmetro sobre uma borracha que amortece seu impacto no pavimento.

Figura 12 – Sensores de medida de deflexão



Fonte: MACÊDO (2003, p.50)

Algumas vantagens seriam a aproximação dos deslocamentos verticais recuperáveis da real situação de um caminhão carregado em movimento, maior acurácia nas medidas, não há influência do operador, podem-se realizar registros automáticos quanto a temperatura exterior e do pavimento e medição das distâncias percorridas de um ensaio para outro. O DNER já criou a normalização do levantamento pelo FWD com o DNER-PRO 273/96 e a tendência de que os equipamentos FWD sejam generalizados no futuro ocorrerá brevemente, pois a viga Benkelman, por mais difundida no mercado, tem certas limitações.

## 2.8 Correlações entre a viga Benkelman e o FWD

Entre os dois equipamentos há uma diferença básica quanto a aquisição das leituras de deflexão, sendo a viga Benkelman por carregamento estático e a leitura é realizada após três minutos. No FWD (Falling Weight Deflectometer) o carregamento é dinâmico ou por impacto, e a leitura é efetivada após a queda dos pesos metálicos.

Uma semelhança entre os ensaios seria nas leituras das deformações elásticas encontradas nas camadas, que conforme a profundidade aumenta, mais afastada ficam as deflexões que sofrem influência dessa camada (MACÊDO, 2003).

Segundo o DNIT (2006) o principal objetivo da necessidade de correlação entre a viga Benkelman e o FWD, é a validação das deflexões recuperáveis encontradas pelo FWD, nos métodos atuais do DNER (de projeto de reforço de pavimentos flexíveis e Sistema de Gerência de Pavimento) e no Modelo HDM adotado no Banco Mundial.

A Tese de Doutorado do Eng.<sup>o</sup> Salomão Pinto no ano de 1991 apresenta correlações entre as deflexões encontradas a partir da viga Benkelman e o FWD obtendo uma Equação 2.4 com essa relação.

$$D_{VB} = -5,73 + 1,396 \times D_{FWD}$$

Equação 2.4

Onde:

$D_{VB}$  = deflexão Benkelman;

$D_{FWD}$  = deflexão FWD.

Borges (2001) em sua Dissertação de Mestrado fez um estudo de diversos modelos de correlação e apresenta através da Tabela 1 e Figura 13 suas conclusões.

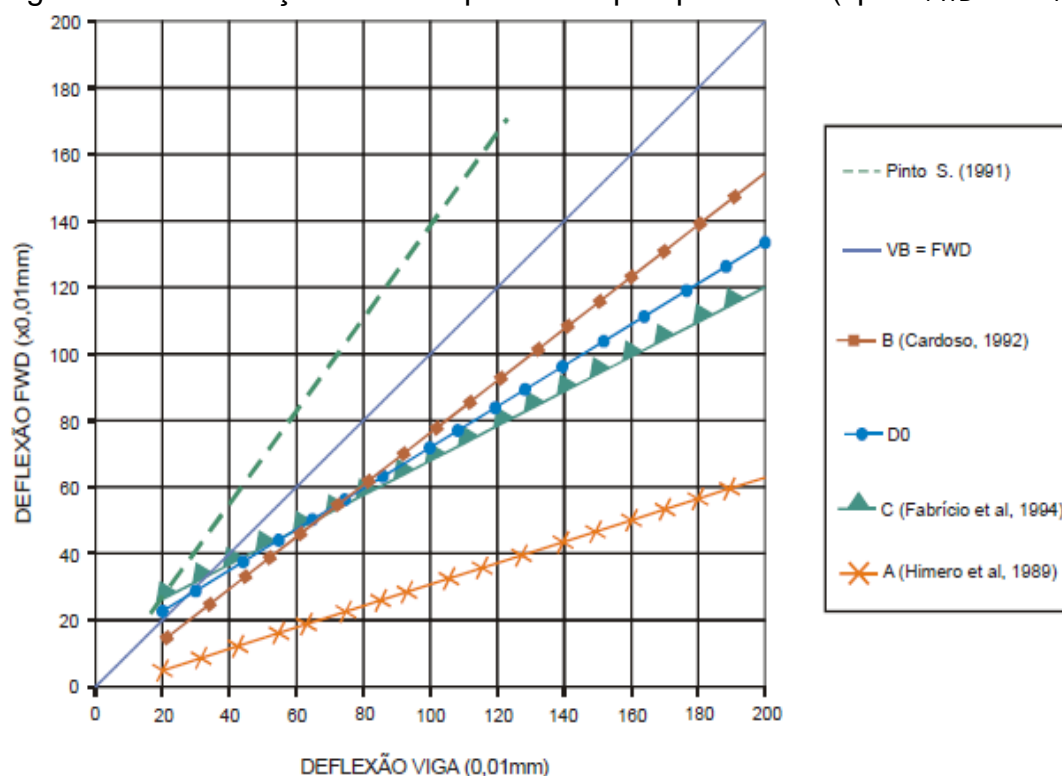
Tabela 1 – Correlações entre FWD e viga Benkelman

CORRELAÇÕES OBTIDAS ATRAVÉS DOS VALORES DE	MODELOS DE CORRELAÇÃO	
	$Y = aX + b$	$Y = \alpha X$
Deflexões características de cada segmento	$D_{VB} = 1,343 D_{FWD} - 5,814$ $R^2 = 0,84$	$D_{VB} = 1,248 D_{FWD}$ $R^2 = 0,83$
Deflexões de todos os segmentos	$D_{VB} = 1,251 D_{FWD} - 2,412$ $R^2 = 0,75$	$D_{VB} = 1,205 D_{FWD}$ $R^2 = 0,74$
Deflexões médias de cada segmento	$D_{VB} = 1,339 D_{FWD} - 6,243$ $R^2 = 0,80$	$D_{VB} = 1,210 D_{FWD}$ $R^2 = 0,79$
Deflexões - espessura de 5,0cm de revestimento	$D_{VB} = 1,180 D_{FWD} - 0,710$ $R^2 = 0,73$	$D_{VB} = 1,193 D_{FWD}$ $R^2 = 0,73$
Deflexões - espessura de 10,0cm de revestimento	$D_{VB} = 1,486 D_{FWD} - 11,144$ $R^2 = 0,77$	$D_{VB} = 1,237 D_{FWD}$ $R^2 = 0,74$

Fonte: Borges (2001, p. 117)



Figura 13 – Correlações obtidas por vários pesquisadores (tipo  $D_{FWD} = aD_{vb} + b$ )



Fonte: DNIT (2006, p. 89)

Em vários estudos feitos para se buscar uma relação entre as deformações dos equipamentos, Borges (2001) conclui que os autores chegaram em valores maiores e dispersos para a viga Benkelman. Valores abaixo de  $20 \times 10^{-2} \text{mm}$  de deflexões são semelhantes e para valores acima de  $85 \times 10^{-2} \text{mm}$  são diferentes entre os dois equipamentos.

## 2.9 Módulo de Resiliência

O DNER (1998) e DNIT (2006) através de seus manuais relatam que o primeiro a relacionar as deformações recuperáveis com fissuras foi o renomado Eng.º norte-americano Francis Hveem, que introduziu o termo “resiliência”, que é definido classicamente como “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”. Hveem procurou diferenciar as deformações recuperáveis ou elásticas de deformações envolvendo outras estruturas através de carregamentos repetidos. As misturas asfálticas exibem valores de módulos que dependem da temperatura ambiente e da frequência com que a carga é aplicada a amostra.

O Módulo Resiliente utiliza tensões verticais repetidas ( $\sigma$ ) e a deformação específica axial resultante ( $\epsilon$ ), para realizar a relação de um material que está recebendo aplicações repetidas de cargas. Essa reprodução de carregamentos repetitivos repercute no pavimento, e se torna responsável pela fadiga dos revestimentos asfálticos, ruptura pelas incontáveis solicitações que são menores que a resistência do material à tração.

## 2.10 Noções de Retroanálise

Medina e Motta (2015) descrevem a retroanálise como nada mais do que resolver o problema inverso em relação ao dimensionamento de um pavimento novo, ou seja, têm-se as deformações resultantes de um carregamento conhecido e deseja-se conhecer os módulos que conduziram àquelas deformações elásticas.

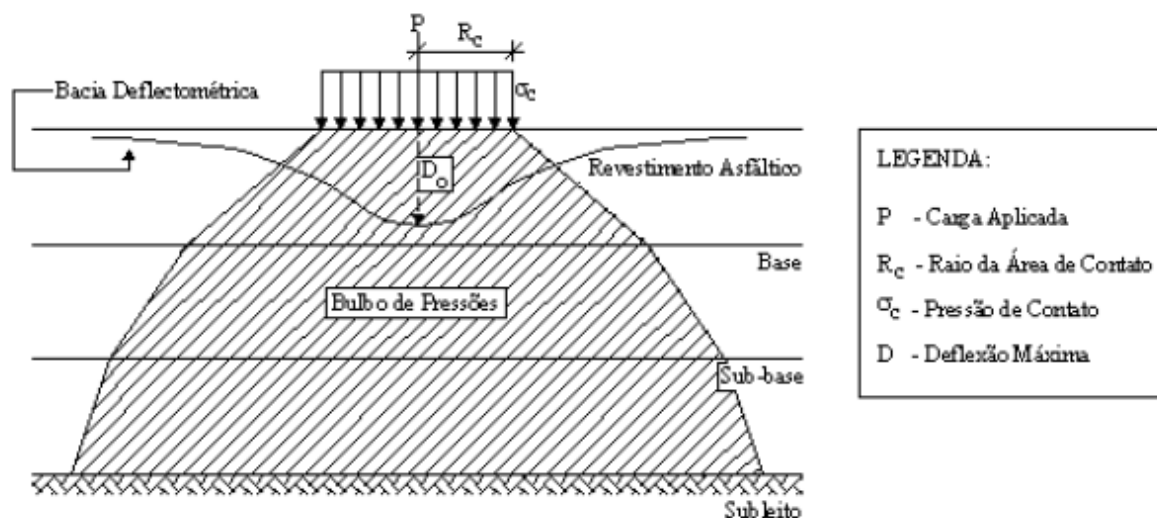
Segundo Macêdo (2003) é um método computacional, que permite descobrir os parâmetros elásticos das camadas do pavimento e subleito. Através da comparação das bacias deflectométricas encontradas em campo e as bacias teóricas, que de modo interativo coincidam até certo ponto de aceitação, com resultados semelhantes ao real analisado.

O conhecimento da deformabilidade dessas camadas aliada com a retroanálise são componentes essenciais para uma avaliação estrutural do pavimento, permitindo, segundo Bernucci *et al.* (2008):

- Encontrar os módulos de elasticidade que conduziram as deformações elásticas descobertas in situ;
- Minimizar coleta de amostras por processo destrutivo e
- Verificar a condição estrutural para cada camada e subleito.

Cada seção analisada por meio da bacia de deflexão possui propriedades próprias, portanto se faz necessário o conhecimento das espessuras das camadas do pavimento, como demonstrado na Figura 14, o módulo de resiliência através do ensaio de compressão diametral (mistura asfáltica), coeficiente de Poisson e as características do pavimento onde o ensaio foi efetivado como carga aplicada, raio da área de contato, pressão de contato ou dos pneus (PESSOA, 2012).

Figura 14 – Esquema simplificado de contribuição das camadas para a bacia de deflexão



Fonte: Medina e Motta (2015, pg. 502 apud FABRÍCIO, 1988)

Medina e Motta (2015) citam alguns cuidados que devem ser levados em conta, para a utilização correta dessa ferramenta, destacando a influência bastante considerável dos módulos de resiliência e espessuras adotados para a retroanálise, cabendo ao engenheiro a capacidade de reconhecer, as vantagens e as limitações de um método que seja mais confiável para o estudo.

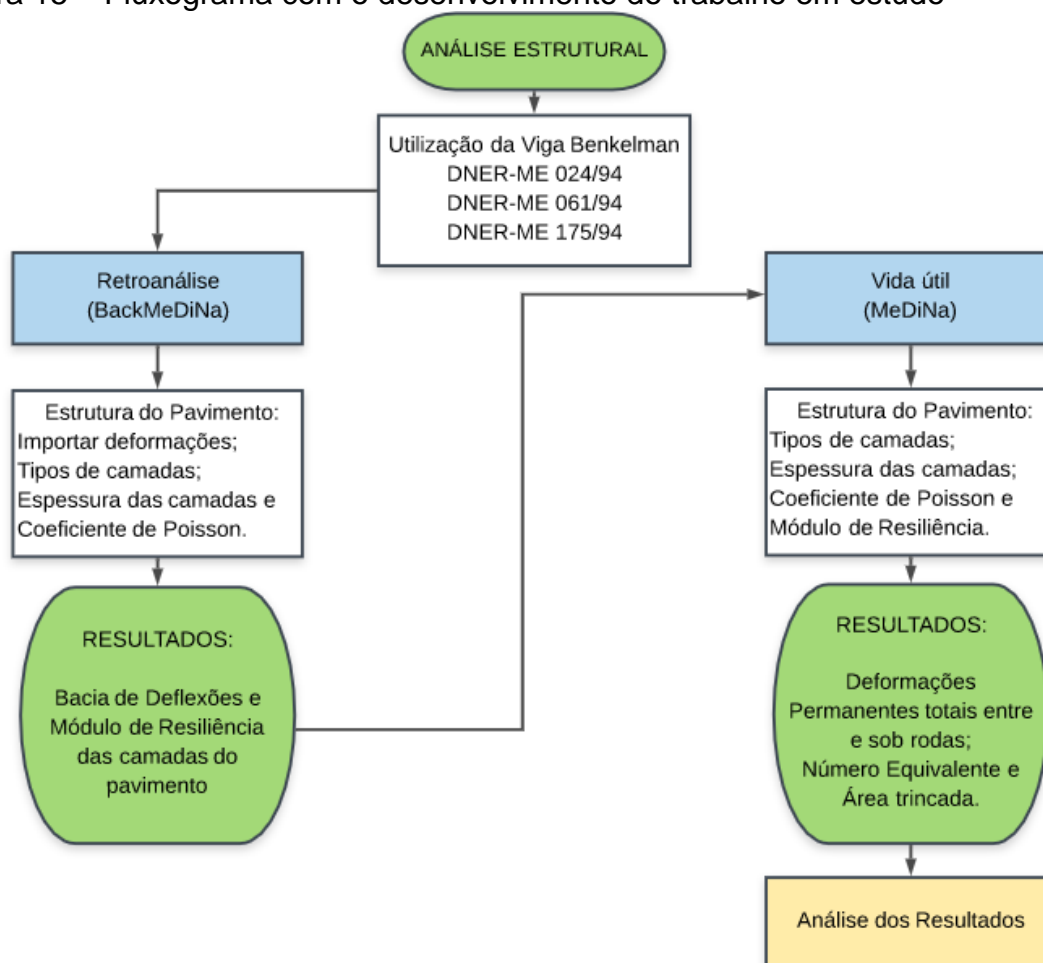
Nóbrega (2003) fez um estudo comparativo, a partir de dois trechos monitorados de deflexão utilizando cinco métodos de retroanálise, através de alguns dos programas de retroanálise desenvolvidos no Brasil como, o RETRAN2-CL, REPAV, REPAV V2, RETROANA e RETRAN5-L. A conclusão que chegou em sua dissertação de mestrado, foi que os programas que melhor representaram a estrutura dos trechos estudados, foram o RETROANA e o RETRAN5-L.

### 3 METODOLOGIA

Nesse capítulo serão apresentados os métodos para o desenvolvimento do trabalho.

#### Planejamento

Figura 15 – Fluxograma com o desenvolvimento do trabalho em estudo

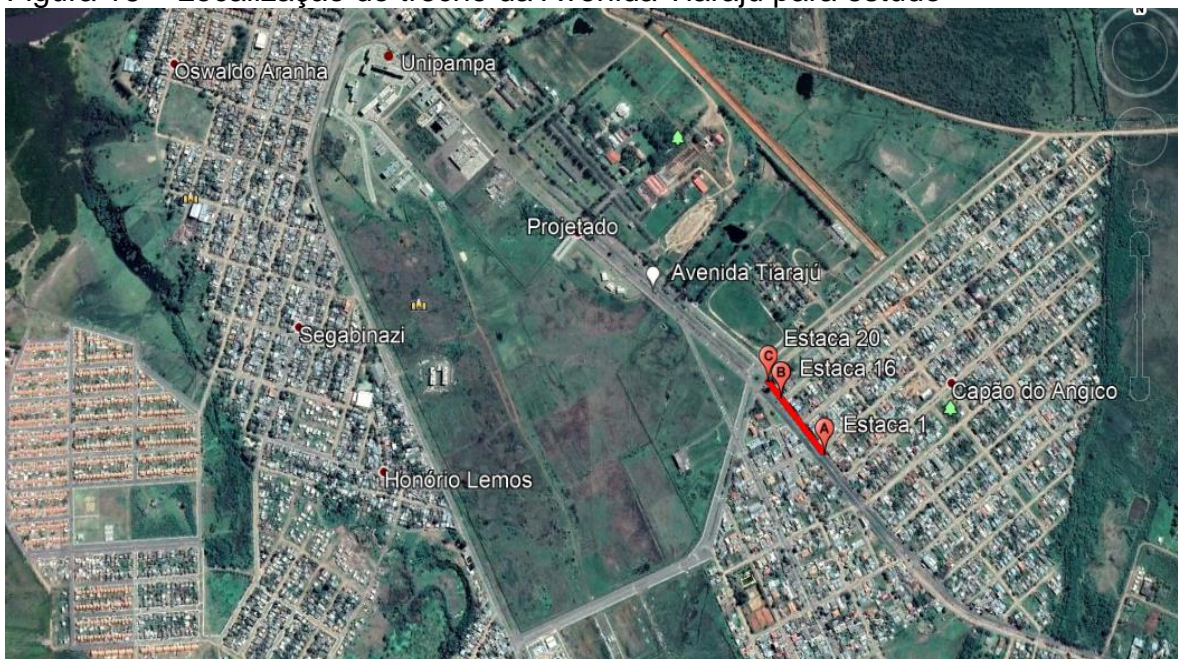


Fonte: Elaboração Própria

#### 3.1 Definição e caracterização do local do estudo

O estudo foi realizado na Avenida Tiarajú partindo do ponto de intersecção com a Rua Carvalho até a intersecção com a Rua Gentil Francisco Carlesso no bairro Capão do Angico com cerca de 200m de extensão, como pode ser observado na Figura 16, o trecho escolhido como representativo e objeto central para análise do presente trabalho.

Figura 16 – Localização do trecho da Avenida Tiarajú para estudo



Fonte: Google Earth (2019)

Trata-se de um trecho onde foi executada a implantação de um pavimento novo acima de trechos em paralelepípedo que estão presentes entre os pontos 1 e 15 conforme a Tabela 2 e o outro entre os pontos 16 e 20 sendo este com remoção total do material e sua reconstrução como a seção apresentada na Tabela 3.

A Tabela 2 demonstra os materiais empregados na camada de revestimento, sendo a base de paralelepípedo já existente entre os pontos já citados.

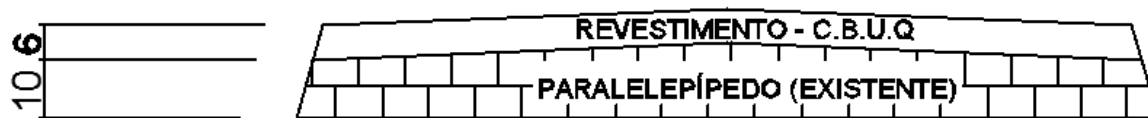
Tabela 2 – Estrutura do Pavimento entre os pontos 1 e 15

Estrutura	Tipo de material	Espessura (cm)
Camada de Rolamento	C.B.U.Q	3,0
Camada de Bloqueio	Pintura de Ligação	–
Camada de Reperfilagem	C.B.U.Q	3,0
Camada de Imprimação	CM-30	–
Base	Paralelepípedo (existente)	10,0
Total		16,0

Fonte: Elaboração Própria

A Figura 17 evidencia o corte transversal da estrutura adotada no pavimento onde houve reconstrução total.

Figura 17 – Composição e espessuras das camadas dos pontos 1 a 15



Fonte: Elaboração Própria

A Tabela 3 demonstra os materiais empregados nas novas camadas de revestimento, base, sub-base e subleito do pavimento construídos entre os pontos 16 e 20, onde foi realizada a remoção total do material de paralelepípedos e parte do subleito.

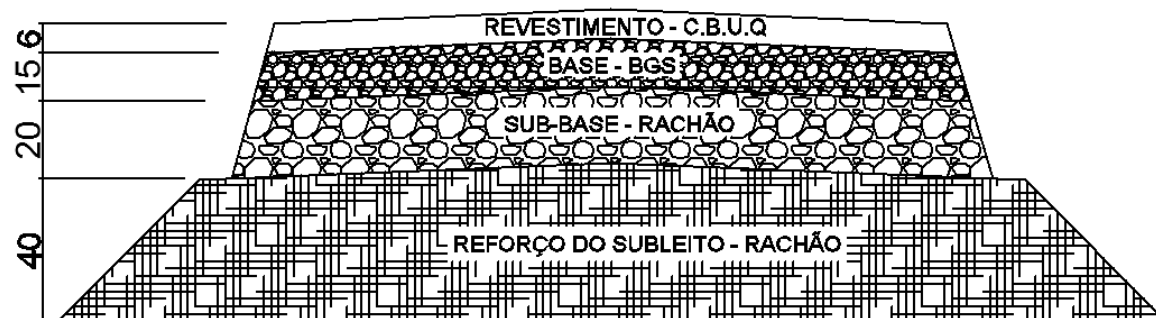
Tabela 3 – Estrutura do Pavimento entre os pontos 16 e 20

Estrutura	Tipo de material	Espessura (cm)
Camada de Rolamento	C.B.U.Q	3,0
Camada de Bloqueio	Pintura de Ligação	–
Camada de Reperfilagem	C.B.U.Q	3,0
Camada de Imprimação	CM-30	–
Base	Brita Graduada Simples	15,0
Sub-Base	Rachão	20,0
Reforço do Sub-Leito	Rachão	40,0
Total		81,0

Fonte: Prefeitura Municipal de Alegrete – Secretaria de Planejamento

A Figura 18 evidencia o corte transversal da estrutura adotada no pavimento a ser utilizado onde ocorreu remoção total.

Figura 18 – Composição e espessuras das camadas dos pontos 16 a 20



Fonte: Prefeitura Municipal de Alegrete – Secretaria de Planejamento



### 3.2 Realização de Ensaio com a Viga Benkelman

O ensaio foi realizado com o uso de um caminhão de eixo simples de roda dupla (ESRD), com 8.200kg em seu eixo traseiro e os pneus foram calibrados com pressões de inflação de 80lb cada um conforme demonstrado na Figura 19.

Figura 19 – Pesagem do caminhão e calibragem dos pneus



Fonte: Elaboração Própria

A locação dos pontos foi realizada através de uma demarcação em linha com spray branco na parte externa da faixa, no qual os pneus traseiros do caminhão, devem estar posicionados perfeitamente perpendiculares a ela na leitura inicial de cada ponto como demonstrado na Figura 20a. Os pontos foram marcados a uma distância de 10m de um ponto de análise ao outro, com um total de 20 pontos, inteirando os 190m de extensão do trecho em estudo.

Em todos os pontos iniciais de leitura foram efetivadas as medições da temperatura do pavimento, com o uso de um termômetro infravermelho digital, demonstrado na Figura 20b.

Figura 20 – Detalhe da demarcação dos pontos e medição de temperatura



(b) Marcação dos pontos

(a) temperatura

Fonte: Elaboração Própria

Através da **Error! Not a valid bookmark self-reference.** podem ser encontrados os valores de temperaturas do pavimento em todos os pontos demarcados na realização do ensaio.

Tabela 4 – Medidas de temperatura do pavimento em cada ponto

Ponto da Pista	Temperatura da pista (°C)
Est. 1	27,2
Est. 2	23,9
Est. 3	30,1
Est. 4	30,4
Est. 5	31,7
Est. 6	27,1
Est. 7	27,7
Est. 8	30,0
Est. 9	29,3
Est. 10	31,1
Est. 11	27,8
Est. 12	21,8
Est. 13	29,0
Est. 14	31,2
Est. 15	32,4
Est. 16	32,0
Est. 17	28,1
Est. 18	32,1
Est. 19	21,7
Est. 20	20,0

Fonte: Elaboração Própria



A leitura de cada ponto a ser medida a deflexão, se deu através de gravações com uma velocidade de captura de 1/1000, filmado em 60 quadros em 1 segundo com a câmera Canon Rebel T6, no início de cada ponto e com a utilização de uma trena de 50m amarrada no caminhão conforme a Figura 21.

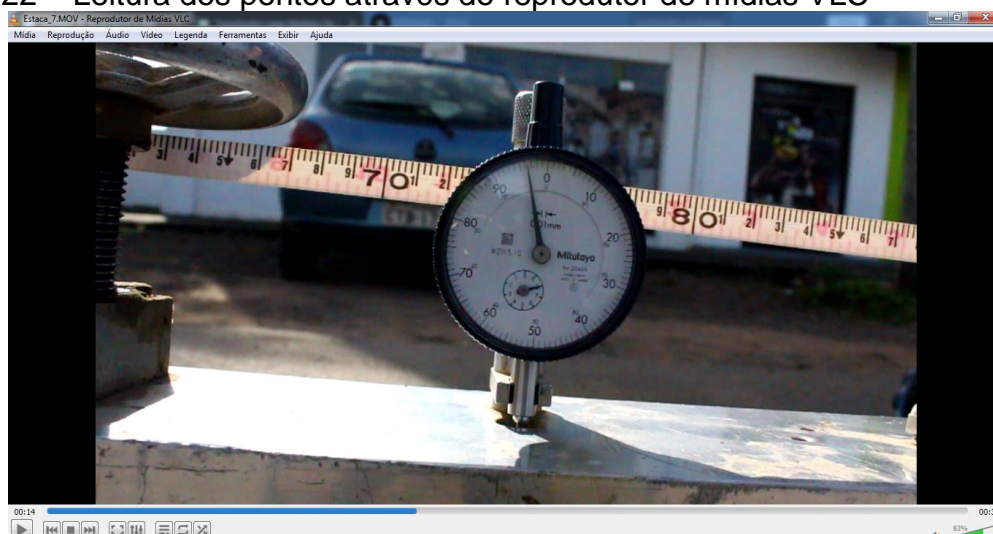
Figura 21 – Leituras dos pontos através de gravações e uso de trena



Fonte: Elaboração Própria

Quando a gravação começa e o caminhão se desloca é possível realizar a leitura de cada ponto utilizando um reprodutor de vídeo, conforme a Figura 22.

Figura 22 – Leitura dos pontos através do reprodutor de mídias VLC



Fonte: Elaboração Própria

Com o posicionamento do equipamento Viga Benkelman (VB), conforme DNER–ME 024/94, foram realizados os ensaios em cada ponto para a determinação

da bacia de deflexão do pavimento de acordo com a Norma DNIT-ME 133/2010 conforme a Figura 23.

Figura 23 – Posicionamento do equipamento



Fonte: Elaboração Própria

O apontamento das bacias deflectométricas entre os pontos 1 ao ponto 15 foram efetuados nas distâncias de 0cm, 25cm, 50cm, 75cm, 100cm, 125cm, 150cm e 200cm. As leituras foram efetuadas entre as distâncias de 25cm porque não houve necessidade de leituras intermediárias devido ao raio de curvatura da linha de influência da bacia ser alta, isso significa um arqueamento baixo da deformada com menores valores de deteriorações, formando uma linha de influência das bacias quase linear. Neste trecho foi utilizado apenas revestimento de seis centímetros acima da base de paralelepípedo já existente, conforme a Figura 24.

Figura 24 – Pavimentação com revestimento acima de paralelepípedo



(a) Ponto 1 ao ponto 8





(b) Ponto 9 ao ponto 15

Fonte: Elaboração Própria

Dos pontos 16 ao 20 foram efetuadas leituras nas distâncias 0cm, 12,5cm, 25cm, 37,5cm, 50cm, 75cm, 100cm, 125cm, 150cm e 200cm. As leituras foram efetuadas com alguns pontos intermediários de distâncias para evitar possíveis erros na correlação de valores no programa BackMeDiNa isso se deve à curvatura do raio ser alta, isso significa um arqueamento elevado da deformada com maiores valores de deteriorações. Esse trecho foi todo refeito conforme a seção transversal apresentada na Figura 18. Na Figura 25 é ilustrado com mais detalhe o trecho.

Figura 25 – Pavimentação do trecho entre o ponto 16 e ponto 20



(a) Reconstrução do trecho entre o ponto 16 e 20



(b) Reconstrução finalizada do trecho entre o ponto 16 e 20

Fonte: Elaboração Própria

As medidas de deflexões realizadas em todo o trecho de estudo de cada ponto podem ser visualizadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Medidas de deflexões em cada ponto de interesse na ordem de 0,01mm

Ponto da Pista	D <sub>0</sub>	D <sub>12,5</sub>	D <sub>25</sub>	D <sub>37,5</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>75</sub>	D <sub>100</sub>	D <sub>125</sub>	D <sub>150</sub>	D <sub>175</sub>	D <sub>200</sub>
Est. 1	0,00	-	0,02	-	0,05	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Est. 2	0,00	-	0,01	-	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05
Est. 3	0,00	-	0,02	-	0,05	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09
Est. 4	0,00	-	0,02	-	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09
Est. 5	0,00	-	0,02	-	0,05	0,07	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10
Est. 6	0,00	-	0,02	-	0,05	0,07	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09
Est. 7	0,00	-	0,04	-	0,09	0,14	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16
Est. 8	0,00	-	0,01	-	0,03	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07
Est. 9	0,00	-	0,04	-	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11
Est. 10	0,00	-	0,03	-	0,07	0,09	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
Est. 11	0,00	-	0,01	-	0,06	0,11	0,14	0,16	0,16	0,16	0,16
Est. 12	0,00	-	0,03	-	0,07	0,11	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16
Est. 13	0,00	-	0,03	-	0,09	0,12	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16
Est. 14	0,00	-	0,03	-	0,13	0,18	0,20	0,21	0,21	0,22	0,23
Est. 15	0,00	-	0,03	-	0,06	0,08	0,09	0,10	0,11	0,11	0,11
Est. 16	0,00	0,01	0,03	0,06	0,08	0,10	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
Est. 17	0,00	0,01	0,02	0,04	0,05	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Est. 18	0,00	0,02	0,04	0,07	0,09	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Est. 19	0,00	0,01	0,04	0,06	0,08	0,11	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15
Est. 20	0,00	0,01	0,04	0,06	0,08	0,11	0,12	0,13	0,14	0,14	0,14

Fonte: Elaboração Própria

### 3.3 Retroanálise

Com os valores extraídos da bacia de deflexão do ensaio da Viga Benkelman foi possível realizar a retroanálise do pavimento real em estudo, mas foram necessárias algumas adequações para a inserção desses dados no programa.

Os valores obtidos pelo extensômetro ainda não remetem a situação real do deslocamento do pavimento. Devem ser calculadas as deformações em função do braço de alavanca, e realizar a subtração da leitura do deslocamento máximo e demais deslocamentos em cada distância de leitura fazendo o uso da Equação 2.3. Assim, obteve-se os seguintes dados de deformações conforme a Tabela 6. Para inserção dos valores de deformação no programa teve-se que utilizar os valores na ordem de micrometros ( $\mu\text{m}$ ) e a relação entre o braço maior e menor foi de  $a/b=4$ .

Tabela 6 – Deformações sem correção de temperaturas ( $\mu\text{m}$ )

Ponto da Pista	D <sub>0</sub>	D <sub>12,5</sub>	D <sub>25</sub>	D <sub>37,5</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>75</sub>	D <sub>100</sub>	D <sub>125</sub>	D <sub>150</sub>	D <sub>175</sub>	D <sub>200</sub>
Est. 1	3200	-	2400	-	1200	400	0	0	0	0	0
Est. 2	2000	-	1600	-	1200	800	400	0	0	0	0
Est. 3	3600	-	2800	-	1600	400	400	400	400	400	0
Est. 4	3600	-	2800	-	1200	800	400	400	400	400	0
Est. 5	4000	-	3200	-	2000	1200	400	400	400	0	0
Est. 6	3600	-	2800	-	1600	800	400	0	0	0	0
Est. 7	6400	-	4800	-	2800	800	400	0	0	0	0
Est. 8	2800	-	2400	-	1600	800	400	0	0	0	0
Est. 9	4400	-	2800	-	1200	800	400	400	400	0	0
Est. 10	4800	-	3600	-	2000	1200	400	0	0	0	0
Est. 11	6400	-	6000	-	4000	2000	800	0	0	0	0
Est. 12	6400	-	5200	-	3600	2000	800	400	400	0	0
Est. 13	6400	-	5200	-	2800	1600	800	400	400	0	0
Est. 14	9200	-	8000	-	4000	2000	1200	800	800	400	0
Est. 15	4400	-	3200	-	2000	1200	800	400	0	0	0
Est. 16	4800	4400	3600	2400	1600	800	400	0	0	0	0
Est. 17	3600	3200	2800	2000	1600	400	0	0	0	0	0
Est. 18	4800	4000	3200	2000	1200	400	0	0	0	0	0
Est. 19	6000	5600	4400	3600	2800	1600	800	400	400	0	0
Est. 20	5600	5200	4000	3200	2400	1200	800	400	0	0	0

Fonte: Elaboração Própria

Foram realizadas também correções nas deflexões encontradas, através das temperaturas retiradas do pavimento, com isso foi necessário realizar a correção da

temperatura em campo, como ressaltado por Bernucci *et al.* (2008), para a temperatura de referência de 25°C, para fins de normalização dos valores de módulos encontrados, com isso se pode haver comparações entre deflexões encontradas em diferentes estações.

Santos (2015) aplicou a Equação 3.1, retirada do ábaco do DER-SP (2006) por Ribas (2014), conseguindo realizar a correção das deflexões através da viga Benkelman encontradas em todo o trecho estudado para 25°C.

$$F_t = \frac{1}{\left(\left(\frac{Hc}{100}\right) \times (t - 25)\right) + 1}$$

Equação 3.1

Onde:

F<sub>t</sub> = Fator de correção da temperatura;

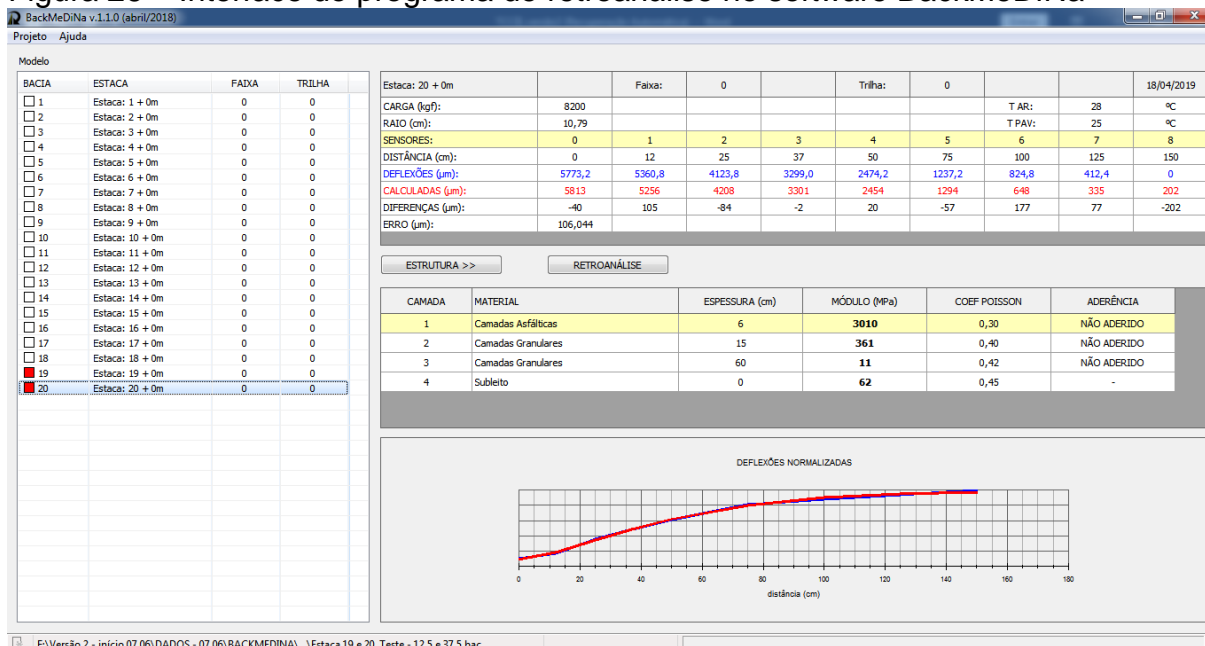
Hc = espessura do pavimento (cm);

t = temperatura do pavimento no momento do ensaio (°C).

O software para a realização da retroanálise do trecho da Avenida Tiarajú foi o software brasileiro BackMeDina, versão 1.1.0 (abril/2018), é um programa que permite a retroanálise dos módulos de resiliência das camadas de um pavimento a partir das bacias deflectométricas levantadas no campo por equipamentos de ensaio não destrutivo do tipo FWD. Como a maioria dos softwares assim como o BackMeDina são calibrados para utilização de dados utilizando o FWD onde há apenas uma área de contato, se faz necessário transformar a área de contato do carregamento de dois pneus alcançados pela viga Benkelman para apenas uma área de carregamento efetivo de contato como no caso do FWD, deve-se então inserir o valor do raio de 10,79cm referente a utilização do ensaio com a viga Benkelman.

Com esses valores corrigidos de duas áreas de contato para uma apenas, o software admite o lançamento das deflexões. Um exemplo do ponto 20 pode ser visualizado na Figura 26.

Figura 26 – Interface do programa de retroanálise no software BackMeDiNa



Fonte: Elaboração Própria

O programa permite inserir novas camadas, excluir e aplicar nas demais camadas a mesma estrutura do pavimento, para isso deve-se entrar com alguns dados característicos do pavimento de estudo.

- a estrutura do pavimento, suas devidas espessuras entre os pontos 1 a 15 e a estrutura do pavimento para os pontos de 16 a 20, como descrito no tópico 3.1.2;
- valores de deflexões corrigidos conforme a temperatura de referência de 25°C conforme a Tabela 9;
- coeficiente de Poisson;
- o raio do carregamento equivalente aplicado pelo equipamento no pavimento, contato de duas áreas para uma apenas e
- carga equivalente aplicada no pavimento.

Foram utilizados como valores de referência do coeficiente de Poisson, os recomendados na instrução de projeto de pavimentação do DER-SP conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Valores Usuais de Coeficiente de *Poisson* para materiais de pavimento

Material	Intervalo de Valores de Coeficiente de <i>Poisson</i>	Valor Recomendado de Coeficiente de <i>Poisson</i>
Concreto de cimento <i>Portland</i>	0,10 – 0,20	0,15
Materiais estabilizados com cimento	0,15 – 0,30	0,20
Misturas asfálticas	0,15 – 0,45	0,30
Materiais granulares	0,30 – 0,40	0,35
Solos do subleito	0,30 – 0,50	0,40

Fonte: DER-SP (2006, p. 23)

O programa inicia o cálculo sempre com os módulos indicados na estrutura do pavimento sem fixação. O programa varia este Módulo por uma faixa que depende do erro da retroanálise. Para erros elevados, a faixa de cada módulo é de 80% do valor indicado (para maior e menor) na estrutura, a fim de abranger um maior nível de soluções. Para erros menores, a faixa de valores de Módulo diminui para 25%. O número de intervalos de cada faixa também varia com erro. Para erros elevados, são apenas 9 intervalos. Para erros menores, são 15 intervalos, que objetiva melhorar a precisão da retroanálise.

A cada clique no botão de retroanálise, o programa testa os intervalos possíveis dentro de um limite até que a semelhança dos módulos de todas as camadas, ao final, apresente a bacia calculada que melhor se aproxima da bacia medida, ou seja, a que apresentar o menor erro.

O programa BackMeDiNa através da retroanálise, realiza a comparação entre a bacia de deformação obtida por intermédio do ensaio em campo e a bacia teórica, onde é definida até apresentar o menor erro possível. Após proporcionar as bacias calculadas de todos os pontos que melhor se aproximam da bacia medida através do ensaio, o programa possibilita a obtenção de valores dos módulos de resiliência nas condições de campo.

Os valores obtidos pelos resultados do módulo de resiliência por retroanálise das camadas precisam ser analisados e verificados se estão de acordo com o comportamento real desses materiais em campo.



### 3.4 Fadiga

Zanetti (2008) define que a resistência a fadiga de uma mistura asfáltica é a sua capacidade de suportar, sem ruptura, as solicitações repetidas de tráfego. A vida de fadiga visa obter o número de solicitações de carregamento que levariam a camada de concreto asfáltico a fadiga (BUDNY, 2012)

Budny (2012) esclarece que o ensaio de fadiga por compressão diametral é o mais utilizado no Brasil pela simplicidade do equipamento e de sua execução. Este ensaio é de tração indireta onde são aplicadas forças verticais distribuídas diametralmente ao corpo-de-prova que sofre esforços horizontais de tração. Este ensaio visa obter o número de solicitações de carregamento que levariam a camada de concreto asfáltico do revestimento betuminoso a fadiga.

Dentre várias equações para encontrar o número de solicitações de carga as mais tradicionais são através da Equação 3.2 ou Equação 3.3:

$$N = K1 \left( \frac{1}{\sigma t} \right)^{n1}$$

Equação 3.2

ou

$$N = K2 \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n2}$$

Equação 3.3

Onde:

N = vida de fadiga expressa em número de solicitações de carga;

$\sigma$  e  $\Delta\sigma$  = tensão e deformação iniciais;

K1 e K2 e  $n_1$  e  $n_2$  = parâmetros de fadiga determinados para o ensaio.

Para a determinação dos valores de regressão K1 e K2, Aduati (2016) realizou ensaios para avaliação de fadiga por compressão diametral. Para a elaboração dos corpos de prova para a realização de seus ensaios, foram utilizados agregados doados pela pedreira Pedra Rosada do município de Alegrete e um ligante asfáltico CAP 50/70 da Petrobras para a mistura. Foram ensaiados 12 corpos de prova no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE na Universidade Federal do Rio de Janeiro, com cargas no intervalo de 10 a 50% da resistência a tração.

Aduati (2016) fez o uso do gráfico de curva de fadiga gerado pela relação entre o número de repetições e as tensões pelo ensaio, e com isso, extraiu os dados referente as constantes K1 e K2, conforme a Tabela 8 que serão utilizados nesse estudo.

Coeficiente de Regressão (K1)	2e-7
Coeficiente de Regressão (K2)	-2,398

Fonte: Aduati (2016, pg. 51)

Com valores mais condizentes com as misturas encontradas na região, o software utilizado para a realização de uma análise do trecho da Avenida Tiarajú, foi o software brasileiro MeDiNa versão 1.0.2 (junho/2018).

Para realizar a análise de durabilidade da estruturado pavimento é necessário, lançar todos os dados da estrutura e do tráfego, como por exemplo espessuras, coeficiente de Poisson, Módulo de Resiliência encontrados através do programa é informado ao programa BackMeDiNa, K1 e K2, entre outras características de cada tipo de estrutura do pavimento estudado como é demonstrado um exemplo do ponto 20 na Figura 27.

Figura 27 – Interface do programa de retroanálise no software MeDiNa

The screenshot shows the MeDiNa software interface with the following data:

MeDiNa - v.1.0.2 - jun/2018 - versão de avaliação  
 Projeto: AVENIDA TIARAJÚ  
 EMPRESA: UNIPAMPA

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Estaca 20	6,0	3010	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Estaca 20	15,0	361	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Estaca 20_Rachão	30,0	11	0,42
4	MATERIAL GRANULAR	Estaca 20_Rachão	30,0	11	0,42
SL	SUBLEITO	Estaca 20	0,0	62	0,45

**EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO**  
**DADOS DO TRÁFEGO**

Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	1303
FD:	1,000
N anual total:	4,75e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	4,75e+05
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	10
N Eq:	5,45e+06

F:\Versão 2 - inicio 07.06\DADOS - 07.06\MEDINA\Estaca\_20.pvt NÍVEL <A>

Fonte: Elaboração Própria

Desta forma, se deseja realizar nesse trabalho uma análise sem fixação dos módulos de resiliência em nenhuma camada, a fim de verificar como a estrutura lançada e executada se comporta com o tráfego. Para isso, é necessário clicar na tecla de atalho F3, ou ir no menu análise e clicar na função para analisar a estrutura. Essa análise realiza os cálculos e verifica os critérios de área trincada e deformação permanente, sem alterar a espessura das camadas, como demonstrado na Figura 28.

Figura 28 – Resultado da evolução mensal dos danos em até 120 meses

Mês	N equiv	ÁREA TRINCADA (%)	DefFerm Total entre as rodas (mm)	DefFerm Total sob as rodas (mm)
1	3,910e+04	2,52%	2,42	2,67
2	7,829e+04	3,52%	2,55	2,81
3	1,176e+05	4,44%	2,63	2,90
4	1,570e+05	5,36%	2,68	2,96
5	1,965e+05	6,32%	2,73	3,01
6	2,360e+05	7,33%	2,77	3,05
7	2,757e+05	8,41%	2,80	3,09
8	3,155e+05	9,57%	2,83	3,12
9	3,551e+05	10,81%	2,85	3,15
10	3,953e+05	12,15%	2,87	3,17
11	4,354e+05	13,58%	2,89	3,19
12	4,756e+05	15,11%	2,91	3,21
13	5,159e+05	16,74%	2,93	3,23
14	5,562e+05	18,48%	2,95	3,25
15	5,967e+05	20,32%	2,96	3,27
16	6,373e+05	22,27%	2,98	3,29
17	6,779e+05	24,31%	2,99	3,30
18	7,187e+05	26,45%	3,00	3,31
19	7,596e+05	28,69%	3,02	3,33
20	8,006e+05	31,02%	3,03	3,34
21	8,416e+05	33,43%	3,04	3,35
22	8,828e+05	35,91%	3,05	3,37
23	9,241e+05	38,46%	3,06	3,38
24	9,655e+05	41,08%	3,07	3,39
25	1,007e+06	43,74%	3,08	3,40
26	1,049e+06	46,44%	3,09	3,41
27	1,090e+06	49,17%	3,10	3,42
28	1,132e+06	51,93%	3,11	3,43
29	1,174e+06	54,69%	3,12	3,44
30	1,216e+06	57,45%	3,12	3,45
31	1,258e+06	60,21%	3,13	3,46
32	1,300e+06	62,94%	3,14	3,46
33	1,342e+06	65,65%	3,15	3,47

F:\Versão 2 - inicio 07.06\Dados - 07.06\MEDINA\Estaca\_20.pvt NÍVEL <A>

Fonte: Elaboração Própria

#### 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

As deflexões encontradas foram corrigidas, através das temperaturas retiradas do pavimento, com isso foi necessário realizar a correção da temperatura em campo, como ressaltado por Bernucci *et al.* (2008), para a temperatura de referência de 25°C.

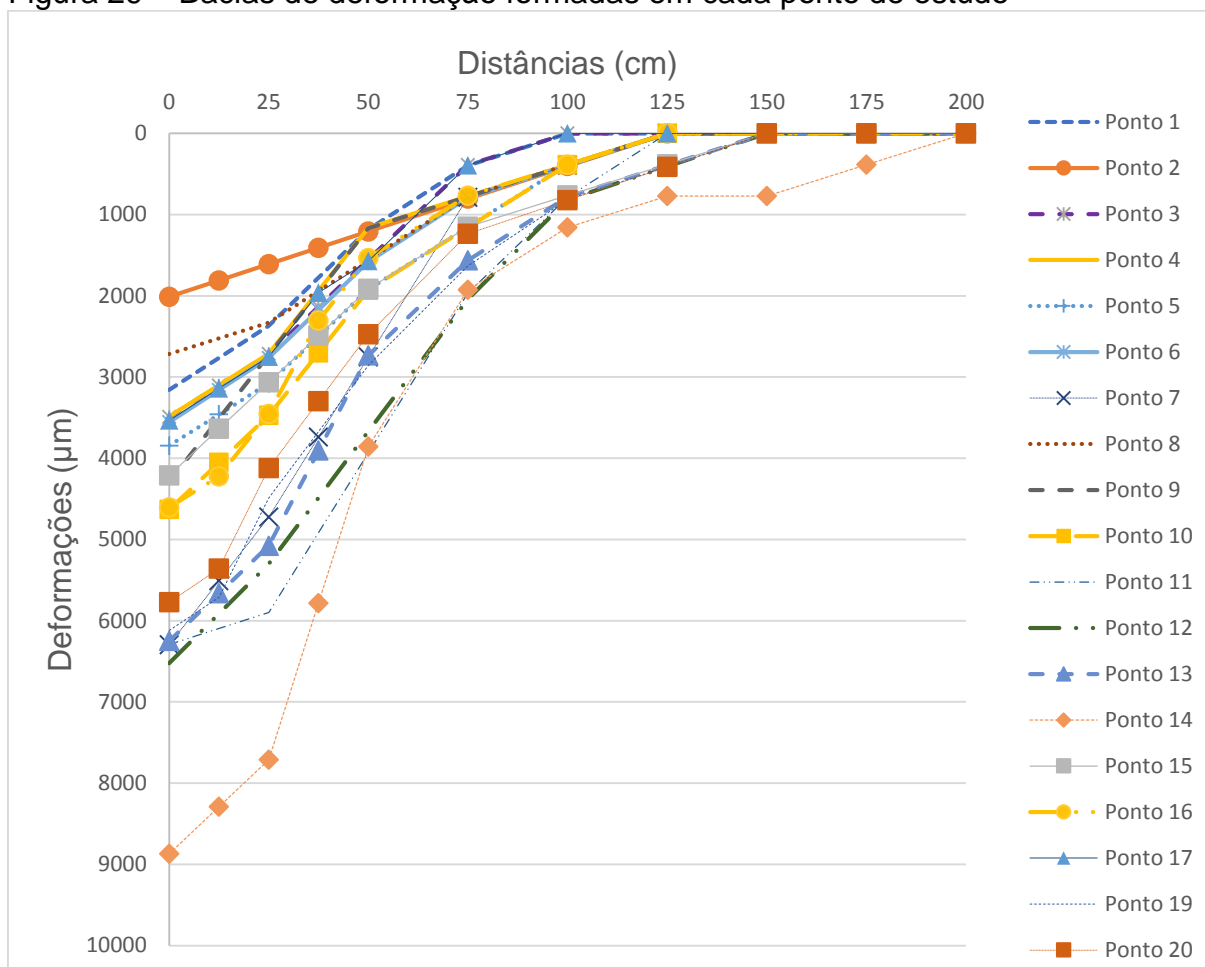
Tabela 9 – Deformações com correção das temperaturas para 25°C ( $\mu\text{m}$ )

Ponto da Pista	D <sub>0</sub>	D <sub>12,5</sub>	D <sub>25</sub>	D <sub>37,5</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>75</sub>	D <sub>100</sub>	D <sub>125</sub>	D <sub>150</sub>	D <sub>175</sub>	D <sub>200</sub>
Est. 1	3158	-	2369	-	1184	395	0	0	0	0	0
Est. 2	2013	-	1611	-	1208	805	403	0	0	0	0
Est. 3	3493	-	2717	-	1552	388	388	388	388	388	0
Est. 4	3487	-	2712	-	1162	775	387	387	387	387	0
Est. 5	3845	-	3076	-	1923	1154	385	385	385	0	0
Est. 6	3555	-	2765	-	1580	790	395	0	0	0	0
Est. 7	6298	-	4723	-	2755	787	394	0	0	0	0
Est. 8	2718	-	2330	-	1553	777	388	0	0	0	0
Est. 9	4289	-	2730	-	1170	780	390	390	390	0	0
Est. 10	4631	-	3473	-	1929	1158	386	0	0	0	0
Est. 11	6294	-	5901	-	3934	1967	787	0	0	0	0
Est. 12	6525	-	5302	-	3670	2039	816	408	408	0	0
Est. 13	6250	-	5078	-	2734	1563	781	391	391	0	0
Est. 14	8870	-	7713	-	3857	1928	1157	771	771	386	0
Est. 15	4213	-	3064	-	1915	1149	766	383	0	0	0
Est. 16	4607	4223	3455	2303	1536	768	384	0	0	0	0
Est. 17	3534	3142	2749	1963	1571	393	0	0	0	0	0
Est. 18	4604	3837	3069	1918	1151	384	0	0	0	0	0
Est. 19	6121	5713	4489	3673	2857	1632	816	408	408	0	0
Est. 20	5773	5361	4124	3299	2474	1237	825	412	0	0	0

Fonte: Elaboração Própria

Com os dados da Tabela 9 possível realizar a criação do delineamento da linha de influência longitudinal de deformação, ocasionada pela carga de prova aplicada estaticamente a superfície de um pavimento denominada bacia de deformação de cada ponto apresentados na Figura 29.

Figura 29 – Bacias de deformação formadas em cada ponto de estudo



Fonte: Elaboração Própria

O gráfico da Figura 29 representa o comportamento das bacias de deformação, sendo as distâncias das leituras encontradas no eixo x, realizadas em cada ponto na unidade de centímetros e as deformações expressas na unidade de micrometros ( $\mu\text{m}$ ), encontradas no eixo y do gráfico em questão.

Há uma variação nos valores encontrados de deflexões, onde valores pequenos são encontrados em sua maioria em pontos onde o revestimento foi construído acima de base de paralelepípedos, uma camada que confere maior rigidez ao pavimento dando consequentemente maior resistência ao deslocamento elástico quando solicitada pelo tráfego. Os valores de deslocamentos um pouco maiores que os demais em alguns pontos, são devido ao pavimento ser flexível conferindo maiores deflexões elásticas ao pavimentado construído.

Os módulos de resiliência encontrados com o uso do BackMeDiNa para todos os pontos, sem a fixação do módulo de resiliência do revestimento, podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 – Módulos de Resiliência encontrados através do programa BackMeDiNa.

Ponto da Pista	Módulo de Resiliência (MPa)			Subleito
	Camada Asfáltica	Camada Granular (paralelepípedo)		
Est. 1	12865	3		793
Est. 2	47055	3		244
Est. 3	13055	3		416
Est. 4	12707	4		18
Est. 5	17988	2		198
Est. 6	16334	2		217
Est. 7	7063	2		134
Est. 8	26532	2		242
Est. 9	6252	7		64
Est. 10	12581	2		185
Est. 11	12325	1		272
Est. 12	11537	1		166
Est. 13	9049	1		68
Est. 14	5935	1		32
Est. 15	14701	3		53
Ponto da Pista	Camada Asfáltica	Camada Granular (BGS)	Camada Granular (Rachão)	Subleito
Est. 16	7965	8	32	125
Est. 17	12272	10	24	1589
Est. 18	6077	8	44	491
Est. 19	1141	633	7	119
Est. 20	3010	361	11	62

Fonte: Elaboração Própria

O DER-SP também recomenda alguns valores de referência sobre o Módulo de Resiliência, na instrução de projeto de pavimentação conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Valores Usuais de Módulo de Resiliência

Material	Intervalos de Valores de Módulo de Resiliência (MPa)
Concretos Asfálticos: - revestimento (CAP 50-70) - revestimento (CAP 30-45) - binder (CAP 50-70) - binder (CAP 30-45)	2000 – 5000 2500 – 4500 2000 – 3000 2500 – 4000
Materiais granulares: - brita graduada - macadame hidráulico	150 – 300 250 – 450
Materiais estabilizados quimicamente: - solo-cimento - brita graduada tratada com cimento - concreto compactado com rolo	5000 – 10000 7000 – 18000 7000 – 22000
Concreto de cimento Portland	30000 – 35000
Solos finos em base e sub-base	150 – 300
Solos finos em subleito e reforço do subleito: - solos de comportamento laterítico LA, LA', LG' - solos de comportamento não laterítico	100 – 200 25 – 75
Solos finos melhorados com cimento para reforço de subleito	200 – 400
Concreto de cimento Portland	28000 – 45000

Fonte: DER-SP (2006, p. 23)

Os pontos que apresentaram melhores resultados em torno da média foram o 19 e o 20 utilizados nesse estudo como referência, pois exibiram valores próximos dos módulos usuais demonstrados por DER-SP, sendo os mais adequados para representar o pavimento flexível construído. Em uma avaliação após a realização das retroanálises foi identificado que na região dos pontos 16, 17 e 18 estava sob influência de tubulações utilizadas para o sistema de saneamento.

Figura 30 – Tubulação na região de estudo



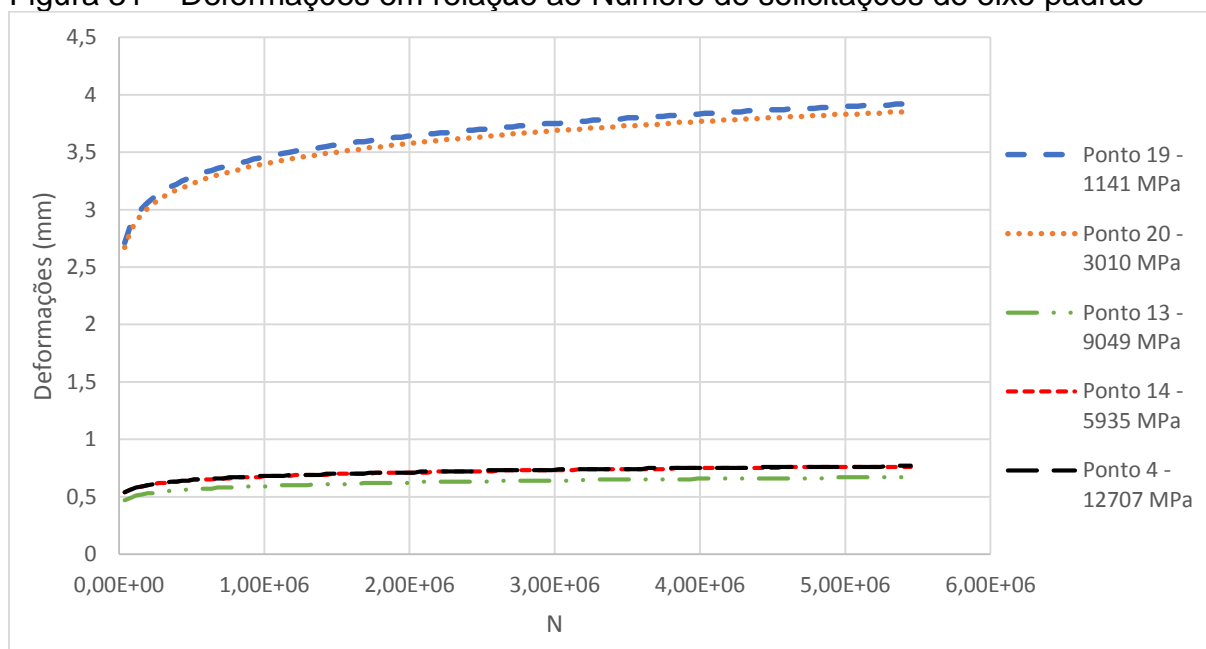
Fonte: Elaboração Própria

A análise dos pontos de estudo que estavam sobre o antigo revestimento de paralelepípedos, apresentaram na estrutura com revestimento valores de módulo de resiliência bem elevados e a camada de paralelepípedos valores praticamente nulos de módulo de resiliência. Sabe-se que, essa situação não é verdadeira, visto que, o revestimento era o mesmo dos demais pontos. Essa situação pode ter ocorrido devido aos materiais não terem valores de rigidez compatíveis, portanto não proporciona uma estrutura compatível entre si. Neste contexto, para as demais análises foram escolhidos os pontos 4, 13 e 14. Esses pontos visam representar o comportamento dos menores aos maiores valor de módulo de resiliência encontrados para a camada do revestimento.

Para demonstração das informações de vida útil do pavimento, os dados da Tabela 10 foram inseridos no software MeDiNa, conforme apresentado no item 3.1.4. e realizada a análise em questão.

A Figura 31 representa a relação entre as deformações permanentes totais sob as rodas e o Número de solicitações do eixo padrão encontrados.

Figura 31 – Deformações em relação ao Número de solicitações do eixo padrão



Fonte: Elaboração Própria

A partir da Figura 31, verifica-se que os pontos 4,13 e 14 obtiveram deformações pequenas, corroborando que, o revestimento foi construído acima de uma base de paralelepípedos existente fazendo com que não ocorram elevadas

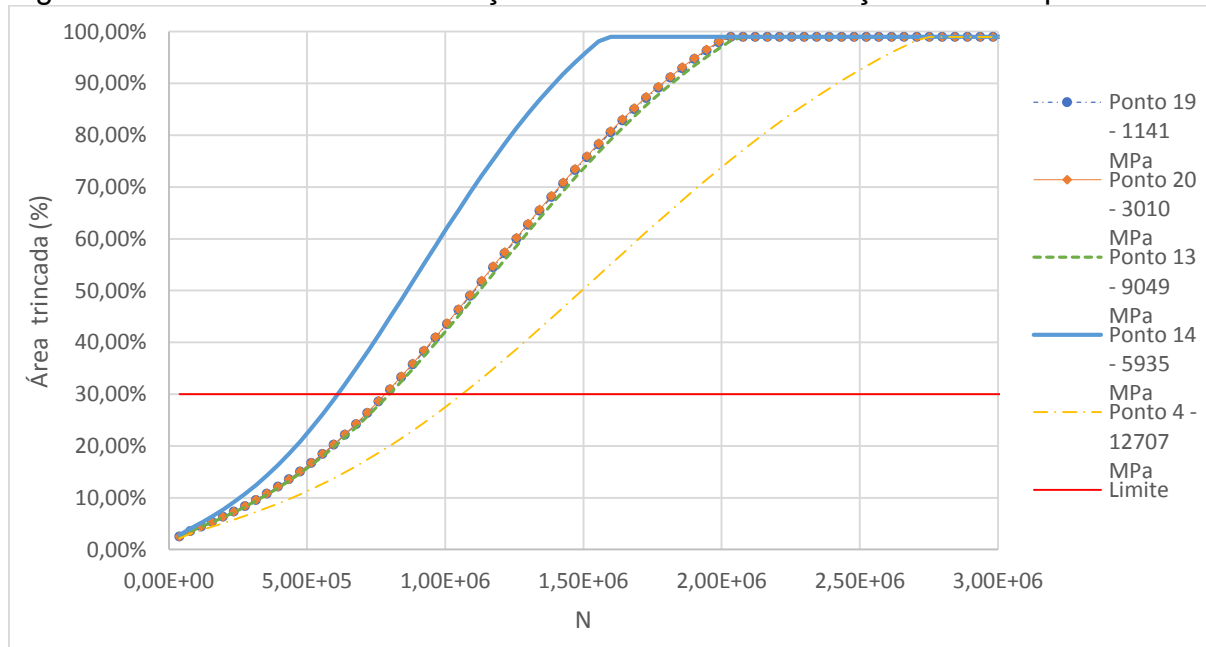


deformações. Já nos pontos 19 e 20, ocorre uma evolução do surgimento deste defeito em pavimentos flexíveis, foram obtidas deformações permanentes um pouco mais elevadas comparadas as anteriores, pois sua estrutura é formada por camadas inferiores que admitem uma maior deformação.

O programa MeDiNa define um critério de parada de dimensionamento quando a deformação permanente atinge 13mm, o que não ocorre nos pontos apresentados. No Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), essa recomendação de 13mm se faz porque pode contribuir para o fenômeno de hidroplanagem na via, que pode afetar o desempenho quanto à segurança do usuário, pois cria-se condições para armazenamento de água nas trilhas de roda. Ao realizar uma análise dos resultados expostos, constata-se que o pavimento não sofrerá problemas com afundamento de trilha de roda, mesmo com a evolução do tráfego.

A Figura 32 representa a relação entre o percentual de área trincada com o Número de solicitações do eixo padrão

Figura 32 – Área trincada em relação ao Número de solicitações do eixo padrão



Fonte: Elaboração Própria

A partir da Figura 32 verifica-se que, todos os pontos atingiram o trincamento por fadiga máximo da superfície, segundo o programa MeDiNa, de 30%. Segundo o Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), o trincamento por fadiga é um defeito decorrente da ação repetida de carregamentos por meio do

tráfego, essas trincas tem seu início entre a face inferior do revestimento e a base, onde ocorrem as maiores tensões que se propagam para a superfície.

Pode-se perceber que entre os valores de N de  $6,12E+5$  e  $1,06E+6$  ocorre uma diferença significativa, isso significa que, a vida útil do pavimento está conectada também ao comportamento da estrutura do pavimento, quando for solicitada a um carregamento naquele local.

Observa-se que, ocorrem diferenças de vida de projeto em uma distância muito curta na via, o que na prática irá resultar em patologias localizadas em alguns pontos. Essa situação poderá resultar em uma restauração total mais precoce devido a essas patologias.

Os dois critérios principais de degradação do pavimento foram avaliados, e para a via em estudo o que melhor permite a previsão de ruptura do trecho será a área trincada, esse critério vai determinar a vida útil da estrutura de todo o trecho em estudo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio de ensaios de caracterização fornecidos pela empresa responsável pela construção da estrutura do pavimento analisado, pode-se perceber que não foram realizados o controle tecnológico das camadas granulares, apenas do material de revestimento. Salviano (2015) enfatiza a importância de ensaios de carregamentos repetitivos para solos e revestimento, pois sem sua realização, induzem a utilização de valores de módulos de resiliência por correlações. É de caráter emergencial que seja exigido por órgãos fiscalizadores às empresas, ensaios que comprovem o atendimento as características de projeto durante a sua construção, isso garante uma maior confiança no controle da obra executada.

Foram efetuados, com o uso da viga Benkelman, ensaios deflectométricos no trecho em estudo, a utilização da viga Benkelman mostrou-se ser uma ferramenta muito útil para extrair os valores de deformações na via e com isso, pode-se formar as bacias de deflexão de todos os pontos. Segundo Medina e Motta (2015), o acompanhamento da construção dos pavimentos através das medidas de deformação, pode garantir que os materiais especificados em projeto, apresentem os mesmos módulos em sua construção.

Por meio de retroanálise alcançou-se os possíveis módulos de resiliência de cada camada do trecho. Os dados de retroanálise segundo Balbo (2007), eliminam ou minimizam a coleta de amostras, são extremamente rápidos em caracterizar o comportamento das camadas conforme seu módulo de resiliência, contribuem para a elaboração de projetos mais duráveis, é o procedimento que mais evoluiu no momento e representa um ganho de tempo para os projetistas.

Verificou-se posteriormente a provável quantidade de passagens de veículos na via utilizando o modelo empírico mecanístico. Os resultados obtidos pela aplicação por meio do programa MeDiNa para avaliação da estrutura construída, apontam uma durabilidade muito baixa para o segmento em estudo, confirmando a ruptura precoce do trecho por área trincada. Segundo Medina e Motta (2015), a deformabilidade elástica encontrada varia ao longo da vida útil do pavimento, pois, provocam fadiga do revestimento. O acompanhamento dessas medidas, nos auxilia a prever, e realizar um diagnóstico do surgimento do trincamento e deformações permanentes encontradas na estrutura do pavimento, ao longo do tempo.

Assim com uma avaliação estrutural do pavimento no seu estado de deterioração atual, se permite que ocorra uma programação de intervenções necessárias para um possível reforço estrutural, caso seja necessário.

Foi possível observar que mesmo em um segmento curto de análise, se não for realizado um controle do processo construtivo de todas as camadas, ocorrem vidas de projeto distintas, resultando assim em patologias precoces em alguns pontos. Isso enfatiza a necessidade de ser realizado o controle construtivo de todas as camadas.

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

Durante o desenvolvimento do estudo e com a análise dos resultados, percebeu-se a importância da avaliação estrutural, a fim de contribuir com a pesquisa já desenvolvida, sugere-se como novos estudos:

- Realizar a leitura de deformabilidade em outros trechos da cidade de Alegrete-RS, contendo diferentes materiais constituintes nas suas bases e diferentes espessuras de camadas.
- Realizar a extração de corpos de prova para ensaios de Módulo de Resiliência no trecho estudado;
- Observar a ação do tráfego em função do número equivalente de operações de eixo simples padrão (N);

## REFERÊNCIAS

ADUATI, M.H.F. **Análise dos efeitos de fibras de polipropileno na adesividade e Vida de fadiga em misturas asfálticas.** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA. Alegrete, 2016. Disponível em: <<http://dspace.unipampa.edu.br:8080/jspui/handle/rii/1733>> Acesso em: 2019-06-06.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 15087. **Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, 2012.

BALBO, J.T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração.** Oficina de Textos, São Paulo, 2007, 558 p.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros.** Petrobras; Associação Brasileira das Empresas Distribuidora de Asfalto, Rio de Janeiro, 2008, 501 p.

BORGES, C.B.S. **Correlações entre Medidas de Deflexão com Viga Benkelman e FWD para os Pavimentos Rodoviários do estado de Santa Catarina.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2001. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/79447/188421>> Acesso em: 2018-10-18.

BUDNY, J. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/es/308-ingles/master-dissertations/2012/3141-jaelson-budny>> Acesso em: 2018-11-10.

DEPARTAMENTO DE ESTRADA DE RODAGEM. DER-SP. **Instrução de Projeto de Pavimentação IP-DE-P00/001**. Departamento de Estrada de Rodagem, 2006, 56p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER–ME 024/94. **Determinação das Deflexões pela viga Benkelman**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994, 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER–PRO 175/94. **Aferição de viga Benkelman**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994, 11p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER. **Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998, 242p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT–ME 133/2010. **Delineamento da Linha de Influência Longitudinal da Bacia de Deformação por intermédio da viga Benkelman**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 2010, 8p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT–ME 135/2018. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2018, 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. IPR/DNIT/ABNT. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2006, 310p.

LOPES, F.M. **Avaliação Estrutural de Pavimentos Asfálticos com Base nos Parâmetros de Curvatura da Bacia de Deformação**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas,

2012. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/258320>>  
Acesso em: 2018-11-03.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro. 2ªed.  
2015. 620p.

NOBREGA, E.S. **Comparação entre Métodos de Retroanálise em Pavimentos Asfálticos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/es/299-ingles/master-dissertations/2003/2942-eduardo-suassuna-nobrega>> Acesso em: 2018-11-10.

PESSOA, F.H.C. **Avaliações funcional e estrutural de trechos de rodovias no Distrito Federal construídos com diferentes materiais**. 2012. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/12272>> Acesso em: 2018-10-08.

PANDOLFO, D.K. **Variação da estimativa de vida útil de um pavimento flexível restaurado com espessuras de reforço analisadas mecanisticamente a partir dos módulos obtidos por diferentes métodos e softwares de retroanálise**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI. Santa Rosa, 2015. Disponível em: <<http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/handle/123456789/3937>> Acesso em: 2018-10-18.

PANDOLFO, D.K.; ECHEVERRIA J.A.S.; SPECHT L.P. **Análise mecânica de um pavimento flexível restaurado a partir do MR obtido em diferentes softwares de retroanálise com dados de viga Benkelman**. Revista de Engenharia Civil IMED, Jul/Dez 2016, p.71-86.

PREGO, A.S.S. **A memória da pavimentação no Brasil**. Associação Brasileira de Pavimentação, Rio de Janeiro, 2001, 640 p.

SANTOS, M.S. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho a partir da implantação de trechos monitorados na região de Santa Maria – RS.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Santa Maria, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7886>> Acesso em: 2018–10–11.

SALVIANO, W.R.A. **Análise do controle construtivo de um pavimento semirrígido por deflexão.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/es/tesis-de-maestria/454-2015/7007-willian-renan-de-araujo-salviano>> Acesso em: 2019–13–06.

VICTORINO, D.R. **Análise de Desempenho de um Pavimento Flexível da Rodovia BR–290/RS Solicitado por um Simulador de Tráfego Móvel.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/16206>> Acesso em: 2018–11–10.

ZANETTI, F.S. **O uso de redes neurais artificiais como ferramenta para auxiliar na determinação da vida útil de pavimentos flexíveis.** 2008. Dissertação (Mestrado em Infra–Estrutura de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-28042009-091916/pt-br.php>>. Acesso em: 2018–11–02.