

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FLAVIO OLIVEIRA SOLIS

**RETROANÁLISE E AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE UM TRECHO DE PAVIMENTO
ASFÁLTICO DA RUA BENTO MARTINS NO MUNICÍPIO DE URUGUAIANA – RS**

**Alegrete
2024**

FLAVIO OLIVEIRA SOLIS

**RETROANÁLISE E AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE UM TRECHO DE PAVIMENTO
ASFÁLTICO DA RUA BENTO MARTINS NO MUNICÍPIO DE URUGUAIANA – RS**

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: Jaelson Budny

**Alegrete
2024**

FLAVIO OLIVEIRA SOLIS

**RETROANÁLISE E AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE UM TRECHO DE PAVIMENTO
ASFÁLTICO DA RUA BENTO MARTINS NO MUNICÍPIO DE URUGUAIANA – RS**

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: 01 de julho de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. JAELSON BUDNY - UNIPAMPA - Orientador

Eng. JULIANO DE ALMEIDA ZACARIAS - Examinador Externo

Prof. Dr. RENAN GUSTAVO SCHERER - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **JAELSON BUDNY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/07/2024, às 08:35, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **RENAN GUSTAVO SCHERER, PROFESSOR MAGISTERIO SUPERIOR - SUBSTITUTO**, em 16/07/2024, às 18:04, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JULIANO DE ALMEIDA ZACARIAS, Usuário Externo**, em 17/07/2024, às 17:04, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1491714** e o código CRC **E11B6565**.

Dedico esse trabalho aos meus pais Roberto e Maria, irmãos Vanessa e Fabiano e a todos os familiares próximos, que sempre acreditaram e incentivaram a minha trajetória na Unipampa.

AGRADECIMENTO

Agradeço aos meus pais Roberto e Maria por terem me dado condições de sonhar com uma graduação longe de casa, por terem paciência no processo e proporcionado alicerces para ter resiliência na realização do curso. Ao meu irmão Fabiano por ter me dado inúmeros conselhos para eu não desanimar. À minha irmã Vanessa que me incentivou e ajudou a me estruturar. Ao meu cunhado Luís Henrique que não mediu esforços para me ajudar no que fosse preciso. Aos meus sobrinhos Martin, Nicolaz, Santiago e Benjamim por serem a luz que brilham todos meus dias. Vocês são as minhas referências, obrigado por passar por essa fase da minha vida junto a mim, com empatia e fortaleza que fizeram toda diferença.

Agradeço aos meus irmãos de coração Diego Serres e Peterson Bonorino que comemoraram as minhas conquistas e suportaram todas as minhas lamentações, deixando mais leve qualquer assunto e aliviando meus temores. Aos amigos que a UNIPAMPA me proporcionou Guilherme Goulart, Dominique Jank, Fernando Camargo, Priscila Gonçalves, Daniela Calegaro, Rafael Assis e tantos outros que de algum jeito especial foram tão necessários e importantes para chegar nesse momento da minha vida.

Aos colegas e amigos de trabalho Diego Rosina, Lucas Rosso, Adilson Moraes, Cláudio de Oliveira, Antônio Trindade, Leonardo dos Santos, Cinthya Figueiredo, Denise Adornes e Cristiane Lopes por torcer, incentivar, apoiar os perrengues do cotidiano, compartilhando fofocas, risadas e experiências de vida profissional e pessoal. Vocês são meus exemplos de profissionalismo e acima de tudo companheirismo.

Ao meu professor orientador Jaelson Budny pela paciência e por ter acreditado no meu potencial para conclusão deste trabalho, sem seus conselhos e orientações não teria alcançado essa etapa do curso.

Por último, mas não menos importante, agradeço a minha companheira Yolanda Fragoso por me ajudar a não perder as esperanças nos momentos mais difíceis da faculdade. Muito obrigado por estar sempre ao meu lado me dando apoio e carinho nas horas que mais preciso.

RESUMO

O fluxo de veículos numa via é o principal causador de danos na pavimentação ao longo do tempo e para avaliar essas patologias, são comumente estudadas as deformações elásticas e plásticas nas camadas do pavimento. Para obtenção de deformações deflectométricas, foi realizado o ensaio não-destrutivo de viga Benkelman na rua Bento Martins, zona urbana da cidade de Uruguaiana/RS, trecho reformado desde a camada de sub-base até a camada de revestimento asfáltico flexível, onde foram coletados dados de deformações em 26 estacas. Com as bacias de deflexão, foi possível realizar a retroanálise por meio do software BackMeDiNa e obter os módulos de resiliência das camadas. Na sequência, com os valores de módulo auferidos, foi realizado o dimensionamento do pavimento dentro do software MeDiNa, obtendo resultados de porcentagem de área de trinca e espessura de afundamento de trilha de roda, afim de avaliar os danos causados pelo fluxo de tráfego no final da estimativa de projeto, com isso comprovando a eficácia do projeto a partir da análise da pavimentação executada.

Palavras-chave: viga Benkelman, retroanálise, vida de projeto.

ABSTRACT

The movement of vehicles on roads is a significant factor contributing to pavement damage over time. It is a common practice to evaluate these issues by studying the elastic and plastic deformations in the pavement layers. A non-destructive test was conducted to obtain deflectometric deformations using a Benkelman beam on Bento Martins Street, an urban area in Uruguaiana/RS. The renovated section underwent testing from the sub-base layer to the flexible asphalt coating layer. Data on deformations in 26 piles were collected. With the deflection bays of each pile, BackMeDiNa software was used to conduct a retro-analysis test and obtain resilience modulus values. In the sequence, the MeDiNa software dimensioned the pavement structure based on the obtained modulus values. The results provided information on the percentage of the crack area and wheel track sinking thickness. To evaluate the damage caused by traffic flow at the end of the project estimate and to validate the effectiveness of the paving endeavor.

Keywords: Benkelman beam, retro analysis, design life.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de um pavimento rígido	15
Figura 2 - Estrutura de um pavimento flexível	16
Figura 3 - Bacias deflectométricas	17
Figura 4 - Deformações Permanentes	18
Figura 5- Posicionamento da Viga Benkelman.....	20
Figura 6 - Projeção da Bacia Deflectométrica	21
Figura 7 - Viga Benkelman	22
Figura 8 - Falling Weight Deflectometer Dynatest.....	23
Figura 9 - Bacia Deflectométrica do ensaio FDW.....	23
Figura 10 - Correlação entre viga Benkelman e FDW	27
Figura 11 - Dados necessários para retroanálise.....	28
Figura 12 - Fluxograma de trabalho	29
Figura 13 - Localização do trecho estudado	30
Figura 14 - Implantação do pavimento	31
Figura 15- Pesagem do caminhão	32
Figura 16 - Marcação das estacas	32
Figura 17 - Posicionamento da VB.....	33
Figura 18 - Temperatura do pavimento.....	33
Figura 19 - Posicionamento da câmera.....	34
Figura 20 - Leituras por vídeo	35
Figura 21 - Comparação das correlações de VB e FWD	37
Figura 22 - Software BackMeDiNa	38
Figura 23 - Software MeDiNa	40
Figura 24 - Bacias deflectométricas	43
Figura 25 - Trecho interditado	44
Figura 26 - Desvio padrão	46
Figura 27 - Resultados no MeDiNa	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Posicionamento do ensaio de Viga Benkelman	20
Tabela 2 – Estrutura do pavimento	31
Tabela 3 - Medições de temperaturas.....	33
Tabela 4 – Valores de deflexões (0,01mm).....	35
Tabela 5 - Valores de coeficiente de Poisson	39
Tabela 6 - Parâmetros de revestimento asfáltico	40
Tabela 7 - Parâmetros da base e sub-base	41
Tabela 8 - Bacias deflectométricas corrigidas (μm).....	42
Tabela 9 - Resultados de MR.....	44
Tabela 10 – Resultados de desvio padrão (MPa)	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celsius
AASHTO	American Association of Highway and Transportation Officials
BGS	Britra Graduada Simples
BR	Brasil
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	California Bearing Ratio
cm	Centímetro
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
FWD	Falling Weight Deflectometer
kgf	Quilograma Força
km/h	Quilômetros por Hora
kN	Quilo Newton
m	Metro
ME	Método de Ensaio
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
MR	Módulo de Resiliência
RMS	Raiz Média Quadrática
VB	Viga Benkelman
µm	Micrômetro

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1.	Objetivo Geral.....	13
1.2.	Objetivos específicos.....	13
1.3.	Justificativa	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1.	Pavimento.....	14
2.2.	Pavimento Rígido	14
2.3.	Pavimento Flexível	15
2.4.	Deflexão dos pavimentos	16
2.5.	Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis por ensaios não destrutivos	18
2.6.	Viga Benkelman (VB)	19
2.7.	Falling Weight Deflectometer (FWD).....	22
2.8.	Correlações entre a viga Benkelman e o FWD.....	24
2.9.	Retroanálise	27
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1.	Planejamento.....	29
3.2.	Local de estudo	29
3.3.	Ensaio com a viga Benkelman	31
3.4.	Ajustes para análise nos softwares	36
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	42
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
5.1.	Conclusões.....	48
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros.....	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1. INTRODUÇÃO

A estrutura de um pavimento é composta por várias camadas de espessuras definidas e construída sobre uma área de solo compactado, com o objetivo de resistir as cargas passantes vindas do tráfego de veículos e das avarias do clima, e de possibilitar boas condições de rolamento aos usuários, levando em consideração a segurança, o conforto e a economia (Bernucci *et al.*, 2022).

A situação atual da malha rodoviária federal é considerada de baixo conforto ao rolamento, insatisfatória aos usuários em relação ao desempenho, segurança e economia, de acordo com pesquisa realizada em 2019 pela Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2019).

A maior parte dos danos na pavimentação ao longo do seu tempo de vida é causado pelo tráfego. Para a análise dessa deterioração, é necessário estudar as deformações elásticas e plásticas das camadas do pavimento através de equipamentos que medem as suas deflexões. Para avaliações de estruturas de pavimentos de grandes extensões, são usualmente empregados no Brasil os métodos de ensaios não-destrutivos de Viga Benkelman (VB) e de Falling Weight Deflectometer (FWD).

Em conjunto com os ensaios não-destrutivos, para avaliação do grau de deformação que um pavimento possa apresentar, o estudo da retroanálise é um aliado para encontrar os módulos de resiliência de cada camada da via em análise. A retroanálise basicamente é a comparação entre o pavimento em situação atual com um pavimento com parâmetros de elasticidades de um trecho recém executado. A avaliação é realizada desde o subleito da obra até as camadas subsequentes de reforço do subleito, sub-base, base e revestimento com espessuras reais. Os resultados são executados por meio de softwares que calculam e comparam os módulos de resiliência.

Para que um pavimento asfáltico possa ser devidamente analisado e recuperado, é necessário o estudo da vida útil da sua estrutura com intuito de fundamentar o seu reparo, sendo a investigação por meio de ensaios para obtenção das bacias deflectométricas uma prática decorrente que possibilita a projeção de operacionalidade adequada do pavimento.

1.1. Objetivo Geral

Avaliar a vida de projeto de um trecho de 620 metros de pavimento flexível localizado na Rua Bento Martins, zona urbana da cidade de Uruguaiana/RS, considerando o comportamento deflectométrico determinado após sua execução.

1.2. Objetivos específicos

Como forma de complementação do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Determinar as bacias de deflexão no pavimento, utilizando a viga Benkelman;
- b) Obter os módulos de resiliência através de retroanálise;
- c) Estimar a vida de projeto da via utilizando modelo empírico mecanístico de dimensionamento de pavimentos flexíveis (MeDiNa);
- d) Avaliar a adequação da estrutura executada para suporte dos carregamentos.

1.3. Justificativa

O planejamento de manutenção e conservação da via depende da qualidade e durabilidade do pavimento executado. A determinação de tais fatores podem ser realizada após a execução do serviço por meio a análise de suas deformações. Para o estudo de campo deste trabalho, foi selecionado um segmento de pavimento urbano, onde foi realizada a restauração de uma rua que é considerada uma via coletora que faz a ligação bairro-centro da zona leste do município de Uruguaiana. A peculiaridade deste segmento é que o mesmo possui dois grandes condomínios residenciais, existindo uma projeção de mais dois empreendimentos do mesmo porte, que resultará no aumento do fluxo de pessoas e veículos, justificando a necessidade de revitalização do trecho. Com a finalidade de garantir que a camada de rolamento executada proporcione aos usuários conforto e segurança de rolagem, realizou-se a avaliação das deflexões do trecho com a viga Benkelman para detalhar as bacias de deformações, a fim de prever os danos causados por fadiga e deformações permanentes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Pavimento

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) define que pavimento é uma estrutura que é construída sobre solo terraplenado e designado a resistir e distribuir esforços verticais sofridos ao subleito, para melhorar condições de segurança e comodidade e resistir aos desgastes dos esforços horizontais na superfície de rolamento.

Ao oferecer melhor qualidade de rolamento de uma via, irá proporcionar aos usuários uma expressiva redução nos custos operacionais, como manutenção dos veículos, que estão associados às condições de superfície dos pavimentos (Balbo, 2007).

Segundo Bernucci *et al.* (2022), as estruturas de pavimentos são sistemas de camadas assentados sobre uma fundação chamada subleito. Desta forma, as características da camada, como espessura e rigidez, bem como a interação entre elas, definem o comportamento estrutural do pavimento. De acordo com os mesmos autores, a engenharia rodoviária subdivide as estruturas de pavimentos segundo a rigidez do conjunto, podendo ser estruturas rígidas ou estruturas flexíveis. A condição estrutural do pavimento indica por quanto tempo ele manterá um nível adequado de condição funcional ou serventia. A condição de um pavimento representa o nível de degradação resultante do processo de deterioração (DNER, 1998).

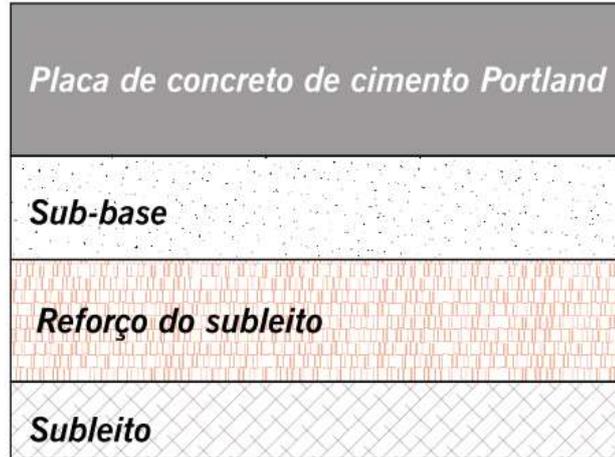
2.2. Pavimento Rígido

Pavimento rígido é a estrutura onde a camada superior apresenta elevada rigidez em comparação as outras camadas abaixo, dessa maneira recebe quase todas as tensões exercidas pelo carregamento na camada de rolamento (DNIT, 2006).

Para Balbo (2007), os pavimentos rígidos são empregados em trechos onde o tráfego é muito intenso ou pesado, sendo usualmente aplicados em corredores exclusivos de ônibus, aeroportos, viadutos, pontes e em recuperação de pavimentos flexível.

Segundo Bernucci *et al.* (2022), são executados com placas de concreto de cimento Portland, podendo ser com ou sem armação, consistindo em uma camada que simultaneamente funciona como revestimento e base (Figura 1).

Figura 1 - Estrutura de um pavimento rígido



Fonte: Bernucci *et al.* (2022)

2.3. Pavimento Flexível

Pavimento flexível é uma estrutura onde todas as camadas sofrem deformações após um carregamento aplicado, de modo que a carga é distribuída quase proporcionalmente entre as camadas (DNIT, 2006).

De acordo com Bernucci *et al.* (2022), os pavimentos flexíveis são elaborados por camada de rolamento asfáltica apoiada sobre camadas de base, sub-base e reforço do subleito. Comumente esses tipos de pavimentos são associados aos pavimentos asfálticos, nas quais suas camadas são formadas por materiais granulares, sem adição de materiais cimentícios.

Uma ou mais camadas podem ser suprimidas, a depender do volume de tráfego, da capacidade de suporte do subleito, da rigidez e espessura das camadas e condições ambientais (Branco, 2004).

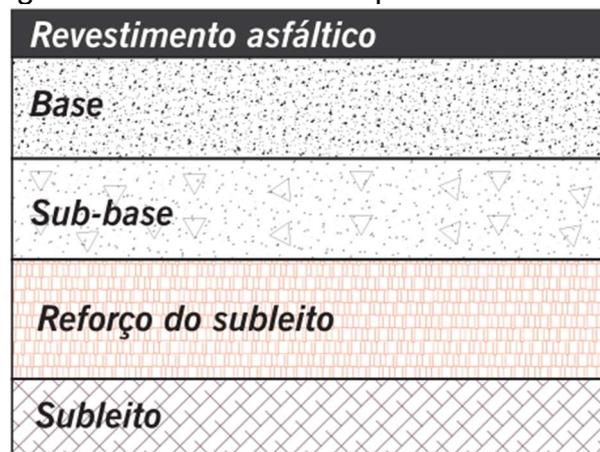
Segundo Balbo (2007), cada camada estrutural que o pavimento asfáltico é composto pode ser exercido uma ou mais funções específicas, como proporcionar vias adequadas para o desempenho eficaz de rolamento e suporte estrutural, resistindo também as variações climáticas.

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) define as quatro camadas que o pavimento flexível é constituído, sendo o subleito, sub-base, base e revestimento:

- Subleito é o terreno usado como fundação do pavimento;
- Reforço do subleito é realizado em caso de necessidade de melhoria de capacidade estrutural;
- Sub-base é a camada de correção do subleito ou complementar a camada de base, não sendo aconselhável a construção do pavimento diretamente sobre o leito alcançado na terraplenagem;
- Base é a camada designada para resistência e distribuição dos esforços verticais exercidos pelos veículos na camada de revestimento;
- Revestimento é a camada que recebe e resiste diretamente os esforços de rolamento dos veículos, tendo como funções de comodidade e segurança nas condições de rolamento.

A Figura 2 mostra uma estrutura-tipo de um pavimento flexível.

Figura 2 - Estrutura de um pavimento flexível



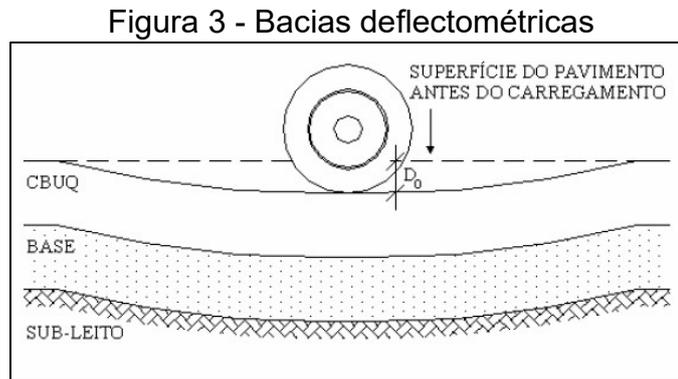
Fonte: Bernucci *et al.* (2022)

2.4. Deflexão dos pavimentos

O objetivo principal de uma avaliação estrutural é a análise dos processos de deformabilidade do pavimento, sendo dividido em deformações recuperáveis (transitórias) e irreversíveis (permanentes), oriundas da ação de cargas passantes das rodas dos veículos para a via (Fonseca, 2013).

Para Silva (2004) é possível definir a deflexão elástica recuperável como as diferenças de alturas verticais reversíveis na camada de rolamento ou nas demais

camadas do pavimento (Figura 3), efetuados pela ação de carregamentos descontínuos, de modo que a estrutura regresse para a posição inicial após suspender o esforço exercido, sendo que a análise das deflexões máximas indica o comportamento futuro do pavimento.



Fonte: Nóbrega (2003)

De acordo com Borges (2013), as deformações irreversíveis (Figura 4) são capazes de suceder de acordo com os fatores a seguir:

- Pela alta quantidade de ligante, gerando escoamento plástico do material asfáltico;
- Pelo demasiado carregamento passante no pavimento, causando ruptura por cisalhamento nas camadas;
- Inadequado dimensionamento do pavimento;
- Pela expansão do subleito em razão da sua saturação, alterando o valor de CBR;
- Pela insatisfatória execução de compactação e drenagem, causando recalque das camadas da estrutura ou pelas cargas demasiadamente elevadas proveniente do tráfego, acarretando trilhas de rodas.

Figura 4 - Deformações Permanentes



Fonte: Bernucci *et al.* (2022)

Para Macedo (2018), a viscoelasticidade é uma propriedade do ligante asfáltico que considera deformações reversíveis e irreversíveis atuando simultaneamente. O comportamento mecânico viscoelástico é a combinação de uma deformação elástica com uma taxa de deformação viscosa (deformações irreversíveis), que depende do tempo e da temperatura.

Considerando as condições climáticas ou as ações do tráfego ao decorrer do período de operação do pavimento, é gerado um processo de aumento das deflexões, diminuindo a elasticidade com o decorrer do tempo de uso do pavimento (Miranda; Pereira, 1999).

2.5. Avaliação estrutural de pavimentos flexíveis por ensaios não destrutivos

A avaliação estrutural tem como objetivo a caracterização dos elementos estruturais do pavimento e suas variáveis, retratando o comportamento das cargas exercidas nas camadas avaliadas, bem como a sua capacidade de suporte para futuros acréscimos de cargas (Balbo, 2007). A avaliação estrutural de um pavimento pode ser realizada por três métodos: destrutivos, semidestruídos ou não-destrutivos.

Para Macêdo (1996) os ensaios não destrutivos são realizados com menores interrupções no tráfego em comparação aos ensaios destrutivos, além disso, esse método não causa avarias na estrutura existente do pavimento. Com isso, a avaliação do condicionamento da estrutura do pavimento se torna viável em qualquer período

de tempo de serviço da rodovia, sendo possível o retorno a avaliação no mesmo local realizado.

Conforme Cardoso (1995) o estudo não-destrutivo corresponde na avaliação da superfície e na execução de provas de cargas, no qual são medidos os efeitos de retorno da estrutura às cargas em movimento, agindo conforme o regime elástico de deformação do pavimento.

Segundo Bernucci *et al.* (2022), para cada passagem de roda o pavimento sofre uma deformação total que resulta em dois componentes: a deformação elástica onde existe uma deflexão no pavimento, e a deformação permanente que se torna o afundamento de trilha de roda, podendo interferir nas condições de conforto e segurança do tráfego depois de certo valor.

No momento em que o deslocamento elástico é medido em vários pontos com uma certa carga aplicada, por denominação, se considera uma bacia de deflexão ou linha de influência da carga sobre um ponto determinado do pavimento (DNIT-ME 133/2010).

De acordo com Branco (2004), os deflectômetros são os equipamentos para medição de deflexão, sendo os ensaios de viga Benkelman (VB) e o *Falling Weight Deflectometer* (FDW) os mais empregados no Brasil. Com esses ensaios é possível obter parâmetros de deflexão máxima (deslocamento abaixo do centro de carga para o ensaio FWD ou abaixo do centro de eixo simples de rodas duplas no caso da viga Benkelman), de raio de curvatura (arco de parábola passantes pelos pontos de distância zero e de 25 centímetros da deformada) e de deformada (bacia deflectométrica ou de deformação, medida do ponto inicial para variadas distâncias sequenciais).

2.6. Viga Benkelman (VB)

O equipamento mais utilizado para a avaliação estrutural dos pavimentos entre tantos que existem no mercado é a viga Benkelman, concebida pelo Engenheiro A. C. Benkelman e usada pela primeira vez nas pistas experimentais da AASHTO, em 1953 (Carneiro, 1966).

Conforme DNER-ME 024/94, para a realização do ensaio de determinação de deflexão de um pavimento a partir da viga Benkelman, é necessário um caminhão

com 80 kN de carga no eixo traseiro simples de roda dupla com 0,55 MPa de pressão de inflação dos pneus, onde será realizada a medição da deformação elástica. A Tabela 1 indica o posicionamento dos pontos do pavimento em que devem ser medidas as deflexões.

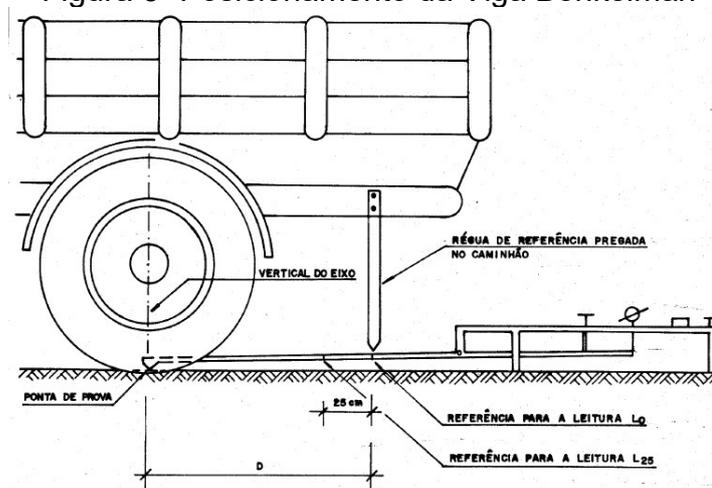
Tabela 1 – Posicionamento do ensaio de Viga Benkelman

Largura da faixa de tráfego (m)	Distância da borda do revestimento (m)
2,70	0,45
3,00	0,60
3,30	0,75
3,50 ou mais	0,90

Fonte: DNER-ME 024/94

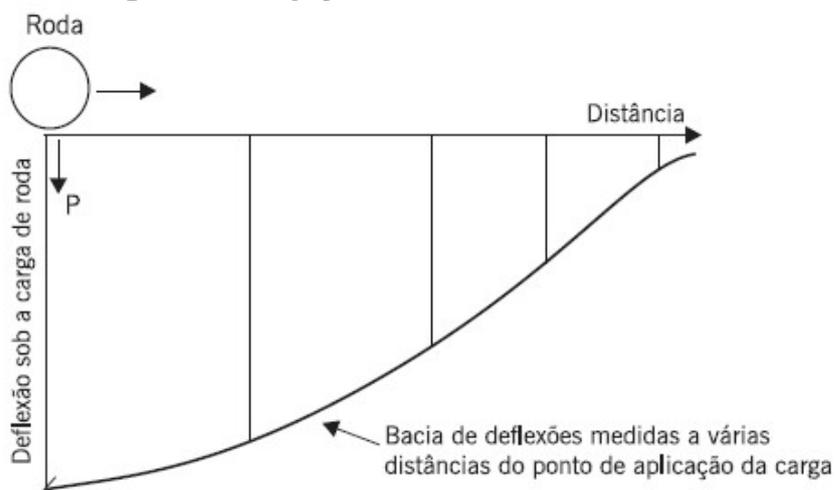
Para o posicionamento do ensaio, a ponta de prova da viga Benkelman tem que estar entre as rodas duplas de um dos lados do caminhão alinhado ao seu eixo (Figura 5). O caminhão por sua vez se acomoda perpendicular ao eixo da pista de rolamento. A trava da viga é liberada e começam as leituras no extensômetro realizando a leitura inicial L_0 , após o caminhão se deslocar lentamente são feitas as leituras em distâncias predeterminadas para que se obtenha a deflexão em variados pontos, gerando a projeção de uma bacia deflectométrica (Figura 6). Para determinar o raio de curvatura, faz-se a leitura a 25 centímetros da posição inicial, coletando o D_{25} .

Figura 5- Posicionamento da Viga Benkelman



Fonte: DNER 024/94

Figura 6 - Projeção da Bacia Deflectométrica



Fonte: Nóbrega (2003)

Segundo a Norma DNIT-ME 133/2010, para o cálculo da bacia de deflexão é necessário obter as leituras de distanciamento inicial (L_o), final (L_f) e as leituras intermediárias. A norma não define os demais deslocamentos para as leituras que compõe a envoltória da bacia deflectométrica, deixando ao operador do ensaio definir essas distâncias.

A deflexão do ponto medido no pavimento é calculada segundo a Equação 1.

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

Equação 1

Onde:

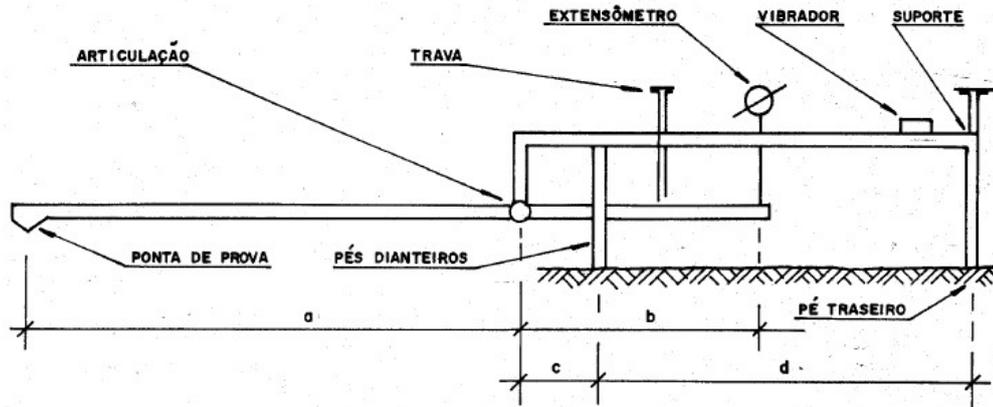
D_n é a deflexão real, em centésimos de milímetro;

L_n é a leitura inicial, em centésimo de milímetro;

L_f é a leitura final, em centésimo de milímetro;

a e b são as dimensões da Viga Benkelman (Figura 7).

Figura 7 - Viga Benkelman



Fonte: DNER 024/94

O raio de curvatura da bacia de deformação é calculado conforme a Equação 2:

$$R = \frac{6250}{2 \times (D_0 - D_{25})}$$

Equação 2

Onde:

R é o raio de curvatura, em metros;

D_0 é a deflexão real, em centésimos de milímetro;

D_{25} é a deflexão a 25 cm da ponta de prova, em centésimos de milímetro.

2.7. Falling Weight Deflectometer (FWD)

Com desenvolvimento na Dinamarca e aperfeiçoamento nos Estados Unidos da América, o FWD (Figura 8) é um medidor de impacto que simula as forças de transição entre o pavimento e a carga de um veículo em circunstâncias de tráfego real com o objetivo da formação de bacias de deflexões com agilidade e elevada credibilidade (Nóbrega, 2003).

Figura 8 - Falling Weight Deflectometer Dynatest



Fonte: Bernucci *et al.* (2022)

Conforme Bernucci *et al.* (2022), o Falling Weight Deflectometer é um dos equipamentos mais modernos para medição de deslocamentos elásticos por impacto. As leituras de deflexão máxima são realizadas através de pancadas de um peso suspenso a certa medida de altura em um local do pavimento, por meio de amortecedores que passam o impacto para uma placa metálica sobre o ponto almejado no pavimento. O equipamento é rebocado por um veículo utilitário, onde é carregado a parte do sistema de recebimento e armazenamento de dados, sendo que o processo de colhimento dos resultados se encontra no reboque e é totalmente automatizado, no qual os detectores sísmicos (deflectômetro) são instalados e ligados ao computador. Com isso, uma carga é aplicada através de impactos para realização de leituras de deslocamentos elásticos em diversos sensores distribuídos ao longo de um suporte para que se obtenha uma bacia deflectométrica desejada (Figura 9).

Figura 9 - Bacia Deflectométrica do ensaio FDW



Fonte: Bernucci *et al.* (2022)

De acordo com Macêdo (1996), a medição da carga aplicada é obtida por meio de uma célula de carga que tem duração de 25 a 33 milissegundos, que é o tempo pelo qual um veículo de velocidade entre 60 e 80 km/h passa no ponto de coleta do equipamento. O FWD obtém dados através de pulsos de carga na pista em forma de ondas, que percorrem pelo sistema da estrutura em velocidades finitas sendo catalogado por sete sensores, estes distribuídos com um no centro da placa e os demais em afastamentos pré-definidas ao decorrer de uma barra metálica de 4,5 metros de comprimento, podendo variar o ajuste da massa e altura de queda dependendo da composição escolhida, assim simulando os efeitos de variados tipos de eixos nos pavimentos.

2.8. Correlações entre a viga Benkelman e o FWD

A correlação entre os dados obtidos por um deflectômetro de impacto (Falling Weight Deflectometer - FWD) e os resultados obtidos por um Viga Benkelman é uma abordagem comum para avaliar a capacidade de carga e a deflexão de pavimentos flexíveis. Segundo Bernucci *et al.* (2022) apesar da viga Benkelman e o FWD serem deflectômetros com finalidade de medir deslocamentos elásticos, suas deflexões não apresentam valores aproximados e não se tem uma correlação generalista e universal entre elas. Se pode obter alguma correlação entre os resultados em situação específica para cada tipo de pavimento avaliado, não se aplicando como padrão para demais estudos.

Em razão do tempo de aplicação da carga ser de velocidade bastante reduzida no decorrer do ensaio da viga Benkelman, é considerado que a camada do revestimento asfáltico sofre deformações de propriedades viscoelásticas. Para o caso do ensaio FWD há uma redução no tempo de aplicação da carga, sendo realizado com velocidade elevada, com isso a característica viscoelástica se torna escassa, portanto as deflexões recolhidas pelo equipamento são somente da parcela das deformações elásticas (Balbo, 2007).

De acordo com Macêdo (1996) a temperatura do pavimento no momento em que o ensaio de viga Benkelman é realizado influencia no comportamento viscoelástico na leitura da deflexão, principalmente em camadas espessas. Ademais,

a superposição dos bulbos de tensões realizados pelas rodas dupla do caminhão provoca medidas de deflexão mais elevadas em comparação com o FWD.

Para diferenciar as deflexões máximas resultantes entre a viga Benkelman e o FWD, de acordo com Campos *et al.* (1995), é possível ressaltar os fatores a seguir:

a) Retratam diferentes aspectos referente as suas geometrias e aplicações dos carregamentos, sendo que a viga Benkelman é um ensaio quase-estático e no FWD é por meio de impacto (emitindo um pulso de carga semelhante com o efetuado por um veículo com velocidade de 70 km/h);

b) O sistema de obtenção de dados da viga Benkelman dispõe de uma maior dispersão de resultados, por depender da habilidade do operador;

c) Em comparação entre os dois ensaios, a desvantagem do FWD é o custo mais elevado do equipamento e a imprescindibilidade de mão de obra qualificada para calibração.

Para Medina *et al.* (1994) se tem dificuldades de correlação entre a viga Benkelman e o FWD, visto que não há uma única maneira de correlacionar as deflexões apanhadas por aparelhos distintos e que as comparações só devem ser utilizadas com a percepção das condições produzidas e dos erros envolvidos, que dependem da estrutura ensaiada, condição climática, modo de carga aplicada e da metodologia de ensaio executado.

O estudo comparativo realizado por Himeró *et al.* (1989) apresenta os resultados das deflexões com o equipamento KUAB FWD e a viga Benkelman. Para a viga Benkelman a carga no eixo duplo do caminhão foi de 90 kN e a pressão dos pneus de 0,60 MPa. Para o FWD a carga de pico foi de 49 kN. A conclusão do estudo foi que existe um grau de correlação entre as deflexões, ainda que os parâmetros da viga Benkelman apresentaram deslocamentos superiores aos medidos com o FWD. Tais resultados ocorreram pela circunstância do tempo de carga ser maior no ensaio da viga Benkelman. A Equação 3 demonstra o modelo de cálculo atingido.

$$D_{FWD} = 0,309 \times D_{VB} + 0,280$$

Equação 3

Onde:

$$R^2 = 0,57$$

D_{FWD} = deflexão obtida com FWD;

D_{VB} = deflexão obtida com viga Benkelman.

De acordo com Fabrício *et al.* (1992), que realizaram uma pesquisa de medida comparativa entre as deflexões da viga Benkelman e o FWD aplicados em trechos da rodovia BR-101/RS (divisa SC/RS – Osório). Com os valores calculados foi possível demonstrar que os deslocamentos elásticos resultantes da viga Benkelman apresentam, sem exceção, valores superiores em comparação com os resultados do FWD. A correlação está representada na Equação 4:

$$D_{FWD} = 18,5 + 0,5 \times D_{VB}$$

Equação 4

Onde:

$$R^2 = 0,37$$

D_{FWD} = deflexão obtida com FWD;

D_{VB} = deflexão obtida com viga Benkelman.

Uma correlação obtida por Rocha Filho (1996), admite as deflexões máximas em relação a espessura da camada de rolamento asfáltico. Por meio do estudo deflectométrico realizado em um pavimento flexível, estabeleceu-se que o efeito do clima (temperatura ambiente) afeta os dados resultantes da deflexão máxima, sendo a camada de revestimento a mais avariada devido as suas propriedades: elevada absorção das radiações solares, má condutividade térmica e ao seu comportamento reológico. A equação é $\frac{D_{FWD}}{D_{VB}} = \alpha$, em que $\alpha = f(h_1, T_{PAV})$. As correlações encontradas na pesquisa foram:

$$\alpha = \frac{1,0}{6,136 \times 10^{-3} \times h_1^{1,756} + 1}$$

Equação 5

Onde:

$$R^2 = 0,94$$

Para $h_1 = 5,0$ cm $\rightarrow \alpha = 0,91$

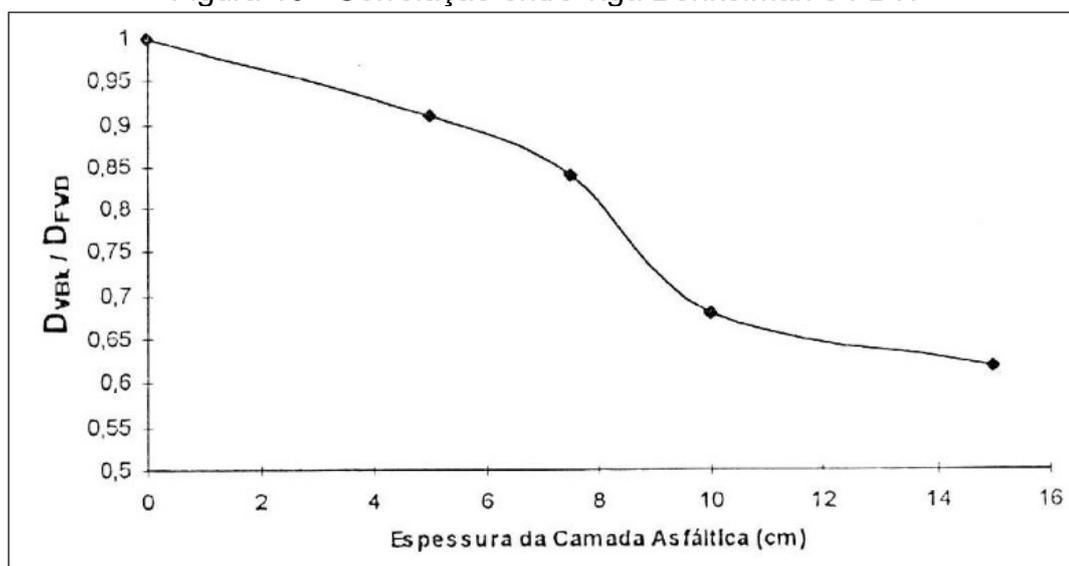
$$h_1 = 7,5 \text{ cm} \rightarrow \alpha = 0,84$$

$$h_1 = 10,0 \text{ cm} \rightarrow \alpha = 0,68$$

$$h_1 = 15,0 \text{ cm} \rightarrow \alpha = 0,62$$

A Figura 10 representa a curva da relação entre a viga Benkelman e o FWD.

Figura 10 - Correlação entre viga Benkelman e FDW



Fonte: Rocha Filho (1996)

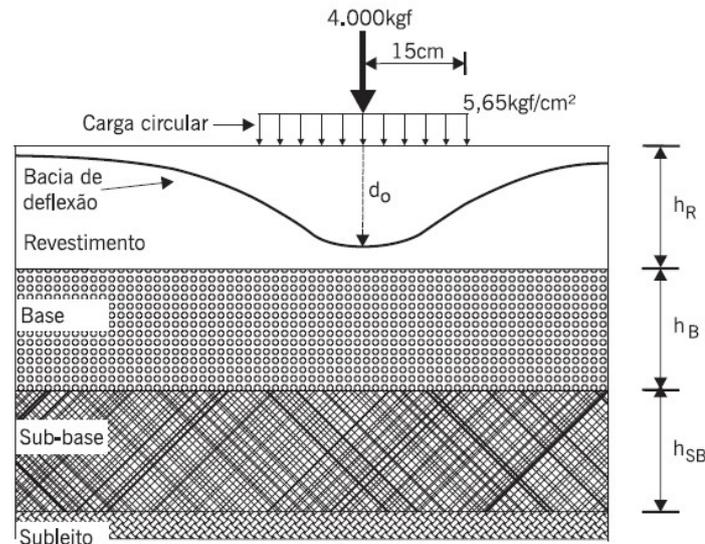
2.9. Retroanálise

Segundo Rocha Filho (1996), a retroanálise proporciona que sejam reduzidas as incômodas e demoradas coletas de amostra do pavimento, ademais, possibilita a realização de projetos melhor desenvolvidos, que resultam em pavimentos com maior vida útil e menor custo financeiro.

É um procedimento computacional que propicia calcular as medidas de deflexões elásticas das camadas da estrutura do pavimento e do subleito. Por meio da relação entre as bacias deflectométricas apanhadas na pista e as bacias teóricas desenvolvidas pelo software, de maneira iterativa a análise é realizada até que a bacia estimada por meio do software se compatibilize com os valores medidos em campo (Macêdo, 2003).

De acordo com Nóbrega (2003), os dados requisitados para o entendimento do estudo da retroanálise estão demonstrados na Figura 11, sendo que a carga externa é utilizada no pavimento para captar a bacia deflectométrica, com seus resultados e com os elementos e dimensões de cada camada conhecida, é possível deduzir os módulos de elasticidade.

Figura 11 - Dados necessários para retroanálise



Fonte: Nóbrega (2003)

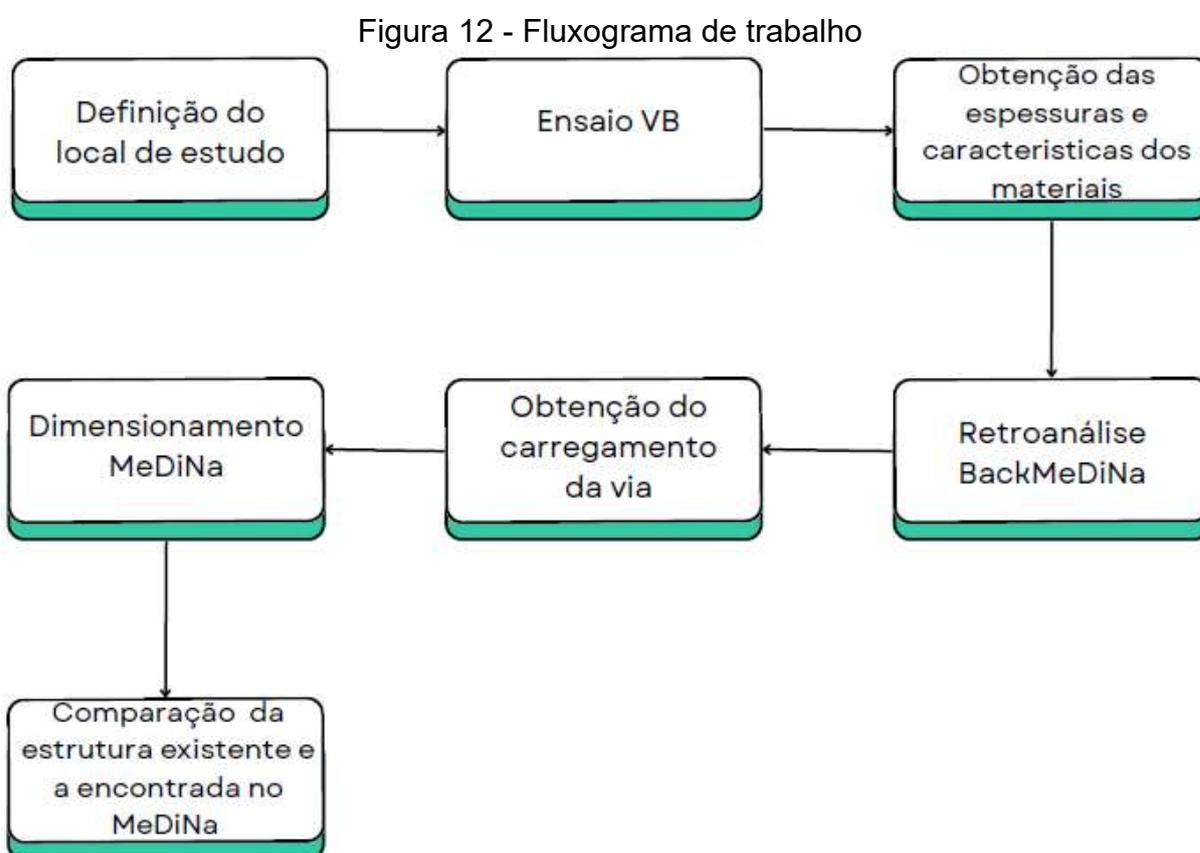
Para Medina e Motta (2015), certos cuidados têm que ser considerados para a adequada aplicação da retroanálise, salientando os cuidados relevantes dos módulos de resiliência e espessuras das camadas adotadas para a análise, e compete ao engenheiro a perícia de identificar as vantagens e os limites de um resultado que seja de maior confiabilidade para o estudo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia que será utilizada para atingir os objetivos do presente estudo.

3.1. Planejamento

Para direcionamento do estudo, foi realizado um fluxograma com as etapas realizadas no trabalho (Figura 12).



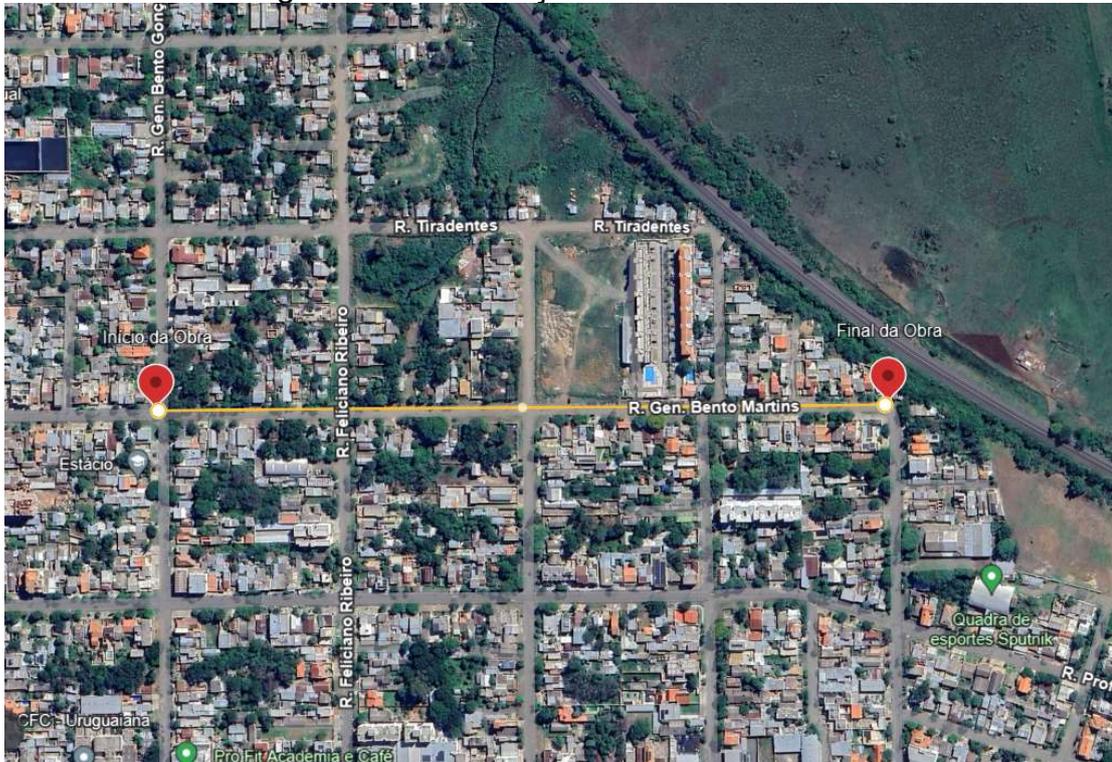
Fonte: Elaboração própria (2024)

3.2. Local de estudo

Para o desenvolvimento deste trabalho foram realizados ensaios em campo com a disponibilidade da viga Benkelman, em um trecho de pavimento de área urbana, localizado na Rua Bento Martins, entre as Ruas Bento Gonçalves e Rua Ramão Prunes de Oliveira, no Bairro Santana na cidade de Uruguai/RS. O trecho mede

620 metros de extensão (Figura 13) e 12 metros de largura, sendo a principal via de acesso de condomínios de grande porte ao centro da cidade.

Figura 13 - Localização do trecho estudado



Fonte: Google Earth (2024)

A obra do trecho de pavimento de estudo foi executada e finalizada entre julho e novembro de 2023, onde foi construído o pavimento desde a fase de escavação, com nova altimetria para fins de direcionamento da drenagem pluvial, até a camada de revestimento asfáltico. As estacas da obra foram cravadas com distância de 20 metros, sendo o Início da Obra a estaca 0+000 e o Final da Obra a estaca 0+620. Na Figura 14 pode-se observar a aplicação de CA no pavimento.

Figura 14 - Implantação do pavimento



Fonte: Elaboração própria (2023)

Na Tabela 2 são apresentados os materiais utilizados com suas dimensões de camada.

Tabela 2 – Estrutura do pavimento

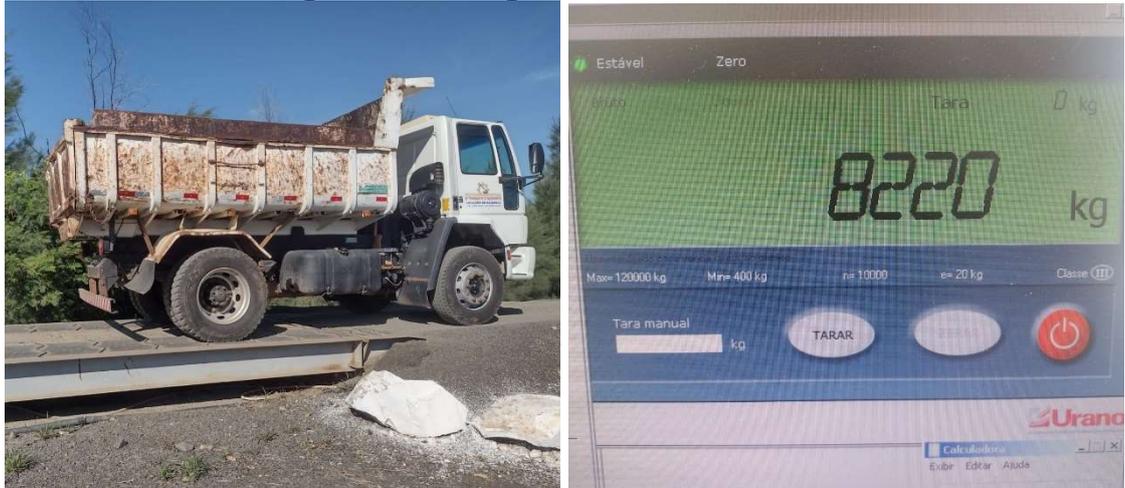
Camada	Material	Espessura (cm)
Revestimento Asfáltico	CA	5,0
Base	BGS	15,0
Sub-base	Rachão	40,0

Fonte: Elaboração própria (2024)

3.3. Ensaio com a viga Benkelman

O ensaio foi realizado conforme a norma DNER-ME 024/94, utilizando um caminhão de eixo simples de roda simples (ESRS) na dianteira e eixo simples de roda dupla (ESRD) na traseira, com calibragem dos pneus com pressão de 0,56 MPa e peso aproximado de 80 kN no eixo traseiro (Figura 15).

Figura 15- Pesagem do caminhão



Fonte: Elaboração própria (2024)

Os pontos ensaiados foram marcados no eixo da pista com corante xadrez rosa (Figura 16) alinhados com as estacas usadas na obra.

Figura 16 - Marcação das estacas



Fonte: Elaboração própria (2024)

Para se obter a deflexão máxima com as leituras da viga Benkelman de forma dinâmica, o posicionamento do eixo traseiro do caminhão estava levemente afastado do alinhamento da marcação da estaca, e com auxílio de uma trena métrica amarrada no parachoque traseiro do caminhão (Figura 17). Foram medidas temperaturas de alguns pontos ensaiados, através de um termômetro infravermelho digital (Figura 18).

Figura 17 - Posicionamento da VB



Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 18 - Temperatura do pavimento



Fonte: Elaboração própria (2024)

Na Tabela 3 são apresentadas as temperaturas do pavimento em suas devidas estacas com a média final.

Tabela 3 - Medições de temperaturas

Estaca	Temperatura do pavimento (°C)
0 +000	54,2
0 + 140	53,7
0 + 340	53,9
0 + 580	54,2
Média Final	54,0

Fonte: Elaboração própria (2024)

As leituras das deflexões foram arquivadas através de vídeos gravados em 60 quadros por segundo com a câmera de um Iphone 11 apoiado num suporte fixo. Após o início da gravação foi identificado o número da estaca com um papel e em seguida o caminhão começou a se movimentar, com a filmagem focada no extensômetro da VB e passando sobre uma trena métrica metálica de 10 metros acoplada com uma linha de pedreiro na traseira do caminhão (Figura 19).

Figura 19 - Posicionamento da câmera

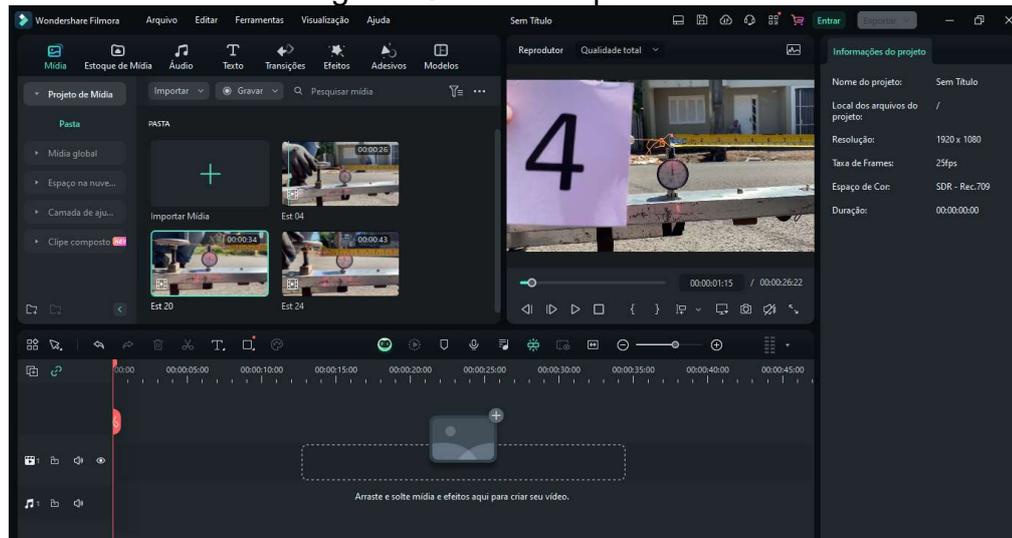


Fonte: Elaboração própria (2024)

A ponta de prova da viga Benkelman foi posicionada entre os pneus da roda dupla traseira e ligeiramente avançado ao eixo do caminhão (cerca de 5 a 15 cm), alinhada no eixo da pista, com leituras realizadas de forma com que o caminhão se mantivesse em velocidade constante e sem frenagem, nas distâncias em relação a ponta de prova de -15 cm até a leitura de 500 cm. Esse procedimento foi repetido em todas estacas ensaiadas para a obtenção das bacias deflectométricas.

Foram verificadas as leituras de cada ponto do extensômetro com auxílio do editor de vídeo Wondershare Filmora 13, permitindo analisar os *frames* com maior precisão (Figura 20).

Figura 20 - Leituras por vídeo



Fonte: Elaboração própria (2024)

A coleta de dados através dos vídeos para a formação da bacia de deflexão de cada estaca foi realizada com as leituras do extensômetro a cada marcação do relógio, ou seja, a cada 0,01mm. Com isso foi possível determinar as distâncias referentes a cada leitura que o extensômetro da viga apontou.

Devido a ponta de prova da VB ter seu início de leitura posicionada um pouco à frente do eixo traseiro do caminhão, foi possível obter com maior precisão o valor de distância para a deflexão máxima de D_0 das bacias deflectométricas analisadas.

Para obter as distâncias desejadas foi calculada a média ponderada entre os intervalos de valores mais próximos. Foram calculados em todas estacas as leituras iniciais de 0 cm (D_0), 20 cm (D_{20}), 30 cm (D_{30}), 45 cm (D_{45}), 60 cm (D_{60}), 90 cm (D_{90}), 120 cm (D_{120}), 150 cm (D_{150}), e leituras finais de 180 cm (D_{180}).

As distâncias percorridas foram corrigidas em relação ao valor coletado da deflexão máxima (D_0), considerada como a distância zero. Os dados foram corrigidos também em relação ao braço de alavanca da viga com a constante $a/b=4$. Os resultados das bacias de deflexões de cada estaca do trecho de estudo estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de deflexões (0,01mm)

Estaca	D_0	D_{20}	D_{30}	D_{45}	D_{60}	D_{90}	D_{120}	D_{150}	D_{180}
01	42,00	26,51	18,43	11,86	8,50	5,20	3,63	2,06	0,01
02	38,00	18,39	12,81	7,39	4,89	1,98	1,72	1,46	1,20
03	39,20	22,97	16,82	11,76	8,75	4,57	1,74	0,92	0,10
04	44,00	25,22	19,88	13,71	9,52	4,08	2,78	1,55	0,31

05	28,00	17,08	12,62	9,09	6,57	3,46	2,14	0,81	0,01
06	36,00	16,51	11,53	6,61	5,20	3,32	1,92	1,66	1,39
07	32,00	16,57	9,73	5,14	2,74	1,32	0,52	0,01	0,01
08	42,00	21,78	15,97	11,86	9,60	6,29	3,80	2,31	0,83
12	34,00	19,06	15,47	12,98	11,32	9,10	6,49	3,84	2,89
13	44,00	22,42	17,39	12,37	10,84	8,32	6,75	5,33	3,89
14	40,00	13,38	7,46	3,52	2,03	0,01	0,01	0,01	0,01
15	24,00	12,00	7,92	4,10	2,36	0,01	0,01	0,01	0,01
16	28,00	17,73	11,97	9,73	7,63	4,35	2,11	1,72	1,42
17	20,00	10,57	7,96	5,89	3,91	1,92	0,01	0,01	0,01
18	30,00	16,75	11,57	5,76	4,04	1,87	1,53	1,20	0,87
19	39,20	31,97	28,92	26,17	23,96	22,16	20,36	17,97	15,85
20	25,20	12,54	8,57	5,56	4,27	1,96	1,59	1,23	0,87
21	22,00	14,98	11,88	9,23	6,78	3,41	1,90	0,40	0,01
22	26,00	11,22	8,86	6,21	5,00	2,81	1,78	1,42	1,07
23	30,00	17,92	14,08	9,09	7,14	3,80	1,66	0,85	0,04
24	30,00	14,49	10,85	6,06	3,99	1,57	0,72	0,01	0,01
25	28,00	15,76	10,33	6,24	4,79	2,22	1,76	1,5	1,25
26	24,00	15,08	11,83	9,07	7,14	4,34	3,60	3,14	2,68
27	46,00	27,20	23,71	20,02	15,76	11,93	11,47	11,02	10,56
28	31,20	14,79	11,85	8,42	6,53	4,41	2,73	1,65	0,57
29	34,00	18,09	13,97	10,29	7,76	5,67	3,90	3,43	2,95

Fonte: Elaboração própria (2024)

3.4. Ajustes para análise nos softwares

Com base nas leituras extraídas do extensômetro no ensaio da viga Benkelman, foi necessário corrigir os dados da temperatura em pista com relação a temperatura referência de 25°C, para que os valores de deflexão sejam uniformizados com outros trabalhos em diferentes temperaturas *in loco*. De acordo com Bueno (2016), as temperaturas foram corrigidas com a adaptação do ábaco proposto pelo DER-SP (2006) através da Equação 6, utilizando a temperatura Média Final (Tabela 3) para incógnita T.

$$D_{25} = \frac{D_p}{\left(\left(\frac{h_{ca}}{1000}\right) \times (T - 25)\right) + 1}$$

Equação 6

Onde:

D_{25} = deflexão corrigida para temperatura de 25°C (10⁻²mm);

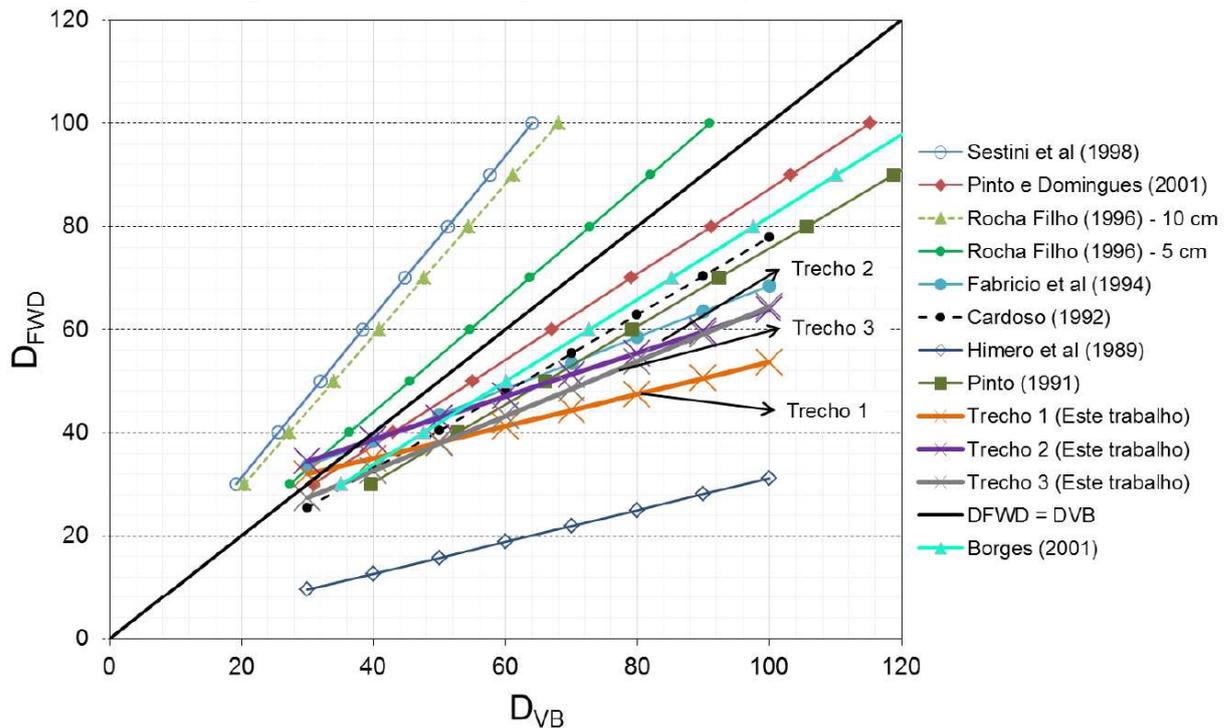
D_p = deflexão medida na pista (10^{-2} mm);

h_{ca} = espessura da camada asfáltica (cm);

T = temperatura da superfície do pavimento no momento do ensaio ($^{\circ}$ C).

A realização das retroanálises, com base em levantamentos de bacias deflectométricas em pista com o ensaio não-destrutivo do tipo FWD, foi através do programa BackMeDiNa. Para o presente estudo foi realizado a tentativa de correlação entre a VB e o FWD com as equações citadas anteriormente (item 2.8), porém, todos os testes apresentaram os módulos de resiliência com valores insólitos, ressaltando a dificuldade de correlação entre esses dois ensaios, onde os critérios de cada método variam com a peculiaridade do pavimento avaliado. Na Figura 21 pode-se observar que Bueno (2016) faz uma correlação das deflexões máximas obtidas com os ensaios de VB com FWD, concluindo que as relações desses ensaios são exclusivamente locais, com alguns métodos apresentando comportamentos opostos ao esperado pelo estudo, podendo cada estrutura apresentar uma correlação diferente. Sendo assim, optou-se em retroanalisar com medidas numéricas retiradas diretamente da VB (sem correlações).

Figura 21 - Comparação das correlações de VB e FWD

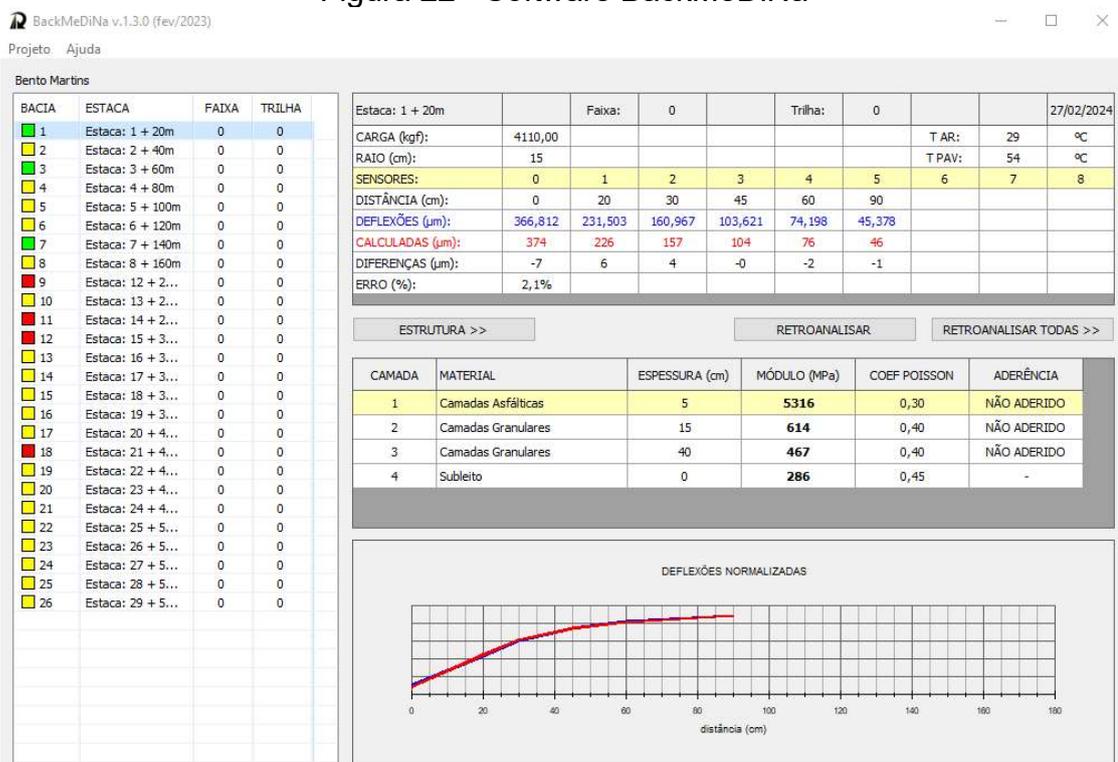


Fonte: Bueno (2016)

Para a retroanálise foi utilizada a versão 1.3.0 (fev/2023) do software BackMeDiNa, convertendo deflexões verificadas na pista em módulos de resiliência, para cada camada do pavimento registrada. O programa realiza o cálculo automaticamente buscando o menor erro quadrático médio (RMS). Segundo Bueno (2016) o erro admissível usado como critério de parada das iterações depende da distância da aplicação da carga nos ensaios de deflexão. No caso do presente trabalho, a distância máxima considerada foi 900 mm com erro admissível de 20%.

Para a adição dos demais dados no BackMeDiNa foi adotado metade da carga do ensaio, considerando que no eixo do caminhão a carga se divide em dois apoios nas extremidades, resultando em metade do peso para cada lado (4110 kgf) e raio de contato de 15 cm. As camadas do pavimento foram estruturadas com materiais e espessuras semelhantes ao pavimento construído, com a primeira camada asfáltica, a segunda e terceira camadas granulares e quarta camada de subleito, a partir da superfície do pavimento (Figura 22).

Figura 22 - Software BackMeDiNa



Fonte: Elaboração própria (2024)

Os coeficientes de *Poisson* foram deixados os mesmos valores que o programa recomenda automaticamente, ficando dentro do intervalo de valores de referência conforme DER-SP (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores de coeficiente de *Poisson*

Material	Intervalo de valores de coeficiente de Poisson
Misturas asfálticas	0,15 - ,045
Materiais granulares	0,30 – 0,40
Solos do subleito	0,30 – 0,50

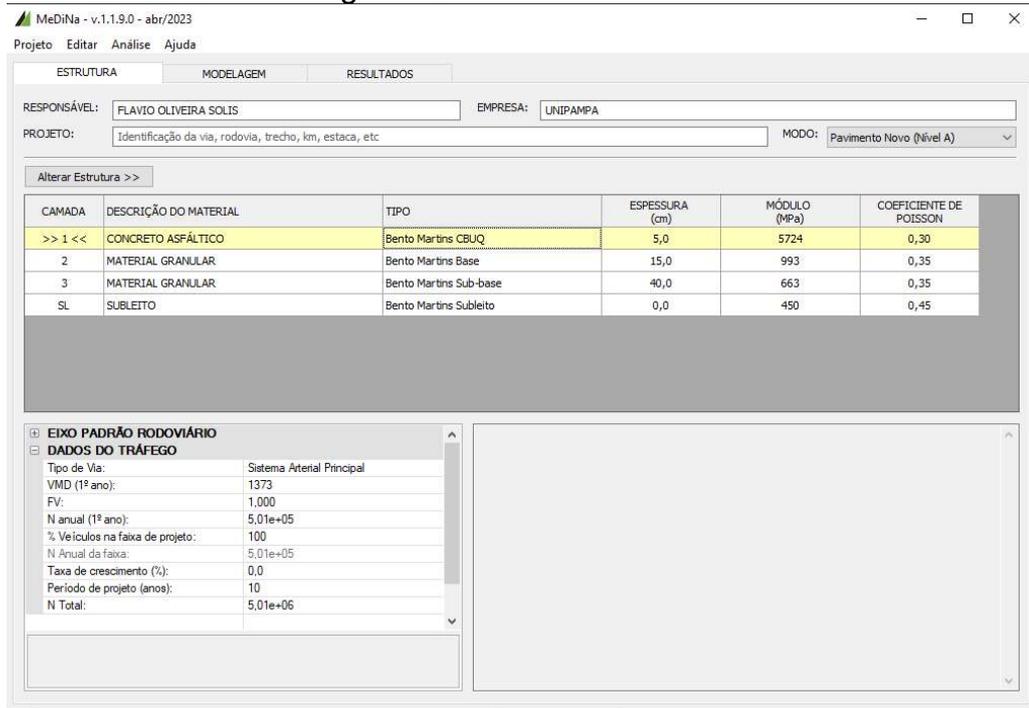
Fonte: DER-SP (2006)

Com todos os dados inseridos no programa, a análise testou os possíveis intervalos de módulo de resiliência de cada camada até apresentar uma bacia de deflexão calculada análoga ao levantado em campo. Essa relação gera uma porcentagem de RMS que se aproxima ao menor erro calculado. Após o fim da análise, os resultados de módulo de resiliência foram verificados se os valores encontrados condiziam com um comportamento próximo da realidade.

Segundo Bernucci *et al.* (2022), os defeitos que surgem no pavimento ao longo da sua vida útil são em decorrência da repetição de cargas passantes, resultando em deformações recuperáveis e permanentes, gerando fadiga no revestimento e nas demais camadas da via, responsável pelo surgimento de trincamentos e trilha de roda.

Para o estudo no software MeDiNa (Figura 23) foi utilizada a versão 1.1.9.0 (abril/2023). Foi realizada a média do módulo de resiliência oriundo do programa BackMeDiNa para a verificação e o dimensionamento mecânico-empírico da estrutura do pavimento, analisando valores de área trincada e de afundamento de trilha de roda.

Figura 23 - Software MeDiNa



Fonte: Elaboração própria (2024)

Durante a análise dos resultados, a fim de obter a média dos módulos de resiliência, foram encontrados valores espúrios que extrapolam valores gerais encontrados nas outras estacas, e com erros admissíveis maiores de 20%. Desta forma os valores correspondentes das estacas 12, 14 e 15 não foram considerados para o cálculo. Para os demais dados, o número equivalente de eixos (número N) foi coletado do memorial de cálculo do projeto da prefeitura municipal de Uruguaiiana com valor de 5,01 E+06. Para Chiarello *et al.* (2019), foi considerado uma estrutura de projeto de pavimentação para análise no programa MeDiNa utilizando CAP modificado, com isso foi empregado os parâmetros das camadas para o presente trabalho, para o CAP modificado (Tabela 6) e para as camadas de base e sub-base (Tabela 7).

Tabela 6 - Parâmetros de revestimento asfáltico

Parâmetros	CAP modificado
Coeficiente de <i>Poisson</i>	0,30
Massa específica (g/cm ³)	2,40
Coef. de regressão k ₁	1,91E-5
Coef. de regressão k ₂	-1,90

Fonte: Chiarello *et al.* (2019)

Tabela 7 - Parâmetros da base e sub-base

Parâmetros	Base	Sub-base
Coeficiente de <i>Poisson</i>	0,35	0,35
Abrasão Los Angeles (%)	43,0	43,0
Massa específica (g/cm ³)	2,223	2,025
Umidade ótima (%)	5,0	7,5
Coef. de regressão k ₁	0,0868	0,1294
Coef. de regressão k ₂	-0,2801	-0,0647
Coef. de regressão k ₃	0,8929	1,1000
Coef. de regressão k ₄	0,0961	0,0735

Fonte: Chiarello *et al.* (2019)

As espessuras, coeficientes de *Poisson* e módulo de resiliência de todas as camadas seguem os mesmos dados usados no BackMeDiNa.

Com os dados cadastrados no programa MeDiNa, é desejado avaliar a estrutura do pavimento ensaiado e estimar o comportamento das deformações do pavimento ao longo da sua vida útil, utilizando um modelo empírico-mecanístico de dimensionamento de pavimentos flexíveis, determinando os danos causados por fadiga e deformações plásticas.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com a utilização da Equação 6 foram corrigidas as deflexões obtidas da pista com sua temperatura em relação a temperatura padrão de 25°C. Para o programa BackMeDiNa foi necessário a mudança de grandeza do extensômetro, de 0,01mm para micrômetro (μm). As deflexões com distância acima de 120 cm apresentaram valores muito baixos e se optou ao descarte desses valores para alcançar uma melhor confiabilidade da retroanálise, em vista que os valores de maior impacto são os mais próximos da deflexão máxima. A Tabela 8 demonstra a magnitude das deflexões características de cada ponto ensaiado com a VB.

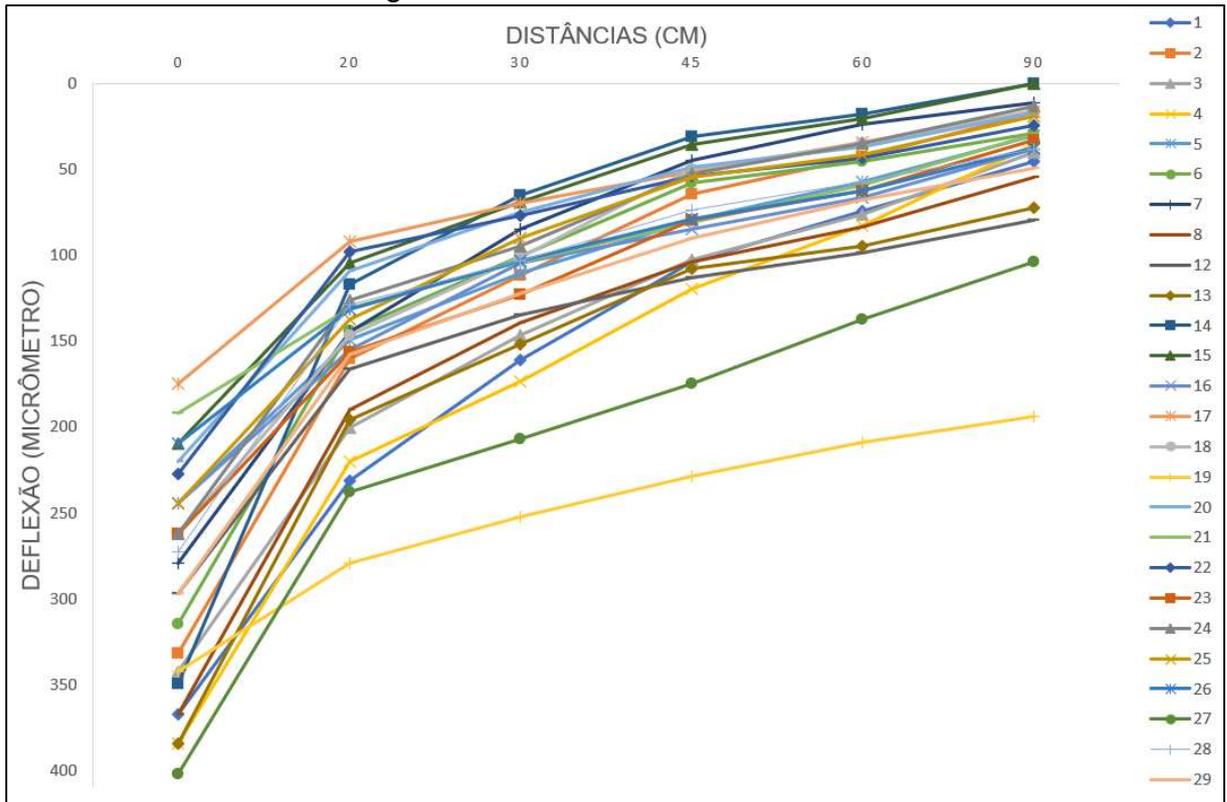
Tabela 8 - Bacias deflectométricas corrigidas (μm)

Estaca	D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀
01	366,812	231,503	160,967	103,621	74,198	45,378
02	331,878	160,630	111,894	64,528	42,703	17,324
03	342,358	200,637	146,909	102,679	76,419	39,949
04	384,279	220,239	173,603	119,723	83,168	35,668
05	244,541	149,191	110,178	79,397	57,383	30,230
06	314,410	144,163	100,741	57,718	45,371	29,021
07	279,476	144,682	84,962	44,856	23,895	11,544
08	366,812	190,199	139,492	103,617	83,843	54,908
12	296,943	166,430	135,099	113,356	98,905	79,461
13	384,279	195,845	151,889	108,028	94,675	72,658
14	349,345	116,896	65,132	30,774	17,771	0,001
15	209,607	104,803	69,201	35,825	20,607	0,001
16	244,541	154,864	104,543	84,990	66,624	37,989
17	174,672	92,310	69,508	51,438	34,180	16,771
18	262,009	146,288	101,006	50,300	35,285	16,289
19	342,358	279,209	252,542	228,602	209,240	193,528
20	220,087	109,478	74,860	48,562	37,268	17,076
21	192,140	130,795	103,726	80,642	59,202	29,769
22	227,074	97,968	77,333	54,249	43,636	24,581
23	262,009	156,533	122,943	79,397	62,383	33,215
24	262,009	126,561	94,738	52,952	34,816	13,684
25	244,541	137,642	90,208	54,457	41,854	19,412
26	209,607	131,745	103,355	79,206	62,377	37,947
27	401,747	237,555	207,035	174,887	137,675	104,204
28	272,489	129,155	103,468	73,514	57,060	38,478
29	296,943	158,011	122,002	89,856	67,739	49,480

Fonte: Elaboração própria (2024)

Com base nas deformações corrigidas da Tabela 8 foi viável a criação e visualização das bacias deflectométricas para cada estaca do referente estudo. Na Figura 24 está representado o comportamento das bacias de deflexão, com as distâncias de zero até 90 cm no eixo horizontal e as deformações em micrômetro (μm) no eixo vertical.

Figura 24 - Bacias deflectométricas



Fonte: Elaboração própria (2024)

Na Figura 24 é demonstrado que os valores dos deslocamentos verticais variam bastante entre as estacas, com deformações mais acentuadas na distância zero. Pode-se observar que existem deflexões que apresentaram comportamento com menor curvatura, com características de deformações plásticas. Salientando que as bacias que tiveram comportamento com maior curvatura são as estacas que estão localizadas no trecho que ainda não tinham, na época dos levantamentos, o fluxo de tráfego liberado, entre as estacas 6 ao 15, limitando somente ao tráfego dos moradores locais (Figura 25).

Figura 25 - Trecho interditado



Fonte: Elaboração própria (2024)

Na Tabela 9 estão os resultados dos módulos de resiliência (MR) realizados no software BackMeDiNa. O primeiro critério de análise foi o erro quadrático médio (RMS) ser menor que 20%, considerando a maior precisão no RMS a porcentagem mais próxima de zero. Foi realizado a média de dos valores de MR de todas as estacas para cada camada, para posteriormente ser aplicado na análise do programa MeDiNa. A partir da média dos MR foi calculado o desvio padrão (Tabela 10), com isso o outro critério de análise foi a observação dos valores de MR estivessem próximos aos valores de desvio padrão.

Tabela 9 - Resultados de MR

Estaca	MR (MPa)				Erro (%)
	CA	Base	Sub-base	Subleito	
01	5316	614	467	286	2,1
02	2019	845	352	571	9,1
03	7031	844	450	309	5,0
04	7688	900	266	338	9,5
05	6000	1200	656	389	6,2
06	5200	788	583	501	8,1
07	7280	674	404	1013	4,0
08	6399	738	675	263	9,3
12	23565	1035	518	241	19,1
13	3375	738	662	227	9,9
14	18863	390	365	7161	35,9

15	22063	540	475	9785	39,9
16	5000	800	750	369	9,5
17	10547	1650	938	675	9,4
18	5625	984	422	697	5,5
19	9923	1340	1190	85	9,6
20	2500	1200	760	675	8,0
21	10505	1200	875	413	10,3
22	3125	1181	1181	507	7,8
23	7219	800	750	355	6,9
24	2106	1835	367	873	8,3
25	5297	866	685	559	8,6
26	6500	1200	750	375	9,8
27	5250	800	750	150	7,3
28	6375	963	750	375	9,6
29	6152	886	788	309	6,4

Fonte: Elaboração própria (2024)

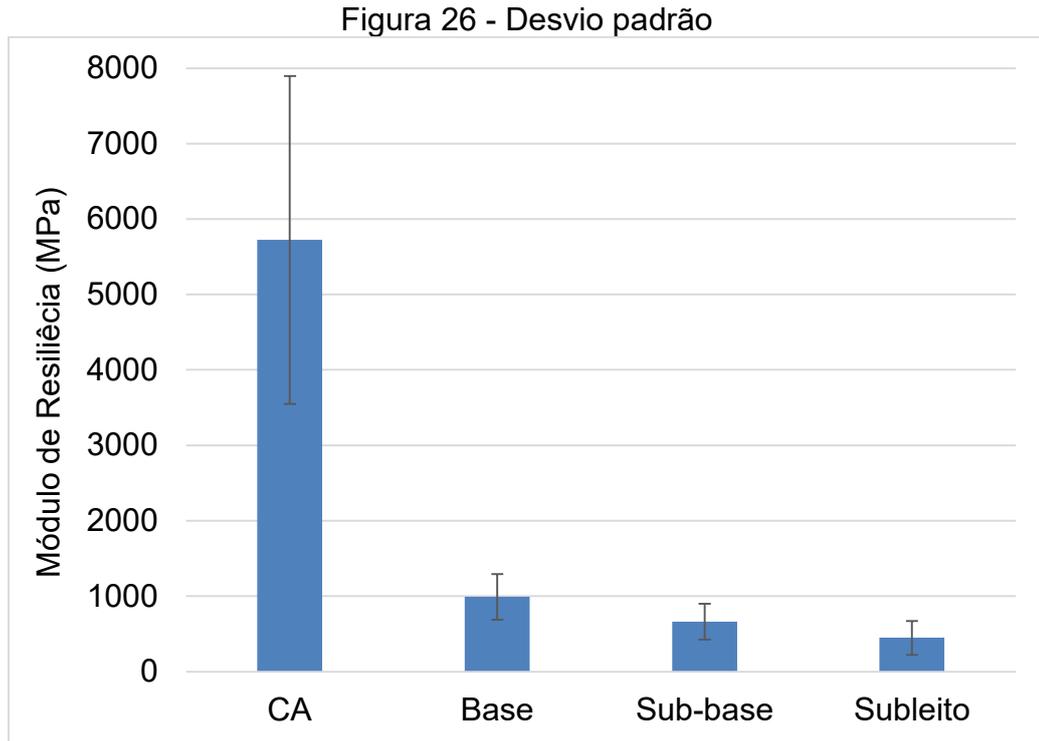
Tabela 10 – Resultados de desvio padrão (MPa)

	CA	BASE	SUB-BASE	SUBLEITO
Média	5931,83	1002,00	672,65	448,43
Desvio Padrão	2336,72	300,47	236,40	219,64
DP + Média	8268,55	1302,47	909,05	668,07
DP - Média	3595,11	701,53	436,25	228,80

Fonte: Elaboração própria (2024)

As estacas 14 e 15 foram desconsideradas para o presente estudo pelo critério de erro RMS ser maior de 20%, apresentando respectivamente 35,9% e 39,9%. Na estaca 12 o motivo para desprezar seu resultado é o MR do CA ter atingido um valor fora do desvio padrão, com valor demasiadamente maior em comparação com a DP+Média. Acredita-se que esses valores de MR tenham sido causados pelas tubulações de esgoto que passam em alguns pontos da pista, assim alterando as grandezas dos MR.

Na Figura 26 é expressado o grau de dispersão apresentados nos resultados de MR, com os desvios padrão de cada camada, pode-se observar a alta dispersão dos resultados.



Fonte: Elaboração própria (2024)

Em conjunto com os parâmetros definidos no item 3.4 e a média dos módulos de resiliência, foi possível cadastrar os dados no programa MeDiNa. As espessuras e os tipos de materiais são as mesmas do projeto executado na pavimentação do estudo. Foi modificado no programa o N anual para $5,01E+6$ conforme o memorial de cálculo do projeto fornecido pela prefeitura de Uruguaiana, com período de projeto de 10 anos. A Figura 27 mostra o software MeDiNa com os resultados do estudo.

Figura 27 - Resultados no MeDiNa

MeDiNa - v.1.1.9.0 - abr/2023

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: FLAVIO OLIVEIRA SOLIS EMPRESA: UNIPAMPA

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Bento Martins CBUQ	5,0	5932	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Bento Martins Base	15,0	1002	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Bento Martins Sub-base	40,0	673	0,35
SL	SUBLEITO	Bento Martins Subleito	0,0	448	0,45

EIXO PADRÃO RODoviÁRIO
 DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	1373
FV:	1,000
N anual (1º ano):	5,01e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,01e+05
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5,01e+06

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO ---
 Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.
 Nível de confiabilidade da análise: 95%
 Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 14,7%
 Afundamento de Trilha de Roda: 6,3mm

Fonte: Elaboração própria (2024)

De acordo com Chiarello *et al.* (2019), a verificação do comportamento das deflexões necessita estar em limites máximos para atender ao número equivalente de eixos e ao período de projeto estimado com relação aos MR encontrados na pista. O rompimento do pavimento por fadiga através de área trincada não pode ultrapassar de 30%. Para as deformações plásticas de afundamento de trilha de roda o limite é de 10mm. O resultado de área trincada estimada foi de 14,7%, não passando do limite aceitável, para o afundamento de trilha de roda foi calculado 6,3mm, atendendo ao limite determinado. Esses resultados definem que o pavimento irá cumprir com o esperado no período de projeto de 10 anos, segundo os limites máximos, podendo a vida útil perdurar além de 10 anos sem a necessidade de manutenção. Por estar mais perto do seu limite máximo (10mm), o dano causado por afundamento de trilha de roda será a primeira patologia a surgir ao longo da vida útil do pavimento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para este capítulo são argumentadas as conclusões derivadas dos resultados obtidos no estudo do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

5.1. Conclusões

No pavimento de estudo foram realizados os ensaios de viga Benkelman para a coleta de dados de deflexões. A técnica utilizada na VB para este trabalho demonstrou ser um ensaio bastante rápido, eficiente e simples para a obtenção de valores de deformações na pista. O método utilizado para adquirir os dados de deflexões e distâncias percorridas de forma dinâmica foi muito útil, levando em consideração que as análises das gravações diminuem os erros de leituras, podendo voltar a analisar quantas vezes for necessário. O posicionamento inicial da VB ligeiramente a frente ao eixo do caminhão resultou em uma maior precisão em obter valores de deflexão máxima e deslocamentos zero para a formação das bacias deflectométricas. Com os dados coletados em campo foi possível desenvolver as bacias de deflexão de cada estaca ensaiada.

Com o BackMeDiNa foram realizadas as retroanálises das bacias deflectométricas de todas as estacas. Em primeiro momento foi elaborado as correlações da VB para o FWD com os estudos citados neste trabalho, contudo, os resultados de módulo de resiliência dessas correlações apresentaram valores muito elevados e dispersos, sendo as correlações descartadas por incoerência de valores. Os dados das bacias de deflexão foram corrigidos em relação a temperatura e a grandeza em que o programa trabalha. Com a porcentagem de RMS dentro do esperado para a maioria das análises, foram obtidos os módulos de resiliência de cada camada da estrutura do pavimento em todas as estacas do trecho.

Foi realizada a avaliação do pavimento estudado mediante o programa MeDiNa utilizando o modelo empírico-mecanístico para avaliação da estrutura similar ao executado em campo. Para os módulos de resiliência utilizados nas camadas do pavimento em estudo, foi executada a média de todas as estacas para uma visão geral do projeto. O número N foi preestabelecido pelo memorial de cálculo do projeto

executado. Com a análise do programa executada foi possível apontar as patologias por fadiga e deformações plásticas.

A avaliação da estrutura do pavimento ficou dentro do esperado para uma execução coerente do projeto. Pelo programa MeDiNa a área trincada estimada (fadiga) não pode passar de 30%, com resultado de 14,7%, para o afundamento de trilha de roda (deformação permanente) o limite dessa patologia é de no máximo 10mm, com o ensaio estimando em 6,3mm. Em comparação aos resultados obtidos, é possível considerar que o pavimento irá primeiramente sofrer com afundamento de trilha de roda ao longo da vida útil, por estar mais próximo do limite estipulado. O pavimento obteve eficácia nas análises para o tempo de projeto de 10 anos. O método utilizado nesse trabalho permite prever as deteriorações e assim estimar intervenções para reparo estrutural.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Com base na elaboração e resultados obtidos neste trabalho de conclusão de curso, com a intenção de contribuir com a pesquisa desenvolvida, é sugerido para futuros estudos:

- Realizar estudos em outros pavimentos com número equivalente de eixos (N) distintos na cidade de Uruguaiana/RS;
- Realizar análises de MR de corpos de prova extraídos do pavimento estudado;
- Realizar ensaio de VB em épocas de enchente no trecho estudado neste trabalho, onde há alagamento de um trecho da pista.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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, 2022.

BORGES, C. B. S. **Estudo Comparativo entre Medidas de Deflexão com Viga Benkelman e em Pavimentos da Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

BRANCO, V. T. F. C. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, UFRJ. 2004.

BUENO, L.D. **Avaliação deflectométrica e de rigidez: estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria/RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, 2016.

CAMPOS, O., GUIMARÃES, S.R.R., RODRIGUES, R.M. **Avaliação Estrutural dos Pavimentos da Rodovia Carvalho Pinto – Análise Preliminar**. 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá, MT, 1995.

CARDOSO, S. H. **Faixas de Módulos Dinâmicos (elásticos) Obtidos por Retroanálise Durante Sete Anos**. In: 29ª Reunião Anual de Pavimentação. Cuiabá, MT, 1995.

CARNEIRO, F.B.L. **Viga Benkelman - Instrumento Auxiliar do Engenheiro de Conservação**. Caderno de Engenharia Rodoviária 2. Secretaria de Comunicações e Transporte. DER/RJ, 1966.

CHIARELLO, G.P.; PASCOAL, P.T.; SANTOS, T.A., PEREIRA, D.S.; BARONI, M.; GERGING, R.P. **Avaliação estrutural e financeira de pavimento flexível dimensionado pelo método do DNER (1981) e MeDiNa (2019): estudo de caso da duplicação da BR 287 - trecho Santa Cruz do Sul à Tabai/RS**. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Balneário Camboriú/SC, 2019.

CNT - Confederação Nacional do Transporte. **Transporte Rodoviário: Impactos da Qualidade do Asfalto Sobre o Transporte Rodoviário**. Brasília: CNT, 2019.

DER-SP – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. **Instrução de projeto de pavimentação IP-DE-P00/001**. São Paulo, 2006.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 024/1994: Pavimento – determinação das deflexões pela Viga Benkelman**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro/RJ, 1998.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. **DNIT-ME 133/2010: Pavimentação asfáltica – Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman**. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. 3º Edição, Rio de Janeiro, 2006.

FABRÍCIO, J.M., SILVA, G.A., GONÇALVES, E.A., FABRÍCIO, O.F., FABRÍCIO, J.V.F. **Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis Existentes - Uma Contribuição para Projetos de Reforço**. 26ª Reunião Anual de Pavimentação, Aracajú, SE, set. 1992.

FONSECA, L. F. S. **Análise das soluções de pavimentação do programa CREMA 2º etapa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

HIMERO, K., MARUYAMA, T., KASAHARA, A. **Development of Pavement Evaluation System Using the Falling Weight Deflectometer**. 2º Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projeto de Reforço - SINAPRE, Rio de Janeiro, RJ, 1989.

MEDINA, J., MACÊDO, J.A.G., MOTTA, L.M.G., ALBERNAZ, C.A.V. **Utilização de Ensaio Deflectométrico e de Laboratório para a Avaliação Estrutural de Pavimentos**. 28ª Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, MG, 1994.

MACEDO, F.N. **Retroanálise de Bacias de Deflexões Reais e Teóricas Obtidas por Métodos Estáticos e Dinâmicos**. Dissertação (Mestrado de engenharia civil). Universidade de Brasília – DF, 2003.

MACÊDO, J.A.G. **Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis**. 1996. Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

MACEDO, T.F. **Caracterização microestrutural de propriedades viscoelásticas de ligantes asfálticos usando a microscopia de força atômica**. Tese (Doutorado de engenharia civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro – RJ, 2018.

MIRANDA, V.; PEREIRA, P. **Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários**. 1999.

MOTTA, L. M. G. e MEDINA, J. **Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método de Análise Mecânica – Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos**. Relatório Parcial 1 – Ministério dos transportes –

Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre – Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2015.

NÓBREGA, E.S.; MOTTA, L.M.G. **Comparação de métodos de retroanálise e sua influência no dimensionamento de reforço.** In: Reunião anual de pavimentação, 2003, Campinas. Anais. Campinas: ABPv, 2003.

ROCHA FILHO, N. R. **Estudo de Técnicas para Avaliação Estrutural de Pavimentos por Meio de Levantamentos Deflectométricos.** Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, SP, 1996.

SILVA, C. A. R. **Controle Deflectométrico na Execução de Camadas de Pavimento.** Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2004.